

Mariano Merino



LOGOS Y COSMOS

Universidad de Valladolid

LOGOS Y COSMOS

MARIANO MERINO

LOGOS Y COSMOS



EDICIONES
Universidad
de
Valladolid



Este libro está sujeto a una licencia "Creative Commons Reconocimiento-No Comercial – Sin Obra derivada" (CC-by-nc-nd).

Mariano Merino

Ediciones Universidad de Valladolid. 2021

Maquetación y diseño de cubierta: Ediciones Universidad de Valladolid

ISBN 978-84-1320-114-6

Imagen de portada: *Alegoría de la ciencia*.

Composición fotográfica sobre una obra del escultor noruego Gustav Vigeland. El hombre (la ciencia) introduce al niño (el hombre) en los secretos del universo.

-La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general, pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos.

Albert Einstein.

INDICE GENERAL

PRÓLOGO	13
INTRODUCCIÓN Y AGRADECIMIENTOS	17
SECCIÓN I. LA CIENCIA	19
I.1 EL ORIGEN DEL CONOCIMIENTO	21
I.2 CIENCIA Y ARTE: MANIFESTACIONES DE LA MENTE HUMANA.....	24
I.3 CONOCIMIENTO Y CIENCIA.....	25
I.4 LA CONSTRUCCIÓN DE LA CIENCIA	29
I.5 LOS OBSTÁCULOS INTELECTUALES, DIFICULTADES A SUPERAR EN LA CREACIÓN DE LA CIENCIA.....	32
I.6 EL MÉTODO CIENTÍFICO.....	35
I.7 TÁCTICAS DE LA CIENCIA	40
I.8 OBSERVACIÓN CIENTÍFICA.....	44
I.9 DARWIN Y WALLACE: LA OBSERVACIÓN CIENTÍFICA CONVERTIDA EN UNA GRAN TEORÍA.....	44
I.10 PROBLEMAS CIENTÍFICOS.....	47
I.11 HIPÓTESIS	50
I.12 MAX PLANCK Y LA MECÁNICA CUÁNTICA O CÓMO UNA HIPÓTESIS PLAUSIBLE LLEGA A SER UNA HIPÓTESIS CONVALIDADA	52
I.13 EXPERIMENTACIÓN	57
I.14 CONCEPTOS.....	61
I.15 UNA MEMORABLE EPOPEYA CIENTÍFICA.....	64
I.16 LEYES	71
I.17 LEYES DE LA GRAVITACIÓN Y DE LA ELECTROSTÁTICA	73
I.17.1 LEY DE LA GRAVITACIÓN.....	73
I.17.2 LEY DE LA ELECTROSTÁTICA.....	77
I.18 TEORÍAS Y MODELOS	80
I.19 UNA GRAN SÍNTESIS DEL MUNDO FÍSICO INMATERIAL: LA TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA	84
SECCIÓN II. ESPACIO Y TIEMPO	91
II.1 ESPACIO Y TIEMPO.....	93
II.2 EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY	97
II.3 LA FLECHA DEL TIEMPO	101
II.4 LA MEDIDA DEL TIEMPO: RELOJES DE SOL	104
II.5 RELOJES MECÁNICOS Y CIENCIA: RÖMER Y LA VELOCIDAD DE LA LUZ	107

II.6 RELOJES MECÁNICOS Y CIENCIA: EL CRONÓMETRO DE MARINA.....	109
II.7 LA CONQUISTA DE LOS SEGUNDOS: MEJORAS EN LA RELOJERÍA MECÁNICA	112
II.8 MEDIR MILLISEGUNDOS: RELOJES DE CUARZO.....	112
II.9 CONTANDO MILMILLONÉSIMAS DE SEGUNDO: RELOJES ATÓMICOS.....	113
II.10 LA MEDIDA DEL ESPACIO: GEOMETRÍA	117
II.11 TRIANGULACIÓN Y PARALAJE.....	122
II.12 LAS DISTANCIAS EN EL UNIVERSO	124
II.13 LAS DISTANCIAS EN EL MICROCOSMOS.....	127
II.14 EN MEDIO DEL OCÉANO DIMENSIONAL	129
II.15 CONOCER LA POSICIÓN: EL SISTEMA GPS.....	132
II.16 ESPACIO Y TIEMPO RELATIVOS.....	136
II.16.1 ADICIÓN DE VELOCIDADES	138
II.16.2 DILATACIÓN DEL TIEMPO	139
II.16.3 CONTRACCIÓN DE LONGITUDES	141
II.16.4 SIMULTANEIDAD	141
II.17 EL ESPACIO-TIEMPO.....	142
SECCIÓN III. MATERIA	149
III.1 EL PENSAMIENTO ATOMISTA.....	151
III.2 MATERIA Y ENERGÍA EN EL UNIVERSO.....	153
III.3 VARIACIÓN RELATIVÍSTICA DE LA MASA.....	155
III.3.1 EQUIVALENCIA MASA-ENERGÍA	156
III.4 PARTÍCULAS ELEMENTALES.....	157
III.5 LA PARTÍCULA DE DIOS	161
III.6 EL NUCLEO ATÓMICO	163
III.7 COMPOSICIÓN DEL NÚCLEO ATÓMICO	166
III.8 Y DIJO DIOS: “HÁGANSE LOS ELEMENTOS”	169
III.9 ÁTOMOS.....	174
III.10 ENLACES QUÍMICOS Y MOLÉCULAS	177
III.11 UNA ESTRUCTURA PROVIDENCIAL: LA MOLÉCULA DE AGUA.....	180
III.11.1 EL ORIGEN DEL AGUA EN LA TIERRA	180
III.11.2 AGUA: LA MOLÉCULA DE LA VIDA.....	182
III.12 ESTADOS DE LA MATERIA.....	189
III.13 EL CUARTO ESTADO DE LA MATERIA	194
SECCIÓN IV. ENERGÍA Y CAMBIOS	201
IV.1 LA CONQUISTA DEL CONCEPTO DE ENERGÍA. UN LARGO Y TORTUOSO CAMINO	203
IV.2 TRABAJO Y CALOR: “ENERGÍAS EN TRÁNSITO”	208
IV.3 CARÁCTER CONSERVATIVO Y OTRAS PROPIEDADES DE LA ENERGÍA.....	212
IV.4 UN UNIVERSO EN EXPANSIÓN: TEORÍA DEL BIG-BANG	216
IV.5 LA ENERGÍA DE LAS ESTRELLAS	219
IV.6 LA VIDA DE LAS ESTRELLAS.....	224
IV.6.1 EL UNIVERSO ES CAMBIANTE	225
IV.6.2 NUBES DE GAS Y POLVO	226
IV.6.3 ENERGÍA GRAVITATORIA VS ENERGÍA NUCLEAR, UN DRAMÁTICO EQUILIBRIO	229
IV.6.4 ESTRELLAS GIGANTES Y NUCLEOGÉNESIS.....	230
IV.6.5 AGUJEROS NEGROS	232
IV.6.6 RESUMEN	235
IV.7 HISTORIA DEL SISTEMA SOLAR.....	236
IV.7.1 FORMACIÓN DE LA LUNA	240

IV.7.1 FORMACIÓN DE LA LUNA	240
IV.7.2 FORMACIÓN DE LA TIERRA.....	241
IV.8 LA TIERRA, UN PLANETA EN PERMANENTE CONSTRUCCIÓN	244
IV.9 Y DIJO DIOS: “CRECED Y MULTIPLICAOS”	252
IV.9.1 EL EXPERIMENTO DE UREY Y MILLER.....	253
IV.9.2 TEORÍAS SOBRE EL ORIGEN DE LA VIDA EN LA TIERRA	255
IV.9.3 LAS MOLÉCULAS DE LA VIDA: ARN Y ADN	258
IV.9.4 LA BIBLIOTECA DE LA VIDA	261
IV.10 “LLENAD LA TIERRA Y ENSEÑOREAROS DE ELLA” (Génesis, 1, 28)	263
IV.10.1 EL SEXO.....	266
IV.11 GEA, LA GRAN MAQUINARIA	270
IV.11.1 EL CICLO DE LA ENERGÍA	272
IV.11.2 CICLO DEL AGUA	275
IV.11.3 CICLO DEL CARBONO	277
IV.11.4 CICLO DEL OXÍGENO	279
IV.11.5 CICLO DEL NITRÓGENO.....	280
IV.11.6 CICLO DEL FÓSFORO	282
IV.11.7 LAS CADENAS TRÓFICAS.....	283
IV.12 COSMOLOGÍA, UNA CIENCIA DE CIENCIAS.	285
IV.13 LA MÁS GRANDE HISTORIA JAMÁS CONTADA	288
EPÍLOGO: UN PUNTO AZUL CLARO	297
LISTADO ALFABETIZADO DE TODOS LOS CONCEPTOS TRATADOS EN ESTE LIBRO, QUE EL LECTOR ENCONTRARÁ POR MEDIO DEL BUSCADOR DE SU APLICACIÓN DE LECTURA PDF"	299
SELECCIÓN BIBLIOGRÁFICA	305

PRÓLOGO

Se presenta un libro escrito por J. Mariano Merino que nos permite descubrir el apasionante mundo de la Ciencia desde un lenguaje claro y preciso. No es fácil explicar en pocas palabras el contenido de este trabajo y que pueda servir de guía al lector. De una manera breve, el libro se podría definir como una Cosmología en el sentido más clásico de la palabra. En esencia trata de llevar al lector a través de un camino histórico, a la concepción más actual de las Ciencias de la Naturaleza. La idea es muy ambiciosa y el autor la resuelve con gran maestría. En este sentido el libro es extenso y profundo pero escrito de modo que cualquier lector con una formación básica pueda comprenderlo. Y la empresa no es tarea fácil, muchos de los asuntos de la Ciencia se escapan a la intuición humana, y por lo tanto suelen resultar oscuros para el lector no iniciado. Nuestra intuición se ha desarrollado en un mundo en el que las distancias se miden en metros, el tiempo en horas y la velocidad en unos pocos kilómetros por hora. Estas magnitudes resultan inadecuadas en cuanto intentamos explicar el micromundo de los átomos y de las partículas elementales, o el macromundo del Universo. No es fácil convencer al lector que en estas circunstancias su intuición no le va a ayudar, pero sí su capacidad de razonar. Resolver este delicado asunto, en mi opinión, es uno de los principales méritos del libro.

El libro hace un recorrido por el campo del conocimiento científico, agrupando la información en cuatro capítulos cuyos títulos son suficientemente explicativos: La Ciencia, Espacio y Tiempo, Materia, Energía y Cambios.

En el primer capítulo, La Ciencia, el autor hace un recorrido desde el origen del conocimiento hasta la concepción actual de las teorías y modelos científicos. Este asunto es especialmente relevante porque coloquialmente se le suele asignar al adjetivo “científico” un cierto “aura” de verdadero. El autor nos deja claro que el método científico tiene unas reglas muy estrictas que aplicadas con rigor e inteligencia crean teorías y

modelos científicos. El gran logro de esta forma de conocimiento es su carácter predictivo, lo que permite descubrir hechos, muchas veces, inimaginables que ocurren en la Naturaleza. No menos importante en estos modelos es la capacidad de cuantificar la incertidumbre del pronóstico. Este punto es clave para distinguir las ciencias predictivas, de las que no lo son. Todos estos importantes asuntos están desgranados con habilidad y claridad en este capítulo.

En el segundo capítulo, El Espacio y El Tiempo, se aborda una de las cuestiones claves de la Ciencia actual. El autor parte de las primeras concepciones, casi siempre absolutas del espacio y del tiempo, para concluir en la visión einsteniana de estos conceptos. El asunto, muchas veces roza el carácter filosófico y es clave para entender la Ciencia actual. La determinación del tiempo es tratado con especial profundidad y rigor. No olvidemos que en la actualidad la única magnitud definida por el Sistema Internacional de Unidades es el segundo, todas las demás se deducen de él y la razón última es la precisión con la que podemos medir el tiempo. Algunas de las previsiones de la Relatividad que parecían imposibles de comprobar, se han podido verificar gracias a esta habilidad en la medida temporal.

En el tercer capítulo, La Materia, se recorre el intrincado camino que llevó desde el pensamiento atomista al bosón de Higgs, recorriendo la formación de los distintos elementos. Resulta especialmente atractivo pensar que una buena parte de la Materia de la que estamos hechos los humanos en algún momento se creó en el corazón de una estrella. El recorrido se hace de forma clara y fácil de comprender, lo que resulta importante en asuntos de esta complejidad. Pero quizás uno de los apartados especialmente atractivo es el dedicado al estudio del agua. Entender las muy especiales propiedades del agua permite comprender el origen de la vida y la necesidad casi absoluta de su presencia para la aparición de la vida. Se nota en este capítulo la sólida formación físico-química del autor.

Por último en el cuarto capítulo, Energía y Cambios, el autor analiza la transformación de la Energía en la historia del Universo y la evolución en la Tierra para comprender los procesos que permiten la existencia de la vida en nuestro planeta.

Sé que esta somera descripción ha dejado muchos asuntos “en el tintero”, pero tendrá que ser el lector quien los vaya descubriendo uno por uno.

En resumen, este libro pretende acercar al lector los conceptos fundamentales del método científico y de las diferentes teorías que modelizan el comportamiento de la Naturaleza. Está claro que un libro de estas características, hoy en día, se presenta de una oportunidad extraordinaria. No tener una idea, aunque sea somera, de los conceptos desarrollados en este trabajo, convierte al individuo en un neo-analfabeto, ya que la dificultad para desenvolverse en el mundo actual, esta muy ligada a la ignorancia de los conocimientos científicos.

Respecto a la organización del texto, la propuesta es original. Generalmente los tratados de Cosmología suelen desarrollarse desde la perspectiva de la Astrofísica. En este trabajo se ha seguido un camino distinto: utilizando el hilo histórico se conduce al lector, paso a paso, hacia la comprensión de las diferentes teorías. El procedimiento permite que el lector descubra la temporalidad de los modelos científicos y cómo poco a poco se van mejorando las teorías, para explicar nuevos hechos.

Por último indicar que un trabajo de estas características solamente puede ser posible desde una sólida y profunda formación del autor en Física y Química. Mariano Merino ha desarrollado su actividad profesional en el campo de la Didáctica de las Ciencias Experimentales y posee la doble titulación en Física y Química. Al leer el libro queda patente esa formación del autor y su capacidad para transmitir las ideas con claridad. Si entendemos por Cultura todo conocimiento generado por el ser humano, no cabe ninguna

duda de que el libro es esencialmente “cultural”. El autor aporta una visión integradora de las ciencias, lo que permite unirlo a otras ramas del saber como la Historia y la Filosofía.

En resumen, el libro es un excelente y original tratado de Cosmología, escrito de forma fácil de comprender. Considerando las necesidades formativas actuales es un trabajo imprescindible.

Gracias, Mariano, por una obra como esta.

Santiago Mar Sardaña
Catedrático jubilado de Óptica de la Universidad de Valladolid

INTRODUCCIÓN Y AGRADECIMIENTOS

Suele decirse con verdad, que la veteranía es un valor que adorna a los seres humanos al alcanzar la categoría *senior*, época en la que las experiencias y conocimientos acumulados en muchos años, son ordenados y depurados en un proceso sosegado de reflexión. Si ello es cierto en muchas facetas de la vida, en el caso de los profesores cobra máxima significación, toda vez que se trata de una profesión que se lleva muy bien con las canas y las arrugas.

Durante muchos años, mi trabajo en la Universidad de Valladolid consistió en formar profesores de ciencias en general, y más en particular, de Física y de Química. Ello motivó que mis esfuerzos se centraran en seleccionar y proponer a mis alumnos toda clase de recursos y puntos de vista tendentes a hacer fáciles y asequibles los contenidos científicos que ellos habrían de transmitir en el futuro. Por otro lado, mi área de conocimiento “Didáctica de las Ciencias Experimentales” es eminentemente multidisciplinar, ya que abarca a todas las ciencias básicas e incluye otras disciplinas anejas, como la Historia de las Ciencias, la Psicología del Aprendizaje y la Pedagogía.

Por motivos personales puse fin a mi carrera prematuramente, si bien era entonces mi propósito escribir un libro que recogiera todo cuanto he atesorado a lo largo de mis años de profesión. Pese a estar retirado, me siento y me sentiré siempre profesor, siendo mi permanente vocación transmitir a los demás lo que yo he aprendido tras mucho esfuerzo y tiempo. Me pareció que la mejor forma de materializar tal propósito era escribir un libro de Cosmología, por ser esta materia una “ciencia de ciencias” que se identifica sobremanera con el área de conocimiento que he profesado, y en la que he realizado todas mis investigaciones.

El reto era importante si se tiene en cuenta que científicos tan relevantes como Carl Sagan y Stephen Hawking o divulgadores tan carismáticos como Isaac Asimov o Helge Kragh, han publicado excelentes obras sobre esta materia. Casi todos ellos abordan la Cosmología desde la astronomía y la astrofísica, yendo directamente a la explicación del origen y desarrollo del universo. En mi caso, lejos de todo intento de emulación a tan importantes referentes, abordé los temas principales de la Cosmología desde el conocimiento de las teorías y leyes científicas bajo la suposición de que estas son universales y que, pese a haber sido elaboradas en laboratorio, son susceptibles de ser aplicadas en todo el universo.

Así pues, he escrito esta obra ordenando los contenidos en torno a cuatro ideas fundamentales: (I) Conocimiento científico, (II) Espacio-tiempo, (III) Materia y (IV) Energía y cambios. Soy consciente de que toda obra de divulgación se mueve en el filo de una navaja, siendo de extrema

importancia mantenerse en equilibrio sin caer ni de un lado ni de otro. A un lado de esta estrecha frontera están el rigor y la veracidad y en el otro lado está la inteligibilidad. La ciencia moderna está plagada de conceptos altamente inasequibles para cualquier profano, tales como *cuantización, spin, mol, meiosis, curvatura del espacio-tiempo*, etc. y, en su loable intento de hacer llegar los conocimientos a un grupo de potenciales lectores lo más extenso posible, el divulgador corre el peligro de caer a un lado u otro. Si enfatiza con exceso en el rigor, su mensaje llegará a pocos y si elabora un discurso que todos puedan entender, será con menoscabo grave del rigor. He aquí la gran dificultad de escribir una obra de divulgación.

Albert Einstein manifestaba con frecuencia en entrevistas y conferencias que “La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas y, por regla general, pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos”. Ese pensamiento ha sido siempre la estrella polar que ha dirigido el rumbo de mis actividades como profesor y, por supuesto, lo ha sido también en la confección de este libro.

He intentado utilizar un lenguaje austero y preciso, eludiendo metáforas y exageraciones. La necesidad de incluir abundante información me ha forzado a redactar oraciones largas, si bien confío en que la lectura no resulte agobiante. Las 168 imágenes en color forman parte de los recursos para una mejor comprensión de los contenidos. Con frecuencia verá el lector numerosas notas a pie de página, en total 326, muchas de las cuales incorporan datos o aclaraciones que he preferido sacar del texto para que sea más fácil seguir el hilo del discurso. De otro modo, esos datos actuarían como elementos de distracción y dificultarían el seguimiento del texto.

He procurado también ordenar los contenidos, de forma que los más básicos y generales se tratan primero y los que requieren conocimientos previos ya tratados, se abordan después. Podrá comprobar el lector que, a medida que va progresando en la lectura del libro, van siendo cada vez más frecuentes las referencias a temas ya tratados en partes anteriores.

Esta obra está concebida para un espectro amplio de lectores interesados en el conocimiento del universo, de su origen y de su historia, a las luces de las más modernas teorías científicas. Se requiere un nivel de conocimientos de ciencias propio de quien posea una cultura científica media. Se acompaña también de una selección bibliográfica que permite ahondar en cualquiera de los temas tratados. También se relaciona un conjunto de series documentales, accesibles vía Internet, sobre Cosmología y ciencias afines que ilustran espléndidamente buena parte de los contenidos del libro.

Cierro esta introducción expresando mi profundo agradecimiento a cuantos me han brindado su ayuda en la consecución del proyecto: A Santiago Mar por sus sugerencias y correcciones, preferentemente en el campo de la Óptica y por las muchas horas que ha dedicado generosamente a la lectura del texto. A Pedro Nieto, verdadero hombre renacentista del siglo XXI, por sus correcciones estilísticas. A David Merino por su minuciosa y constructiva crítica en aquellas partes que eran de más difícil comprensión. A Ramiro Merino por el aliento que me brindó en momentos en los que mis fuerzas flaquearon y a Asunción Esteban por creer en mi proyecto desde el primer momento y animarme durante los largos meses de duro trabajo. Finalmente, agradezco a Ediciones de la Universidad de Valladolid la esmerada maquetación y la diligencia con que ha llevado adelante la edición de este libro.

J. Mariano Merino

Julio de 2020

La ciencia



Miniatura del s. XIII que representa a un astrónomo, un matemático y un clérigo determinando posiciones de los astros para construir el calendario

Después de todo ¿Qué es un científico entonces? Es un hombre curioso que mira a través del ojo de una cerradura, la cerradura de la naturaleza, tratando de saber qué es lo que sucede.

Jacques Ives Cousteau

I.1 EL ORIGEN DEL CONOCIMIENTO

Cierto atardecer de hace mucho, mucho tiempo, tres individuos caminaban por un canchal con paso lento y trayectoria no bien definida. Diríase que, más que dirigirse a un determinado destino, buscaban por el suelo no se sabe qué. Uno de ellos levantó una piedra, acercó su cara y hurgó con sus dedos en la zona descubierta. Un lejano rugido le hizo incorporarse sobre sus ciento treinta y cinco centímetros de estatura como si de un resorte de acero templado se tratara, y una vez erguido, oteando en la lejanía olfateó la leve brisa que subía por la pendiente desde la reseca sabana. Sin duda, el individuo conocía muy bien el significado del sonido que acababa de percibir y ciertamente le inquietaba sobremanera. Uno de sus dos compañeros, que se hallaba más arriba en la ladera, se había asustado al escuchar el amenazante rugido y a consecuencia de ello había resbalado, cayendo varios metros por la pendiente. En su caída, el borde afilado de una piedra le había provocado un corte en la palma de la mano. Los tres individuos se apelotonaron en el lugar en el que el herido se lamía la mano ensangrentada buscando en la proximidad de sus cuerpos la seguridad y el alivio al estrés que el rugido del depredador había provocado en ellos.

Los tres individuos permanecieron largo rato en el lugar intercambiando sonidos guturales y gestos, con la finalidad de tranquilizarse unos a otros. Lentamente el sol iba declinando en el horizonte y por fin, la patrulla se puso en marcha pendiente abajo en dirección al cercano bosque que se hallaba junto a la ladera. Entre los árboles aquellos individuos y sus familias encontraban cobijo y seguridad durante las noches. Subidos en las ramas gruesas se acomodaban y dormían a salvo de los ataques de las manadas de hienas y leones que ocupaban aquel territorio.

Ya de noche, nuestro individuo repasó mentalmente los acontecimientos que había vivido; recordaba que, como todas las mañanas, había ido a beber en la poza del cercano manantial mientras sus compañeros vigilaban. Como todos los días, había contemplado su imagen reflejada en el agua, un hecho cotidiano que forma parte de lo normal en la vida de cualquier animal, sin más repercusiones. Ahora bien, nuestro personaje había heredado de sus antepasados un cerebro de 650 cm³ y junto con él una serie de habilidades imaginativas e intelectuales que hacían de él un ser especial.

Con frecuencia, durante el escaso y peligroso tiempo que dedicaba a beber en la poza, su curiosidad le incitaba a tocar el agua con sus dedos y observaba que aquella imagen reflejada que él veía en el fondo de las aguas, reproducía exactamente todos los movimientos y muecas que él hacía. Y se preguntaba: ¿qué ser extraño es el que me mira desde el fondo de la poza que hace todo cuanto yo hago y que se rompe cuando yo agito el agua para después volver a reaparecer? ¿Acaso no seré yo mismo?

Más tarde recordó el percance que su compañero había sufrido en el canchal y la piedra que lo había herido. Él sabía desde niño que las piedras del canchal con bordes afilados podían herir los pies si se las pisaba descuidadamente. Por otro lado veía cómo los chimpancés de la horda vecina arrojaban los frutos de dura cáscara contra las piedras para obtener el delicioso alimento que había en su interior. De hecho eso es lo que él y sus congéneres hacían a diario. Sumido en estos pensamientos nuestro personaje se quedó dormido.

A la mañana siguiente, tras apagar la sed en el bebedero, el trío de nuestra historia volvió a subir por el canchal en busca de lagartos, huevos, escarabajos y rizomas carnosos que componían parte de su dieta. Era ya mediodía cuando nuestro inquieto personaje encontró una piedra del tamaño de la palma de la mano con uno de sus bordes muy afilado, lo cogió y pasó un dedo por el borde cortante. Algo fascinante debía tener aquel objeto para él; aquella piedra podía cortar lo mismo su dedo que cualquier otro cuerpo. Él recordó que sus compañeros habían encontrado días atrás el cuerpo destrozado de un facocero que los leones habían abatido la noche anterior. Ante los restos del festín, se afanaron en arrancar de los huesos los girones de carne que aún quedaban, pero la inoportuna aparición de una manada de hienas había dado al traste con lo que habría sido una suculenta cena. De haber sido más rápidos y diestros en recolectar la carne, el botín habría sido para ellos y no para las hienas.

La mente de nuestro personaje trabajaba sin descanso ¿y si hubiera utilizado la piedra cortante para cobrar la carne del despojo? En ese caso, para cuando las hienas llegaran, ya habría cobrado el alimento y estaría disfrutando de él en la segura rama de su árbol favorito. Sumido en estos pensamientos mantuvo la piedra en su mano durante toda la jornada. Aquella noche, nuestro personaje tardó más en dormir por causa de las imaginaciones y estrategias que su mente elaboraba para el día siguiente.

Parece seguro que este relato, absolutamente inventado, fue en todo o en parte realidad millares de veces, hace unos dos millones de años. Es altamente probable que los *homo habilis* que poblaban las sabanas africanas aprendieran a utilizar las piedras como utensilios para finalidades concretas. Este tipo de actividad, en el que se combinan la conciencia del propio yo, la elaboración de construcciones mentales con los conocimientos empíricos y la previsión de hechos y situaciones que aún no son realidad, es la actividad intelectual propia del ser humano, que le distingue del resto de las especies animales.

Durante la larga noche de la prehistoria, la mente del ser humano creció en complejidad, paralelamente a su desarrollo cerebral. El uso de artefactos se fue diversificando a velocidad creciente, de forma paralela a la perfección de su manufactura. El volumen de conocimientos empíricos era transmitido de padres a hijos y se acrecentaba en cantidad y calidad. A lo largo de dos y medio millones de años, la mente humana ha ido creciendo cualitativa y cuantitativamente. En un principio, los *homo habilis* y más tarde los *homo ergaster* acreditaron unas rudimentarias

capacidades de memorizar, de hacer sencillas relaciones mentales con los conocimientos almacenados en su cerebro y de tomar decisiones previsoras.

A lo largo de centenares de siglos, generación tras generación, el cerebro humano fue aumentando en tamaño y complejidad. Desde los 650 cm³ de volumen craneal del *homo habilis* hasta los 1400 cm³ del *homo Neandhertalensis* han transcurrido cerca de dos millones y medio de años y en este larguísimo período, las capacidades memorísticas y discursivas del cerebro humano han ido creciendo sin cesar.

Tenemos numerosas evidencias de que hace 30.000 años, los últimos neanderthales cuidaban a sus enfermos y lisiados, lloraban y enterraban a sus muertos, veneraban ídolos y tótems, se comunicaban con un lenguaje sencillo pero eficaz, trabajaban la piedra para obtener hachas de mano y puntas de lanza, trabajaban el hueso para hacer punzones y arpones así como las pieles para hacer abrigo y un rudimentario calzado y colaboraban siguiendo elaboradas estrategias para acechar y abatir a sus presas.

Con frecuencia se compara el cerebro humano con un ordenador¹ y es bien sabido que para que un computador funcione se requiere que tenga un buen *hardware* y esté equipado con un eficiente *software*. Pues bien, antropólogos y prehistoriadores están de acuerdo en que hace ya 30.000 años, el *hardware* cerebral humano había llegado al desarrollo que hoy tenemos y que por tanto, las nuevas habilidades intelectuales que el ser humano ha adquirido desde tan lejana fecha se deben mucho más al aumento y mejora del *software* que al del *hardware*. Dicho en otros términos, todo apunta a que los logros intelectuales de los últimos milenios se han debido casi con exclusividad al volumen de conocimientos disponible y a la transmisión de los mismos entre los seres humanos. Y si esto fuera así, sería fascinante poder traer desde la noche de los tiempos a uno de los personajes que hace 20.000 años pintaron los bisontes de la cueva de Altamira. Supongamos que durante veinte años estuviera entre nosotros, que cursara las etapas educativas de Primaria y Secundaria y que posteriormente se matriculara en una universidad ¿llegaría a graduarse en la especialidad elegida? y ¿qué calificaciones obtendría?

Nos consta que el bagaje de conocimientos empíricos que poseía un cazador recolector del paleolítico inferior era importante, y en algunos aspectos, muy superior al que cualquiera de nosotros pueda tener. Él conocía qué setas, bayas o raíces son comestibles y cuáles venenosas, sabía qué emplastos de mohos debía aplicar sobre una herida para que esta sanara, conocía las costumbres de los animales mejor que el más diestro cazador actual y conocía la disposición de las estrellas visibles mejor que cualquier ciudadano urbano. A la hora de elaborar un útil de piedra, sabía elegir el mejor sílex, estudiaba detenidamente las imperfecciones del material como posibles líneas de fractura y con gran precisión golpeaba con el percutor al objeto de conseguir el filo deseado. Posteriormente lo engarzaba con destreza en una barra de madera convenientemente trabajada para obtener así el hacha, la lanza, la flecha o el arpón.

¹ La gran mayoría de los inventos no son sino diseños inspirados en nuestro propio cuerpo o en los elementos naturales. Así, una excavadora es una copia del brazo, un avión es una copia de un ave, un barco es una copia de un tronco de árbol flotando, una cámara fotográfica es una copia del ojo, una motocicleta es una copia de un animal de montura, etc. Los diseños humanos tienen por finalidad ampliar los límites de las posibilidades que por condición o por circunstancias tenemos.

I.2 CIENCIA Y ARTE: MANIFESTACIONES DE LA MENTE HUMANA

Llegados a este punto, procede asumir que la mente humana, con sus capacidades memorísticas, imaginativas y discursivas es la causa de que la ciencia exista. El ser humano ha venido creando desde tiempo inmemorial todo un acervo de conocimientos gracias a sus experiencias, almacenadas como recuerdos, gracias a su capacidad imaginativa que le permite concebir hechos y situaciones no reales y gracias también a su capacidad para retomar esos conocimientos de su memoria para relacionarlos y obtener así nuevas construcciones mentales que le permiten acumular más conocimiento, e incluso le permiten elaborar estrategias previsoras. Esta capacidad para adelantarse a los acontecimientos antes de que estos sucedan ha sido una de las grandes bazas del ser humano para alcanzar el éxito zoológico que hoy tiene². Ahora bien, esta habilidad que tan buenos resultados da, tiene importantes costes para él, ya que su capacidad de previsión le lleva a situaciones de angustia y estrés ante un futuro incierto o negro que los demás animales, o no padecen o lo padecen en mucho menor grado



Figura 1: Anverso y reverso del disco de oro que transporta la nave Voyager con información básica de la civilización humana, del planeta Tierra y de su situación.

Hay dos manifestaciones que son exclusivamente humanas: el arte y la ciencia. Tanto la creación artística como la científica requieren la puesta en práctica del pensamiento abstracto, exclusivo de la especie humana.

En 1977, más en concreto, el 20 de agosto, la NASA lanzó al espacio la nave Voyager 2 y el 5 de septiembre de ese mismo año fue lanzada la Voyager 1. La misión de ambas era estudiar Júpiter y Saturno pero, tras un paseo por las inmediaciones de ambos planetas, los científicos de la NASA decidieron dejarlas seguir indefinidamente. Ambas sondas van equipadas con baterías de plutonio que convierten el calor de la desintegración radioactiva en energía eléctrica. Se estima que

² No todo es exitoso en esta condición humana. Se dice que a veces “se puede morir de éxito”. Ciertamente el éxito zoológico del hombre ha conducido a la superpoblación actual; no hay especie animal en nuestro orden de tamaño corporal tan numerosa sobre el planeta. Se estima que la población mundial actual alcanza los 6.000 millones de individuos y que en 2025 seremos unos 8.500 millones. Todos asumimos que pueden existir 6.000 millones de moscas sin ningún problema pero ¿alguien se imagina que en el mundo hubiera 6.000 millones de chimpancés?

actualmente se encuentran a 20.000 millones de km y que podrán seguir enviando información mediante ondas electromagnéticas hasta 2030. Dicha información tarda en llegar hasta la Tierra unas 19 horas.

Una y otra nave llevan en su interior un disco de oro con grabaciones fonográficas de audio, consistentes en saludos en 54 idiomas, una colección de sonidos de la Tierra (viento, rayos, volcanes, un perro, latidos del corazón, coches y una selección de música de diversas culturas).

En lo que al registro de imágenes se refiere, el disco contiene una selección de 116 fotografías de diferentes formas de vida de la Tierra y de la sociedad humana (estructuras de ADN, un grupo de niños, un feto, un museo, un tren, la página de un libro, etc.)

A su vez, la parte no grabada del disco (lado izquierdo en la figura) contiene símbolos difícilmente descifrables para un humano medio. En la parte superior izquierda se muestra un esquema de cómo debe reproducirse y descifrarse el contenido del disco; debajo aparece ese mismo esquema de perfil. Justo abajo, a la izquierda, se muestra un diagrama que define la localización de nuestro sistema solar utilizando direcciones de 14 púlsares de direcciones conocidas desde nuestra estrella. Los códigos binarios marcados sobre ellos determinan la frecuencia de los pulsos. Arriba, a la derecha, aparecen las instrucciones necesarias para decodificar las grabaciones. La primera parte muestra la forma de onda de los sonidos, los códigos binarios que aparecen más abajo abarcan una longitud de onda y se refieren a la frecuencia de muestreo³ de las grabaciones de audio y de escaneo⁴ de las imágenes. Finalmente, abajo derecha, aparecen dos círculos unidos por un segmento que representan los dos estados más bajos del átomo de hidrógeno.

La confección de este mensaje “intergaláctico” fue realizada por un equipo de expertos, liderado por el prestigioso astrofísico y divulgador científico Carl Sagan. Se hizo asumiendo que cualquier extraterrestre que se topara con la nave, sabe Dios cuándo y dónde, fuera mucho más listo y avanzado que nosotros y que pudiera descifrarlo. Por el momento, no hay evidencia alguna de que ningún ser inteligente lo haya manipulado. Pero ¿por qué se eligió la información antes descrita en la sonda espacial destinada a viajar mucho más allá de los confines de nuestro sistema planetario? ¿Qué se pretendía con ello? La comisión de la NASA tuvo en cuenta que, a la hora de confeccionar una carta de presentación de la Humanidad, se debería incidir en aquello que es intrínseco de la especie humana: el arte y el conocimiento.

I.3 CONOCIMIENTO Y CIENCIA

El ser humano se hace preguntas ante los hechos que acontecen en su entorno, elabora explicaciones utilizando las reglas de la lógica y los conocimientos que ya posee, colabora con sus congéneres compartiendo recuerdos, conocimientos y razonamientos y transmite a sus

³ La frecuencia de muestreo expresa el número de medidas de la amplitud de la onda acústica por segundo que un computador hace, con objeto de convertir dicha onda en una sucesión de dígitos. Dada la enorme velocidad de procesado que los ordenadores permiten, la frecuencia de muestreo habitual es 44 KHz, esto es, 44.000 medidas de amplitud por segundo. Ello permite digitalizar a la perfección cualquier sonido audible.

⁴ Para digitalizar una imagen es preciso dividir esta en pequeñas fracciones cuadradas y de cada una de ellas medir la intensidad de los tres colores fundamentales: rojo, amarillo y azul. De nuevo la velocidad de procesado de los ordenadores permite ejecutar en tiempo récord densidades de escaneo muy grandes que permiten una perfecta reproducción de las imágenes.

semejantes su saber, contribuyendo así al desarrollo de una cultura colectiva en permanente revisión y desarrollo.

Es preciso ahora definir cuatro conceptos: Pensamiento espontáneo, conocimiento ordinario, pensamiento científico y conocimiento científico.

Pensamiento espontáneo es toda forma de razonamiento que desarrolla cualquier individuo manejando sus propios recursos, conocimientos, recuerdos y formas de pensamiento aprendidas, siguiendo las reglas de la lógica y del sentido común.

Nuestro pensamiento tiende de forma sistemática a discurrir por sendas prefijadas, insertas en nuestro entendimiento de forma deliberada o inconsciente. De hecho, esto es algo bueno, sin duda, un poderoso recurso empleado por el ser humano desde la más remota antigüedad, que le ha permitido aprovecharse de los logros intelectuales de sus semejantes y ahorrar así esfuerzos inútiles. De hecho, la cultura determina de forma decisiva la forma de pensar de los individuos, y a esta forma de pensar se le denomina “sentido común”. Ahora bien, si es cierto que el sentido común es la forma de pensamiento de los individuos pertenecientes a una cultura, no menos cierto es que el sentido común ha cambiado drásticamente de unas épocas a otras y es muy distinto entre las diversas culturas. Así, por ejemplo, hubo tiempo en que si llovía era porque los dioses lloran en tanto que hoy pensamos en la evaporación y la condensación del agua, igualmente hubo tiempo en que un sacrificio humano era una forma de aplacar a los dioses y obtener favores de ellos, en tanto que hoy es considerado un asesinato ritual.

Conocimiento ordinario es toda aquella información almacenada en la memoria, adquirida a través de la experiencia o la educación. También puede definirse como el contenido intelectual adquirido sobre un campo determinado. La rama de la filosofía que estudia el conocimiento se denomina *epistemología* o *teoría del conocimiento*.

Pensamiento científico. Es la capacidad que tienen las personas de formular ideas y representaciones mentales de forma racional y objetiva. Para M. Bunge⁵ “Es una forma de pensamiento y de acción; precisamente la más reciente, más universal y más provechosa de todas las formas de pensamiento conocidas”.

Ahora bien, no siempre el conjunto de circunstancias que condicionan el modo de pensamiento científico son algo positivo. Así, por ejemplo, la filosofía impuesta por los griegos clásicos (Pitágoras, Aristóteles, etc.) según la cual, el conocimiento científico es directamente accesible desde la mente racional, obró negativamente en el desarrollo ulterior de la ciencia y hubo que esperar hasta bien entrado el S. XVII en que Galileo impuso el método científico experimental, y es a partir de entonces cuando los científicos asumen de forma consensuada que “en cuestiones de ciencia, las cosas son como son y no como creemos que deben ser”, por muy lógicas que nos parezcan, y en este contexto, las teorías no son sino “las mejores explicaciones disponibles de los hechos experimentales”. Aún más evidente resulta la interpretación geocéntrica del universo⁶, idea que prevaleció extremadamente arraigada durante catorce siglos, haciendo de la idea incluso una cuestión de fe. Hasta bien entrado el S. XVI, de la mano de Nicolás Copérnico, no se inició el

⁵ BUNGE, M. (1983) *La investigación científica*. Ed. Ariel, S.A. Barcelona

⁶ Claudio Ptolomeo (90-168 d.C.) recopiló en su célebre obra *Almagesto* una exposición del sistema del Universo, situando a la Tierra en el centro del mismo y el resto de los cuerpos celestes en torno a ella.

cambio hacia el paradigma que hoy aceptamos e incluso, en los primeros cien años, la resistencia al cambio fue feroz por parte de los sectores reaccionarios, como prueban los procesos a los que fueron sometidos Giordano Bruno, el propio Copérnico, Galileo, etc. Los dos grandes ejemplos que acabamos de considerar ilustran el alcance de los paradigmas científicos cuando pierden su validez y se convierten en obstáculos intelectuales.

Sea cual fuere el paradigma vigente, el pensamiento científico se atiene siempre a tres valores: objetividad, racionalidad y sistematicidad. Esto ha sido así, tanto en la Grecia clásica como en los

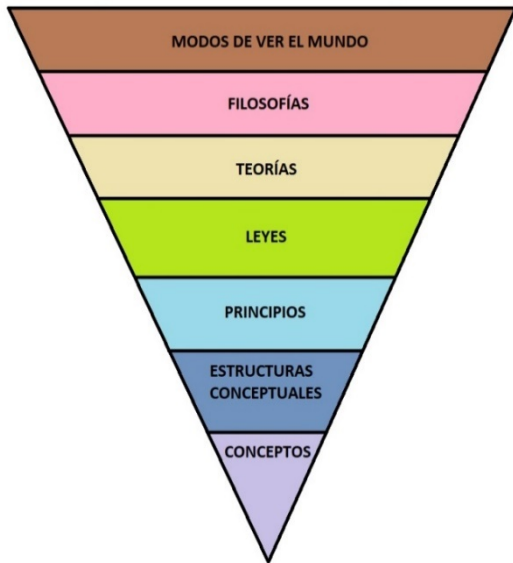


Figura 2 Esquema de la estructura del conocimiento científico

tiempos de Copérnico, Galileo y Newton y por supuesto, como hoy en día. Además, el pensamiento científico presenta un conjunto de características: Es *analítico* al descomponer los problemas complejos en fragmentos más simples para estudiarlos a fondo. Es *preciso* en la descripción de los fenómenos estudiados y en los cálculos cuantitativos. Es *comunicable* utilizando un lenguaje conciso y directo. Es *metódico*, desterrando toda suerte de desórdenes y arbitrariedades que pudieran interferir en su objetivo final. Es *revisorista* cuestionando y contrastando permanentemente todo el cuerpo del conocimiento.

Conocimiento científico Es el conjunto de hechos contrastables y verificables recogidos en las teorías científicas, obtenidos por medio de la

metodología específica de la ciencia. Se estructura de diversas maneras según se trate de ciencias exactas, ciencias de la naturaleza, ciencias sociales o filosofía, pero en general la ciencia se ajusta a una estructura arborescente en cuya parte inferior están los conceptos, que no son sino signos o símbolos compartidos socialmente que indican regularidades en los acontecimientos, por ejemplo “masa, peso y distancia”. Justo encima se sitúan las estructuras conceptuales, siguiendo con el ejemplo, “las masas se atraen entre sí, tanto más cuanto más próximas se encuentran” y más arriba los principios, reglas conceptuales que regulan la conexión entre las pautas existentes en los fenómenos. En nuestro ejemplo, un principio sería “la acción atractiva de una masa se ejerce por igual en todas direcciones”. Por encima estarían las Leyes que en nuestro ejemplo sería la expresión de la Ley de la Gravitación de Newton “la fuerza con que se atraen dos masas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa”. Por encima estarían las Teorías, construcciones lógicas que posibilitan pautas de razonamiento que conducen a explicaciones. En nuestro ejemplo estaríamos hablando de la Teoría de la Gravitación Universal. Más por encima estarían las filosofías, formas de pensamiento consensuadas. En nuestro ejemplo cabe citar “la naturaleza es ordenada y cognoscible” y finalmente, cabe situar en lo más arriba los modos de ver el mundo. Siguiendo con nuestro ejemplo “la mecánica celeste sigue una única y sencilla ley, no requiriendo de la intervención de ningún ser supremo”.

La investigación científica se pone en marcha cuando se es consciente de que el cuerpo de conocimiento disponible no explica satisfactoriamente un determinado problema. Buena parte

del conocimiento previo del que parte una investigación es conocimiento espontáneo y otra parte es conocimiento científico.

Ante cualquier situación problemática, la mente humana intenta elaborar explicaciones e interpretaciones de aquello que le resulta enigmático, y puede hacerlo de dos formas; la primera, la más universal, es el pensamiento espontáneo que, mediante las reglas del sentido común, lleva directamente a un conocimiento ordinario. La otra forma, el pensamiento científico, mucho más sofisticado y especializado permite acceder al conocimiento correcto sobre el problema en cuestión.

Debe quedar bien claro que el esquema anterior no es sino la simplificación de una realidad bastante compleja. En realidad, buena parte del sentido común actual es el fruto de la investigación científica del pasado.

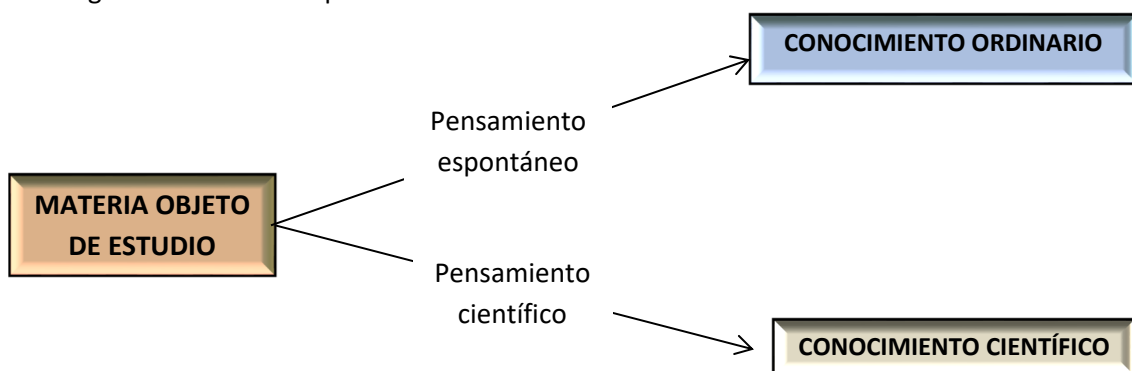


Figura 3 Esquema de la interacción entre la mente y la materia objeto de estudio

Veamos un ejemplo: Ante la pregunta ¿Cómo caen los cuerpos? El pensamiento espontáneo da por respuesta que la caída es acelerada y que los cuerpos más pesados caen más rápidamente que los ligeros. Para ello, la mente ha recuperado de la memoria las observaciones y experiencias de cada día. Todos sabemos que si se coge con una mano una piedra y con la otra la pluma de la pechuga de una gallina, la piedra llegará antes al suelo que la pluma. Igualmente, nadie ignora que se puede saltar desde una banqueta cuantas veces se quiera, pero saltar desde la planta 20 de un moderno edificio se hace solo una vez ya que lo peligroso de este segundo lance no es la altura sino la velocidad con la que uno llega al suelo.

Si se aborda el problema haciendo uso del pensamiento científico, lo primero que hace la mente es acotar y definir el problema: si el aire atmosférico es un fluido, el movimiento de los cuerpos en su seno ha de vencer la resistencia de la atmósfera⁷. Es preciso por tanto experimentar para comprobar si la presencia del aire afecta o no a la caída libre de los cuerpos, y el experimento no es otro que el representado en la Figura 4. En el interior del tubo se introduce un perdigón de plomo y una liviana pluma de ave, a continuación se extrae el aire con ayuda de una bomba de vacío y finalmente puede comprobarse que tanto la bola como la pluma caen con igual celeridad. Vemos por tanto en este ejemplo, que el pensamiento espontáneo lleva a un conocimiento

⁷ Quien no esté convencido de ello, que se suba a una bicicleta de competición e intente recorrer los 45 km de una prueba contra-reloj en el tiempo en el que lo hacía Miguel Induráin.

ordinario erróneo, en tanto que el pensamiento científico permite acceder al conocimiento correcto.

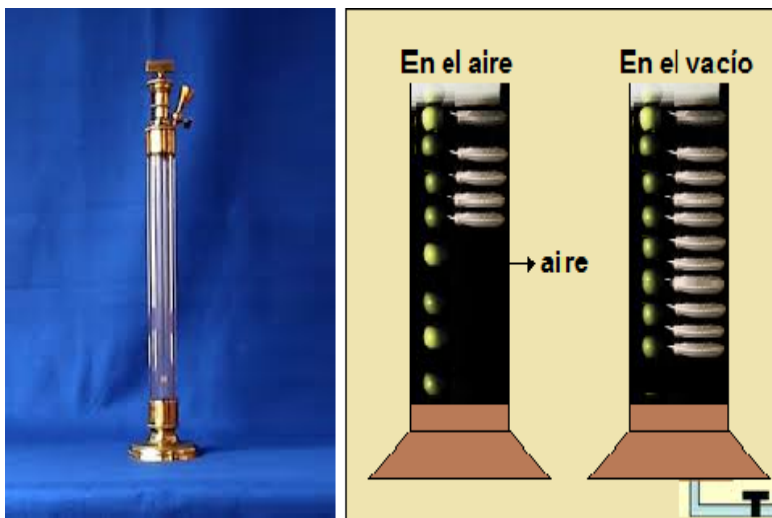


Figura 4 Experimento del Tubo de Newton para demostrar que, en ausencia del aire, los cuerpos pesados y los ligeros caen con igual rapidez.

Si en un párrafo anterior se afirmaba que el sentido común actual es el fruto de la investigación científica del pasado, no menos cierto es que el pensamiento espontáneo de hoy fue pensamiento científico en el pasado. Así, ante la pregunta ¿cómo caen los cuerpos? del ejemplo anterior, Aristóteles nos hubiese respondido en la forma primera ¡y hablamos de un personaje cuya mente aguda y científica se halla fuera de toda duda!

I.4 LA CONSTRUCCIÓN DE LA CIENCIA

La construcción del conocimiento científico actualmente admitido sólo ha sido posible a través de un proceso lento e incierto de franquear obstáculos epistemológicos muy resistentes. Pero curiosamente, estos obstáculos se ignoran desde el momento en que el desarrollo de la investigación encuentra una "solución" a los mismos (aunque provisional y sujeta a revisión). Se experimenta una reelaboración del proceso intelectual tal y como se ha operado, que comienza por la reescritura de los descubrimientos por los propios científicos. Posteriormente, el fenómeno se extiende al plano divulgativo. De pronto, los conceptos científicos ya no se nos presentan como lo que son: respuestas a cuestiones teóricas, pierden su carácter problemático, dejan de estar "vivos" al perder su función epistemológica original. Se nos presentan entonces de forma más "llana" como simples "cosas" factuales, que basta conocer y memorizar. Es preciso pues, insistir en el carácter problemático de los conceptos, en el hecho insuficientemente señalado de que su estatus les permite plantear interrogantes en contradicción con el sentido común.

Pensemos, por ejemplo, en la larga epopeya que supuso la explicación del Universo. En un principio se crearon mitos y dioses que gobernaban y movían los cuerpos celestes⁸, posteriormente se pensó en la Tierra como el centro del universo, idea que, si bien fue discutida y rechazada en la antigüedad, terminó asentándose bajo la forma de la Teoría de los Epiciclos de Claudio Ptolomeo de Alejandría en el S. II de nuestra era, perviviendo durante catorce siglos. Hasta bien entrado el S. XVI, de la mano de Nicolás Copérnico, no se inició el cambio hacia el paradigma que hoy aceptamos e incluso, en los primeros cien años, la resistencia al cambio fue feroz por parte

⁸ Tal es el caso de Helio, el dios sol de la mitología griega que transportaba en su carro al astro rey desde el alba hasta el ocaso

de los sectores reaccionarios, como prueban los procesos a los que fueron sometidos Giordano Bruno, el propio Copérnico, Galileo, etc.

Ante un caso como el del ejemplo uno se pregunta ¿por qué es tan difícil cambiar la mentalidad? ¿Por qué nuestra mente es tan reacia a la hora de abandonar el pensamiento rutinario y abordar los problemas desde puntos de vista nuevos? La respuesta obvia es que por un principio de economía, nuestra mente tiende a recorrer el camino del pensamiento siempre por el mismo sendero. La práctica totalidad de nuestros razonamientos eficaces no los produce nuestra mente *ab initio* sino que son formas de razonamiento aprendidas que rescatamos de nuestra memoria según convenga a las circunstancias. En principio, todo el conocimiento almacenado en la memoria resulta útil para pensar más y mejor⁹. Ahora bien, no siempre el conocimiento disponible es bueno y positivo a la hora de encarar un problema científico, con frecuencia el conocimiento disponible se convierte en un obstáculo intelectual.

Nuestro pensamiento tiende de forma sistemática a discurrir por sendas prefijadas, insertas en nuestro entendimiento de forma deliberada o inconsciente. De hecho, esto es algo bueno, sin duda, un poderoso recurso empleado por el ser humano desde la más remota antigüedad, que le ha permitido aprovecharse de los logros intelectuales de los semejantes y ahorrar así esfuerzos inútiles. La historia de la ciencia está repleta de ejemplos de cómo las ideas de otros han determinado la forma de pensar del investigador, permitiéndole alcanzar las más altas cotas. Sirvan como tales los casos de Darwin, Newton, Galileo, etc., quienes elaboraron grandes paradigmas científicos que han dirigido y dirigen la forma de pensar y de actuar de quienes se dedican a la creación del conocimiento científico, en todas sus facetas.

Ahora bien, no siempre el conjunto de circunstancias que condicionan el modo de pensamiento son algo positivo. Así, por ejemplo, la filosofía impuesta por los griegos clásicos (Pitágoras, Aristóteles, etc.) según la cual, el conocimiento científico es directamente accesible desde la mente racional, obró negativamente en el desarrollo ulterior de la ciencia y hubo que esperar hasta bien entrado el S. XVII en que Galileo impuso el método científico experimental, y es a partir de entonces cuando los científicos asumen de forma consensuada que “en cuestiones de ciencia, es preciso construir hipótesis, experimentar, ordenar, comprobar, interpretar resultados, sacar conclusiones y elaborar explicaciones fiables de los hechos problemáticos¹⁰.”

Definiremos pues, un *Obstáculo intelectual* como el conjunto de circunstancias (epistemológicas, esquemas conceptuales, momento histórico, apariencias experimentales, etc.,) que determinan la forma de pensar de un individuo, dificultando su acceso al conocimiento.

Un ejemplo histórico de lo anteriormente expuesto es el de un ilustre médico y biólogo: Claude Bernard, quien en 1865 publica su descubrimiento acerca de la intoxicación de la sangre por el monóxido de carbono. Se sabe hoy que la hemoglobina se combina reversiblemente, tanto con el oxígeno (HBO₂) como con el dióxido de carbono (HbCO₂) durante la respiración normal, pero que

⁹ Conocer a fondo el cálculo infinitesimal es decisivo para comprender la Física. No se puede entender la Bioquímica si no se sabe Química Orgánica y por igual motivo no se puede estudiar Economía sin conocer la Estadística, la aritmética y el álgebra.

¹⁰ Esta secuencia es la trama fundamental del Método Científico, cuya descripción se hará más adelante.

su asociación con el monóxido de carbono (Hecho) es muy estable, y por lo tanto mortal, cuando se respira accidentalmente.



Figura 5 Claude Bernard (1813-1878)
Renan, Ernest, Bert, Paul. *L'œuvre de Claude Bernard*. Paris : J.-B. Baillière et fils. 1881. Cote 38609

PROCESO DE RESPIRACIÓN NORMAL

El O_2 y el CO_2 tienen afinidades parecidas por la hemoglobina de la sangre (**Hb**). Cuando la sangre venosa **CO_2 -Hb** de color rojo oscuro llega a los pulmones, el oxígeno atmosférico sustituye al gas carbónico y la sangre se convierte en arterial **O_2 -Hb** de color rojo intenso.

En las células sucede lo contrario y allí, la sangre arterial libera su oxígeno, se asocia al dióxido de carbono y se convierte en venosa esto es, pasa de tener color rojo

INTOXICACIÓN POR MONÓXIDO DE CARBONO

Al inhalar aire contaminado por el **CO**, tanto este como el O_2 compiten por asociarse a la hemoglobina (**Hb**), prevaleciendo fuertemente la unión **CO-Hb** (color rojo intenso) sobre la unión **O_2 -Hb** (color rojo intenso).

La unión del **CO** a la hemoglobina es tan intensa que, cuando la sangre llega a las células, el CO_2 tampoco es capaz de desalojar al **CO** de la sangre. De este modo, la persona que fallece por esta causa, tiene su sangre de color rojo claro, dando la impresión de que

Desde 1856, Claude Bernard pudo demostrar que la sangre pierde su oxígeno en presencia de monóxido de carbono, y afirmaba textualmente: "...el óxido de carbono envenena impidiendo a la sangre arterial convertirse en venosa...", es decir, oponiéndose a la "desarterialización" de la sangre. Como vemos, la mente de Claude Bernard era prisionera de un obstáculo epistemológico, y la comparación de fechas muestra que le harían falta casi diez años para franquearlo¹¹. Eso sí, una vez franqueado, el obstáculo se olvida enseguida y Claude Bernard presentará su descubrimiento en 1865 como un proceso experimental de naturaleza lógico-deductiva.

¿Qué es pues, lo que supuso un obstáculo para Claude Bernard? Sin ningún género de dudas, lo fue el color rojo, común a la oxihemoglobina (HbO_2) y a la carboxihemoglobina ($HbCO$)

Lo que resultaba difícil de imaginar era precisamente que un compuesto pudiera ser a la vez rojo y pobre en oxígeno. Es más fácil "acoplar" en una sola idea el *rojo* con lo *oxigenado* e imaginar la intoxicación como un impedimento para la desoxigenación de la sangre, puesto que sigue siendo roja. Lo que hacía falta era dissociar el *rojo* y el *oxigenado*. Evidentemente, una vez conseguido el progreso intelectual, el hecho parecerá tan evidente que Claude Bernard reescribirá su descubrimiento de modo lógico, que no corresponde a como en realidad se produjo.

¹¹ En sus observaciones, Claude Bernard había observado tanto el color oscuro y cianótico, ciertamente terrorífico, de los fallecidos por ahogamiento como el color sonrosado de los fallecidos por el tufo de los braseros (algo muy común en el S. XIX). Difícilmente hubiera podido pensar que en uno y otro caso la muerte se habría producido por la falta de oxígeno en la sangre.

Actualmente, en los manuales, de este proceso se hace una cuestión sensorial, y no conceptual: los matices del color rojo de la HbO_2 y la HbCO son ligeramente diferentes. Los manuales de medicina se valen de esta variación con fines de aprendizaje. ¡Como si Claude Bernard para comprender el fenómeno hubiese abierto desmesuradamente los ojos, o hubiera sacado su colorímetro!

I.5 LOS OBSTÁCULOS INTELECTUALES, DIFICULTADES A SUPERAR EN LA CREACIÓN DE LA CIENCIA

El conocimiento científico tiene una naturaleza especial, los problemas que trata son casi siempre inobservables e inasequibles para la mayoría de los mortales, como lo es, por ejemplo, la estructura de los grafenos¹², la relación entre los telómeros¹³ y la longevidad de los seres vivos o la evolución de las estrellas. La ciencia propone y aventura conjeturas e hipótesis basadas en complicadas teorías que van más lejos de lo que se supone conocimiento común. Así, por ejemplo, no se entiende un trabajo sobre grafenos que no considere la Mecánica Cuántica, ni una investigación sobre los telómeros que ignore la Biología Molecular y, por supuesto, investigar sobre la evolución de las estrellas supone conocer a fondo la Teoría de la Relatividad General. Además, la ciencia somete las hipótesis y conjeturas a contrastación con la experiencia, empleando para ello técnicas muy especiales y sofisticadas, como la espectroscopía, microscopía electrónica o la radiotelescopía. Por todo ello, se ha de aceptar que el sentido común no puede ser en ningún caso el que dirima las cuestiones científicas.

Cuando un científico aborda el estudio de un problema, su mente elabora conjeturas e hipótesis imaginativas, razonables y verificables, y para ello su mente no dispone de otros elementos que el conocimiento que posee. Sin duda esto es bueno y necesario, toda vez que la ciencia es una empresa colectiva en la que unos investigadores se apoyan en los descubrimientos de otros y luego publican sus logros para que otros investigadores puedan apoyarse en ellos. Las grandes teorías no solo son las vertebradoras del conocimiento sino que guían la mente de los investigadores, así, por ejemplo, no hay geólogo que no interprete sus observaciones bajo el prisma de la Teoría de la Deriva Continental, ningún paleontólogo ignora la Teoría de la Evolución de las Especies y no hay químico que no tenga en cuenta la Teoría atómica de la Nube de Carga.

Pues bien, llegados a este punto, obligado es admitir que las formas de pensamiento, las epistemologías y las teorías vigentes en el momento, condicionan necesariamente el pensamiento de los investigadores, no siempre para bien. La historia de la ciencia pone de manifiesto que las teorías, las epistemologías y los esquemas conceptuales han sido en numerosas ocasiones verdaderos obstáculos intelectuales que han impedido el avance de la ciencia. Veamos varios ejemplos:

¹² Materiales formados por carbono puro, con sus átomos organizados en estructuras hexagonales similares al grafito. Por su resistencia superior a la del acero, su ligereza inferior a la del aluminio su flexibilidad y su elevada conductibilidad eléctrica, son materiales utilizados en electrónica, pantallas táctiles, cámaras fotográficas, cables informáticos de alta velocidad, desalinización de aguas, etc.

¹³ Son los extremos de los cromosomas, regiones de ADN no codificante, altamente repetitivas, cuya función principal es la estabilidad estructural de los cromosomas, la división celular y el tiempo de vida de las estirpes celulares. Además están involucradas en enfermedades tan importantes como el cáncer.



Figura 6 Esfera armilar existente en la biblioteca del monasterio de El Escorial.

A finales del S. IV, Agustín de Hipona (354-430) afirmaba que “razón y fe no están necesariamente en oposición” y novecientos años después Tomás de Aquino (1225-1274), máximo exponente del pensamiento escolástico medieval, defendía la coordinación entre la fe y la razón con claro predominio de la primera. Ambos personajes ejercieron gran influencia en el pensamiento medieval y, ciertamente, la epistemología impuesta por ambos supuso un freno para el avance científico.

En la Grecia Clásica, pensadores como Platón y Aristóteles sostenían la idea de que el conocimiento es accesible con exclusividad desde la razón. Este planteamiento epistemológico supuso un fuerte obstáculo al disuadir a los investigadores posteriores de la realización de experimentos y de hacer observaciones sistemáticas. El ya citado Tomás de Aquino fue un gran defensor de las ideas platónicas y aristotélicas, contribuyendo a que la revolución científica de Galileo y su Método Experimental no llegara hasta bien entrado el S. XVII.

La Teoría de los Epiciclos de C. Ptolomeo (90-168 d.C.), que situaba a la Tierra en el centro del universo, pervivió hasta mediados del S. XVI dificultando durante siglos una mejor comprensión de la mecánica celeste. El arraigo de esta forma de pensamiento fue de tal calibre que en 1582 el rey Felipe II recibió un regalo del cardenal Fernando de Médici, consistente en una esfera armilar (un modelo mecánico del sistema ptolemaico del universo) que hoy se conserva en la biblioteca del Real Monasterio de San Lorenzo del Escorial ¡y esto sucedió cuarenta años después de que Nicolás Copérnico publicara su célebre *De revolutionibus orbium coelestium*! Diremos con justicia en favor de los asesores científicos del monarca que el libro de Copérnico había sido incluido en el Índice de los Libros Prohibidos y que por tanto, era prácticamente desconocido.

Otro gran obstáculo intelectual para el avance de la ciencia es el *Pensamiento antropocéntrico*, esto es, la tendencia a interpretar los hechos naturales desde nuestra propia percepción humana con evidente merma de la objetividad. Juzgar los hechos observables desde nuestra propia percepción es lo más natural; lo difícil es juzgar las cosas desde una perspectiva ajena a nosotros. Un claro ejemplo es el mito judeo-cristiano de la creación del universo, descrita en el Génesis, en el que el Dios Creador hace primeramente la luz, después separa las aguas de la tierra seca, posteriormente crea las plantas y los animales y finalmente, como broche de oro de tan magno proceso, Dios crea al hombre. En esta descripción mítica se da una visión secuencial y progresiva de la creación del mundo en la que se sitúa al hombre en la cúspide. Y por si ello no fuera suficiente, en el Capítulo 1, versículo 20 dice: “Llamó, pues, Adán por sus propios nombres a todos los animales, a todas las aves del cielo y a todas las bestias de la tierra...” consolidando así al hombre en la posición de dueño y señor de todo lo creado.

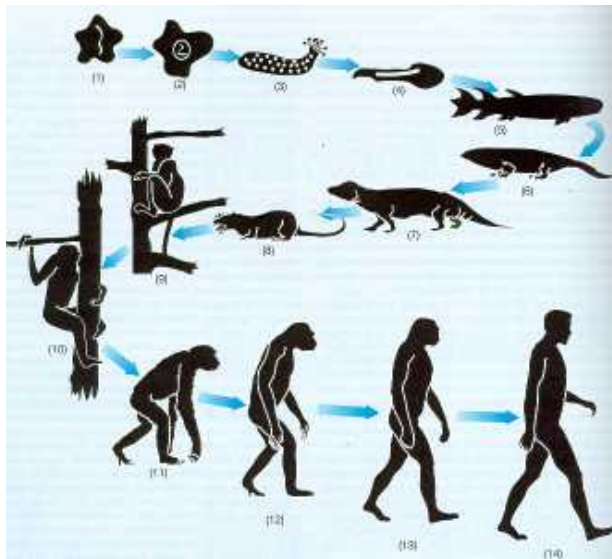


Figura 7 Ilustración perteneciente a un moderno texto divulgativo sobre la evolución de los seres vivos desde una perspectiva fuertemente antropocéntrica.

Incluso en la actualidad, muchos de los textos divulgativos sobre la evolución están afectados de esta forma de pensamiento.

De igual forma, la teoría geocéntrica del universo está fuertemente impregnada de pensamiento antropocéntrico y solo se explica la pertinaz duración de su vigencia por la fuerte propensión de la mente humana para juzgar los hechos desde su propia perspectiva.

El uso frecuente del recurso de accesibilidad puede convertirse en ocasiones en un obstáculo intelectual, así, cuando la mente trabaja en la resolución de algún problema lo primero que hace es acotar y analizar dicho problema;

después, la mente busca en su memoria aquellos conocimientos que pudieran resultar útiles en la construcción de conjeturas e hipótesis que expliquen razonablemente los enigmas estudiados. Ahora bien, la mente es ante todo economista, esto es, de todos los caminos posibles elige en que resulte menos costoso y más eficaz. En consecuencia, de todos los elementos almacenados en la memoria, elige aquel que resulta más fácil de recordar (efecto de *recencia*) o bien aquel que ha dado buenos resultados con más frecuencia (efecto de *recuencia*)¹⁴.

Las *apariencias experimentales* pueden convertirse en un obstáculo intelectual a la hora de hacer ciencia. Recordemos el ejemplo de Claude Bernard, que se trató en las páginas 10 y 11, allí la apariencia experimental era el color rojo claro, común a la sangre arterial y a la sangre intoxicada por el monóxido de carbono. El color claro y sonrosado de los fallecidos por el tufo de los braseros actuó como distractor de la mente de Claude Bernard, llevándole a pensar que “el monóxido de carbono es un tóxico letal porque impide la desarterialización de la sangre”, craso error toda vez que, según hoy sabemos, la sangre de un fallecido por intoxicación de CO no tiene ni un solo miligramo de oxígeno.

Otro ejemplo ilustrativo es la fuerte tendencia de los estudiantes de Biología a contestar equivocadamente a la pregunta “un percebe ¿es un molusco o un crustáceo?” Una gran mayoría consideran un molusco a tan delicioso animal (gastronómicamente hablando) cuando en realidad es un crustáceo. La pertinaz equivocación tiene su origen en el hecho de que un percebe es un crustáceo cuyo cuerpo se encuentra en el interior de un caparazón en forma de uña, y dadas sus condiciones de vida, dispone de un pedúnculo carnoso y flexible con el que se mantiene firmemente unido a la roca. Dado que lo más llamativo del percebe es el pedúnculo carnoso y no el animal que está en el interior del pequeño caparazón, estamos ante una apariencia

¹⁴ Los profesores de física sabemos que ante un problema de Mecánica, los estudiantes tienden a resolverlo por vía cinemática ignorando el Principio de la Conservación de la Energía, debido a que les resulta más fácil sacar de su memoria los conceptos cinemáticos que los energéticos.

experimental que lleva a confusión a los alumnos poco atentos. Sin duda, la textura del pedúnculo sugiere que el percebe sea un molusco, es decir, lleva al error.

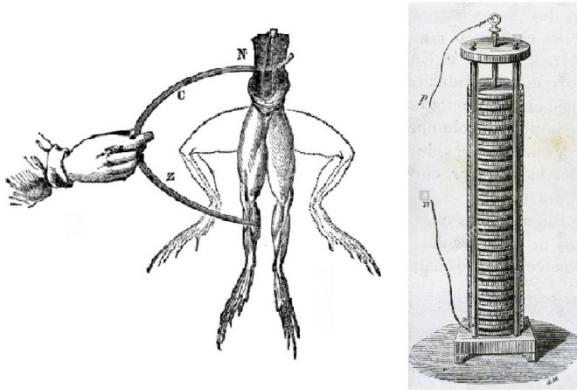


Figura 8 Experimento demostrativo del efecto de la corriente eléctrica sobre los músculos. A la derecha, pila de Volta con la que Galvani realizaba su experimento en los últimos años.

Un tercer ejemplo de cómo una apariencia experimental puede convertirse en un obstáculo causante de errores es el caso de Luigi Galvani (1737-1798). A partir aproximadamente de 1780, Galvani comenzó a incluir en sus conferencias pequeños experimentos prácticos que demostraban a los estudiantes la naturaleza y propiedades de la electricidad. En una de estas experiencias, el científico demostró que, aplicando una pequeña corriente eléctrica, generada por una pila de Volta, a la médula espinal de una rana muerta, se producían grandes contracciones musculares en los

miembros de la misma. De esta forma demostró la existencia de las corrientes nerviosas de naturaleza eléctrica que excitan los músculos. Ahora bien, años antes manipulaba ancas de rana en su laboratorio, las colgaba de un soporte de bronce y accidentalmente tocaba con sus tijeras de hierro el músculo del animal muerto. Sorprendido, observaba que las patas de las ranas se contraían, lo que le llevó a pensar en la existencia de una electricidad animal y a afirmar en aquellos años que “el tejido biológico de las ranas genera una corriente eléctrica propia”. Lo que Galvani ignoraba entonces es que el cobre y el hierro en contacto generan una pequeña diferencia de potencial que es capaz de provocar la contracción muscular.

I.6 EL MÉTODO CIENTÍFICO

En general, un método es un procedimiento para abordar un conjunto de problemas de una determinada naturaleza. Cada tipo de problema requiere un conjunto de técnicas y estrategias apropiado, es decir, un método específico. Normalmente, los problemas de la vida ordinaria requieren de la aplicación de métodos ordinarios basados en el sentido común y en la educación que posee el propio individuo (por ejemplo, mantener el orden en la vida de una familia) otros problemas ordinarios requieren la aplicación de métodos que solo conocen ciertos profesionales (por ejemplo, un coche averiado requiere los métodos que solo conoce un mecánico). Ahora bien, cuando se trata de problemas científicos es preciso poner en juego un conjunto de estrategias y formas de pensamiento que damos en llamar *Método Científico*.

Renato Descartes (1596-1650) publicó en 1637 su gran obra “*Discurso del método para conducir bien la propia razón y buscar la verdad en las ciencias*”¹⁵. En la parte segunda de su libro propone

¹⁵ El propio Descartes manifestó que a su obra la había titulado “Discurso” y no “Tratado” para dejar bien claro que no tenía intención de enseñar sino de hablar. Con esto el autor trata de alejarse de cualquier problema que pudiese surgir con sus contemporáneos por las ideas vertidas en esta obra y además escapa así de una posible condena

cuatro reglas: No admitir jamás cosa alguna como verdadera sin antes contrastar su veracidad, dividir el problema en tantas partes como fuera posible para facilitar su resolución, conducir con orden el pensamiento desde lo más simple hasta lo más completo aunque este no sea el orden natural y, finalmente, hacer recuentos integrales y revisiones generales que aseguren que nada quede omitido.

En la cuarta parte de su libro, Descartes establece el concepto de *duda metódica* ante la evidencia de que el conocimiento accesible a través de los sentidos suele ser erróneo. Propone que si un individuo duda es porque está pensando y si piensa es evidente que existe¹⁶.

En la sexta parte de “El Discurso del Método”, Descartes establece una serie de reflexiones sobre la investigación científica, considera los beneficios materiales y morales que el progreso científico reporta a la sociedad y admite la necesidad de que los científicos comuniquen sus trabajos a otros colegas para que puedan revisar y contrastar sus logros¹⁷.

Como vemos, Descartes es el primer exponente de la filosofía moderna que defiende el escepticismo, el análisis, el pensamiento ordenado, la observación detallada, la ordenación minuciosa, la publicación de trabajos e ideas, la verificación de los trabajos de otros, la colaboración con los colegas... en fin, todo un conjunto de valores que hoy es propio de quienes se dedican al progreso de la ciencia.

Pocos años antes de que Descartes diera a conocer sus ideas, el inglés Francis Bacon afirmaba en su libro *Novum Organum* la necesidad de abandonar la epistemología aristotélica que impregnaba el pensamiento escolástico, hasta entonces vigente en toda Europa. Bacon propone que la inteligencia humana no es suficiente para desentrañar los misterios de la naturaleza y que ha de proveerse de los instrumentos adecuados para acceder al conocimiento. Estos instrumentos son los experimentos, esto es, la reproducción del fenómeno objeto de estudio en condiciones controladas, normalmente en el laboratorio, que permitan la observación objetiva y el estudio de las relaciones entre las variables que intervienen en dicho fenómeno. Bacon insiste en la necesidad de que el investigador se libere de todos aquellos prejuicios que merman la objetividad de sus apreciaciones, los cuales agrupa en cuatro clases¹⁸: *Ídolos de la tribu*, prejuicios comunes a la sociedad y al género humano, como, por ejemplo, la tendencia al pensamiento antropocéntrico. *Ídolos de la caverna*, procedentes de la educación y de los hábitos adquiridos por cada persona, como por ejemplo, el uso indiscriminado de la “regla de tres” sin reparar en la posibilidad de que las magnitudes involucradas en ese cálculo puedan tener una relación de dependencia no lineal. *Ídolos del foro*, nacidos del uso del lenguaje ambiguo, erróneo o impreciso, como por ejemplo, la confusión entre masa y peso, hablar de la “factura de la luz” cuando en realidad es la factura de la energía eléctrica. Finalmente, *Ídolos del teatro*, causados por las falsas filosofías, como por ejemplo, pensar que todo el conocimiento es accesible con un ordenador vía Internet cuando en

eclesiástica, como había ocurrido poco tiempo antes con Galileo y cuyas ideas Descartes no consideraba desacertadas.

¹⁶ De aquí deriva el célebre principio filosófico *pienso, luego existo*.

¹⁷ Sin embargo Descartes fue reacio a la publicación de sus investigaciones, por considerar que éstas podrían verse mezcladas en grandes controversias con el espíritu religioso emanado de los teólogos de la época. Ciertamente, Descartes sentía próximos los casos cruentos de Miguel Servet, Giordano Bruno, Lucilio Vanini y de otros que, sin serlo tanto, pesaron en su ánimo, como los de Nicolás Copérnico y Galileo.

¹⁸ En su libro, Bacon denomina *ídolos* a los prejuicios que pesan sobre la mente. En esta obra, el autor denomina *obstáculos intelectuales* a estos prejuicios.

realidad, para sacar provecho en ese océano que es la web global, se precisa conocer lo más a fondo posible el campo en el que uno se mueve.

Contemporáneo de Descartes y de Bacon fue Galileo Galilei, a quien se atribuye ser el artífice de la Revolución Científica del S. XVII. Considerado como el padre de la física moderna, Galileo asume el modelo heliocéntrico de Copérnico y el pensamiento de Descartes y Bacon. Dejando de lado la invención del telescopio, la observación de la Luna y de los satélites de Júpiter, sus trabajos astronómicos y su enfrentamiento con la Inquisición, nos centraremos en la consagración que él hizo del experimento como parte fundamental del Método Científico.



Figura 9 Dispositivo experimental de Galileo para el estudio del movimiento acelerado (Museo Galileo de Florencia).

Se cuenta que Galileo dejó caer simultáneamente desde lo alto de la torre de Pisa una bola de hierro y una manzana y comprobó que ambos cuerpos llegaban al suelo también simultáneamente. Sus observaciones no concordaban con las previsiones teóricas del momento, según las cuales, la bola de hierro debería llegar antes al suelo que la manzana. Así pues, se propuso estudiar la caída libre de los cuerpos en condiciones controladas que le permitieran reconocer de qué factores depende la velocidad con la que un cuerpo llega al suelo tras haberlo dejado caer libremente desde una cierta altura. Ya en el laboratorio, Galileo comprobó que todos los

cuerpos macizos parecen caer con la misma aceleración, algunos muy ligeros y de gran superficie, como una pluma, sufren una fuerte resistencia a su avance por causa del aire. Este efecto apenas se nota en los cuerpos macizos y pulidos. En sus experimentos se percató de que la aceleración de la caída de una bola por un plano inclinado es máxima si la inclinación del plano fuera máxima y nula cuando el plano estuviera horizontal.

Para su experimento Galileo dispuso un tablón de doce codos de largo con una acanaladura de un dedo de ancho, de bordes muy pulidos, por donde caía una bolita de bronce de superficie también muy pulida. En su caída, la bolita accionaba unas campanillas situadas en unos soportes deslizantes. Comprobó que para conseguir que el tintineo de las campanillas fuese regular, era preciso colocarlas como se aprecia en la Figura 9. Esto significa que la bolita recorre espacios regularmente crecientes en intervalos iguales de tiempo, es decir, cae aceleradamente. El experimento fue repetido una y mil veces para distintas inclinaciones del plano. Pudo comprobar que la aceleración aumenta al incrementar la inclinación y comprobó también que el tiempo invertido en el descenso depende únicamente de la inclinación del plano.

Parece ser que el genial pisano quiso controlar y medir los tiempos, tarea en extremo difícil en una época en la que los relojes mecánicos eran harto imprecisos, en especial para pequeños intervalos.

El Método Científico es el procedimiento para obtener nuevos conocimientos, que ha caracterizado a la ciencia, y consiste en la observación sistemática, experimentación, medición, formulación, análisis y la emisión de hipótesis razonables coherentes con el conocimiento existente. Entre las muy variadas estrategias del método científico están la deducción¹⁹, la inducción²⁰, la abducción, la predicción²¹, la falsabilidad²² y la reproductibilidad de los resultados²³.

El Método Científico supone el desarrollo de un complejo proceso que puede ser resumido en los siguientes pasos:

- Observación. Es la adquisición de información a través de los sentidos que, en el caso de la ciencia, se realiza en el trabajo de laboratorio (ciencias de la naturaleza) o en el trabajo de campo (ciencias de la naturaleza y ciencias sociales).
- Acotación y definición del problema. La observación científica lleva inevitablemente a la formulación de preguntas que no siempre tienen una contestación satisfactoria. En ese momento la pregunta se ha convertido en un problema.
- Emisión de hipótesis. Una hipótesis científica es una conjetura sobre un problema, elaborada por medio de la lógica, que sea coherente con el conocimiento disponible y susceptible de ser verificada.
- Experimentación. Consiste en reproducir el fenómeno enigmático objeto de estudio en el laboratorio en condiciones controladas, eliminando o introduciendo aquellas variables que puedan influir en él. Normalmente se modifica el valor de una variable llamada “independiente” y se estudia la evolución provocada en el valor de otra llamada “dependiente”, de esta forma se puede conocer la naturaleza de la relación entre ambas.
- Medición. Medir es comparar el tamaño de una magnitud con una cantidad discreta de esa magnitud, consensuada por la comunidad científica, llamada “unidad. La medición es absolutamente necesaria en la experimentación para la obtención de datos cuantitativos.
- Análisis de resultados y extracción de conclusiones. Los datos experimentales, tanto cualitativos como cuantitativos, han de ser analizados y estudiados con el fin de comprobar si son coherentes con las hipótesis de partida. En caso afirmativo la hipótesis queda validada y en caso contrario será preciso elaborar una nueva hipótesis para volver a repetir el ciclo.
- Arbitraje. Es un proceso social en el que el trabajo hecho por el investigador en los anteriores pasos es sometido a evaluación por parte de las instituciones científicas (Institutos, revistas, congresos, etc.) sobre su originalidad, rigor y trascendencia.
- Publicación. Es el último paso del proceso y consiste en dar a conocer a la comunidad científica los logros alcanzados en las anteriores etapas.

¹⁹ Una deducción es un proceso mental en el que la conclusión se infiere necesariamente de las premisas.

²⁰ Forma de razonamiento en el que la veracidad de las premisas apoya la veracidad de la conclusión, pero no la garantiza.

²¹ Predicción científica es anunciar o conjeturar algo que ha de suceder basándose en el conocimiento.

²² Capacidad de una teoría o hipótesis de ser sometida a potenciales pruebas que la contradigan

²³ es la capacidad de una prueba o experimento de ser reproducido o replicado por otros, en particular, por la comunidad científica.

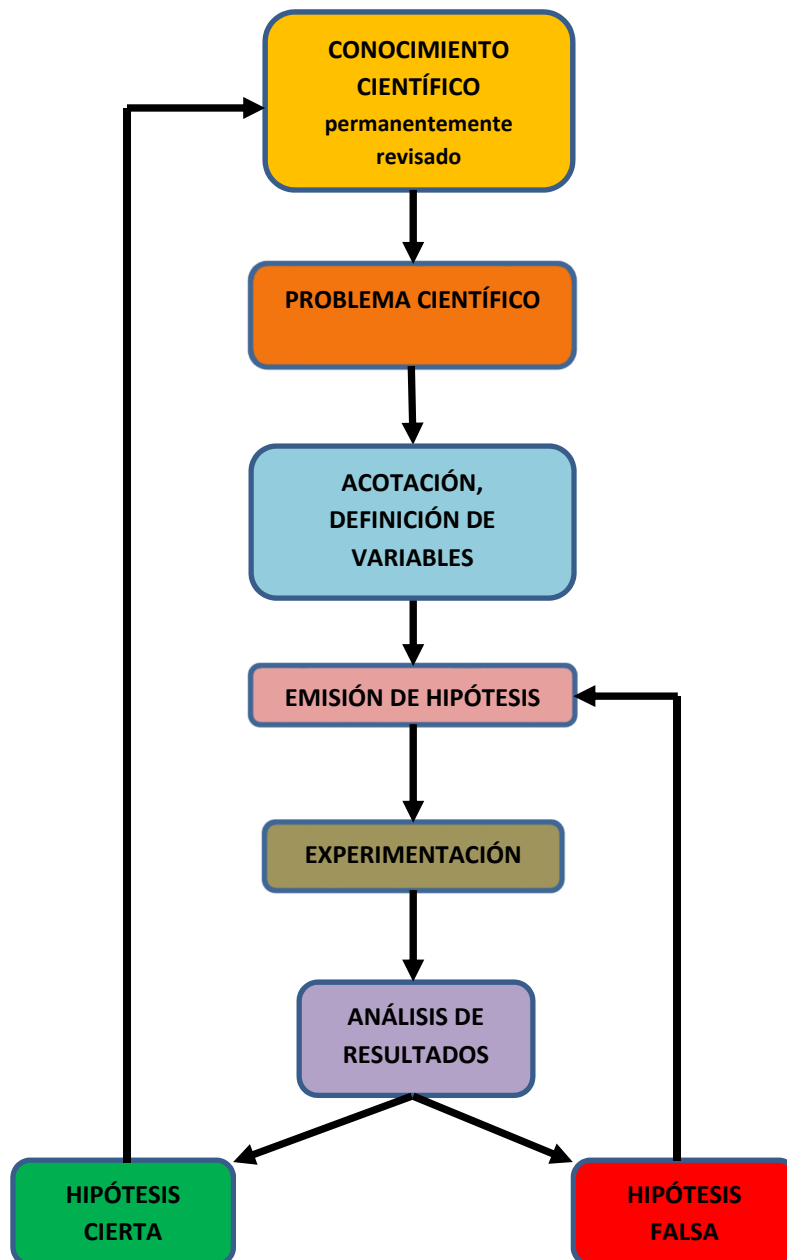


Figura 10 Esquema simplificado del *Método Científico*

Hemos de aceptar que el panorama de la ciencia actual es tan extenso como variado. Las ciencias físico-químicas, de carácter fuertemente experimental, presentan importantes diferencias con las ciencias naturales y no digamos estas con las ciencias sociales. Por otro lado, hay ciencias que no requieren observación ni experimentación, como es el caso de la Filosofía y la Matemática. Por tanto es obligado aceptar que cualquier intento de esquematizar el método científico, como se ha hecho en la p. 18 y en la figura 8 conduce necesariamente a una visión sesgada y parcial del mismo. Igualmente, reducir el método científico a un conjunto de reglas es otro error y no cabe esperar que la aplicación estricta de esas reglas pueda sustituir con ventaja a la capacidad de formular preguntas sutiles y creativas, el ingenio en construir teorías sólidas y profundas y la destreza en arbitrar contrastaciones.

Realmente, los científicos se han preocupado poco por la sistematicidad de las reglas del método científico. Más bien adoptan una actitud de ensayo-error respecto de las reglas de la investigación, y las que les resultan más eficaces, se incorporan sin más en su trabajo diario tan implícitamente que ni siquiera son conscientes de ello.

I.7 TÁCTICAS DE LA CIENCIA

Ciertamente el *Método Científico* es la estrategia de la investigación científica, ahora bien, la puesta en práctica de cada una de las reglas y operaciones que hemos tratado en el epígrafe anterior depende sobremanera del tema objeto de estudio y del estado del conocimiento disponible sobre ese tema. Así, por ejemplo, los instrumentos que utiliza un historiador para contrastar la veracidad de un documento no tienen validez alguna para un físico, pese a que ambos buscan la verdad por medio de una única estrategia: el método científico. De igual forma, los métodos utilizados por Jane Goodall durante sus 55 años estudiando la etología de los chimpancés en el Parque Nacional Gombe Stream de Tanzania, poco tienen que ver con los empleados por un bioquímico que estudia en el laboratorio de un gran instituto a los chimpancés como posibles causantes o transmisores del sida.

Así pues, no hay diferencia de metodología entre las diferentes ciencias, más bien hay diferencias entre las distintas tácticas usadas en la resolución de los distintos problemas, y tan es así que Bunge²⁴ (1983) define una “*ciencia como una disciplina que utiliza el método científico con la finalidad de hallar estructuras generales (leyes)*”. Si nos atenemos a esta definición no debemos considerar ciencias a aquellas disciplinas que sin ajustarse al método científico se limitan a aportar datos, como es el caso de la Informática y la Geografía, entre otras.

Actualmente el saber humano es muy extenso y variado, son muchas y muy distintas las ciencias reconocidas y no digamos la variedad de problemas que un investigador se puede plantear. En consonancia con esta diversidad, las técnicas utilizadas en el método científico constituyen hoy una interminable y variopinta lista que, eso sí, puede resumirse en dos grandes grupos:

-Técnicas científicas *conceptuales*. Son aquellas que permiten enunciar problemas e hipótesis con precisión, arbitrar procedimientos para deducir consecuencias a partir de las hipótesis y verificar si dichas hipótesis resuelven los problemas correspondientes. Tal es el caso de la matemática, que provee los mejores y más potentes recursos para la ciencia (álgebra, geometría, trigonometría, estadística, cálculo infinitesimal, etc.).

-Técnicas científicas *empíricas*, que permiten llevar a cabo experimentos y realizar observaciones y mediciones. Tal es el caso de la microscopía, la espectroscopía, la RMN o la gammagrafía.

Hay otras técnicas universales cuyo origen está en la vida ordinaria y por ello, son fácilmente comprensibles. Consideraremos tres: El cuestionario ramificado, los procedimientos iterativos y el muestreo al azar.

²⁴ BUNGE, M. (1983) *La investigación científica*. p. 32 Ed. Ariel, S.A. Barcelona.

El *Cuestionario ramificado*. Cuando en un problema existen un número determinado de posibilidades, la mejor táctica resolutoria consiste en dividir las paso a paso en dos subconjuntos recíprocamente disjuntos, esto es, cualquiera de las posibilidades estaría obligatoriamente en uno u otro subconjunto.

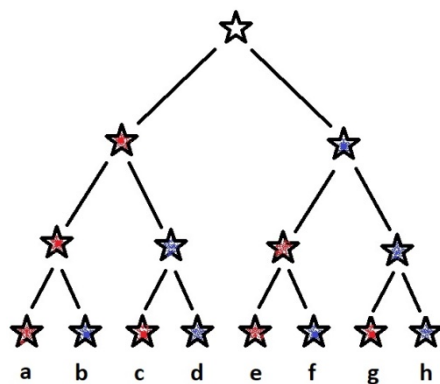


Figura 11 Aplicación de un cuestionario ramificado para un conjunto inicial de 8 objetos.

Llega un momento en el que la posibilidad buscada se encuentra a través de un número mínimo de preguntas. Sea el caso de un conjunto de 8 posibilidades (Figura 11), por un errático procedimiento de ensayo-error necesitaríamos siete operaciones (preguntas: ¿es a? ¿es b? ...) para discernir una posibilidad de las siete restantes. En cambio, si dividiéramos el conjunto de posibilidades en dos subconjuntos basados en los colores rojo y azul, para después dividir cada subconjunto en dos nuevos igualmente disjuntos y de nuevo hacer una tercera división con el mismo criterio de los dos colores, necesitaríamos tan solo tres

operaciones (¿es rojo o azul?) para identificar una de las ocho posibilidades de entre las demás. En general, si el número de posibilidades fuera N, bastaría realizar un número de preguntas $n = \log_2 N$

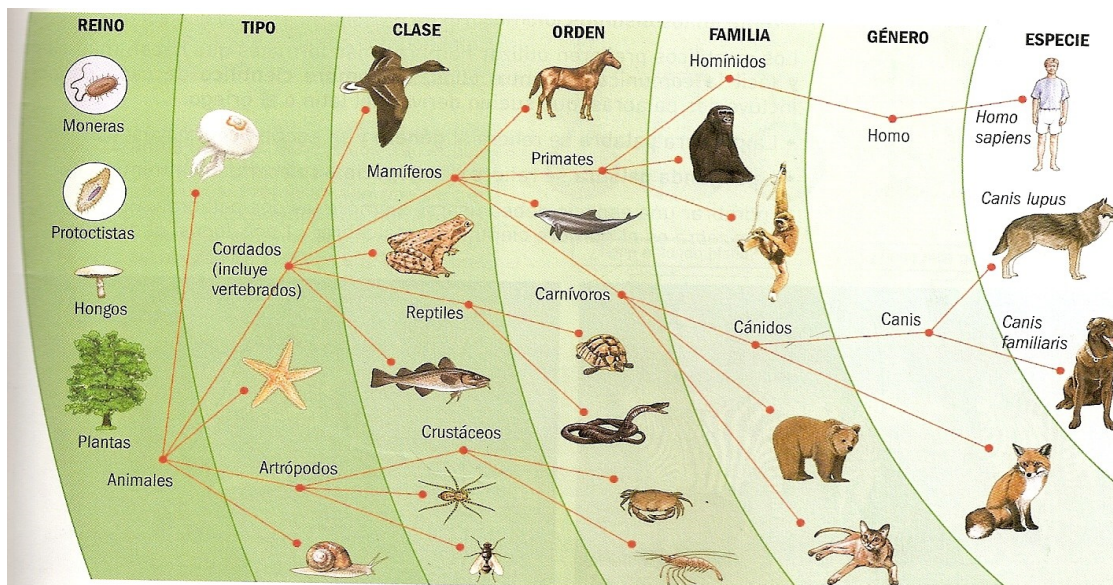


Figura 12 Ilustración de la estructura de la clasificación linneana de los seres vivos.

La técnica del cuestionario ramificado es muy utilizada por los naturalistas cuando se trata de identificar una especie desconocida. La clasificación linneana de los seres vivos (ver la figura 12) se articula en grandes agrupaciones o reinos (moneras, protocistas, hongos, plantas y animales) los cuales se subdividen en tipos y estos a su vez vuelven a dividirse en clases (grandes grupos de seres vivos que comparten un buen número de caracteres).

Las clases se subdividen en órdenes (por ejemplo, la clase de los mamíferos se divide en varios órdenes, siendo uno de ellos los carnívoros) y estos en familias (los cánidos, los úrsidos y los félidos

son familias pertenecientes al orden de los carnívoros). A su vez, las familias se dividen en géneros y estos en especies. Así, por ejemplo el lobo *canis lupus* y el perro *canis familiaris* son dos especies que pertenecen al género de los cánidos. Dada la enorme variedad de seres vivos existentes²⁵ está fuera de toda duda que hay que recurrir al uso del cuestionario ramificado para discernir por medio de unas pocas operaciones o preguntas entre este elevadísimo número de posibilidades. Veamos un ejemplo:

PREGUNTA	RESPUESTA	CONCLUSIÓN
¿a qué reino pertenece?	animal	
¿tiene esqueleto? ¿cómo es?	Tiene endoesqueleto y columna vertebral	Es un cordado
¿cómo es su cobertura externa? ¿forma de reproducción?	Tiene pelo, es vivíparo y mama	Es un mamífero
¿cómo son sus dedos? ¿cómo es su visión?	Pentadáctilo. Visión estereoscópica y tricrómica	Es un primate
¿tamaño craneal? Estática corporal?	Capacidad craneal elevada. Posición bípeda	Es un homínido
¿cómo es el cráneo? ¿y el esqueleto?	Braquicéfalo, mentón pequeño, osamenta ligera.	Es un Homo Sapiens

-*Procedimientos iterativos*. Básicamente consisten en repetir varias veces un proceso con intención de alcanzar una meta deseada. Cada repetición del proceso se llama "iteración" y los resultados de una iteración se utilizan como punto de partida para la siguiente. La iteración matemática se refiere al proceso de iteración de una función repetidamente, usando la salida de una iteración como entrada de la siguiente; con frecuencia se usa para generar soluciones numéricas aproximadas a ciertos problemas matemáticos.

Veamos como ejemplo el Método de Newton: Supongamos que se trata de una función $y=f(x)$ de la que se sabe que tiene una raíz x_0 desconocida²⁶ en el intervalo comprendido entre x_a y x_b . Eso significa que la gráfica de dicha función corta al eje x en el punto x_0 desconocido. Forzoso es admitir que todos los puntos de la curva cuya abscisa esté comprendida entre x_0 y x_a han de tener ordenada positiva y aquellos cuya abscisa esté comprendida entre x_0 y x_b la tendrán negativa. Así pues:

Primera iteración (color rojo): trazamos una recta de **a** hasta **b**, la recta cortará al eje de abscisas en x_1 cuya ordenada puede valer 0 en cuyo caso el problema está resuelto, pero puede ser negativa o positiva.

Segunda iteración (color verde): unimos los puntos 1 y a, hallamos el corte x_2 y determinamos su ordenada, la cual puede ser positiva o negativa.

²⁵ Se estima que en el planeta hay unos 7,7 millones de especies entre las cuales hay 1,9 millones catalogadas siendo 1,5 millones animales, los hongos y líquenes suman unas 100.000 especies, las plantas suman otras 124.000 especies, los protistas suponen 55.000, las bacterias 10.000 y los virus 3.200

²⁶ Se llama raíz x_0 de una función $y=f(x)$ al valor de x para el que y vale 0, es decir, $f(x_0)=0$

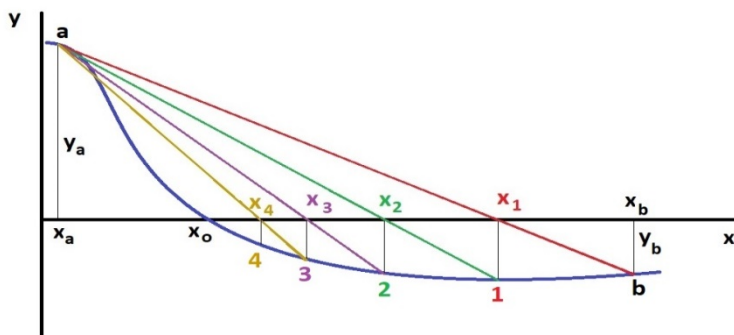


Figura 13 Representación gráfica del método iterativo de Newton para encontrar la raíz de una función $f(x)$. En colores rojo, verde, magenta y ocre se representan las cuatro primeras iteraciones.

Tercera iteración (color magenta): unimos los puntos 2 y a , hallamos el corte x_3 y determinamos su ordenada, que puede ser negativa o positiva.

Cuarta iteración (color ocre): se repite de nuevo el proceso empleando como punto de partida la solución anterior y se obtiene la abscisa x_4 etc.

Como vemos, los valores de x que se van obteniendo tras sucesivas repeticiones son cada vez más próximos al valor deseado x_0 .

El empleo de computadores cada vez más rápidos y potentes, capaces de repetir millones de veces en un tiempo récord complejas y costosas operaciones ha determinado que el empleo de los métodos iterativos sea usado en un amplísimo espectro de situaciones y problemas científicos.

-La tercera técnica universal de la ciencia es el *Muestreo Estadístico*, esto es, la selección de una muestra a partir de una población. Con frecuencia el científico se encuentra ante un gran conjunto de elementos o individuos de los cuales desea estudiar una o varias características. Si el número de elementos es muy elevado, el estudio de todas y cada una de las individualidades es imposible. Así pues, lo práctico es seleccionar un subconjunto de elementos que sea suficientemente representativo de la población, para estudiar un número razonable de individuos, con la pretensión de que los resultados obtenidos sean extrapolables a toda la población. A este subconjunto se le llama *muestra* y a la técnica de selección de la muestra se llama *muestreo*.

Cuando la población es extensa y homogénea se utiliza el *muestreo sistemático*, consistente en coger las muestras al azar en distintas partes de la población. Tal sería el caso de un ornitólogo que estudiase la masa corporal de los estorninos de una determinada región. Durante varias temporadas cazaría con sus redes centenares de individuos que pesaría y luego dejaría en libertad. Ahora bien, puede suceder que la población estudiada no sea homogénea, en cuyo caso es preciso parcelar o estratificar la población y tomar muestras por igual en todos y cada uno de los sectores de la población. En este caso estaríamos hablando de un *muestreo estratificado*. Un ejemplo sería el caso de un oceanógrafo que estudiase el plancton de una determinada zona marítima. Dado que la composición del plancton varía con la profundidad, sería necesario tomar muestras sistemáticamente a diversas profundidades para luego, finalmente, sacar conclusiones globales.

I.8 OBSERVACIÓN CIENTÍFICA

El procedimiento básico e inicial de la ciencia en su afán por acceder al conocimiento es la *observación* de los objetos, esto es, todo aquello que puede ser tema del pensamiento o acción del científico. Existe una variada gama de ciencias, unas se ocupan de las ideas, otras de los hechos naturales y otras de los hechos culturales.

Ante tanta variedad, los objetos de estudio de las diversas ciencias han de ser, por fuerza, muy dispares y por tanto los métodos y estrategias también han de serlo.

Observar es algo consustancial con el ser humano. Cualquiera ante un bello paisaje o ante una obra de arte se deleita en la contemplación y se deja llevar de los sentimientos o emociones que tal contemplación suscitan, pero no es de esto de lo que hablamos aquí. La observación científica difiere sustancialmente de la mera contemplación porque es intencionada e ilustrada, esto es, porque se hace con un objetivo determinado y está guiada por el conocimiento. Dicho de otro modo, la investigación científica se caracteriza por ser selectiva e interpretativa. Así, por ejemplo, un naturalista aficionado registrará montones de hechos que serían irrelevantes para el biólogo profesional en su trabajo de campo. Con seguridad, este último anotaría unas pocas observaciones que habrían pasado inadvertidas al lego en la materia por falta de un objetivo determinado, ya que ese objetivo no puede venir dado sino por un sistema conceptual. Si no tenemos ideas ni objetivos, no podremos registrar nada o bien registraríamos todo cuanto cayera en nuestro horizonte perceptual, y ni en uno ni en otro caso sería relevante para la ciencia.

En el proceso de observación cabe distinguir cinco elementos esenciales: el *objeto* de la observación, el *sujeto* u observador, las *circunstancias* de la observación, los *medios* de observación y el cuerpo de *conocimiento* en el que están relacionados los anteriores. Evidentemente es muy distinta la observación que hace un astrónomo de la que hace un ornitólogo y de la que hace un sociólogo. El primero lo hace en la sala de un observatorio haciendo uso de un sofisticado y costoso material, el segundo lo hace a campo abierto poniendo en práctica ingeniosas técnicas de captura, registro de imagen y sonido, etc. en tanto que el tercero utiliza técnicas específicas de muestreo, encuesta y entrevista.

Si bien la observación es el primer estadio en el avance del conocimiento, no menos cierto es que hay ocasiones en las que la observación ha dado lugar directamente a las más grandes construcciones teóricas de la historia de la ciencia. Tal es el caso de los trabajos de Charles Darwin y Alfred Wallace, cuyas observaciones les permitieron proponer la *Teoría de la Evolución de las Especies*, uno de los cuerpos teóricos que más han influido e influyen en el pensamiento humano. Igualmente, hemos de citar las observaciones de Alfred L. Wegener, creador de la Teoría de la Deriva Continental, base de la moderna Geología.

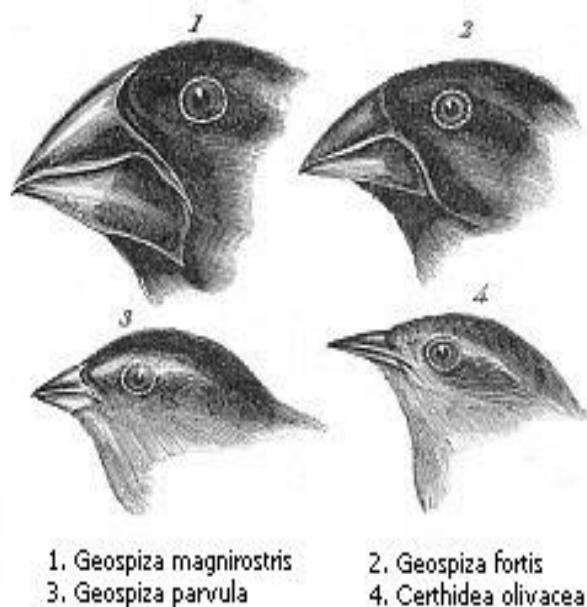
I.9 DARWIN Y WALLACE: LA OBSERVACIÓN CIENTÍFICA CONVERTIDA EN UNA GRAN TEORÍA

Si bien en los siglos XVI y XVII hubo grandes expediciones, principalmente de cuenta de Portugal y España, hubo que esperar al S. XVIII para que, en la corriente de la Ilustración que afectaba a Europa, se acometieran empresas en las que, además del interés económico y militar, se sumara el científico. Hasta entonces los móviles de los grandes viajes se resumían en tres conceptos: Dios,

gloria y oro. El siglo XVIII fue el escenario de memorables viajes como el de Louis Antoine de Bouganville, James Cook o Alejandro Malaspina, entre otros muchos. Por entonces irrumpió en el seno de las sociedades ilustradas el interés por la naturaleza, por lo exótico y paralelamente surgieron en las grandes ciudades europeas las sociedades científicas, las grandes colecciones y los museos de ciencias naturales. Es el siglo en el que Karl Nilson Linneo recorre Laponia observando in situ animales y vegetales y recogiendo centenares de muestras que, tras su estudio le permitirían idear una clasificación y un método de nomenclatura binomial para los seres vivos. Es también el siglo en el que Georges Cuvier, considerado como el padre de la Paleontología, observa que los fósiles de una misma especie que se encuentran en estratos diferentes presentan pequeñas diferencias morfológicas, sugiriendo así la existencia de un proceso evolutivo. En 1770 Jean Baptiste Lamarck publica su obra *Filosofía Zoológica* en la que da a conocer su teoría evolutiva que resume en dos leyes:

Primera ley: “En todo animal que no ha traspasado el término de sus desarrollos, el uso frecuente y sostenido de un órgano cualquiera lo fortifica poco a poco, dándole una potencia proporcionada a la duración de este uso, mientras que el desuso constante de tal órgano le debilita y hasta lo hace desaparecer”.

Segunda ley: “Todo lo que la Naturaleza hizo adquirir o perder a los individuos por la influencia de las circunstancias en que su raza se ha encontrado colocada durante largo tiempo, y consecuentemente por la influencia del empleo predominante de tal órgano, o por la de su desuso, la Naturaleza lo conserva por la generación en los nuevos individuos, con tal de que los cambios adquiridos sean comunes a los dos sexos, o a los que han producido estos nuevos individuos”.



Pinzones de las islas Galápagos

Figura 14 Dibujos de las cuatro variedades de pinzones de las islas Galápagos en los que se aprecia el efecto evolutivo del aislamiento insular.

Ya en el siglo XIX, más en concreto en 1831 zarpaba del puerto de Plymouth el HMS Beagle para realizar un viaje que duraría 5 años alrededor del mundo, recorriendo las costas de Brasil, Patagonia, Chile, Perú y Ecuador para luego adentrarse en el Pacífico llegando a las costas de Australia y volver bordeando Madagascar y Sudáfrica. La misión de la expedición era fundamentalmente científica; se trataba de medir corrientes oceánicas y cartografiar costas. En aquella expedición se había embarcado un joven experto en entomología, botánica e invertebrados marinos que desde niño se había sentido fuertemente atraído por la Historia Natural y el coleccionismo de animales y plantas. Charles Darwin era por entonces estudiante de medicina, poco convencido por una vida de hospitales y enfermos, que prefería los trabajos de campo y la observación de la naturaleza. Su misión consistía en recoger muestras geológicas,

botánicas y zoológicas en todos aquellos puntos en los que el bergantín fondeara. Dichas muestras eran preparadas y estudiadas por el propio Darwin para luego ser enviadas periódicamente a Cambridge junto con los correspondientes informes.

En las costas patagónicas encontró fósiles de enormes mamíferos extinguidos. Estos hallazgos le proporcionaron la primera evidencia fósil de la mutabilidad de las especies y marcaron el inicio de la elaboración de su *Teoría de la Evolución*. Ya en las costas chilenas observó valvas de mejillones por encima de la línea de la marea alta y conchas de moluscos fósiles de árboles costeros en las alturas de los Andes, indicio inequívoco de la existencia de procesos geológicos de elevación y depresión del terreno. Más al norte, en las islas Galápagos, geológicamente jóvenes, encontró variedades de pinzones emparentados con los continentales cuya morfología variaba de isla a isla, e igual pasaba con los caparzones de las tortugas. En Australia las ratas marsupiales y los ornitorrincos le parecieron tan extraños que llegó a pensar que era como si “dos creadores hubieran obrado a la vez, independientemente”. Más adelante, ya en aguas atlánticas, Darwin escribía en sus informes que, por sus observaciones, albergaba fundadas sospechas de que la Teoría de la Estabilidad de las Especies” podría ser errónea.

Diecisiete años después de que el HMS Beagle zarpara hacia su memorable viaje, Alfred R. Wallace iniciaba su famoso viaje a bordo del *Mischief* junto a otro naturalista llamado Henry Bates. La expedición se dirigió a las costas de Brasil con la finalidad primordial de recolectar insectos y otros animales en la selva amazónica y venderlos a coleccionistas en el Reino Unido. También esperaban poder obtener evidencias sobre la transmutación de las especies. Cuatro años más tarde, a su vuelta al Reino Unido, el navío de Wallace sufrió un incendio y se hundió, perdiéndose así todas las colecciones que el naturalista había reunido. Sólo se salvaron su diario y varios dibujos. Pasados otros dos años, Wallace partió en dirección al archipiélago malayo, región que recorrería observando y recolectando muestras durante ocho años. Sus observaciones de las marcadas diferencias zoológicas entre diversas partes del archipiélago le llevaron a proponer una frontera zoogeográfica conocida como *línea de Wallace*. Mientras exploraba el archipiélago, Wallace cambió sus ideas sobre evolución y empezó a plantearse la teoría de selección natural. En 1858, envió a Darwin un artículo describiendo la teoría, el artículo fue publicado, junto a una descripción de la teoría de Darwin, en ese mismo año y de él llegó a decir Darwin: “Jamás vi coincidencia más impresionante; ¡si Wallace tuviera mi borrador escrito en 1842, no habría podido realizar un resumen mejor!”.

La historia no ha tratado bien a Wallace, toda vez que popularmente se considera a Darwin como el padre de la Teoría de la Evolución de las Especies de igual forma a como se considera a Newton respecto de la Teoría de la Gravitación Universal. Se comete así un agravio a quien llegó a las mismas conclusiones al mismo tiempo y por procedimientos de observación iguales.

De todos modos es preciso señalar que existen sutiles diferencias en el planteamiento de la teoría según se trate de Darwin o de Wallace. Darwin enfatizó en la competición entre individuos de la misma especie para sobrevivir y reproducirse, mientras que Wallace dio una mayor importancia a la influencia del medio para forzar a las especies a adaptarse al entorno local y entendió la selección natural como un mecanismo de retroalimentación que mantiene a las especies adaptadas al entorno.



Figura 15 Línea imaginaria de Wallace que separa la región australiana de la asiática. A uno y otro lado se encuentran animales y vegetales de una misma especie que difieren significativamente, debido al aislamiento geográfico. Este hecho fue determinante para la elaboración de la Teoría de la Evolución.

La Teoría de la Evolución de las Especies suscitó una fuerte controversia a finales del S. XIX y fue objeto de encendidos debates entre los evolucionistas y los fijistas anclados en el pensamiento aristotélico y la mitología judeocristiana. Las ideas darwinianas han obligado a reinterpretar a fondo los textos sagrados y las posturas tradicionalistas sobre la creación, el origen de los seres vivos y de nosotros mismos como especie zoológica. A partir del S. XX la teoría es universalmente aceptada y guía desde entonces el pensamiento no solo de los científicos sino de toda la población, hasta el punto de formar parte del “sentido común”. Darwin y Wallace son sin duda unos los científicos que más han influido en el pensamiento colectivo. Finalmente, hemos de señalar que la sociedad ha colmado de gloria y honores a Darwin olvidando injustamente a Wallace. Quizá ello se deba a que falleció a los 90 años en su casa de campo de Broadstone y si bien la prensa informó ampliamente de su muerte y sus amigos sugirieron que fuera enterrado en la abadía de Westminster, junto a Darwin, su viuda siguió fielmente los deseos del difunto e hizo que fuera enterrado en Broadstone. Finalmente, en 1915 se puso en su honor un medallón conmemorativo junto a la tumba de Darwin.

I.10 PROBLEMAS CIENTÍFICOS

El talento científico se mide por la capacidad de percibir novedad, de ver nuevos problemas e incluso de inventarlos. Es tarea del científico el asumir y conocer problemas que otros pueden haber planteado, insertarlos en el cuerpo de conocimiento e intentar resolverlos con el máximo rigor. Así, por ejemplo, una antiquísima moneda encontrada en un yacimiento arqueológico puede ser una pieza codiciada económicamente por un anticuario, un estímulo de sensaciones para un aficionado al arte y una valiosa pieza para un coleccionista, ahora bien, para un arqueólogo esa moneda es un objeto significativo como testimonio de una civilización extinguida y con seguridad le planteará un conjunto de preguntas y problemas a los que seguirá un estudio minucioso y, quizá, algunas conclusiones de valor científico.

Ciertamente, los problemas son los motivos de la actividad científica y el nivel de la investigación se halla en proporción a la dimensión de los problemas que maneja. A su vez, la selección de problemas está determinada por el estado del conocimiento, particularmente por sus lagunas, y por las posibilidades metodológicas. Cuando el conocimiento subyacente a un problema es escaso, este no puede plantearse sino vagamente, siendo entonces difícil el poder resolverlo. He aquí la razón por la que las ciencias del hombre están aún manejando problemas relativamente modestos, estando las cuestiones más profundas en manos de los pseudocientíficos, ya que los científicos no disponen del marco teórico adecuado para plantear correctamente esos problemas profundos.

Para que un problema científico esté bien formulado han de darse cuatro condiciones necesarias y suficientes: a) Ha de existir un cuerpo de conocimiento (datos, teorías, técnicas) en el que pueda insertarse el problema, b) El problema ha de estar bien formulado, c) Ha de estar bien acotado y d) El problema debe de estar bien concebido de modo que sus presupuestos no sean falsos o no decididos.

Desde que Galileo construyera en 1610 sus primeros anteojos astronómicos y diera a conocer sus observaciones sobre la Luna, la Vía Láctea, los satélites de Júpiter y los anillos de Saturno, entre otros muchos hallazgos, el interés por la observación astronómica experimentó una fuerte eclosión. Cincuenta y ocho años más tarde, Isaac Newton construyó los primeros telescopios reflectores que permitían mayores aumentos que los anteojos refractores, por no sufrir el problema de la aberración cromática²⁷. A partir de este momento, los instrumentos de observación astronómica fueron aumentando en número, potencia óptica, definición y eficiencia, de forma tal que en los siglos XVII y XVIII fueron numerosos y trascendentes los descubrimientos y avances técnicos en astronomía. Así, en 1682 Edmund Halley descubrió el más célebre cometa, que lleva su nombre, y pronosticó su vuelta 76 años más tarde²⁸. James Bradley descubre ya en el S. XVIII la aberración de la luz²⁹ y el movimiento de *nutación*³⁰ del eje de rotación terrestre. William Herchel (1738-1822) perfeccionó los telescopios reflectores y descubrió en 1781 el planeta Urano³¹. Sin duda el descubrimiento de Herchel era algo muy notable, pero lo verdaderamente extraordinario del hecho fue el problema científico que el descubrimiento de Neptuno supuso.

Años antes, otros astrónomos habían observado a Urano pero lo habían confundido con una estrella fija. La explicación de estos “errores” radica en el hecho de que la velocidad de traslación del planeta es extraordinariamente lenta³² debido a la enorme distancia que le separa del Sol. Tras el descubrimiento del nuevo planeta, las observaciones del mismo fueron sistemáticas y

²⁷ Cuando las lentes de un instrumento óptico tienen excesiva curvatura, los bordes de las imágenes pierden nitidez por aparición de irisaciones tipo “arco iris”. Esto sucede cuando se pretende que el instrumento tenga muchos aumentos. Esto limita la potencia útil de los anteojos. Sin embargo los telescopios, al no tener lentes sino espejos cóncavos, este problema no existe.

²⁸ El cometa Halley volvió a aparecer en la navidad de 1758, pero su descubridor no pudo verlo ya que había fallecido en 1742.

²⁹ Diferencia entre la posición observada de una estrella y su posición real, debido a la combinación de la velocidad del observador y la velocidad de la luz.

³⁰ Se llama así al ligero movimiento oscilatorio experimentado por el eje de rotación de la Tierra, que se sobrepone al movimiento de precesión.

³¹ Herchel denominó así al nuevo planeta siguiendo la tradición astronómica de poner nombres de los dioses grecolatinos a los planetas. Se llama así en honor de la divinidad griega del cielo Urano, el padre de Crono (Saturno) y el abuelo de Zeus (*Júpiter*).

³² El año sideral de Neptuno equivale a 164 años, 288 días y 13 horas terrestres.

exhaustivas. Pronto las discrepancias entre las posiciones observadas para el planeta y las previstas según las leyes del movimiento y de la gravitación de Newton, llegaron a constituir un serio problema científico que por el momento, no tenía solución.

En esta situación un joven astrónomo, John C. Adams, y un matemático francés, Urban Le Verrier, acometieron por separado la tarea de calcular la posición de un cuerpo de gran masa que estuviera

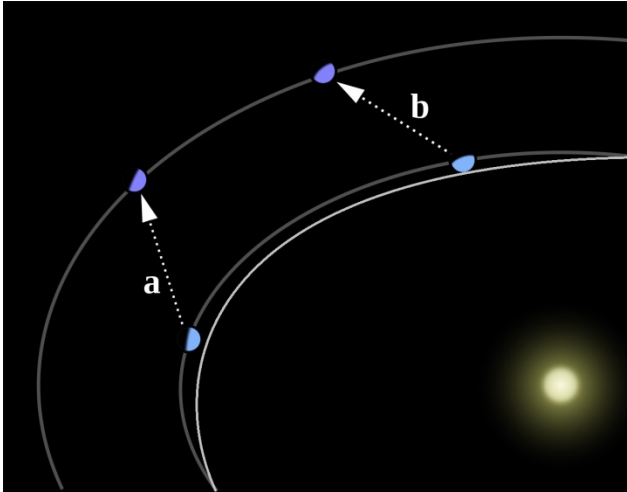


Figura 16 Esquema explicativo de la solución que Adams y Le Verrier dieron a las anomalías de la órbita de Urano. En color claro se muestra la órbita teórica. La acción gravitacional de Neptuno provoca un aumento del radio de la órbita de Urano y modifica su velocidad de traslación aumentando en la posición **a** y disminuyendo en la posición **b**.

más alejado del Sol que Urano y que fuera capaz de deformar la órbita de este. Todo ello lo harían partiendo de los datos obtenidos en las observaciones del planeta Urano, recopiladas en tablas astronómicas. Como vemos, se trataba de calcular los datos de una causa a partir de los datos de sus efectos, es decir, se trataba de resolver un problema “inverso”³³.

Pero ¿por qué a ambos científicos se les ocurrió semejante idea? En sus razonamientos ambos pensaban que si Urano era el planeta más externo del sistema solar, es decir, si según el conocimiento de entonces no había cuerpo celeste alguno más allá del citado planeta, la acción única acción gravitacional que este podía recibir sería la del sol y el resto

de los planetas. Ahora bien, los hechos experimentales revelaban con contundencia que Urano orbitaba en ciertas ocasiones más lejos del Sol de lo que teóricamente le correspondía. Hasta aquí, Adams y Le Verrier tenían el problema bien definido y acotado.

A continuación, cada uno por su cuenta, elaboraron la hipótesis científica que, de ser validada, daría respuesta satisfactoria al problema, y dicha hipótesis consistió obviamente en proponer que más allá de Urano debería haber un planeta hasta entonces desconocido, de masa suficientemente grande como para atraer gravitacionalmente a Urano deformando su órbita como se muestra en la figura 17.

Así pues, Adams y Le Verrier acometieron la tarea de calcular, a partir de los datos de las posiciones “anómalas” de Urano, la masa y posición de ese supuesto planeta. Ese cálculo no es hoy en día de gran dificultad gracias a los potentes ordenadores de que se dispone pero a mediados del S. XIX era realmente una larga y penosa empresa. Tanto Adams como le Verrier publicaron los resultados de sus cálculos en los primeros meses de 1846. En dichos resultados ambos daban las posiciones que en distintas fechas debería ocupar el hipotético astro. Ahora bien, los cálculos del francés fueron más precisos que los del inglés y así, mientras en el observatorio de Cambridge se afanaban en identificar el nuevo planeta en las posiciones predichas por Adams, en el observatorio de Berlín

³³ La historia de la ciencia registra numerosas ocasiones en las que la resolución de un problema planteado al revés ha reportado pingües beneficios.

el astrónomo Johann Gotfried Galle encontró el nuevo planeta en la posición que había predicho Le Verrier. Era la noche del 23 de septiembre de aquel año.

I.11 HIPÓTESIS

En el ideario común se tiene una imagen distorsionada de los científicos como personajes extraños, pintorescos y un tanto locos que llevan una vida aislada, enfrascados en su propio mundo. Como todo ser humano, el científico se hace preguntas y utiliza su intelecto para dar contestación a esas preguntas, pero va más lejos que el resto de los mortales. El científico es escéptico, es un curioso empedernido, utiliza con rigor lo que sabe para dar explicaciones razonables a los problemas y cuestiona permanentemente lo que sabe y lo que aprende. Entre los profanos de la ciencia se tiene la idea de que el científico crea la ciencia en su laboratorio por un proceso casi mágico, donde los descubrimientos surgen por generación espontánea³⁴, cuando la realidad es bien distinta. Ningún problema científico se resuelve lanzándose de cabeza al laboratorio sino que, muy al contrario, el científico lo acota desechando todo cuanto sea superfluo, lo analiza desmembrando el problema en otros más pequeños y asequibles, determina las variables que intervienen, luego intenta elaborar explicaciones o propuestas razonables con los conocimientos que ya posee y finalmente, diseña los experimentos adecuados para verificar si las propuestas que ha hecho se cumplen. Después, y sólo después de todo este proceso, se mete en el laboratorio a experimentar.

Según la R.A.E. una hipótesis es una suposición de la que se pretende sacar una consecuencia o llegar a una deducción. Esta definición es un tanto general, siendo necesario definir de manera más precisa una *Hipótesis científica* como *una proposición sobre un problema concreto, construida mediante las leyes de la lógica con el conocimiento científico disponible, susceptible de ser verificada o falsada*³⁵.

En el trabajo científico las hipótesis son el centro de la actividad intelectual y no los datos. Así, por ejemplo, cuando un médico se enfrenta a un caso, no comienza a observar a su paciente de un modo arbitrario, sin prejuicios y sin más finalidad que obtener datos brutos. Más bien, tras un primer y somero examen, sobre los conocimientos que él tiene, elabora una hipótesis de trabajo que dirige la recolección de datos tales como análisis de sangre, auscultación, exploración por el tacto, uso de instrumentos (radiografías, laringoscopio, tensionímetro, electrocardiógrafo, etc.). Los datos que obtiene con la ayuda de tales procedimientos, y sobre la base de la hipótesis de partida, le son luego útiles para formular hipótesis diagnósticas que probablemente contrastará más tarde con procedimientos más finos y sofisticados como, por ejemplo, RMN, TAC, análisis histológico, gammagrafía, etc., e incluso debatirá con otros colegas en sesión clínica.

La formulación de hipótesis es la parte más noble y creativa de la investigación científica. Para que una hipótesis esté bien formulada se requieren tres condiciones necesarias y suficientes: a) Tiene que ser formalmente correcta y significativa, b) Ha de estar fundada en conocimiento previo, y si

³⁴ Se invita al lector a que en su ordenador introduzca la sentencia de búsqueda "científico imágenes" y podrá comprobar que la anterior afirmación es bien cierta.

³⁵ El autor se permite aquí la licencia de utilizar un término que, pese a no figurar en el diccionario de la R.A.E., forma parte de la jerga de filósofos y epistemólogos.

fuera completamente nueva, tiene que ser compatible con el conocimiento científico disponible y c) Tiene que ser empíricamente contrastable mediante los procedimientos objetivos de la ciencia.

Con frecuencia, la naturaleza del problema determina la vía por la que el investigador puede emitir una hipótesis. Así, las *hipótesis emitidas analógicamente* son aquellas que proceden de argumentos de analogía o por captación intuitiva de parecidos (por ejemplo, “si el sodio es un poderoso reductor, el resto de los elementos alcalinos también lo será”). Las *hipótesis de origen inductivo* son las emitidas sobre la base del examen caso por caso (por ejemplo, “el aprendizaje de cualquier materia interfiere con el aprendizaje de materias contiguas”). Las *hipótesis intuitivas* son aquellas cuya emisión no ha sido planificada; tienen un aspecto natural y obvio y parecen nacidas por generación espontánea sin investigación previa ni elaboración lógica. Pero esta impresión es falsa toda vez que son construcciones bastante elaboradas que no habrían podido formularse en otras épocas o culturas, tal es el caso de “la Tierra gira en torno al Sol, siendo uno de sus planetas”. Finalmente, están las *hipótesis deductivas*, obtenidas a partir de proposiciones más importantes (por ejemplo, el Teorema de Bernouilli no es sino la aplicación del Principio de la Conservación de la Energía para una tubería ideal por la que circula un fluido también ideal).

Según sea su profundidad o calidad las hipótesis pueden ser clasificadas en:

Ocurrencias. Son hipótesis sin fundar ni contrastar. Este tipo de proposiciones es característico de las actividades especulativas, pseudociencias y los estadios primitivos del trabajo teórico. En este tipo de hipótesis se fundamenta, por ejemplo, la Radiónica, una medicina alternativa que afirma que las enfermedades pueden ser diagnosticadas y tratadas con una clase de energía similar a las ondas de radio. Los practicantes de radiónica sostienen que un individuo sano tiene ciertas frecuencias de energía moviéndose por su cuerpo en tanto que una persona enferma tiene esas frecuencias alteradas. Los dispositivos radiónicos pretenden diagnosticar y curar aplicando frecuencias apropiadas para contrarrestar las frecuencias discordantes. Por contradecir los principios básicos de la Biología y de la Física y por no haber propuesto ningún mecanismo de acción científicamente razonable, la mayoría de los médicos desechan la radiónica como pura charlatanería.

Hipótesis empíricas. No tienen fundamentación pero están empíricamente convalidadas. Un ejemplo sería “el enfriamiento brusco de un pedazo de hierro al rojo aumenta su dureza” refiriéndose al templado del hierro. Otro ejemplo, ahora de la agricultura, sería “el abonado de las plantas ha de ser en la proporción justa, tanto el exceso como el defecto, son perjudiciales”.

Hipótesis plausibles. Son hipótesis fundamentadas pero sin contrastar. Por regla general, estas hipótesis son las de partida en las investigaciones. Son construcciones lógicas edificadas con los conocimientos disponibles que a lo largo de la investigación son contrastadas, pudiendo ser aceptadas o declaradas falsas y por tanto, descartadas.

Hipótesis convalidadas. Son aquellas que están bien fundadas y además, están empíricamente confirmadas. Realmente, el conocimiento científico en su totalidad es un conjunto de hipótesis contrastadas y como tales, sujeto a revisión permanente. Se suele decir con acierto que en ciencia no hay nada definitivo, todas las leyes y teorías, por perfectas que parezcan, son interpretaciones más o menos afortunadas de la realidad, son aceptadas y utilizadas por los científicos en la elaboración de las hipótesis de partida de sus investigaciones y lo son hasta que surge algún problema que no se puede explicar con esas hipótesis. Comienza entonces un proceso de creación

de nuevas hipótesis cuya finalidad es obtener mejores explicaciones de los fenómenos reales. Tal es el caso, por ejemplo, de la evolución de las ideas en torno a la naturaleza de la luz, que en un principio (S. III a.C.) es considerada como algo inherente a la visión, siendo esta algo que emana de los ojos, como si de tentáculos inmatrimales se tratara, con los que nuestro sentido de la vista palpara los objetos reconociendo así sus formas y colores. Hay que esperar hasta el S. XVII en el que Christian Huyghens propone que la luz es una onda similar a las que se producen en la superficie del agua, explicando así los fenómenos de reflexión, refracción y difracción de la luz. En esa misma época, Isaac Newton trabaja en óptica proponiendo para la luz una naturaleza corpuscular. Ambas ideas, la ondulatoria y la corpuscular, conviven durante casi cien años hasta que Thomas Young estudia las interferencias luminosas y Agustín Jean Fresnel trabaja con la luz polarizada afianzando así la idea de que la luz tiene naturaleza ondulatoria. Por si ello fuera poco, ya en pleno S. XIX James Clerk Maxwell da a conocer su Teoría Electromagnética según la cual, la luz no es sino una onda electromagnética de igual naturaleza que las ondas de radio, las microondas, los rayos infrarrojos, los rayos ultravioleta, los rayos X o la radiación gamma. A comienzos del S. XX parecía que la ciencia se decantaba definitivamente por una concepción ondulatoria de la luz, pero es entonces cuando Max Planck propone su hipótesis de la cuantización de la energía electromagnética que lleva implícita la idea de que los *quantos* o cantidades discretas de esa energía exhiben un carácter corpuscular, resucitando así la idea newtoniana.

I.12 MAX PLANCK Y LA MECÁNICA CUÁNTICA O CÓMO UNA HIPÓTESIS PLAUSIBLE LLEGA A SER UNA HIPÓTESIS CONVALIDADA

A modo de ejemplo detallaremos a continuación el proceso por el que a comienzos del S. XX surgió una nueva concepción del universo y la consiguiente aparición de una nueva física que explicaría a satisfacción ese nuevo mundo: la *Mecánica Cuántica*.

Es bien sabido desde el comienzo de los tiempos que cuando un cuerpo eleva su temperatura emite calor en forma de radiación infrarroja y que si se sigue aumentando la temperatura, llega un momento en el que el cuerpo alcanza la incandescencia adquiriendo un color rojo que va haciéndose cada vez más blanco y brillante a medida que la temperatura se eleva más y más. A finales del S. XIX la Termodinámica y el Electromagnetismo estaban sólidamente desarrollados y ofrecían explicaciones aceptables para todos los fenómenos relacionados con ellos... ¿todos? Realmente no. Por entonces existía un problema que traía de cabeza a los físicos. Se trataba del comportamiento emisor de un *cuerpo negro* al ser progresivamente calentado.

Antes de continuar hemos de aclarar qué es un cuerpo negro. Es comúnmente sabido que los cuerpos reflejan la luz que incide sobre ellos, y precisamente por ello podemos verlos. Supongamos que iluminamos un cuerpo con luz solar (la luz solar se considera blanca porque contiene todas las longitudes de onda, es decir, todos los colores, por igual) y ese cuerpo lo vemos blanco. Ello es debido a que refleja por igual todos los colores y como bien sabemos, la suma de todos los colores da como resultado el blanco. Si ese cuerpo lo viéramos verde sería debido a que no refleja el rojo, complementario del verde, y al faltar este último en la luz que llega al ojo, tendríamos la sensación visual verde. Viceversa, si el cuerpo lo viéramos rojo sería debido a que el cuerpo no refleja el verde. Igual explicación podríamos dar al caso en que el cuerpo tuviera color azul, naranja, violeta o amarillo. Ahora bien ¿qué sucedería si el cuerpo iluminado con luz solar

absorbiera por completo todas las radiaciones, es decir, si no reflejara ningún color? En ese caso no veríamos ese cuerpo porque ninguna luz procedente de él llegaría a nuestros ojos y la sensación visual sería el negro, absolutamente negro. Pues bien, ese cuerpo ideal (porque realmente no existe) se denomina *cuerpo negro*³⁶.

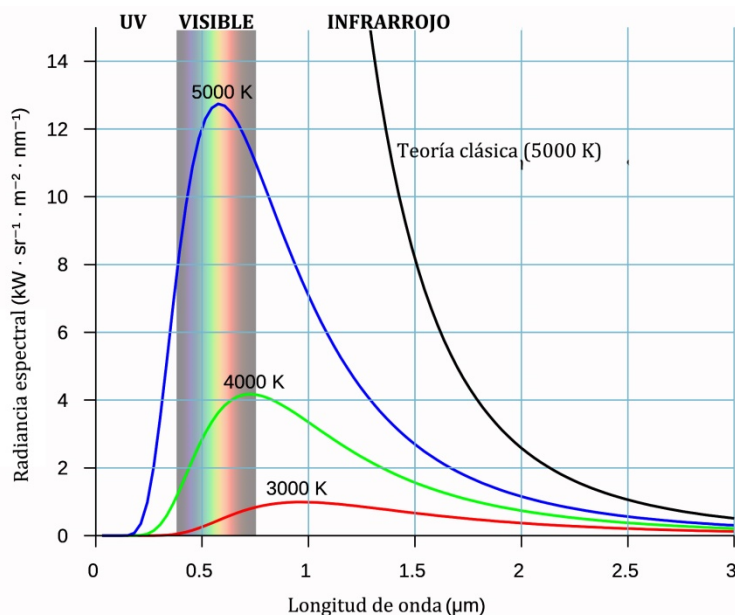


Figura 17 Representación gráfica del poder emisor del cuerpo negro a 3000, 4000 y 5000 K obtenida experimentalmente. En color negro se representa el comportamiento emisor previsto por las teorías vigentes en el S. XIX.

Desde que Maxwell dio a conocer su Teoría Electro-magnética, los físicos explicaban la reflexión de la luz de la siguiente manera: “Cuando la luz incide sobre un objeto, sus átomos absorben la energía incrementando su vibración. A su vez, los átomos en vibración³⁷ emiten energía electromagnética, es decir, luz”. Ahora bien, si se pretende explicar el comportamiento emisor de un cuerpo negro por medio de las teorías disponibles en el S. XIX el fracaso es rotundo. Efectivamente, dichas teorías

predicen que la energía E_λ que un cuerpo emite en forma de ondas electromagnéticas de una longitud λ es proporcional a su temperatura e inversamente proporcional a la cuarta potencia de la citada longitud (Ley de Stefan-Boltzmann).

$$E_\lambda \sim \frac{T}{\lambda^4}$$

Parece razonable que la energía emitida por un cuerpo caliente sea proporcional a su temperatura, esto es, cuanto más caliente esté más energía emitirá. Por otro lado llama la atención que la longitud de onda se encuentre en el denominador, esto significa que, a una temperatura dada, la distribución de energía emitida crece brutalmente al disminuir la longitud de onda, por estar elevada a la cuarta potencia. Así pues, la predicción teórica es que un cuerpo que se encontrara a la elevadísima temperatura de 5000 K³⁸ debería emitir toda su energía en el rango del ultravioleta, apenas emitiría longitudes de onda visibles y por tanto no se pondría incandescente. Fijémonos ahora en la figura 18, la curva de color negro representa la predicción de las teorías decimonónicas y las curvas coloreadas representan la realidad experimental a tres temperaturas. Analizando las

³⁶ Hay ciertos objetos, como el hollín de una chimenea, la tinta de un cefalópodo, ciertas pinturas negro mate, cuyas propiedades se aproximan a las de un cuerpo negro sin serlo realmente.

³⁷ La teoría de Maxwell predice que una carga que vibra emite ondas electromagnéticas y no debemos olvidar que los átomos tienen cargas de ambos signos.

³⁸ Para que el lector se haga una idea, diremos que el filamento de tungsteno de una lámpara de incandescencia está como mucho a 3000 K.

curvas coloreadas vemos lo que realmente pasa: a temperaturas moderadas por debajo de 1000 K toda la emisión se produce en el infrarrojo; por encima de esa temperatura la emisión, mayoritariamente infrarroja, empieza a interesar al rojo visible y empieza la incandescencia (ese es el caso de un pedazo de hierro recién sacado del fuego de una fragua). Si se sigue elevando la temperatura el pico de emisión se va adentrando en el rango visible empezando por el rojo, y así sucesivamente, de forma que a una temperatura muy elevada el pico de emisividad interesa a todo el rango visible y el cuerpo incandescente llega a adquirir el color blanco, como sucede en el filamento de una bombilla encendida.

Este comportamiento, inexplicable por las teorías de la época, constituía un problema científico que traía de cabeza a los físicos de entonces hasta el punto de que tenía incluso un nombre: “catástrofe ultravioleta”. Corrían los últimos años del S. XIX cuando Max Planck, a la sazón profesor de Física en la Universidad de Berlín, intentaba descifrar el rompecabezas del poder emisivo del cuerpo negro y, a falta de una idea mejor, decidió tratar estadísticamente los datos experimentales de las curvas coloreadas de la figura 18 con la intención de hallar empíricamente una ecuación matemática que se ajustara lo más posible a dichas curvas. Él acariciaba la idea de llegar a una explicación teórica a través de la interpretación de la ecuación empírica que iba a obtener³⁹. Así pues, por un procedimiento empírico llegó a una ecuación complicada⁴⁰ que se ajustaba aceptablemente a las curvas acampanadas de la figura 17. Y posteriormente, acometió la tarea de su interpretación.

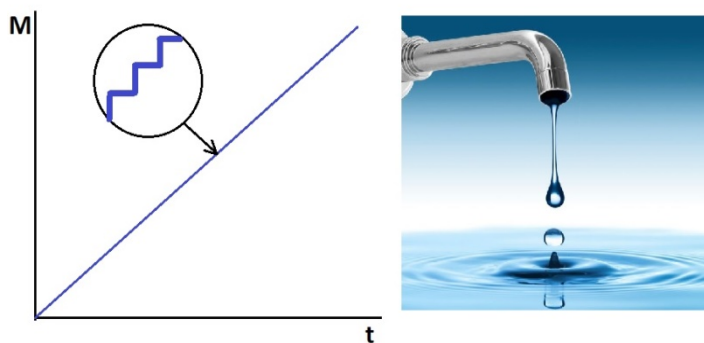


Figura 18 Experimento mental para la comprensión del concepto de cuantización.

Planck intentó deducir por vía teórica la ecuación que había obtenido empíricamente; la tarea era harto complicada, lo intentó una y otra y otra vez por distintos procedimientos y un buen día surgió la idea genial que sería el germen de la nueva física del S. XX. Para deducir su ecuación, Planck supuso a modo de hipótesis que los átomos del cuerpo emisor caliente oscilan emitiendo energía electromagnética, hasta aquí

³⁹ Los profesores de física que hemos pasado largas horas de laboratorio con nuestros alumnos sabemos muy bien que hay algunos avispos que en aquellos trabajos prácticos en los que hay que realizar medidas para determinar un resultado final, como por ejemplo, la aceleración de la gravedad, un índice de refracción o un coeficiente de dilatación, lo que realmente hacen es realizar los cálculos “al revés”, esto es, a partir del resultado correcto calculan el valor de las medidas que debieron hacer y no hicieron. Posteriormente, redactan el informe del trabajo presentándolo en orden inverso a como ellos lo hicieron. Así se aseguran de que el resultado de su trabajo sea el correcto y de que la buena calificación esté asegurada. Lo que ellos no saben es que el profesor suele notar el fraude por “exceso de exactitud” en los resultados. Ciertamente, Max Planck actuó como los alumnos tramposos y no menos cierto es que el resultado fue espléndido, que no en vano hay ocasiones en las que es preciso caminar recto por caminos tortuosos, algo bastante habitual en la investigación científica.

⁴⁰ El autor es consciente de que en una obra divulgativa como esta, cada fórmula que se incluye en el texto supone 50 lectores menos. Pese a ello, para aquellos que lo deseen, la fórmula hallada por Planck era: $E_{\lambda T} = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$ Donde h es la constante de Planck, c es la velocidad de la luz en el vacío, k es la constante de Boltzmann, λ es la longitud de onda y T es la temperatura.

nada nuevo. Ahora bien, la energía que cada oscilador atómico emite en una determinada frecuencia es discreta, esto es, sólo puede tomar ciertos valores dados por la expresión

$$E_n = nhf$$

Siendo n un número entero, h es una constante de proporcionalidad, conocida como *constante de Planck*⁴¹ en honor al insigne físico, y f la frecuencia. A partir de esta hipótesis Max Planck pudo explicar teóricamente el poder emisivo del cuerpo negro. Pero esto carece de importancia en comparación con la trascendencia de la hipótesis que acababa de emitir: “La energía absorbida y emitida por los átomos está cuantizada” Planck llamó *quanto* a las dosis de energía y propuso que el valor de esa dosis debe ser proporcional a la frecuencia de la radiación emitida o absorbida.

Así pues, en nuestra historia llegamos al punto en el que un científico ha emitido una hipótesis plausible, bien fundamentada por haber sido construida con lógica a partir del conocimiento disponible en ese momento, pero no contrastada ya que, por el momento, no había evidencias científicas que avalaran la idea de que la energía electromagnética absorbida y emitida por los átomos estuviera cuantizada. El motivo por el que esta hipótesis es una idea audaz y revolucionaria consiste en asumir que en el Universo, la energía que absorben y emiten las partículas materiales, así como la que se traslada a la velocidad c está dosificada o cuantizada. Esta idea, que hoy a los físicos nos parece tan natural, no lo era en 1900 como no lo era en el S. XVI la idea de que la Tierra no es el centro del Universo.

Para entender mejor la hipótesis de Planck recurriremos a un experimento mental. Sea un grifo que no cierra bien y gotea. Pongamos debajo una vasija vacía colocada en el platillo de una balanza muy precisa que nos permita registrar en todo momento el aumento de masa de la vasija en función del tiempo transcurrido. Es evidente que la representación gráfica del aumento de masa del recipiente en función del tiempo ha de ser una recta escalonada en la que la altura de los peldaños ha de coincidir con la masa de cada gota. Forzoso será admitir que la masa del vaso no podrá tener en ningún momento un valor intermedio entre dos “peldaños”, es decir, la masa medida estará cuantizada y el tamaño de cada “quanto” de nuestro experimento será la masa de una gota. Pudiera uno pensar que si abriéramos el grifo, el experimento fallaría por su base al sustituir las gotas por el chorro continuo de agua, pero hemos de pensar que el agua está constituida por moléculas H_2O con una masa de 18 u.m.a. cada una, con lo cual habrá que admitir que también en este caso el incremento de masa del recipiente estaría cuantizado, eso sí, el tamaño de los peldaños de la gráfica sería ahora extremadamente pequeño⁴²

Volvamos ahora a la arriesgada propuesta que hizo Planck en 1900 ¿por qué a nadie se le había ocurrido semejante idea hasta entonces? Pues, sencillamente, porque la cuantización no se ve. Nuestros sentidos nos dan una percepción continua del mundo, no cuantizada, porque el tamaño de las dosis energéticas o *quantos* es extremadamente pequeño. Ya hemos visto que la energía de un fotón o quanto es $E = hf$ y resulta que el valor de la constante de Planck es extraordinariamente pequeño: $h=6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Kg.m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

⁴¹ El valor de la *constante de Planck* es $6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

⁴² Piense el lector que en una gota de agua hay más moléculas que granos de arena en una playa.

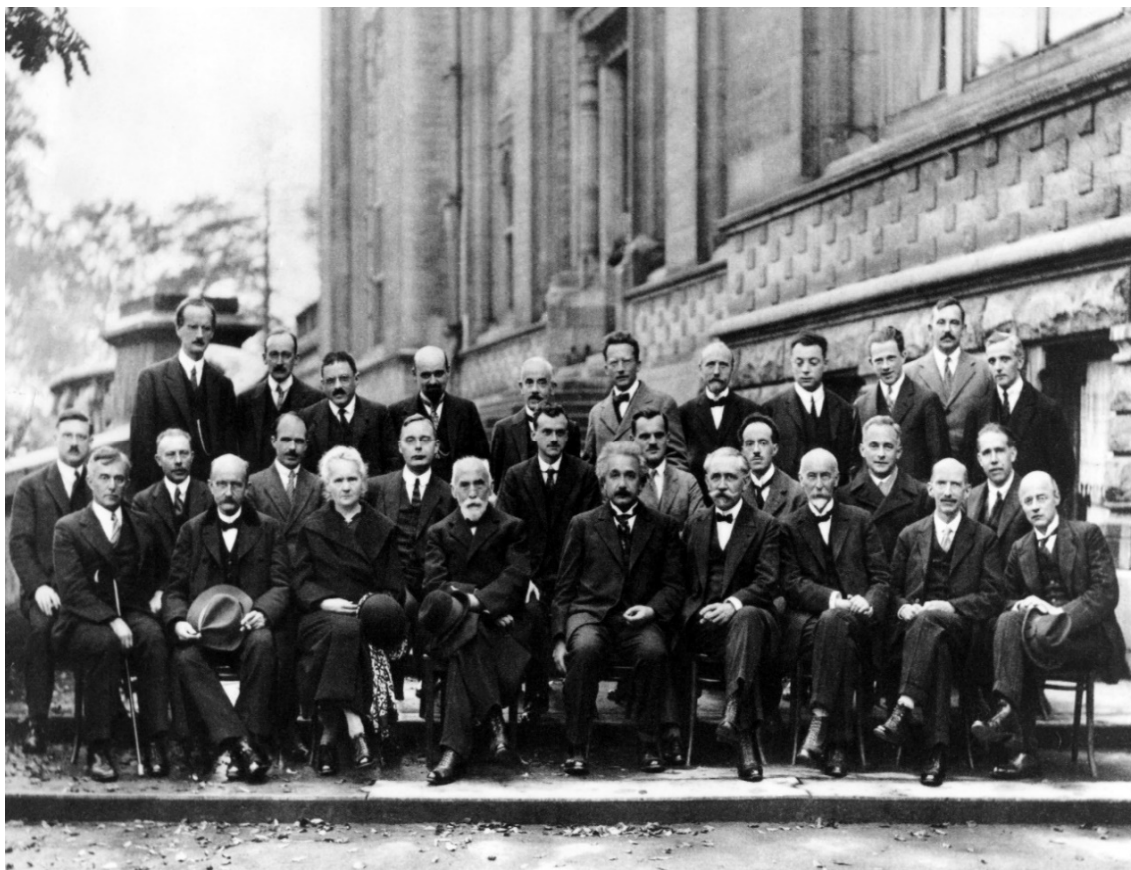


Figura 19 Foto de familia del V Congreso Solvay celebrado en Bruselas en 1927, considerada como la fotografía más famosa e importante de la historia de la ciencia. Jamás se produjo mayor concentración de “materia gris” por metro cuadrado. Baste decir que diecisiete de los veintinueve asistentes eran o llegaron a ser premios nobel de física o de química.

En 1904 un joven de 25 años se ganaba la vida en la oficina de patentes de Berna y en sus horas libres trabaja con denuedo en su gran pasión, la física. Por entonces había elaborado una explicación muy convincente del *movimiento browniano*⁴³ y en aquellos días trabajaba en hacer una explicación teórica del *efecto fotoeléctrico*⁴⁴. El joven Einstein se había leído de cabo a rabo no solo las publicaciones que su descubridor Heinrich Hertz había hecho diecisiete años antes sino también los trabajos que había publicado recientemente Max Planck. Imbuido por la idea de la cuantización elaboró una explicación teórica del efecto fotoeléctrico que suponía que cada electrón arrancado de un metal requiere la absorción de un cuanto (o fotón) y solo uno.

Por su explicación del movimiento browniano, del efecto fotoeléctrico y por su Teoría de la Relatividad, Einstein recibió el premio Nobel de Física en 1921. Tres años antes a su “hada madrina” se le había concedido el mismo premio por haber sentado las bases de una nueva concepción del mundo.

⁴³ Se llama así al movimiento caótico de las partículas ultra pequeñas dispersas en un fluido.

⁴⁴ Consiste en la emisión de electrones por un material al incidir sobre él una radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta).

Posteriormente, la hipótesis cuántica de Max Planck fue verificada y aceptada por la comunidad científica dando paso a una nueva forma de interpretar el mundo y al nacimiento de la Mecánica Cuántica, la nueva física del S. XX

I.13 EXPERIMENTACIÓN

Podemos afirmar con objetividad que el experimento científico es la más rica de las experiencias a las que el ser humano puede acceder ya que es planificado y diseñado en un contexto teórico, añade a la observación el control de ciertas variables y supone un detenido análisis de los resultados del mismo. El término “experimentar” es un tanto ambiguo; en el diccionario de la R.A.E. se define como “Probar y examinar prácticamente la virtud y propiedades de algo” y, refiriéndose a las ciencias de la naturaleza lo define como “hacer operaciones destinadas a descubrir, comprobar o demostrar determinados fenómenos o principios científicos”.

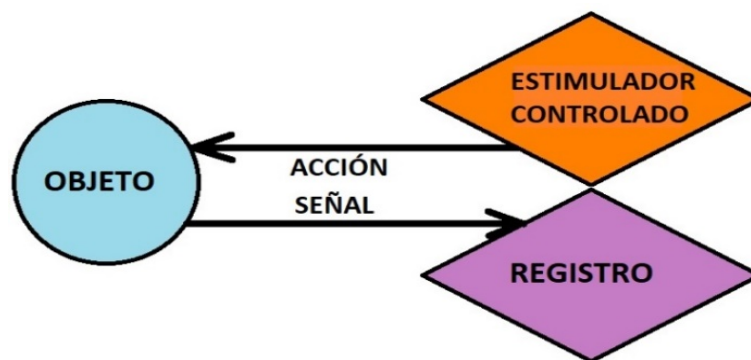


Figura 20 Esquema de la acción experimental en ciencia.

Una definición aceptable de *experimento científico* puede ser: “un procedimiento mediante el cual se trata de comprobar (confirmar o verificar) una o varias hipótesis relacionadas con un determinado fenómeno, mediante la manipulación y el estudio de las correlaciones de las variables que presumiblemente son su causa. La experimentación científica constituye, por tanto, uno de los elementos claves de la investigación y es fundamental para ofrecer explicaciones causales.

Los experimentos pueden ser *cualitativos* o *cuantitativos* en función de si la acción y la señal son meras apreciaciones o magnitudes medidas. La mayoría de los experimentos exploratorios cuya finalidad es el descubrimiento de hechos nuevos o la contrastación preliminar de nuevas teorías son cualitativos, o a lo sumo, semicuantitativos. Tenemos un ejemplo en los experimentos cualitativos que realizó Hans Christian Oersted en 1820 demostrando las interacciones entre los imanes y las corrientes eléctricas. Con ellos arrancó el *electromagnetismo*, una de las parcelas importantes de la física. Más tarde, André M. Ampère realizó experimentos cuantitativos basados en las experiencias de Oersted, en los que estudió las fuerzas que aparecen entre dos corrientes eléctricas paralelas y le permitieron enunciar la ley que rige la relación que existe entre la intensidad de una corriente eléctrica y el campo magnético que crea en su entorno. La Ley de Ampère fue utilizada cuatro décadas después por James Clerk Maxwell en la elaboración de su Teoría Electromagnética, uno de los más importantes pilares teóricos de la física actual.

Un experimento científico estará bien diseñado si cumple las siguientes condiciones:

Reproductibilidad, otros científicos deben poder llevar a cabo el mismo experimento en las mismas condiciones y obtener el mismo resultado.

Metodismo, esto es, ningún elemento del experimento puede ser dejado al azar, sino que debe contarse con la descripción más minuciosa de los elementos considerados en la experiencia, es decir, deben tomarse en cuenta todas las variables posibles.

Objetividad. No puede tenerse en cuenta la opinión o los sentimientos del científico, ni sus puntos de vista personales, sino que debe haber una descripción objetiva de lo ocurrido, para bien o para mal.

Veracidad. Los resultados del experimento no pueden ser sino los que son, sean o no los esperados, y no pueden falsearse de ninguna manera.

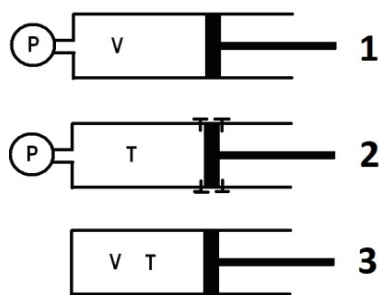


Figura 21 Tres fases de un experimento con gases para estudiar las relaciones entre P, V y T

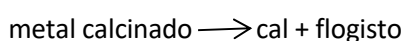
En un experimento bien diseñado se han considerado previamente todas las variables que presumiblemente pudieran intervenir en el fenómeno, a continuación se ha eliminado por algún procedimiento la influencia de todas menos dos para, posteriormente, variar una de ellas (variable independiente) y registrar lo que le sucede a la otra (variable dependiente). En una segunda fase se habrán modificado las condiciones experimentales eligiendo otras dos variables y eliminando la influencia de las restantes para así estudiar la relación de dependencia entre esas dos variables, y así sucesivamente. Veamos un ejemplo: Si se pretende estudiar el comportamiento de un gas, suponiendo que las variables que intervienen son la

presión, el volumen y la temperatura y lo que se pretende es conocer las relaciones entre las tres variables, realizaríamos tres experimentos (Figura 21):

1. Estudio de la relación P-V a temperatura constante, para lo cual se llenaría con el gas un pistón sumergido en un baño termostático que asegurara que la temperatura se mantenga constante en todo momento y se modificaría el volumen moviendo el émbolo mientras se registran los valores de la presión que mediría un manómetro.
2. Estudio de la relación P-T a volumen constante. Ahora el émbolo del pistón estaría inmovilizado y lo que se haría es modificar la temperatura del baño termostático para ir registrando los valores de la presión.
3. Estudio de la relación V-T a presión constante. En este último caso se dejaría el pistón libre, de forma que pudiera desplazarse en un sentido u otro. A continuación iríamos modificando la temperatura del baño termostático e iríamos registrando el volumen del gas a cada temperatura.

Sean o no cuantitativos, los experimentos científicos suponen conceptos, hipótesis y teorías, y además comportan sofisticaciones técnicas cada día más intrincadas que exigen un alto grado de especialización al experimentador; todo ello hace que su comprensión sea inaccesible no solo a los profanos sino incluso a otros colegas no especializados.

En 1630 un desconocido físico francés, J. Rey, publicó los resultados de sus experimentos con metales. Él había experimentado con el estaño comprobando que el peso⁴⁵ del metal aumenta tras ser calentado y, como conclusión, propuso la siguiente explicación: “El estaño aumenta de peso al ser calentado, debido a la toma de aire”⁴⁶. Los trabajos de Rey pasaron inadvertidos debido a que sus experimentos y conclusiones no encajaban en el marco teórico de la época. Incluso se conocieron otros casos además del estudiado por el francés pero ninguno fue tomado en consideración y fueron asumidos como anomalías sin importancia, sin más. Años después la situación se volvió aún más adversa cuando en 1667 un alquimista alemán propuso la *Teoría del flogisto*, según la cual toda sustancia susceptible de sufrir combustión contiene flogisto, y el proceso de combustión consiste básicamente en la pérdida de dicha sustancia. Esta teoría descende directamente de la idea aristotélica del fuego, entendido como elemento ígneo, apoyada por el pensamiento ortodoxo de entonces. La teoría del flogisto afirmaba que los minerales metálicos son más simples que los metales correspondientes porque se encuentran en la naturaleza⁴⁷, y era entonces un principio ontológico general que “la naturaleza es simple y el hombre es el origen de toda complejidad”. Así pues, según la teoría del flogisto, si las sales⁴⁸ son más simples que los metales correspondientes, entonces había que añadir algo a las primeras para convertirlas en metales, y ese algo era el flogisto, el elemento productor del fuego, es decir, tenía que darse una de estas dos posibilidades:



La pervivencia de esta teoría durante casi un siglo se debió a que tenía las virtudes de simplicidad y alcance, es decir, coordinaba de un modo simple una gran masa de datos. Además, el interés de los alquimistas de la época no era el contrastar y desarrollar sus hipótesis, sino confirmar insistentemente una teoría simple que estaba apoyada por la tradición. Como vemos, los químicos de comienzos del S. XVIII no hacían experimentos cuantitativos por no considerar la importancia del peso en los procesos químicos. En aquellos años, antes de que la alquimia diera a luz a la química de la mano de Antoine Lavoisier, era a lo sumo semicuantitativa y fenomenológica. Considerado el padre de la Química Moderna, Lavoisier demostró que el desprecio del peso en las reacciones químicas es un craso error. El concepto clave de su nueva teoría, que desterraría para siempre al flogisto, era el de oxidación (o combustión) como combinación con el oxígeno. Pero ¿cómo llegó a construir su teoría de la oxidación refutando la del flogisto? y ¿cómo le fue posible establecer la Ley de la Conservación de la Masa en las Reacciones Químicas? Veamos los dos cruciales experimentos de Lavoisier:

1. Oxidación del mercurio. En su intento por demostrar que los metales se oxidan con intervención del oxígeno atmosférico, Lavoisier puso en una retorta de vidrio una muestra de mercurio de masa conocida. La boca de la retorta comunicaba con una campana de

⁴⁵ Se advierte al lector que en esta parte de este libro el autor habla de “pesos” cuando en realidad debería decir “masas”. Este error es intencionado y sólo admisible por utilizar los mismos términos que usaban los químicos de esa época.

⁴⁶ En esa época no se conocía el oxígeno. Habría que esperar a que en 1772 Carl W. Scheele lo aislara y en 1774 Joseph Priestley lo identificara (a ambos se atribuye su descubrimiento).

⁴⁷ A excepción del oro y el platino.

⁴⁸ El término “cal” se refiere al mineral en el que se encuentra el metal en estado natural.

vidrio que contenía agua, de forma que el nivel de agua en el interior y exterior de la campana fueran exactamente iguales. Tras calentar fuertemente observó que se formaba en la superficie del metal líquido una costra de polvo rojizo que entonces se denominaba “mercurius calcinatus”. Observó también que el volumen de agua del interior de la campana subía hasta un punto en que ya no subía más por mucho que calcinase la muestra. E hizo una tercera observación: el polvo rojizo formado en la superficie del mercurio es más pesado que el metal del que se ha formado. Todo ello lo averiguó haciendo pesadas lo más precisas posible antes y después del experimento.

2. Descomposición del óxido de mercurio. Seguidamente, el polvo rojizo obtenido en el experimento anterior fue calentado en un dispositivo igual (herméticamente cerrado) eliminando el horno y calentando fuertemente mediante un intenso haz de luz⁴⁹. En esta segunda ocasión observó que el polvo se descomponía liberando gotitas brillantes de mercurio metálico al tiempo que el nivel del agua del interior de la campana descendía por debajo del nivel exterior. Hizo también una tercera observación: si se añadía este gas al residuo gaseoso del primer experimento se obtenía una mezcla idéntica al aire atmosférico.

Estas son las descripciones de los dos experimentos opuestos. Es de destacar que el diseño de los experimentos había sido realmente concienzudo ya que en ambos se mantiene la masa total

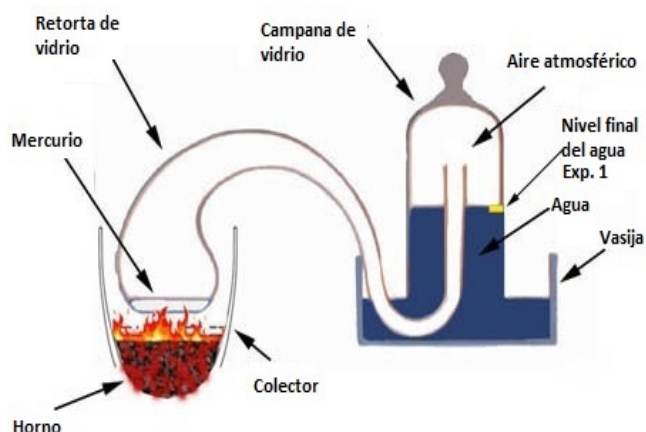


Figura 22 Esquema del experimento de Lavoisier

constante, habida cuenta de que el dispositivo era hermético. Lavoisier se las ingenió para controlar tres variables físicas: masa, temperatura y volumen gaseoso evitando que la naturaleza siguiera su curso espontáneo y además, las variaciones del volumen gaseoso, de por sí poco perceptibles, fueron puestas de manifiesto por medio de las variaciones del nivel del agua.

De esta manera, el genial francés desterró para siempre la teoría del flogisto y a partir de entonces quedó

plenamente demostrado que el proceso de oxidación, y por tanto de las combustiones, no es sino una reacción de combinación con el oxígeno del aire (experimento 1) y que la descomposición de un óxido libera oxígeno (experimento 2). Ahora bien, solo por estos hallazgos Antoine Lavoisier no sería considerado el padre de la Química. Realmente su aportación a la ciencia fue mucho más allá. Él estableció la práctica de medir cuantitativamente las masas y volúmenes de reactivos; de esta manera, la vieja alquimia, cuya pretensión obsesiva era el descubrimiento de la piedra filosofal y el elixir de la vida por medios meramente observacionales, empíricos y fenomenológicos, dio a luz a comienzos del S. XVIII a la moderna química, una de las ciencias que hoy más problemas resuelve a la sociedad. Lavoisier enunció por primera vez la *Ley de la conservación de la masa en las reacciones químicas*. Y puso de moda el uso de la balanza de precisión como herramienta básica en la investigación química. A partir de Lavoisier se creó la

⁴⁹ Para ello sustituyó el horno por una gran lente convergente que concentraba la luz solar en el interior de la retorta.

Estequiometría, (del griego *στοιχειον*, *stoikheion*, 'elemento' y *μετρον*, *métrón*, 'medida') es el cálculo de las relaciones cuantitativas entre los reactivos y productos en el transcurso de una reacción química. Estas relaciones se pueden deducir a partir de la teoría atómica, aunque históricamente se enunciaron sin hacer referencia a la composición de la materia, según distintas leyes y principios.

El primero que enunció los principios de la estequiometría fue Jeremías Benjamin Richter (1762-1807), en 1801, quien describió la nueva disciplina de la siguiente manera: «La estequiometría es la ciencia que mide las proporciones cuantitativas o relaciones de masa de los elementos químicos que están implicados (en una reacción química)». También estudia la proporción de los distintos elementos en un compuesto químico y la composición de mezclas químicas. Tras él llegó Proust con su *Ley de las proporciones definidas*, según la cual “cuando dos elementos se combinan para formar un compuesto, lo hacen en proporción de masas constante y definida para ese compuesto”. Lavoisier había dado el pistoletazo de salida para la gran carrera la Química Moderna y así, un par de años después, en 1803, el químico francés Charles Gay-Lussac demostró que “cuando dos o más elementos se combinan para dar más de un compuesto, una masa variable de uno de ellos se une a una masa fija del otro, y la primera tiene como relación números enteros sencillos.

Lavoisier, de ascendencia noble y adinerada, recibió una esmerada educación destacando desde el principio por sus grandes dotes para la ciencia. Por imposición paterna estudió derecho, si bien su gran pasión era la investigación científica. Fue elegido miembro de la Academia de Ciencias francesa en 1768. Ocupó diversos cargos públicos, incluidos los de director estatal de los trabajos para la fabricación de la pólvora en 1776, miembro de una comisión para establecer un sistema uniforme de pesas en 1789 (antecesora de la Conferencia General de Pesas y Medidas) y comisario del tesoro de 1791. Lavoisier trató de introducir reformas en el sistema monetario y tributario francés y en los métodos de producción agrícola. Trabajó en el cobro de contribuciones, motivo por el cual fue arrestado en 1793. Importantes personajes hicieron todo lo posible para salvarlo. Cuando se expusieron al tribunal todos los trabajos que había realizado Lavoisier, se dice que, a continuación, el presidente del tribunal pronunció la famosa frase: «La república no precisa ni científicos ni químicos, no se puede detener la acción de la justicia». Lavoisier fue guillotinado el 8 de mayo de 1794, cuando tenía 50 años. El gran matemático y astrónomo Joseph Louis Lagrange dijo al día siguiente: «Ha bastado un instante para cortarle la cabeza, pero Francia necesitará un siglo para que aparezca otra que se le pueda comparar». Al año de la muerte de Lavoisier, fue exonerado por el nuevo gobierno francés en una nota dirigida a su viuda donde se leía: "A la viuda de Lavoisier, quien fue falsamente condenado"⁵⁰.

I.14 CONCEPTOS

Si abrimos el diccionario de la R.A.E., en cualquier página nos encontraremos con un listado de palabras ordenadas alfabéticamente con sus correspondientes definiciones en función de cada

⁵⁰ La historia tiene patentes contradicciones: Parece ser que Demóstenes, el más grande orador de la antigüedad, era tartamudo. El genial compositor del Himno a la Alegría era sordo como una tapia, el inmortal autor del Quijote era manco y una de las cabezas más brillantes del S XVIII rodó por el suelo.

una de sus acepciones. Cada una de ellas es un concepto, en su mayoría son conceptos naturales, esto es, términos que se refieren a la vida ordinaria, los cuales han sido creados por los individuos de la sociedad a lo largo del tiempo por medio de los mecanismos habituales en la evolución de las lenguas. Son por tanto conceptos accesibles a cualquier individuo.

Los conceptos son las formas básicas del conocimiento humano, son la formulación de una idea o una imagen a través de la palabra. El término concepto viene de la palabra latina “conceptus” (concepción) y se refiere al modelo mental que elabora el pensamiento acerca de algo. Así pues, los conceptos no son proyecciones directas del mundo exterior sobre nuestra mente sino constructos que esta última elabora, con ayuda de las percepciones sensoriales, acerca de ese mundo.

“Los conceptos físicos son creaciones libres del espíritu humano y no están, por más que parezca, determinados unívocamente por el mundo exterior. En nuestro empeño de concebir la realidad, nos parecemos a alguien que tratara de descubrir el mecanismo invisible de un reloj, del cual ve el movimiento de las agujas, oye el tic-tac, pero no le es posible abrir la caja que lo contiene”⁵¹.

Los conceptos a los que aquí nos referimos son los *conceptos científicos*; sabido es que cada ciencia tiene su lenguaje específico, o si se prefiere, su dialecto profesional. Esta jerga ha sido construida por métodos distintos a como se construye un idioma con el fin de expresar un conocimiento extraordinario, y muchas de sus expresiones no tienen sentido sino en el contexto de una teoría o campo de conocimiento. Asistir como convidado de piedra a una sesión clínica de un gran hospital o a una mesa redonda de un congreso de espectroscopía significa no enterarse de nada, porque nada de lo que allí se escucharía tiene sentido alguno para un profano en la materia.

Las ciencias construyen lenguajes artificiales⁵² tomando con frecuencia términos del lenguaje natural, como es el caso de los conceptos físicos de trabajo, presión, temperatura, frecuencia, etc. Ahora bien, la acepción que la ciencia da al término es precisa y rigurosa, cosa que no sucede en el lenguaje natural⁵³. Veamos como ejemplo el término “peso”: en el lenguaje natural tiene diversas acepciones así, en la frase “el peso de la situación acabó con su ánimo” se refiere a un problema de la vida ordinaria o bien “este archivo es demasiado pesado para enviarlo por e-mail” se refiere a un problema informático. Sin duda, esta es la razón por la que los conceptos de “masa” y “peso” suelen confundirse. Sirva como ejemplo el relato descrito en el cuadro de texto adjunto en el que se detalla una situación de confusión generalizada entre masa y peso en un contexto escolar. Otra confusión muy frecuente es no distinguir en la vida ordinaria entre los conceptos

⁵¹ EINSTEIN, A. & INFELD, L. (1986) *La evolución de la Física*. Salvat Ed. ISBN: 84-345-8246-5

⁵² El epíteto “artificiales” se refiere al hecho de que los lenguajes científicos no se han construido por medio de los mecanismos naturales que han servido para la creación y evolución de lenguas como el chino, el castellano o el inglés.

⁵³ Con gran frecuencia se habla de conceptos científicos en ambientes que no lo son, con menoscabo del rigor que estos conceptos requieren. Sirva como ejemplo el siguiente caso: El 28 de marzo de 1999 se declaró en el túnel del Mont Blanc un pavoroso incendio que costó la vida a más de 40 personas. Los noticiarios del día siguiente recogían en portada lo acontecido en el luctuoso suceso. En numerosos programas radiofónicos y televisivos hablados se pudo escuchar lo siguiente: “El incendio fue tan terrible que el calor alcanzó los 1000 grados”, confundiendo así calor con temperatura, dos conceptos absolutamente distintos toda vez que el calor es una forma de energía que se mide en termias, calorías o julios en tanto que la temperatura es una magnitud proporcional a la energía cinética media de las partículas de un material, y se mide en grados.

“luz” y “energía eléctrica”, así es frecuente la siguiente frase: “en Enero subirá la factura de la luz” cuando lo correcto sería decir “en Enero subirá la factura de la energía eléctrica”⁵⁴.

CONFUSIÓN ENTRE LOS CONCEPTOS DE MASA Y DE PESO

A lo largo de sus muchos años de profesor de Física, el autor ha protagonizado episodios en los que pregunta a un alumno para evidenciar ante todos lo fácil que es confundir masa con peso, como el que a continuación se relata:

Profesor: ¿Cuánto pesas?

Alumno: 64 kilos

Profesor (con gesto de desagrado): Mal

Alumno (con un cierto apuro): 64 kilogramos.

Profesor (alzando la voz): ¡De nuevo mal!

El alumno preguntado ya está nervioso y sus compañeros, interesados en la situación, murmuran entre ellos cuál será la respuesta correcta. Al fin, el profesor inquiere de nuevo al alumno.

Profesor: ¿Vas a responder a la pregunta que te hago, sí o no? Te la voy a hacer de otra manera ¿Con qué fuerza te atrae la Tierra?

La luz se hace entre el alumnado e inmediatamente, todos se dan cuenta de que a la pregunta ¿cuánto pesas? responden erróneamente citando su masa, no su peso.

Otras veces los términos se han construido a partir de las lenguas clásicas de culturas de las que procede la ciencia actual (griego, latín, árabe). Tal es el caso de los términos “energía” (del griego *en*=dentro y *ergon*=actividad), o los términos químicos “álcali”, “alcohol” y “alambique”, procedentes todos ellos del árabe o bien todos los nombres linneanos de las especies vivas, que proceden del latín como, por ejemplo, *balaenoptera musculus*=ballena azul, *canis lupus*=lobo, *quercus ilex*=encina, etc.

Los conceptos científicos tienen la importante función metodológica de permitir la distinción entre

entidades para luego hacer análisis y síntesis. Así, por ejemplo, los conceptos geológicos de mineral, roca magmática, roca sedimentaria y roca metamórfica sirven para establecer toda una clasificación de los materiales que componen la litosfera y sirven también para relacionarlos según su composición química, su textura y su origen.

Una forma elemental de clasificación sería la *ordenación* en orden creciente (o decreciente) conforme a un concepto que sea común a todos los elementos de un conjunto. Tal es el caso de la “dureza”, concepto que se define como “resistencia de un material a dejarse rayar por otro”. Es un concepto común a todos los sólidos y podríamos ordenar todos los materiales de una colección frotando uno de ellos contra todos los demás luego otro y otro y otro, comprobando cual es rayado y cual no se deja rayar; de esta manera puede hacerse una ordenación por dureza⁵⁵ de todos ellos.

En general, las grandes clasificaciones científicas de hoy han pasado por estadios pre teóricos en los que los conceptos que se usaron para confeccionarlas eran externos y fácilmente observables. Tal fue el caso de la sistemática biológica, que empezó fijándose en los caracteres exosomáticos de los seres vivos (animal o vegetal, con flores o sin flores, peces, anfibios, aves, etc.) y posteriormente se reformuló atendiendo a conceptos más diferenciadores, no observables directamente como el número de células que conforman al ser, el tipo de células (procariotas o

⁵⁴ El origen de esta popular confusión está en el hecho de que las primeras facturas se referían a consumo por iluminación, ya que entonces no había electrodomésticos.

⁵⁵ La escala de dureza de Mohs es una de las formas más antiguas de la medición de la dureza que fue ideada por el mineralogista alemán **Friedrich Mohs en 1812**. Se ha convenido a efectos prácticos otorgar grados de dureza de 1 hasta 10 a los siguientes materiales de referencia: 1 Talco, 2 Yeso, 3 Calcita, 4 Fluorita, 5 Apatito, 6 Ortosa, 7 Cuarzo, 8 Topacio, 9 Corindón y 10 Diamante

eucariotas), el tipo de nutrición, forma del sistema nervioso, etc. De esta forma se ha llegado a una clasificación más teórica que se fundamenta en la Teoría de la Evolución.

Otra gran clasificación científica es el *Sistema Periódico de los Elementos Químicos*, en este caso es el concepto de *número atómico* el que se usa en su construcción. Este concepto se define como *el número de protones que hay en el núcleo de los átomos de un elemento*, siendo determinante en las propiedades físicas y químicas del mismo. Por ser la más espléndida síntesis de que dispone la ciencia, dedicaremos a ella la atención que en esta obra se merece.

I.15 UNA MEMORABLE EPOPEYA CIENTÍFICA

Algunos elementos, como el oro, la plata, el cobre, el mercurio y el plomo son conocidos desde la antigüedad debido a que pueden encontrarse libres, es decir, en forma no combinada, en la naturaleza. El S. XVIII fue pródigo en descubrimientos de elementos tanto gaseosos (oxígeno, hidrógeno y nitrógeno) como sólidos, entre ellos bismuto, zinc, zirconio, cloro, cobalto, cromo, y otros más hasta sumar quince. En esa época en que la lista ascendía a 33 y se había consolidado el concepto de *elemento*, fue cuando Antoine Lavoisier⁵⁶ elaboró la conocida *lista de elementos simples*. Posteriormente, ya en el S. XIX, la invención de la corriente eléctrica y la electrólisis hizo posible el descubrimiento de elementos difíciles de aislar, como los alcalinos y los alcalinotérreos. A mediados del S. XIX se inventó el espectroscopio, facilitando el descubrimiento de nuevos elementos como el cesio, el talio y el rubidio. Finalmente, en el S. XX la investigación en los procesos radioactivos llevó al descubrimiento en cascada de una serie de elementos pesados (casi siempre sustancias artificiales sintetizadas en laboratorio, con periodos de vida estable muy cortos), hasta alcanzar la cifra de 118 elementos con denominación oficialmente aceptados por la IUPAC⁵⁷ en noviembre de 2016.

El primer intento de sistematización se debe a Lavoisier (1789), quien ordenó los 33 elementos conocidos entonces, agrupándolos en gases, metales, no metales y tierras. Aunque muy práctica y todavía funcional en la tabla periódica moderna, fue rechazada debido a que había muchas diferencias tanto en las propiedades físicas como en las químicas. La ordenación de Lavoisier era pre teórica, toda vez que el criterio de ordenación lo eran unas propiedades físicas, fácilmente observables, que carecían de un sustento lógico y fundamentado. Era necesario el advenimiento de un cuerpo teórico que acogiera conceptos organizadores adecuados para los elementos, y la llegada de esa gran teoría llegó en 1803 de la mano del químico inglés John Dalton.

Hacia 1895 el joven Dalton estaba interesado en la meteorología y la matemática, trabajaba en su laboratorio con gases y a resultados de sus experimentos se preguntaba “¿por qué un determinado volumen de agua no admite (en disolución) un mismo volumen de cualquier gas?”. Reflexionando sobre este problema llegó a intuir que, posiblemente, ello se debiera al peso del gas y al número de las partículas, últimas constituyentes de los diferentes gases. Con bastante probabilidad, este

⁵⁶ En su *Traité Élémentaire de Chimie* Lavoisier definía por primera vez como *elemento* a aquella “sustancia pura que no puede descomponerse en otras más sencillas”.

⁵⁷ Siglas de *International Union of Pure and Applied Chemistry*, organismo internacional que rige la formulación y nomenclatura química.

pensamiento pudo ser el germen de la Teoría Atómica que lleva su nombre y que desde entonces dirige el pensamiento y proceder de cuantos nos dedicamos a la Química.

En la elaboración de su propuesta, Dalton partió de unas evidencias experimentales:

- Las sustancias elementales no pueden descomponerse.
- Las sustancias, simples o compuestas, tienen siempre las mismas propiedades características.
- Los elementos no desaparecen al formarse un compuesto, pues se pueden recuperar por descomposición de éste.
- La masa global (de los reactivos y los productos) se conserva en las reacciones químicas (afirmación que provenía de la Ley de conservación de la masa de Lavoisier).
- La proporción de los elementos que forman un compuesto es constante (principio que provenía de la Ley de las proporciones definidas del también químico francés Proust).

Y propuso las siguientes hipótesis, en las cuales resucitaba las ideas que Demócrito de Abdera⁵⁸ (460-360 a.C.) propugnó 23 siglos antes:

- La materia es discontinua; está formada por átomos que son partículas indivisibles.
- Todos los átomos de un mismo elemento son iguales, tienen la misma masa, y átomos de diferentes elementos, difieren en su masa.
- Los átomos de diferentes elementos se combinan para formar "moléculas".
- Los cambios químicos son cambios en las combinaciones de los átomos entre sí, los átomos no se crean ni se destruyen.
- Los átomos que se combinan para formar un compuesto lo hacen siempre en la misma proporción, que será la *Ley de las proporciones definidas*.

Finalmente, la propuesta teórica de Dalton fue resumida en cinco puntos:

1. Los elementos están constituidos de partículas diminutas llamadas átomos que son indestructibles e indivisibles.
2. Todos los átomos de un determinado elemento son idénticos.
3. Los átomos de un elemento son diferentes de los de cualquier otro elemento, y los átomos de elementos diferentes se pueden distinguir unos de otros por sus respectivos pesos atómicos relativos.
4. Los átomos de un elemento se combinan con los átomos de otros elementos para formar compuestos químicos, y un compuesto dado siempre tiene el mismo número relativo de tipos de átomos.
5. Los átomos no se pueden crear ni dividir en partículas más pequeñas, ni se destruyen en el proceso químico. Una reacción química simplemente cambia la forma en que los átomos se agrupan.

La idea de que las sustancias puras están formadas por partículas indivisibles y específicas de cada una, resultó altamente atractiva y convincente de forma que, a comienzos del S. XIX, los químicos

⁵⁸ Filósofo y matemático griego que vivió entre los siglos V y IV a.C. desarrolló la «teoría atómica del universo», concebida por su mentor, el filósofo Leucipo. Sostenía que los átomos son indivisibles, y se distinguen por forma, tamaño, orden y posición y que las propiedades de la materia varían según el agrupamiento de los átomos.

se afanaban en determinar la masa atómica⁵⁹ de los elementos conocidos por entonces; en 1817 el químico alemán Johann W. Döbereiner se percató de la existencia de propiedades notablemente parecidas en ciertos grupos de tres elementos con una variación progresiva del primero al tercero.

TRIADAS DE DÖBEREINER			
Litio (7)	Calcio (40)	Azufre (32)	Cloro (35,5)
Sodio (23)	Estroncio (88)	Selenio (79)	Bromo (80)
Potasio (39)	Bario (137)	Teluro (128)	Yodo (127)

Figura 23 Triadas de Döbereiner. Junto al nombre de cada elemento se expresa su masa atómica.

Döbereiner señaló que la masa atómica promedio en cada triada es muy parecida a la del elemento intermedio.

Reihen	Gruppe I. — R ² O	Gruppe II. — RO	Gruppe III. — R ² O ³	Gruppe IV. RH ¹ RO ²	Gruppe V. RH ³ R ² O ⁵	Gruppe VI. RH ² RO ³	Gruppe VII. RH R ² O ⁷	Gruppe VIII. — RO ⁴
1	H=1							
2	Li=7	Be=9.4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24	Al=27.3	Si=28	P=31	S=32	Cl=35.5	
4	K=39	Ca=40	—=44	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56, Co=59, Ni=59, Cu=63.
5	(Cu=63)	Zn=65	—=68	—=72	As=75	Se=78	Br=80	
6	Rb=85	Sr=87	?Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	—=100	Ru=104, Rh=104, Pd=106, Ag=108.
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	?Di=138	?Ce=140	—	—	—	— — — —
9	(—)	—	—	—	—	—	—	
10	—	—	?Er=178	?La=180	Ta=182	W=184	—	Os=195, Ir=197, Pt=198, Au=199.
11	(Au=199)	Hg=200	Tl=204	Pb=207	Bi=208	—	—	
12	—	—	—	Th=231	—	U=240	—	— — — —

Figura 24 Tabla Periódica de los Elementos tal y como Mendeléyev la publicó en 1872. En esta clasificación los elementos aparecen agrupados en familias (vertical) y períodos (horizontal). Su autor tuvo la gran idea de dejar huecos allí donde suponía que debía haber un elemento por entonces desconocido, prediciendo su masa atómica y varias de sus propiedades químicas (representados por guiones)

Posteriormente, en 1857, August Kekulé observó que el carbono está a menudo unido a otros cuatro átomos, más en concreto, en el metano, está unido a cuatro átomos de hidrógeno. De estas observaciones surgiría el importantísimo concepto químico de *valencia*⁶⁰ de gran protagonismo en la Tabla Periódica Moderna. Por aquellos años el geólogo Alexandre E. de Chancourtois publicó una primera forma de tabla periódica que llamó la «hélice telúrica» o «tornillo». Fue el primero en notar la periodicidad de los elementos y al disponerlos en espiral sobre un cilindro por orden

⁵⁹ Debido a la extrema pequeñez de los átomos, expresar su masa en gramos sería mucho más absurdo que pretender expresar la masa de un gorrión en giga toneladas. Por ello se utiliza unas unidades específicas llamadas *u.m.a.* (unidades de masa atómica). 1 gramo equivale a $6,022 \cdot 10^{23}$ uma

⁶⁰ Etimológicamente, valencia viene del término latino *valentia*=fuerza, capacidad, refiriéndose al poder combinante de un elemento. Modernamente sabemos que es el número de electrones que le faltan o debe ceder un elemento para completar su capa electrónica más externa. Por este motivo hoy se prefiere hablar de *número de oxidación* y no de *valencia*.

creciente de masa atómica, mostró que los elementos con propiedades similares parecían situarse a intervalos regulares.

Como vemos, entre 1850 y 1870 hubo un verdadero frenesí en los intentos de ordenación de los elementos. La idea más recurrente era la ordenación por masas atómicas y así el químico inglés John Newlands señaló que cuando los elementos se enumeran en orden de aumentar la masa atómica, las propiedades físicas y químicas similares se repiten a intervalos de ocho, de igual manera a como sucede con los sonidos de la escala diatónica musical, ahora bien esta regla deja de cumplirse a partir del calcio.

En 1869 eran ya 63 los elementos conocidos de los 92 que existen en la naturaleza, y por entonces, un profesor de química ruso, Dimitri Ivánovich Mendeléyev y un químico alemán, Julius Lothar Meyer elaboraron casi simultáneamente una ordenación de los elementos. Ambos los colocaron por orden creciente de sus masas atómicas, los agruparon en filas o periodos de distinta longitud y situaron en el mismo grupo elementos que tenían propiedades químicas similares, como la valencia. Construyeron sus tablas haciendo una lista de los elementos en filas o columnas en función de su masa atómica y comenzando una nueva fila o columna cuando las características de los elementos comenzaron a repetirse.

Llegados a este punto, cabe preguntarse ¿por qué la gloria de ser el inventor de la Tabla Periódica se la llevó Mendeléyev y no L. Meyer? La respuesta está en un par de decisiones que tomó el ruso: La primera fue dejar huecos cuando parecía que el elemento correspondiente todavía no había sido descubierto⁶¹ y la segunda fue ignorar el orden sugerido por los pesos atómicos y permutar determinados elementos adyacentes, tales como telurio-yodo⁶² y cobalto-níquel⁶³ para clasificarlos mejor en familias químicas.

La ordenación de Mendeléyev abrió de par en par las puertas para el descubrimiento de nuevos elementos. El momento era idóneo, ya que en aquellos años se había desarrollado notablemente la espectroscopía⁶⁴ y los químicos se habían percatado de la estrecha relación que existe entre la luz emitida y absorbida por los átomos y su estructura. Así pues, en 1875 Lecoq de Boisbaudran descubrió por vía espectroscópica un nuevo elemento que había predicho Mendeléyev denominándolo *eka-aluminio* por estar justamente debajo del aluminio. Su descubridor, francés, lo llamó Galio⁶⁵ en honor a su país. Cuatro años antes, en 1871, el alemán Clemens Winkler había demostrado la existencia de otro elemento predicho por Mendeléyev al que había llamado *eka-silicio* por estar situado debajo del silicio. Su descubridor lo llamó Germanio, en honor a su propio país.

⁶¹ No fue el primero en hacerlo, pero sí en ser reconocido en el uso de las tendencias en su tabla periódica para predecir las propiedades de esos elementos no conocidos. Incluso pronosticó las propiedades de algunos de ellos: el galio (Ga), al que llamó eka-aluminio por estar situado debajo del aluminio; el germanio (Ge), al que llamó eka-silicio; el escandio (Sc); y el tecnecio (Tc), que, aislado químicamente a partir de restos de un sincrotrón en 1937, se convirtió en el primer elemento producido de forma predominantemente artificial.

⁶² Las masas atómicas del telurio y del yodo son 127,6 y 126,9 uma por lo que deberían haberse colocado el yodo a la izquierda y el telurio a la derecha.

⁶³ Las masas atómicas del cobalto y del níquel son 58,9 y 58,7 uma respectivamente.

⁶⁴ Se llama así al estudio de las luces emitidas por los átomos al ser excitados (espectroscopía de emisión) y las absorbidas por ellos al ser convenientemente irradiados (espectroscopía de absorción).

⁶⁵ Le dio el nombre de su país natal *Gallia*, y el suyo propio por un juego de palabras de los que gustaban a los científicos de finales del siglo XIX ya que *gallus* significa gallo, *coq* en francés como su nombre Lecoq.

Al finalizar el S. XIX ya se conocían los gases nobles y surgía el problema de dónde colocarlos. Fue en 1904 cuando se decidió asignarles valencia cero y situarlos en columna a la derecha de la tabla, debido a su inercia química.

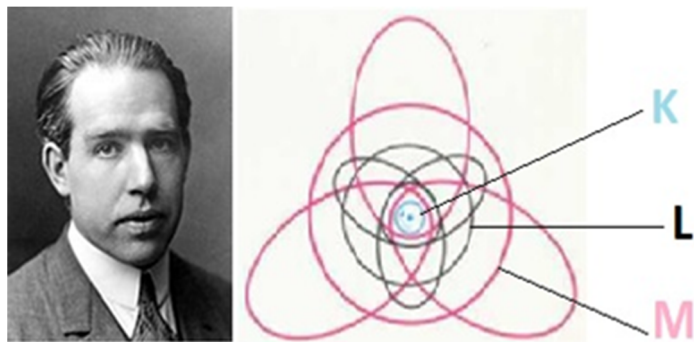


Figura 25 Modelo atómico de Bóhr-Sommerfeld. Apréciase que la capa más profunda (color azul) está formada por una única órbita circular en tanto que la complejidad crece en la segunda (color negro) la cual está formada por una órbita circular y tres elípticas. La tercera capa, aún más compleja (color rosa) está formada por una órbita circular, tres elípticas y cinco más de mayor excentricidad (no representada en la figura).

Ya en el S. XX se perfeccionaba la espectroscopía, extendiéndose más allá de la luz visible, los científicos se afanaban en observaciones espectroscópicas que evidencian una ordenación de los electrones en las cortezas atómicas según leyes estrictas. Toda esta temática fue objeto de intensa investigación en el marco de la Teoría Cuántica recién establecida, siendo el resultado la creación del *modelo atómico de capas* propuesto por Niels Bóhr⁶⁶ y perfeccionado poco después por Arnold Sommerfeld. Dicho modelo describe la corteza del átomo

como un conjunto de capas K, L, M, N,... de complejidad creciente que agrupan órbitas de distintas excentricidades.

Los gases nobles, situados a la derecha del Sistema Periódico, tienen sus capas electrónicas completas⁶⁷ en tanto que el resto de los elementos tienen su capa más externa incompleta, de forma que su tendencia natural es captar o ceder electrones. Una capa electrónica completa es considerada una estructura estable y así se explica la gran inercia química de los gases nobles. Por el contrario, los elementos alcalinos tienen un único electrón en su capa externa en tanto que los halógenos están a falta de un electrón para completar su capa superior. Así se explica la fuerte tendencia de los primeros a perder un electrón y la apetencia de los segundos por ganarlo en sus reacciones. Consideraciones de este tipo han hecho de la Tabla Periódica una espléndida clasificación en la que puede estimarse la reactividad de un elemento en función de su situación.

En 1912 un joven químico de 24 años llamado Henry Moseley, que trabajaba en el laboratorio del Dr. Rutherford experimentando con los rayos X producidos por distintos elementos, llegó a establecer una relación sistemática entre la longitud de onda de los rayos X emitidos por distintos átomos con su número atómico⁶⁸. Poco después daba a conocer en su publicación que el número atómico es un concepto mejor que la masa atómica para ordenar los elementos químicos, más en concreto, decía: “Cuando los elementos se ponen en orden de sus números atómicos sus propiedades físicas y químicas muestran tendencias periódicas”.

⁶⁶ Premio Nobel de Física en 1922

⁶⁷ La capa K puede alojar 2 electrones a lo sumo, la capa L se llena con 8, la capa M puede albergar hasta 18, la capa N se completa con 32 electrones.

⁶⁸ Número de protones que contiene el núcleo de un átomo.

En poco tiempo la ordenación de los elementos por orden creciente de su masa atómica, que desde los tiempos de Mendeléyev venía utilizándose, dio paso a la nueva ordenación de los elementos por orden creciente de sus números atómicos. La lógica de este cambio era aplastante: si se tiene en cuenta que los átomos de los elementos libres son neutros asumiremos que el número de electrones de su corteza ha de ser igual que el número de protones de su núcleo, y puesto que la actividad química radica en los electrones corticales, la ordenación por número atómico ha de ser mucho mejor que la ordenación por masa atómica.

En aquellos años se desarrollaba a gran ritmo la Mecánica Cuántica, especialmente diseñada para explicar los fenómenos ultra pequeños que escapan a nuestra percepción sensorial y, claro está, el objeto primordial de esa teoría no podía ser otro que el átomo. Uno de los principios de esta nueva física es la *imposibilidad de determinar la posición exacta de una partícula en un momento dado*, enunciado por Werner Heisenberg en 1927. La aceptación de este principio es, obviamente, incompatible con el concepto de órbita.

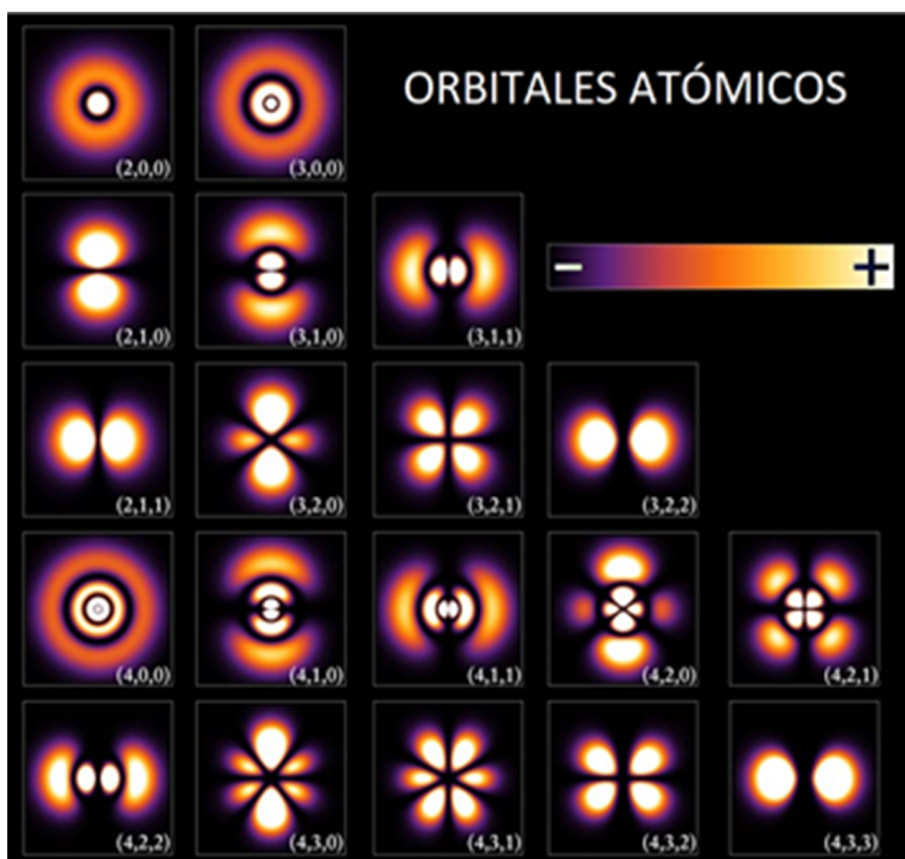


Figura 26 Formas geométricas de los distintos orbitales atómicos obtenidas por cálculo computacional. Las zonas más claras son las de mayor *densidad electrónica* (o probabilidad cuántica).

La aceptación de la Teoría Cuántica por la comunidad científica obligó a reformar en profundidad el modelo atómico de Böhr-Sommerfeld y sustituirlo por el llamado *Modelo de Nube de Carga* en el que las órbitas son sustituidas por *orbitales*, regiones del espacio circundante al núcleo, de determinada geometría, en los que se da por hecho que están los electrones, eso sí, sin conocer en ningún momento su posición exacta.

Los grandes avances del S. XX en Física Nuclear permitieron el descubrimiento de nuevos elementos no existentes en la naturaleza por causa de su núcleo excesivamente grande que los hace inestables y radiactivos. Todos ellos son más pesados que el uranio y se encuentran a continuación de este último en la Tabla Periódica.

Tabla Periódica de los Elementos

1 H Hidrógeno 1.008																	2 He Helio 4.002
3 Li Litio 6.941	4 Be Berilio 9.012											5 B Boro 10.811	6 C Carbono 12.011	7 N Nitrógeno 14.007	8 O Oxígeno 15.999	9 F Fluor 18.998	10 Ne Neón 20.180
11 Na Sodio 22.990	12 Mg Magnesio 24.305											13 Al Aluminio 26.982	14 Si Silicio 28.086	15 P Fósforo 30.974	16 S Azufre 32.064	17 Cl Cloro 35.453	18 Ar Argón 39.948
19 K Potasio 39.098	20 Ca Calcio 40.078	21 Sc Escandio 44.956	22 Ti Titanio 47.88	23 V Vanadio 50.942	24 Cr Cromo 51.996	25 Mn Manganeso 54.938	26 Fe Hierro 55.933	27 Co Cobalto 58.933	28 Ni Níquel 58.693	29 Cu Cobre 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Galio 69.723	32 Ge Germanio 72.61	33 As Arsénico 74.922	34 Se Selenio 78.97	35 Br Bromo 79.904	36 Kr Kriptón 84.80
37 Rb Rubidio 84.468	38 Sr Estroncio 87.62	39 Y Ytrio 88.906	40 Zr Zirconio 91.224	41 Nb Niobio 92.906	42 Mo Molibdeno 95.94	43 Tc Tecnecio 98.907	44 Ru Rutenio 101.07	45 Rh Rodio 102.906	46 Pd Paladio 106.42	47 Ag Plata 107.868	48 Cd Cadmio 112.411	49 In Indio 114.818	50 Sn Estáño 118.71	51 Sb Antimonio 121.760	52 Te Teluro 127.4	53 I Yodo 126.905	54 Xe Xenón 131.29
55 Cs Cesio 132.905	56 Ba Bario 137.327	57-71 Lantánidos	72 Hf Hafnio 178.49	73 Ta Tantalio 180.948	74 W Wolframio 183.85	75 Re Reniio 186.207	76 Os Osmio 190.23	77 Ir Iridio 192.22	78 Pt Platino 195.08	79 Au Oro 196.967	80 Hg Mercurio 200.59	81 Tl Talio 204.383	82 Pb Plomo 207.2	83 Bi Bismuto 208.980	84 Po Polonio [209]	85 At Astato [209]	86 Rn Radón [222]
87 Fr Francio [223]	88 Ra Radio [226]	89-103 Actínidos	104 Rf Rutherfordio [261]	105 Db Dubnio [262]	106 Sg Seaborgio [263]	107 Bh Bohrio [264]	108 Hs Hassium [265]	109 Mt Meitnerio [266]	110 Ds Darmstadtio [268]	111 Rg Roentgenio [272]	112 Cn Copernicio [277]	113 Uut Ununtrio [deconocido]	114 Fl Flerovio [289]	115 Uup Ununpentio [deconocido]	116 Lv Livermorio [293]	117 Uus Ununseptio [deconocido]	118 Uuo Ununoctio [deconocido]
57 La Lantano 138.906	58 Ce Cerio 140.115	59 Pr Praseodimio 140.908	60 Nd Neodimio 144.24	61 Pm Prometio 144.913	62 Sm Samario 150.36	63 Eu Europio 151.964	64 Gd Gadolinio 157.25	65 Tb Terbio 158.925	66 Dy Disprocio 162.50	67 Ho Holmio 164.930	68 Er Erbio 167.26	69 Tm Terbicio 168.934	70 Yb Yterbio 173.04	71 Lu Lutecio 174.967			
89 Ac Actinio [227]	90 Th Torio [232]	91 Pa Protactinio [231]	92 U Uranio [238]	93 Np Neptunio [237]	94 Pu Plutonio [244]	95 Am Americio [243]	96 Cm Curio [247]	97 Bk Berkelio [247]	98 Cf Californio [251]	99 Es Einsteinio [254]	100 Fm Fermio [257]	101 Md Mendelevio [288]	102 No Nobelio [289]	103 Lr Lawrencio [262]			

Figura 27 Tabla Periódica moderna ordenada por números atómicos crecientes. Obsérvese que los 14 elementos que siguen al *lantano* (La) y al *actinio* (Ac) aparecen debajo, cuando realmente, deben intercalarse entre las columnas 3 y 4. Se hace así para darle unas proporciones razonables a la tabla.

Finalmente, en 1945 Glenn Seaborg, un científico estadounidense, sugirió que tanto los actínidos como los lantánidos, estaban llenando un subnivel *f* en vez de una cuarta fila en el bloque *d*, como se pensaba hasta el momento. Los colegas de Seaborg le aconsejaron no publicar una teoría tan radical, ya que lo más probable era arruinar su carrera. Como consideraba que entonces no tenía una carrera que pudiera caer en descrédito, la publicó de todos modos. Posteriormente se encontró que estaba en lo cierto y en 1951 ganó el Premio Nobel de Química por su trabajo en la síntesis de los actínidos.

Actualmente la Tabla Periódica es objeto de estudio en todos los ámbitos escolares por la enorme cantidad de conocimiento que acumula y por la sistemática que su uso impone en el desarrollo de la Química. Es, sin ningún género de dudas, una de las clasificaciones científicas más excelsas de que se dispone, fruto de las mentes brillantes de unos trabajadores incansables que se pasaron el testigo en la carrera de una gran epopeya intelectual que se extendió durante un siglo y medio.

I.16 LEYES

“La mayoría de las ideas fundamentales de la ciencia son esencialmente sencillas, y por regla general pueden ser expresadas en un lenguaje comprensible para todos”.

Albert Einstein (1879-1955) Premio Nobel de Física

En 1854 el presidente de Estados Unidos hizo una oferta al jefe Seattle, de la tribu swamish, para comprarle los territorios del noroeste que hoy forman el estado de Washington, junto con la promesa de crear una “reserva” para el pueblo indígena. Meses después el sabio jefe contestó a la oferta pronunciando un discurso en el Congreso de la nación que ha pasado a la historia por su clarividencia y sensatez. Hoy es un icono del movimiento ecologista. Se recogen aquí algunos fragmentos del citado discurso:

“Esto es lo que sabemos: la tierra no pertenece al hombre; es el hombre el que pertenece a la tierra. Todas las cosas están relacionadas como la sangre que une una familia. Hay una unión en todo. Lo que ocurra con la tierra recaerá sobre los hijos de la tierra. El hombre no tejió el tejido de la vida; él es simplemente uno de sus hilos. Todo lo que hiciere al tejido, lo hará a sí mismo”.

Así pues, se asume universalmente que la naturaleza existe de por sí, siendo el hombre una pequeña parte de ella. Para convencerse de ello, baste el ejemplo de la declaración del jefe Seattle, quien en su discurso se definía a sí mismo: *“Soy un hombre salvaje y no comprendo ninguna otra forma de actuar”.*

Por otro lado la filosofía reconoce que la naturaleza es legal, es decir, obedece a leyes invariantes en el tiempo y en el espacio, correspondiéndole al científico la tarea de descubrirlas y describirlas. Además, la existencia de esas leyes es independiente de que el ser humano las describa o no, siendo en principio posible conocerlas en su totalidad.

Podríamos definir *ley científica* como *una proposición que afirma una relación constante entre dos o más variables o factores*. Una ley científica puede expresarse matemáticamente (caso, por ejemplo, de las leyes del movimiento rectilíneo) o en lenguaje normalizado (caso, por ejemplo, de las leyes de Mendel sobre la herencia biológica). Para Bunge⁶⁹ una ley científica es “una hipótesis confirmada que afirma una relación constante entre dos o más variables, cada una de las cuales representa (al menos parcial o indirectamente) una propiedad de sistemas concretos”.

Las leyes pueden ser descubiertas por vía inductiva a través de la observación de hechos concretos, como es el caso de las leyes de Mendel sobre la herencia, o bien por vía deductiva a partir de otras leyes más generales. En este segundo caso las leyes de partida suelen denominarse *principios*. Así, por ejemplo, la ley de Snell sobre la refracción de la luz puede deducirse a partir del Principio de Fermat, de carácter más general. Este último dice que *el camino que seguirá la luz entre dos puntos será aquel en que necesite menos tiempo para recorrerlo*. Pierre Fermat lo dio a conocer en 1650 y con él consiguió demostrar la ley de la refracción que Willebrord Snellius había descubierto 29

⁶⁹ BUNGE, M. (1983) *La Investigación Científica*. Ed. Ariel. Barcelona. ISBN: 84 344 8010 7

años antes. Se trata de una idea simple y universal, tanto que forma parte de nuestra forma de actuar, es decir, de nuestro sentido común, como podemos comprobar en el experimento mental representado en la figura 28. En este experimento la socorrista debe llegar cuanto antes al punto en que se encuentra el bañista en apuros para socorrerle, así pues, deberá seguir el camino que le permita acercarse corriendo por la arena el máximo tiempo posible aprovechando su mayor velocidad y siempre que no signifique realizar un rodeo excesivo. Por tanto, el camino correcto será el **C**. Pues bien, eso mismo es lo que sucede con la luz, y por este motivo cambia su dirección al pasar de un medio a otro en el que su velocidad de propagación es diferente, es decir, se refracta.

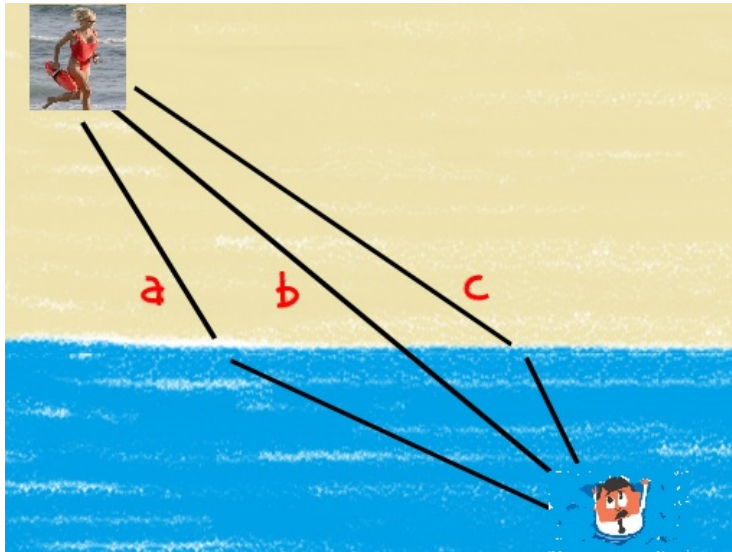


Figura 28 En una playa hawaiana un bañista se está ahogando. La vigilante de la playa, Pamela, sale corriendo a socorrerlo intentando llegar a él en el menor tiempo posible. Sabiendo que su velocidad sobre la arena es mayor que en el agua ¿Cuál de las tres trayectorias deberá seguir?

La ciencia tiene su base en un conjunto de principios cuyo número tiende a ser mínimo, a partir de los cuales puede construirse por vía lógica la gran mayoría de sus leyes. Pertenecen a este selecto conjunto el *Principio de la Conservación de la Energía*, el *Principio de Conservación de la Masa*, Los *Principios de la Termodinámica*, los *Principios de la Mecánica*, en el campo de la hidrostática tenemos el *Principio de Pascal* y el *Principio de Arquímedes*, en la ondulatoria tenemos el *Principio de Propagación* (Ch. Huyghens) y el *Principio de Superposición*, en la óptica geométrica está el ya

citado *Principio de Fermat* y, ya en el campo de la Física Moderna, tenemos el *Principio de la Cuantización* (M. Planck), el *Principio de la Dualidad Onda-Corpúsculo* (de Broglie), el *Principio de Exclusión* (W. Pauli) y el *Principio de Indeterminación* (W. Heissenberg) entre otros.

Detengámonos ahora ante un instructivo caso histórico: El *Principio de Arquímedes*, probablemente la más antigua ley científica: A mediados del S. III a.C. Arquímedes de Siracusa estudiaba y trabajaba en Alejandría colaborando con el director de la Biblioteca, Eratóstenes de Cirene. Arquímedes se había propuesto investigar sobre el fenómeno de la flotación de los cuerpos, ahora bien, el conocimiento disponible por entonces era insuficiente e impreciso, toda vez que se ceñía a unas pocas generalizaciones tales como “Los sólidos desplazan a los líquidos”, “Los cuerpos sumergidos en un líquido pesan menos que en el aire”, “La flotación depende de la clase de líquido”, todas ellas sacadas de la experiencia cotidiana.

Lo primero que tenía que hacer Arquímedes era seleccionar las variables necesarias y suficientes para conjeturar el fenómeno de la flotación. No se conservan documentos escritos que den cuenta del proceso de la investigación, tan solo disponemos de la tradición oral recogida en otros textos escritos bastantes siglos después. Podemos por tanto imaginar que Arquímedes debió desechar variables como la viscosidad del líquido, su transparencia o la forma y composición del sólido flotante

para centrar su atención en el peso del sólido, el volumen del líquido desalojado y el empuje que este ejerce sobre el sólido.

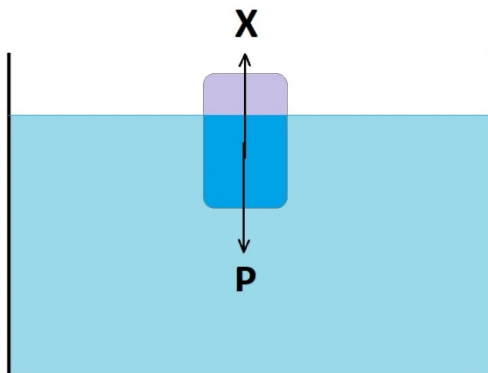


Figura 29 Sólido flotante en equilibrio. El peso del cuerpo es igual al empuje hidrostático.

Hoy estamos acostumbrados a buscar variables cuantitativas, pero en tiempos de Arquímedes dominaban el prejuicio platónico contra la posibilidad de construir una ciencia de la naturaleza y la concepción aristotélica de una física cualitativa y especulativa. Y este es el gran mérito de Arquímedes: para llegar a descubrir su principio tuvo que inventar incluso el método para descubrirlo.

Probablemente, el primer paso que dio era suponer que el peso del cuerpo en el aire P y el peso de ese cuerpo sumergido P' son fuerzas y que la pérdida de peso del cuerpo por efecto de la flotación ($P - P' = X$)

tiene que ser también una fuerza. Arquímedes se preguntaría con qué propiedad podría relacionar esta última ¿con el peso del cuerpo? No porque ese peso ya forma parte del enunciado del problema, entonces ¿con el peso de todo el líquido? Tampoco, porque la flotación es independiente de la cantidad de líquido. Así pues, hubo de suponer que X tiene que estar relacionada con el peso del líquido desalojado. Es bastante seguro que él pensara que si un barco flota y no se hunde es porque el peso de la embarcación es igual al empuje que el agua desalojada ejerce sobre el navío. Y ese empuje no puede ser otra cosa que el peso de esa agua.

Finalmente, la mente de Arquímedes razonaría de la siguiente manera: Si el cuerpo representado en la figura 29 se hiciera desaparecer restituyendo el agua que desalojó no habría más que agua en la vasija, en equilibrio, y en esas condiciones el peso del agua restituida sería igual que el empuje hidrostático que sobre ella ejercería el resto del líquido. De esta forma pudo haber llegado al convencimiento de que *el peso de cualquier sólido que flota en un líquido debe ser igual al peso de líquido desalojado*.

I.17 LEYES DE LA GRAVITACIÓN Y DE LA ELECTROSTÁTICA

Hemos visto en la sección anterior que las leyes científicas pueden ser descubiertas por vía deductiva o por vía inductiva. A modo de ilustración, veremos el caso de dos leyes que se refieren a dos de las fuerzas esenciales de la naturaleza, cuya expresión matemática es casi idéntica, si bien la vía por la que fueron descubiertas era distinta. Nos referimos a las leyes de la Gravitación y de la Electrostática.

I.17.1 LEY DE LA GRAVITACIÓN

La espectacular complejidad del firmamento ha atraído desde muy antiguo la atención del ser humano, siendo su empeño interpretar científica o religiosamente las observaciones. De este modo, han surgido dos tendencias, por un lado la *Astronomía*, de fundamento matemático y físico, intenta explicar los movimientos de los cuerpos celestes y sus leyes, y por otro, la *Astrología*, busca la relación o influencia de los cuerpos celestes y sus posiciones en el comportamiento y destino de los seres. El año 1548 señala el comienzo de un cambio de paradigma por el que se abandona la

concepción geocéntrica del universo que desde muy antiguo imperaba, hasta el punto de haber hecho de ella una cuestión de fe⁷⁰. A partir de entonces se considera el Sol como sistema de referencia y el estudio de los movimientos de los cuerpos celestes se hace en relación a él.

En 1576 el rey Federico II de Dinamarca había hecho construir en la isla de Hven un observatorio astronómico dotado de los mejores y más avanzados medios de la época. Aquel complejo científico se llamaba Uraniborg, en honor de Urania, la musa de la Astronomía y al frente del mismo estaba un joven astrónomo danés de origen noble y abultada hacienda llamado Tycho Brahe. La labor principal que desarrolló Tycho en las dos décadas que pasó trabajando en Uraniborg fue la rutinaria, aunque importantísima tarea, de medir las posiciones de los planetas con respecto a las estrellas fijas. Sus datos eran considerados los de más calidad de Europa y sus tablas astronómicas fueron las más reconocidas y utilizadas hasta bien entrado el S. XIX. A partir de 1599 T. Brahe se traslada al castillo de Benatky, cerca de Praga donde montó su nuevo observatorio. Por entonces trabajaba con él Johannes Kepler, joven astrónomo y gran matemático de origen alemán cuya misión era recopilar los datos de las más de 1000 estrellas que Tycho Brahe había determinado durante más de veinte años⁷¹. Tycho falleció en 1601 siendo sucedido por Kepler.

Durante años, Kepler intentó explicar los datos de los movimientos aparentes de los planetas que T. Brahe había determinado. Lo intentó hasta la saciedad suponiendo órbitas circulares para ellos, influenciado sin duda por sus creencias religiosas y por el prejuicio de un mundo perfecto en el que los movimientos de los cuerpos celestes habrían de ser circulares por ser esta la línea perfecta. Ahora bien, le aparecía un pertinaz error de ocho minutos de arco en las posiciones de Marte que no conseguía superar, así pues, no le quedó otro remedio que ensayar la posibilidad de que la órbita de Marte fuera elíptica, una extraña figura geométrica que había descrito diecinueve siglos antes el geómetra griego Apolonio de Pérgamo. Al comprobar que los datos de las tablas concordaban con las previsiones teóricas, supuesta la órbita elíptica, la mente de Kepler consiguió superar el obstáculo intelectual que la atenazaba y comprendió que los planetas describen “imperfectas” elipses en torno al Sol y no circunferencias⁷². Tan pronto como se produjo el cambio conceptual en la mente de Kepler todo parecía ser más claro, al fin todo encajaba. El análisis de las posiciones de los planetas en distintos momentos del año permitió que Kepler se percatara de que la velocidad de su traslación no es constante, siendo máxima en el *perihelio* y mínima en el *afelio*. Aún más, también pudo descubrir que para todos los planetas de los que disponía de datos, existe una proporcionalidad entre el período de revolución del planeta en torno al Sol y el eje mayor de la órbita. Todo ello lo plasmó en forma de tres leyes en su obra *Astronomia Nova*, publicada en 1609. Utilizando sus leyes, Kepler pudo predecir el tránsito de Venus del año 1631 con lo cual sus leyes quedaron validadas.

Primera ley: *Los planetas describen órbitas elípticas en torno al Sol, ocupando este uno de los focos de la elipse*

⁷⁰ “Aquel día, el día en que Yahvé entregó a los amorreos en las manos de los hijos de Israel, habló Josué a Yahvé, y a la vista de Israel dijo: Sol, detente sobre Gabaón; y tú, Luna, sobre el valle de Ayalón; y el Sol se detuvo, y se paró la Luna, hasta que la gente se hubo vengado de sus enemigos” Josué (10-12)

⁷¹ Las *Tablas rudolfinas* o *rodolfinas* son una publicación de Johannes Kepler de 1627, consistente en un catálogo estelar y unas tablas planetarias, usando los datos recabados por Tycho Brahe en sus observaciones. Kepler las llamó *Rudolfinas* en homenaje al emperador Rodolfo II, bajo cuyo mecenazgo habían trabajado los dos.

⁷² En 1916 Albert Einstein explica con su Teoría General de la Relatividad que la masa del Sol curva el espacio-tiempo, de manera que los planetas se mueven en un espacio deformado. De alguna manera las elipses resultan ser “rectas en un espacio curvo” y ¡la línea recta es aún más simple que la circunferencia!

Segunda ley: *Los planetas se mueven con velocidad areolar constante, esto es, el radio vector que les une al Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.*

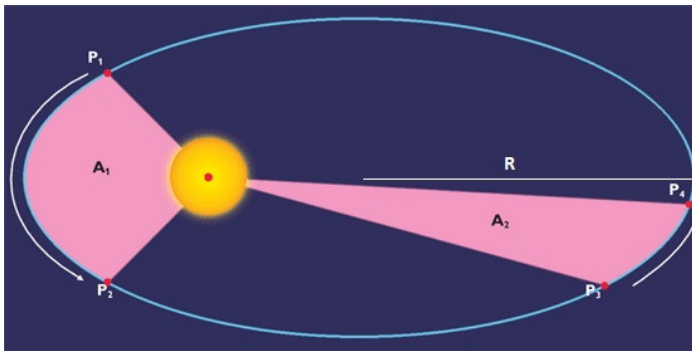


Figura 30 Esquema que resume las tres leyes de Kepler. El planeta se desplaza tanto más rápido cuanto más próximo se encuentra al Sol y el cuadrado de su "año" es proporcional al cubo del semieje mayor de su eclíptica.

Tercera ley: *para todos los planetas, el cuadrado de su período de revolución es proporcional al cubo del semieje mayor de su órbita.*

Corría el año 1663 cuando el joven Newton recibió una carta de Robert Hooke en la que le comentaba sus ideas intuitivas acerca de la gravedad. En aquella época de estudiante en Cambridge, Isaac Newton estaba interesado en la Matemática, la Astronomía, la Mecánica y la Óptica, materias que él dominaba gracias a

su capacidad de trabajo y su poderío intelectual. Había estudiado a fondo las obras de Descartes, Galileo y Kepler, entre otras muchas y por entonces, había experimentado y establecido los *Principios de la Dinámica*, cuyos enunciados son:

Principio de Inercia: *En ausencia de fuerzas, todo cuerpo mantiene su movimiento rectilíneo y uniforme.*

Principio de Acción: *Cuando un cuerpo recibe la acción de una fuerza, este experimenta una aceleración proporcional a la fuerza, siendo la masa del cuerpo la constante de proporcionalidad. El principio se expresa con la conocida expresión $f = ma$*

Principio de Acción-Reacción: *Cuando un cuerpo recibe la acción de una fuerza, este reacciona con una fuerza igual y contraria.*

La misiva de Hooke determinó que Newton abandonara temporalmente sus otras investigaciones y se zambullera de lleno en el problema de la gravitación⁷³. ¿Qué es lo que movió a Newton para que se centrara en el problema de la gravitación? Muy probablemente fuera el deseo de quedar por encima de Hooke, resolviendo un problema que este no había podido resolver.

En sus razonamientos, Newton pensaba que si, realmente, los planetas giran en torno al Sol siguiendo órbitas elípticas cerradas, tal y como había postulado Kepler, es porque entre el Sol y cada planeta debe existir algún tipo de ligadura o unión inmaterial que retiene al planeta en una órbita cerrada. Algo parecido pasa cuando un pastor hace girar una piedra con su honda, la fuerza de la tensión de las cuerdas motiva que la piedra describa una trayectoria circular cerrada. Si el pastor suelta la cuerda la tensión cesa y la piedra sale despedida en dirección recta y tangencial.

⁷³ Siempre hubo una fuerte rivalidad entre Hooke y Newton; pese a ser el primero siete años mayor y ser un gran científico, era también un polemista contumaz y a su vez Newton, de carácter difícil y con una brillantez intelectual aplastante, decidiría rivalizar con su colega.

DEDUCCIÓN DE LA LEY DE LA GRAVITACIÓN PARA EL CASO DE LA TIERRA Y LA LUNA

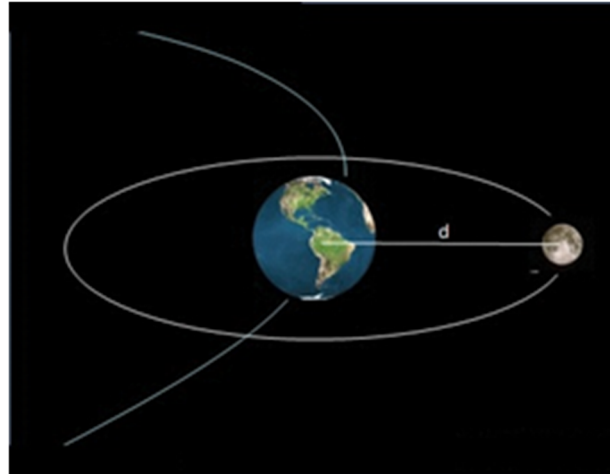


Figura 31 Sistema Tierra-Luna

La fuerza atractiva que la Tierra ejerce sobre la Luna debe ser igual al producto de la masa de la Luna por la aceleración (centrípeta) de esta:

$$F = m \frac{4\pi^2}{T^2} d$$

o, escrito de otra forma:

$$F = m \frac{4\pi^2}{d^2 T^2} d^3$$

Pero el cociente $\frac{d^3}{T^2}$ es un valor constante para todos los planetas y sus satélites, por tanto:

$$F = 4\pi^2 k_1 \frac{m}{d^2} \quad (*)$$

La fuerza que la Luna ejerce sobre la Tierra deberá responder a:

$$F = 4\pi^2 k_2 \frac{M}{d^2} \quad (**)$$

Y ambas fuerzas deben ser iguales, es decir, $k_1 m = k_2 M$

O lo que es lo mismo: $k_1/M = k_2/m = K$

Por consiguiente: $k_1 = KM$ y $k_2 = Km$

Y sustituyendo k_1 en la ecuación (*) tenemos:

$$F = 4\pi^2 K \frac{M \cdot m}{d^2} = G \frac{M \cdot m}{d^2}$$

Y lo mismo pasaría al sustituir k_2 en la ecuación (**)

Igualmente sucede entre el Sol y la Tierra o los restantes planetas y, en general, siempre que dos masas m_1 y m_2 estén situadas frente a frente a una distancia r , se atraerán con una fuerza que responde a la ecuación antes deducida.

Al producto $4\pi^2 K$ se le llama *Constante de Gravitación Universal*

Newton se basó en cuatro supuestos para deducir matemáticamente su famosa Ley de la Gravitación Universal:

1. En la primera ley de Kepler, según la cual un planeta gira en torno al Sol en una órbita elíptica, estando el Sol situado en uno de sus focos.
2. En la tercera ley de Kepler, según la cual el cociente entre el cubo del semieje promedio de la órbita y el cuadrado del período es constante para todos los astros y planetas.
3. En el Principio de Acción de las Fuerzas establecido por él mismo, según el cual, la fuerza ejercida sobre un cuerpo es igual al producto de su masa por la aceleración que este adquiere: $F = m \cdot a$
4. Que la aceleración de un cuerpo que gira en torno a un centro no es otra que la centrípeta: $a = \frac{v^2}{R}$

Combinando las ecuaciones procedentes de los cuatro supuestos, Newton llegó a deducir por vía matemática su *Ley de la Gravitación Universal*, según la cual, la fuerza con que se atraen dos masas m_1 y m_2 situadas a la distancia r es proporcional al producto de ambas masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa.

Tanto los Principios de la Mecánica como la Ley de la Gravitación Universal fueron publicados por Newton, a instancias de su gran amigo Edmund Halley, en 1687 bajo el título *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, probablemente el más importante texto científico de la historia.

En una obra como esta, dirigida a lectores científicamente cultivados, pero no necesariamente diestros en matemáticas, pudiera ser problemático incluir la deducción de la ley de Newton. Por ese motivo, dicha deducción se incluye en un cuadro de texto como añadido, a sabiendas de que la citada deducción puede encontrarse en cualquier libro de Física General.

I.17.2 LEY DE LA ELECTROSTÁTICA

Pasados ya más de cincuenta años de la publicación de los *Principia* de Newton, la comunidad científica del S. XVIII no solo había asumido los Principios de la Dinámica y la Ley de la Gravitación sino que la figura de su descubridor era venerada y considerada en extremo. Por otro lado, en la primera mitad de este siglo estaba avanzando el conocimiento de la naturaleza eléctrica de la materia. La cosa venía de lejos, toda vez que ya en el siglo sexto antes de Cristo, Thales de Mileto y posteriormente Teofrasto de Efeso (S. III a.C.) habían observado que al frotar un pedazo de ámbar⁷⁴ este es capaz de atraer objetos muy ligeros. Pasados diecinueve siglos, el físico británico William Gilbert publica en 1600 *De Magnete*, donde utiliza por primera vez la palabra *electricidad*, creada a partir del término griego “elektron” que significa “ámbar”. El trabajo de Gilbert sobre electrostática y magnetismo supuso el lanzamiento de toda una línea de investigación sobre las propiedades eléctricas de la materia. Así, se perfeccionan las brújulas magnéticas para mejorar la navegación. En 1733 el francés Francois de Cisternay du Fay comprobó que los objetos frotados contra el ámbar se repelen y que los objetos frotados contra el vidrio también se repelen y comprobó también que los objetos frotados contra el ámbar atraen a los objetos frotados contra el vidrio. Merced a ello, propuso la existencia de dos tipos de carga eléctrica, la positiva y la

⁷⁴ Resina fósil de color miel, considerada como el plástico de la antigüedad, con la que se confeccionaban aderezos y objetos ornamentales.

negativa. Ya en la segunda mitad del siglo, se construyen los primeros condensadores⁷⁵ eléctricos y los electroscopios⁷⁶ y se descubrió la conductividad eléctrica del carbón.

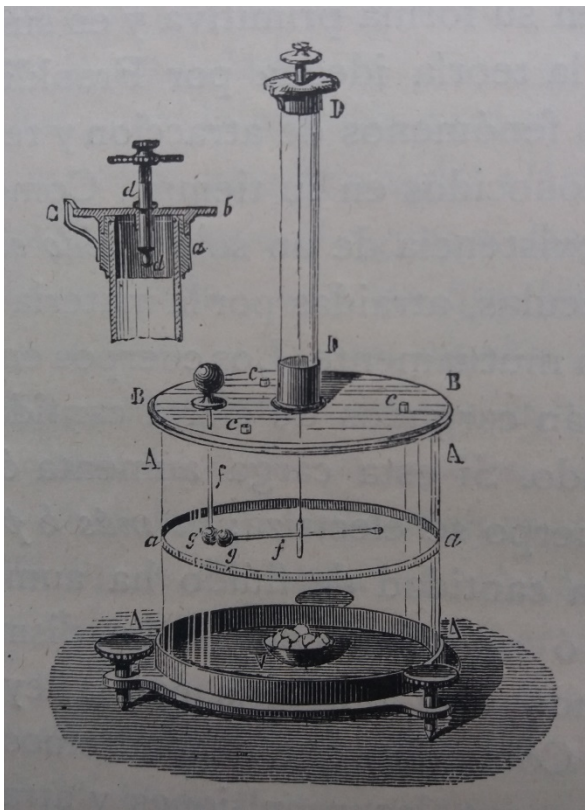


Figura 32 Balanza electrostática de torsión diseñada por Ch. Coulomb para sus experimentos. GUILLEMIN, A (1882) *El Mundo Físico*. Montaner y Simon Ed., Barcelona.

A comienzos del S. XVIII el empeño de los científicos era cuantificar las fuerzas atractivas o repulsivas que unas cargas ejercen sobre otras. Inevitablemente, la influencia de Newton era patente en los físicos de esa época, siendo una idea consensuada que las cargas deberían interactuar entre ellas de forma similar a como se atraen las masas entre sí.

En 1777 Charles-Augustin de Coulomb acometió la tarea de comprobar si las fuerzas entre las cargas siguen una ley similar a la de Newton. Para ello ideó una balanza de torsión⁷⁷ cuyo esquema se representa en la figura 32. El dispositivo experimental se encuentra alojado en el interior de una estructura cerrada de vidrio en cuyo fondo hay un platillo con cal viva para asegurar que el aire esté seco. El hilo de torsión cuelga de un tornillo micrométrico graduado (ver el detalle ampliado en la figura) **D** y en su extremo inferior sostiene un brazo de material aislante; en uno de sus extremos se inserta una bola metálica **g** y en el otro

extremo hay un contrapeso que equilibra el brazo. En la tapa superior **B** se encuentra una barra metálica **f** coronada por una bola de bronce y en su extremo inferior se aloja una bola metálica **g'**. El cilindro de vidrio que conforma el cuerpo principal del instrumento tiene un aro **a** graduado que permite medir los ángulos de torsión.

Coulomb operaba de la siguiente manera: Primero giraba el tornillo superior **D** hasta conseguir que las bolitas metálicas **g** y **g'** quedaran en contacto, evitando que el hilo se retorciera. Después tocaba con un cuerpo electrizado (una barra de ebonita, de ámbar o de vidrio) en la bola superior del instrumento. Las cargas pasan hasta las bolitas **g** y **g'** lo que motiva la aparición de una fuerza repulsiva entre ambas que provoca un giro del travesaño que se puede medir en la escala graduada **a**. Téngase en cuenta que el ángulo de torsión del hilo es proporcional a la fuerza repulsiva entre las bolitas.

⁷⁵ Dispositivos que permiten acumular carga eléctrica

⁷⁶ Dispositivos para detectar la existencia de cargas eléctricas.

⁷⁷ Este dispositivo, ideado por Coulomb, no solo rindió grandes frutos en sus investigaciones sino que permitió que veinte años más tarde, Henry Cavendish pudiera determinar el valor de la Constante de Gravitación Universal haciendo uso de una balanza de torsión de gran tamaño instalada en el interior de una caseta, para evitar posibles corrientes de aire.

Pongamos, por ejemplo, que la torsión fuera de 36° entonces, si se conoce la constante elástica de torsión del hilo, puede conocerse el valor de la fuerza repulsiva entre las bolitas. Seguidamente, Coulomb giraba el tornillo micrométrico aproximando ahora las bolitas cargadas a 18° , es decir, a distancia mitad, pero para ello tenía que girar el tornillo micrométrico un ángulo de 144° . Para reducir la distancia entre bolitas a la cuarta parte, es decir, a 9° , el tornillo micrométrico debería ser girado 576° , y así sucesivamente. En su diario de laboratorio, Coulomb tabulaba sus medidas en modo análogo al cuadro de texto adjunto:

Distancia angular	36°	18°	9°
Ángulo de torsión	36°	144°	576°
	$36/36=1$	$144/36=4$	$576/36=16$

Pudo comprobar de esta manera que a medida de que las esferas cargadas se aproximan a distancias mitad, cuarta parte, ... la fuerza repulsiva entre ellas se hace cuatro, dieciséis, ... veces mayor, es decir, que *la fuerza repulsiva es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa*.

Como fruto de esta experimentación, pudo Coulomb enunciar se célebre *Ley de la Electroestática*, cuya fórmula matemática es:

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Ambas leyes, la de la gravitación y la de la electrostática, tienen igual formato, en ambos casos, la fuerza con que interactúan las dos magnitudes activas (masas o cargas) es proporcional al producto de los valores de estas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Ahora bien, hay una diferencia en la constante de proporcionalidad ya que en el caso de la gravitación la citada constante es única y universal⁷⁸ en tanto que en el caso de las acciones eléctricas, la constante de proporcionalidad depende del medio en el que se encuentren las cargas⁷⁹.

Actualmente, las leyes de Newton y de Coulomb se enmarcan en la *Teoría General de Campos*⁸⁰, siendo el gravitatorio y el eléctrico casos particulares en los que la magnitud activa es la masa o la carga, respectivamente. Se da por hecho que toda masa crea en torno a sí un campo gravitatorio, ya que cualquier otra masa colocada en sus inmediaciones experimentaría una fuerza atractiva. Igualmente se asume por principio que toda carga crea un campo eléctrico en torno a sí misma, ya que cualquier otra carga situada en su entorno experimentaría una fuerza atractiva o repulsiva según fueran los signos de ambas.

Tanto Newton como Coulomb enunciaron sus leyes para campos centrales, esto es, para el caso en que la magnitud creadora de los mismos fuera puntual. Asumimos como obvio que esto no pasa nunca; ni la Tierra ni el Sol son masas puntuales, ni lo es ningún cuerpo celeste, ahora bien, las distancias siderales son tan grandes en comparación al tamaño de los astros que el modelo

⁷⁸ El valor de G fue determinado por primera vez en 1798 por Henry Cavendish por medio de una balanza de torsión, encontrando para ella el valor $G=6,674 \cdot 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$

⁷⁹ El valor de la constante de Coulomb para el vacío es $K=9 \cdot 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2$

⁸⁰ En física se denomina *campo* a aquella región del espacio donde se dejan sentir los efectos a distancia de una determinada magnitud activa. En los campos gravitatorios la magnitud activa es la masa y en los eléctricos la carga.

puntual es perfectamente aplicable a esos casos. Otro tanto puede decirse de los campos eléctricos creados por cuerpos cargados de geometría esférica o cuasi esférica.

Finalmente, a modo de resumen, es preciso insistir en que las leyes científicas son proposiciones que establecen la relación constante que existe entre dos o más variables que intervienen en un fenómeno. Dada la enorme variedad de fenómenos que son objeto de estudio para la ciencia, forzoso es aceptar que la variedad de leyes es enorme. Las leyes físico-químicas son cuantitativas, puesto que casi todas relacionan unas pocas magnitudes mensurables, tal es el caso de las leyes de los gases, de la elasticidad de los materiales, de la estequiometría, de la inducción electromagnética, etc. En el caso de las leyes biológicas la profusión de variables intervinientes en los fenómenos es mayor, lo que dificulta o impide la modelización matemática de los mismos y por tanto las leyes son a lo sumo estadísticas. Tal es el caso de las leyes de la herencia de G. Mendel. Como consecuencia, los métodos deductivos se ciñen casi con exclusividad a la mayoría de los fenómenos físicos en tanto que los métodos inductivos se aplican en general al resto de los fenómenos naturales.

I.18 TEORÍAS Y MODELOS

La curiosidad infantil es una característica común al ser humano en las primeras etapas de su desarrollo. El niño investiga y aprende a través del juego, no dispone de más conocimientos ni destrezas que los propios de su edad y con frecuencia se equivoca. Nosotros, los adultos, vemos sus trastadas y pifias, fruto inevitable del juego del ensayo-error, no siempre con la benevolencia y paciencia que sería deseable. Pues bien, la ciencia arranca la investigación con preguntas pero, a diferencia del juego infantil, sigue un proceso bien ritualizado y estructurado para culminar con la construcción de sistemas de ideas compactos y estructurados, esto es, las teorías. Estas constituyen y vertebran el conocimiento científico.

En un principio, cuando una ciencia es joven, se buscan variables relevantes, datos singulares así como clasificaciones e hipótesis sueltas que establezcan relaciones entre esas variables y expliquen los citados datos. Así, por ejemplo, ya desde la más remota antigüedad se conocían ciertos efectos de la electricidad atmosférica, como los relámpagos, los rayos y los fuegos de San Telmo, sin que por entonces se supiera prácticamente nada acerca de la existencia de las cargas eléctricas. En los siglos XVII y XVIII William Gilbert⁸¹, Benjamin Franklin y Charles Coulomb, entre otros, dieron a conocer la existencia de los campos magnéticos, la naturaleza eléctrica de los fenómenos atmosféricos así como la ley que rige las fuerzas entre cargas.

En una fase posterior se elaboran explicaciones más acertadas, se descubren nuevas relaciones entre las variables y se dan forma a las primeras leyes. Siguiendo con nuestro ejemplo, en el S. XIX Alessandro Volta diseña el primer dispositivo capaz de generar una corriente eléctrica, Hans Christian Ørsted descubre y estudia el campo magnético creado por una corriente eléctrica y André-Marie Ampère comprueba la existencia de fuerzas entre dos corrientes eléctricas próximas, enunciando la ley que rige esas acciones.

⁸¹ En su obra más importante *“De Magnete”*, publicada en Londres en 1600, Gilbert estudia los imanes y sus propiedades, los cuerpos magnéticos y el magnetismo terrestre.

Finalmente, cuando el conocimiento semiempírico sobre un determinado fenómeno ha alcanzado una cierta “masa crítica” es posible elaborar una teoría explicativa del mismo que aglutina todo el conjunto de hipótesis y leyes, de forma que cada miembro del conjunto, o es un supuesto inicial (axioma o principio) o es una consecuencia lógica de uno o más supuestos iniciales. Aún más, una teoría es un conjunto armónico donde los principios, las hipótesis y las leyes tienen su encaje y funcionalidad propia; lo contrario sería como un caótico montón de células sin un sistema nervioso que las coordine. En nuestro ejemplo, esto sucedió en 1873 cuando J.C. Maxwell da a conocer su *Teoría Electromagnética*⁸², en la que unifica en una sola explicación los fenómenos eléctricos y magnéticos, y además, incluye la luz visible en el grupo de las ondas electromagnéticas en las que se encuentran las ondas de la radio, de la telefonía, los rayos X, los infrarrojos, los ultravioletas y las radiaciones emitidas por las sustancias radioactivas.

Una teoría científica *orienta la investigación* dirigiendo el pensamiento de quienes trabajan en ella, así por ejemplo, el pensamiento de todos los geólogos está presidido por la *Teoría de las Placas Tectónicas* de la misma forma que el de los biólogos lo está por la *Teoría de la Evolución de las Especies*. Por otro lado, una teoría inspira nuevas líneas de investigación mediante el planteamiento de problemas científicos profundos, tal es el caso, por ejemplo, de la Teoría General de la Relatividad, inspiradora de la línea de investigación sobre la naturaleza y propiedades de los agujeros negros. En tercer lugar, las teorías ofrecen modelos o representaciones de los objetos reales y no un mero sumario de datos y procedimientos.

Un *modelo científico* es una representación de la realidad que da una descripción capaz de explicar el comportamiento de una parte del universo, reduciéndolo a los hechos fundamentales, a los más básicos y al propio tiempo sirve para hacer predicciones del comportamiento de ese sistema. Los modelos científicos son representaciones de la realidad, no la realidad, Así, por ejemplo, el péndulo simple es un modelo que representa más o menos a todos los péndulos reales; se define como un sistema formado por una masa puntual suspendida de un hilo inextensible que oscila en ausencia de rozamientos, cuyo período responde a la ley:

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}$$

Donde T es el tiempo invertido en una oscilación, l es la longitud del hilo y g es la aceleración de la gravedad. Sabemos que cualquier péndulo real, cuya masa no está concentrada en un punto sin dimensiones ni el hilo de suspensión es inextensible ni oscila en ausencia de rozamientos, a lo sumo, cumple con mayor o menor aproximación la ley expresada antes, pero nunca con exactitud 100%. Pese a ello, el modelo resulta útil por su simplicidad, siempre que tengamos en cuenta que dicho modelo no es sino una idealización de la realidad. Otro tanto puede decirse del *gas ideal*, que se define como un gas formado por partículas puntuales (sin dimensiones) que no interactúan entre sí, cuyo comportamiento sigue la ley

$$P \cdot V = R \cdot T$$

Donde P es la presión, V es el volumen molar, T es la temperatura y R es la constante universal de los gases ideales, de valor $8,31 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Dicha ley resulta útil por su simplicidad y, al igual que

⁸² Más adelante abordaremos el origen y la significación de esta gran teoría, una de las más importantes de la ciencia actual.

la del péndulo simple, tiene un cierto rango de aplicabilidad, fuera del cual, la disparidad entre sus predicciones y los hechos reales es inasumible. Ya hemos dicho que las teorías orientan la investigación planteando nuevos problemas o reformulando los ya existentes, y en el caso de la física de los gases, el modelo inicial y simplista de *gas ideal* ha sido perfeccionado progresivamente, así en 1873 Joannes van der Waals introduce primeramente el volumen de las partículas gaseosas, que ha de ser restado del volumen total, para así disponer el volumen útil del que disponen las partículas en su movimiento. Seguidamente consideró las fuerzas intermoleculares entre ellas, cuya existencia reduce la presión que ejercería si fuera ideal. Como resultado, propuso la ecuación de estado que lleva su nombre:

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = R \cdot T$$

Donde P , V , T y R tienen la significación que ya conocemos en tanto que a y b son parámetros específicos de cada gas real relacionados con la atracción intermolecular y con el tamaño de las moléculas, respectivamente.

Otros modelos físicos como las lentes ideales, las ondas senoidales puras, la tubería ideal, etc, están igualmente representados en forma de ecuaciones matemáticas sencillas cuyas predicciones se aproximan en mayor o menor medida a la realidad de cada caso. Queda pues a criterio del usuario el tener en cuenta los límites asumibles de aplicación de estos modelos, aceptando que las predicciones teóricas que de ellos se derivan son siempre aproximadas.

Llegados a este punto, surge ahora la pregunta tan inevitable como ingenua: Si las predicciones de los modelos son siempre aproximadas ¿por qué no indagar directamente sobre los casos reales? La respuesta es que en los hechos reales intervienen un sinfín de variables y las teorías científicas se han edificado por vía inductiva o deductiva, despreciando todas aquellas variables cuya influencia es pequeña o irrelevante y como resultado, la modelización matemática de las leyes físicas se reduce a ecuaciones sencillas en las que intervienen unas pocas variables, las más importantes pero no las únicas. He aquí la razón por la que la utilización de los modelos es ventajosa a la hora de teorizar y prever, siempre y cuando se tenga en cuenta que las predicciones son aproximadas. Así, por ejemplo, las leyes de la óptica geométrica no tienen en cuenta las aberraciones de las lentes, los procesos de difusión en el vidrio o de reflexión en las superficies refractantes pero no por ello dejan de ser útiles a la hora de entender cómo funciona un antejo.

Los modelos en Química son igualmente necesarios, toda vez que los entes involucrados son inobservables por su extrema pequeñez (átomos y moléculas). En esta ciencia se agudiza aún más la necesidad de elaborar representaciones de esos elementos por inferencia, a partir de los hechos macroscópicamente observados. Dichos modelos están sometidos a una permanente revisión,

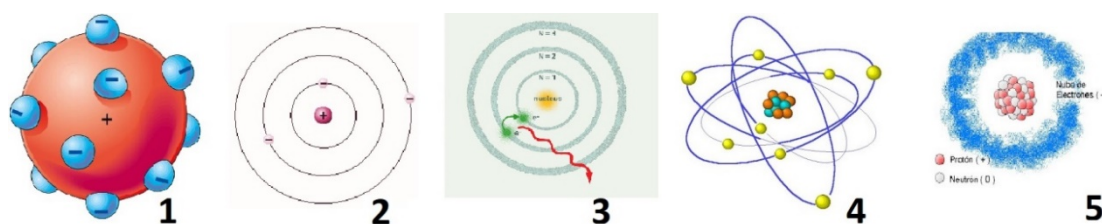


Figura 33 Evolución del modelo atómico a lo largo del S. XX: **1** Modelo “plum cake” de J. Thompson. **2** Modelo planetario de E. Rutherford. **3** Modelo de órbitas permitidas de N. Bohr. **4** Modelo de órbitas excéntricas de A. Sommerfeld. **5** Modelo cuántico “nube de carga”.

siendo progresivamente mejorados. A modo de ejemplo, citaremos ahora el caso del *modelo atómico*, el cual ha experimentado varias transformaciones en profundidad a lo largo del S. XX.

El primero de ellos fue propuesto por Joseph J. Thompson en 1904 en un momento en el que se conocía la naturaleza eléctrica de la materia y él mismo había determinado la relación carga/masa de los electrones⁸³. El segundo fue propuesto en 1911 por el neozelandés Ernest Rutherford⁸⁴, quince años después de que Herry Becquerel descubriera la radioactividad, para explicar los resultados de su famoso experimento de la lámina de oro y las partículas α . Dos años después, el danés Niels Böhrr⁸⁵ propone un nuevo modelo inspirado en el anterior, incorporando en él los niveles discretos de energía para los electrones, previstos por la Teoría Cuántica de Max Planck. En 1916 Arnold Sommerfeld modifica el modelo de Böhrr introduciendo las órbitas excéntricas, para así poder explicar la estructura fina de los espectros de emisión de los átomos y, finalmente, la aceptación por parte de la comunidad científica de los principios de la *Dualidad onda-corpúsculo* de Louis de Broglie y de la *Indeterminación* de W. Heissenberg, condujeron directamente a la adopción del modelo actual de *nube de carga*.

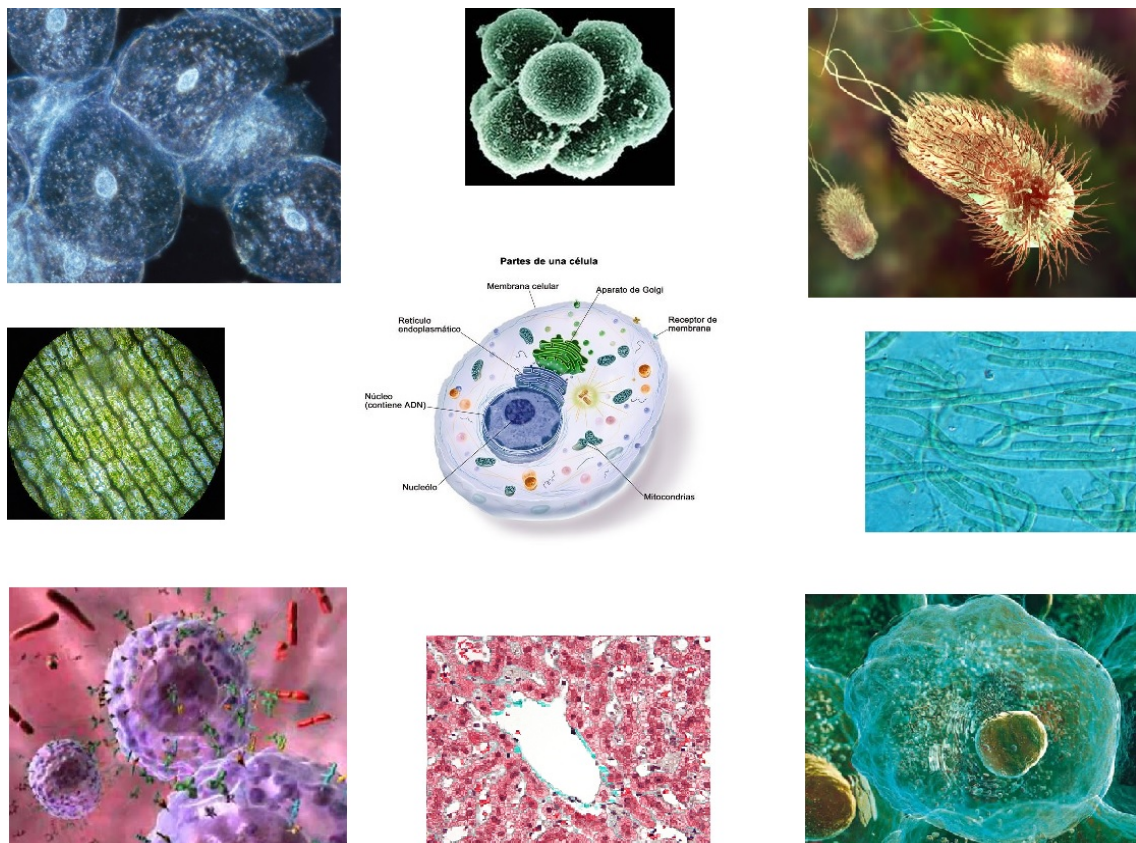


Figura 34 La célula representada en el centro es uno de los más importantes modelos de la Biología. En torno a ella se reproducen diversas imágenes microscópicas de distintos tipos de células, tanto vegetales como animales. Se aprecia con claridad la sublimación de la realidad que este modelo científico supone.

⁸³ Por este motivo, recibió el Premio Nobel de Física en 1906

⁸⁴ Recibió el Premio Nobel de Química por sus investigaciones sobre la transmutación radioactiva.

⁸⁵ Premio Nobel de Física en 1922

Se aprecia claramente en la evolución de los modelos atómicos, que la creación de modelos científicos está supeditada a las teorías vigentes en el momento y han de ser armoniosos y coherentes con el conocimiento. De no ser así, se plantea de inmediato la elaboración de un nuevo modelo que sí lo sea

Metiéndonos finalmente en el ámbito de la Biología, donde la complejidad de los objetos de estudio, los seres vivos, es mayor que en los objetos de estudio de las ciencias físico-químicas, y donde además, el número de variables implicadas es notoriamente mayor, los modelos son ahora caricaturas de la realidad aún más acusadas. Tal es el caso del modelo de célula, representado en el centro de la figura 34, representativo de todas las células existentes en los seres vivos. Se aprecia claramente la gran disparidad morfológica que existe entre el modelo y los casos reales, y entre estos últimos.

Si en los comienzos de una ciencia las teorías se construyen a partir del conocimiento ordinario⁸⁶, posteriormente se edifican a partir de otras teorías preexistentes. Ahora bien, puede suceder que la matriz del conocimiento sea escasa, en cuyo caso es difícil teorizar (esto ocurre actualmente en las ciencias del comportamiento humano). Incluso hay ocasiones en las que se producen revoluciones traumáticas, debido a que las nuevas ideas no se han inducido de la observación o bien rompen con las teorías existentes, las cuales están con frecuencia profundamente arraigadas. Tal es el caso de las propuestas que hicieron N. Copérnico en el S. XVI, Darwin en el S. XIX y Max Planck y Einstein en el S. XX.

1.19 UNA GRAN SÍNTESIS DEL MUNDO FÍSICO INMATERIAL: LA TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

El punto de arranque de una teoría es el problema de sintetizar y explicar un conjunto de planteamientos generales más o menos inconexos, unos empíricos y otros deducidos, que podríamos llamar “las hipótesis de partida” de la teoría. Su construcción no se consigue manipulando datos más o menos a ciegas sino inventando una esquematización ideal del objeto de la teoría inicialmente sencilla, para ir complicándola gradualmente, introduciendo más conceptos y relaciones más complejas entre ellos hasta donde permita la imaginación.

En el caso de las ciencias físico-químicas los supuestos iniciales están, con gran frecuencia, expresados matemáticamente. Por otro lado, es un hecho que las teorías más precisas, aunque no las más verdaderas, son las matemáticas. En estas consideraciones encontramos los motivos por los que tanto físicos como químicos, tienden a la modelización matemática de los principios y de las leyes. Ello supone que esos supuestos iniciales pueden ser manipulados a través del álgebra y el cálculo en orden a deducir leyes más generales y, en definitiva, a construir las nuevas teorías por vía deductiva. Ciertamente, la matematización en la investigación científica supone grandes ventajas, destacando la simbología matemática que, interpretada adecuadamente, puede usarse en cualquier ciencia. Otra ventaja es la precisión que los modelos matemáticos ofertan a la hora de hacer previsiones o conjeturas y añádase a ello la potencia deductiva que oferta el cálculo matemático⁸⁷.

⁸⁶ Tal es el caso del mito judeocristiano de la creación del mundo en siete días, descrito en el Génesis, así como muchas otras cosmogonías de otras antiguas civilizaciones.

⁸⁷ Newton tuvo que inventar el cálculo infinitesimal para poder probar su hipótesis de que las ecuaciones del movimiento, junto con su ley de la gravedad, implican las órbitas elípticas predichas por Kepler.

Volviendo de nuevo al caso de la electricidad y el magnetismo, que hemos elegido como ejemplo en este apartado dedicado a las teorías, hemos de señalar que desde la más remota antigüedad se han conocido algunos fenómenos fácilmente observables, inherentes a las cargas eléctricas y al magnetismo, siendo hasta los primeros años del S. XIX, disciplinas independientes. Ahora bien, en 1800 Alessandro Volta hizo un descubrimiento que supuso el pistoletazo de salida para una carrera científica de relevos, que duraría 65 años. La pila inventada por Volta supuso la posibilidad de

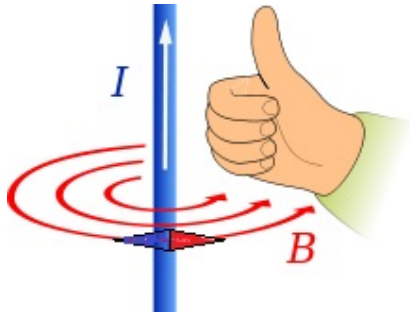


Figura 35 Regla de la “mano derecha”, de Ampère. El dedo pulgar señala la dirección de la corriente y los cuatro dedos restantes señalan la orientación de la brújula.

mantener una corriente eléctrica constante y estable, algo que hasta esa fecha no era posible. Esta situación se ha dado innumerables veces en la historia de la ciencia: los genios creadores de las grandes teorías no habrían podido elaborar sus explicaciones sin los descubrimientos y trabajos de quienes los precedieron⁸⁸. Así pues, pasados veinte años del descubrimiento de Volta, el danés Hans Christian Oersted realizó un experimento de crucial importancia: Sirviéndose de una pila hizo pasar una corriente eléctrica por un alambre rectilíneo y horizontal, debajo del cual se hallaba situada una brújula. Pudo comprobar que, en ausencia de la corriente eléctrica, la brújula se situaba en la dirección

norte-sur geográfica como era de esperar, ahora bien, al hacer pasar la corriente eléctrica, la brújula se reorientaba situándose en una dirección perpendicular a la línea de la corriente. Las consecuencias del experimento eran incuestionables: Existe una relación directa entre la electricidad y el magnetismo y además, las corrientes eléctricas crean en su entorno un campo magnético similar al de los imanes. Todo esto sucedió en la primavera de 1820.

En el verano de ese mismo año, el lyonés André-Marie Ampère, fascinado por el descubrimiento de Oersted, trabajaba con corrientes e imanes y pudo darse cuenta de que la dirección que adopta una brújula respecto de una corriente eléctrica próxima sigue una ley ideada por él, que hoy se conoce como *regla de la mano derecha*. De la misma forma que pensó su compatriota Coulomb cincuenta años antes cuando se preguntaba ¿por qué las cargas no han de comportarse como las masas, interactuándose en proporción inversa al cuadrado de la distancia? Ampère se preguntaba: “Si una corriente eléctrica produce efectos sobre un imán es porque crea en su entorno un campo magnético. Entonces, los campos magnéticos de dos corrientes eléctricas próximas deben interactuar entre sí”. Ese mismo verano realizó diversos experimentos con corrientes

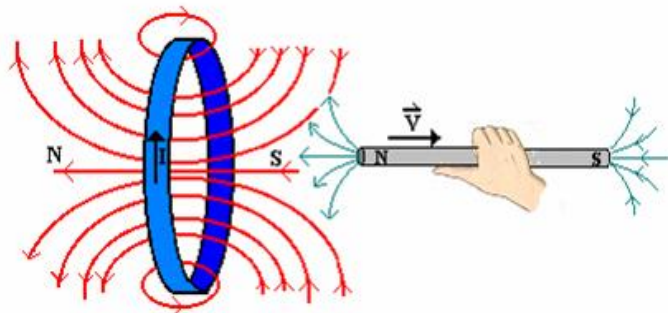


Figura 36 Experimento de Faraday. Al mover el imán se induce una corriente tanto más intensa cuanto más veloz sea el movimiento del imán.

⁸⁸ Ya vimos en una sección anterior que Newton no hubiera podido deducir su Ley de la Gravitación sin el cambio paradigmático de Copérnico y Galileo, las mediciones de T. Brahe y las leyes de Kepler. Tampoco hubiera sido posible la elaboración del modelo atómico actual sin las aportaciones de Planck, de L. de Broglie, de Heisenberg y de Böhr, entre otros muchos.

eléctricas, situando conductores rectilíneos en posiciones paralelas y próximas y pudo descubrir que los conductores paralelos recorridos por corrientes eléctricas se atraen, si las corrientes son de igual sentido y se repelen en caso contrario. En septiembre de ese mismo año Ampère presentó su hallazgo en la Academia de Ciencias francesa y seis años más tarde afirmaba en uno de sus libros: “el magnetismo es electricidad en movimiento” y “Los fenómenos magnéticos dependen sólo de la existencia y el movimiento de cargas eléctricas”.

La carrera hacia la gran teoría electromagnética era frenética y así, en 1821, Michel Faraday reproducía de nuevo el experimento de Oersted comprobando que la dirección de la fuerza a la que se ve sometida una brújula en las inmediaciones de un conductor rectilíneo es

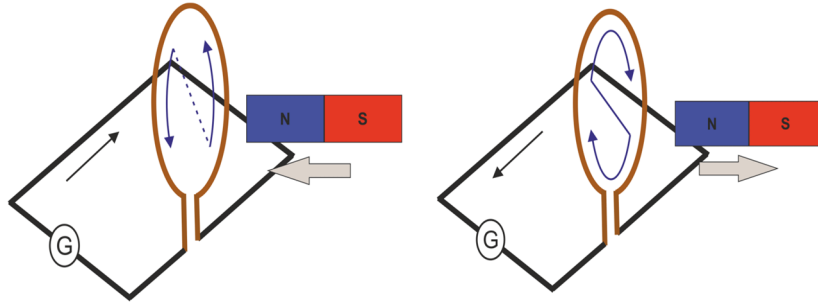
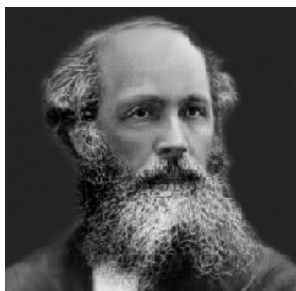


Figura 37 Esquema descriptivo del experimento de Lenz. Al acercarse el imán (izquierda) el sentido de la corriente inducida es tal que su campo magnético repele al imán y viceversa (derecha).

circular, y que esto es así, independientemente de la distancia a la que se sitúe la brújula. A partir de ahí el propio Faraday acuñó el concepto de *línea de fuerza*, describiendo el resultado de su experimento como: “el hilo conductor está rodeado de una serie infinita de líneas de fuerza circulares y concéntricas” (figura 35). En los diez años siguientes, Faraday se enfrascó en sus investigaciones en electromagnetismo descubriendo que cuando se mueve un imán en las inmediaciones de un conductor se induce en este una corriente eléctrica y que dicha corriente es tanto más grande cuanto mayor sea la velocidad con que se mueva el imán.

En 1834 el físico germano-báltico Heinrich Lenz comprobó que el campo magnético creado por la corriente inducida se opone sistemáticamente a la variación del flujo magnético inductor, es decir, cuando el imán se acerca, la corriente inducida crea un campo magnético que repele al imán y viceversa, al alejarse el imán la corriente, ahora de sentido contrario, crea un campo magnético que lo atrae. Hoy sabemos que el descubrimiento de Lenz es, ni más ni menos, el cumplimiento del *Principio de la Conservación de la Energía*. Pensemos que, de no ser así, si el imán inductor pudiera moverse sin dificultad alguna, estaríamos produciendo energía eléctrica sin esfuerzo alguno y nos



$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{q_{enc}}{\epsilon_0}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{enc}$$

Figura 38 Ecuaciones de Maxwell en su forma integral que resumen la *Teoría Electromagnética Clásica*, publicada por primera vez en su libro *A Treatise on Electricity and Magnetism*, (1873), obra científica cumbre del S. XIX.

hallaríamos ante el quimérico móvil perpetuo de segunda especie. La combinación de los trabajos de Faraday y de Lenz ha dado lugar a la *Ley de la Inducción de Faraday-Lenz* y es el fundamento de todos los procesos de producción de corriente eléctrica a gran escala que posibilitan y condicionan nuestra vida cotidiana.

El mismo año en que Lenz daba a conocer su ley de la inducción, un niño de tres años jugaba en las calles de Edimburgo, su nombre era James Clerk Maxwell y estaba llamado a coronar la meta de la gran carrera que estamos describiendo. A los once años fue llevado a la Academia de Edimburgo y cinco años más tarde ingresó en la Universidad de su ciudad natal. El joven Maxwell destacaba por su pensamiento imaginativo, agudo y perspicaz y por sus extraordinarias habilidades matemáticas, tanto que, pasados tres años, sus padres decidieron ingresarle en la Universidad de Cambridge y en el Trinity College.

Ya en Cambridge, Maxwell se interesó por la matemática, la óptica y el electromagnetismo; a mediados del S. XIX el conocimiento sobre esta última materia era el conjunto de hipótesis y leyes cuantitativas elaboradas por Oersted, Ampère, Faraday y Lenz, entre otros, que ya hemos visto en párrafos anteriores. La gran aportación de Maxwell fue unificar todas ellas bajo una gran teoría cuyos fundamentos expresó en tan solo cuatro ecuaciones⁸⁹.

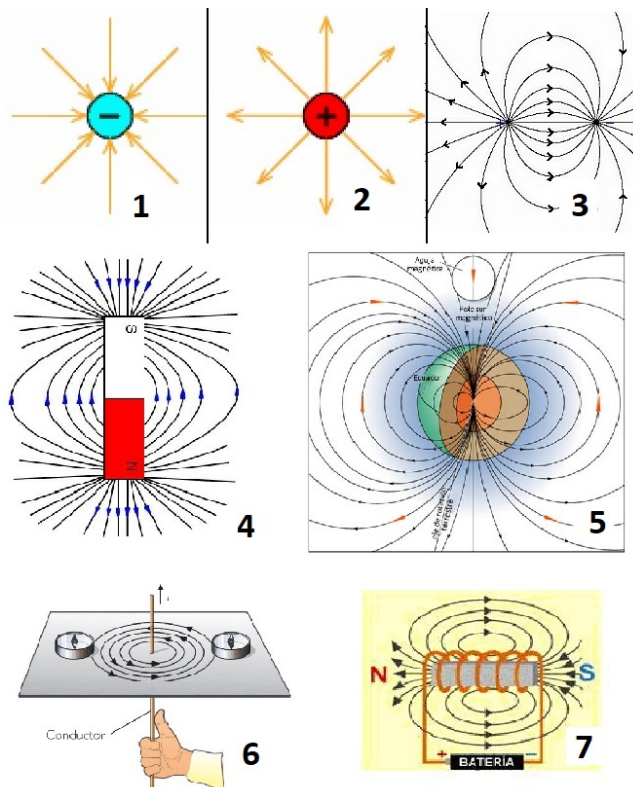


Figura 39 Representación de diversos campos por sus líneas de fuerza: **1** Carga puntual negativa. **2** Carga puntual positiva. **3** Dipolo eléctrico. **4** Imán rectilíneo. **5** Campo magnético terrestre. **6** Corriente eléctrica rectilínea. **7** Solenoide eléctrico.

Haremos una explicación intuitiva de cada una, y para que ello sea posible, es preciso imaginar el entorno de los imanes, de las cargas y de las corrientes eléctricas como lo hizo M. Faraday. Dicho entorno se llama *campo* (eléctrico o magnético, según sea el caso) y en él hay que imaginar unas *líneas de fuerza* inmatrimales. Esas líneas de fuerza, al igual que los meridianos terrestres, no tienen existencia real, siendo tan solo una abstracción o modelo que nos permite intuir cómo es el campo⁹⁰.

Es preciso también intuir otro concepto: *Flujo* (eléctrico o magnético) el cual se define como *el número de líneas de fuerza* (eléctrica o magnética) *que atraviesa a la unidad de superficie plana y perpendicularmente dispuesta respecto de las líneas*. El lector comprenderá sin dificultad que, allí donde las líneas estén más próximas, el flujo es mayor

⁸⁹ En una obra como esta, de carácter interdisciplinar y cosmológico, no parece prudente enfatizar en la parafernalia matemática propia de las grandes teorías físicas. El autor pretende exponer las ideas acerca de cómo es y cómo se construye la ciencia a un universo de lectores lo más amplio posible, eso sí, con un interés y conocimientos previos mínimos e imprescindibles.

⁹⁰ Existen procedimientos experimentales sencillos que permiten “ver” las líneas de fuerza. En el caso de los campos magnéticos se utilizan limaduras de hierro las cuales se comportan como minúsculas brújulas que se alinean siguiendo la dirección de las fuerzas. En el caso de los campos eléctricos se utilizan partículas diminutas de otros materiales, como talco, pimienta molida, semillas de sésamo, etc. sobre un soporte aceitoso.

y también lo será la intensidad del campo. Si nos fijamos en la figura 39 apreciaremos que los campos de las cargas puntuales y de las corrientes rectilíneas (1, 2 y 6) en campo es tanto más intenso cuanto más próximos estemos del agente que lo crea. Si se trata de los campos de un dipolo eléctrico, de un imán rectilíneo y terrestre (3, 4 y 5) el campo es tanto más intenso cuanto más cerca estemos de los polos y, finalmente, en el caso del campo solenoidal (7) el campo tiene su máxima intensidad en el interior del solenoide.

El tercer paso previo para entender el significado de las ecuaciones de Maxwell es asumir que, a diferencia de las fuerzas gravitatorias, las acciones eléctricas y magnéticas están afectadas por la naturaleza del medio. Recordemos que en secciones anteriores vimos que la *constante de gravitación universal* G es única, en tanto que la *constante de Coulomb* K depende del medio en el que se hallen las cargas y otro tanto sucede con las acciones magnéticas. En consecuencia, los científicos han ido determinando para cada medio (vacío, aire, agua, etc.) un parámetro de impermeabilidad eléctrica ϵ y un parámetro de permeabilidad magnética μ que, como puede suponer el lector, cuantifican la dificultad que el medio opone a las acciones eléctricas y la facilidad que el medio ofrece a las acciones magnéticas, respectivamente.

Ahora ya estamos en condiciones de comprender el significado de las ecuaciones de Maxwell⁹¹:

Primera ecuación: $\oint E \cdot dA = Q/\epsilon$ donde E es la intensidad del campo eléctrico.

Significa que *el flujo total a través de una superficie cerrada que contenga a una carga eléctrica es tanto mayor cuanto mayor sea la carga y tanto menor cuanto mayor sea la constante dieléctrica del medio.*

Segunda ecuación: $\oint B \cdot dA = 0$ donde B es la intensidad del campo magnético.

Significa que *el flujo total a través de una superficie cerrada que contenga un elemento magnético es nulo.* Como corolario añadiremos que los polos magnéticos, a diferencia de las cargas eléctricas, nunca pueden estar aislados y que las líneas de fuerza magnéticas no tienen comienzo y final, a diferencia de las eléctricas.

Tercera ecuación: $\oint E \cdot dS = -d\Phi_B/dt$ donde Φ_B representa el flujo magnético.

También conocida como *Ley de Faraday-Lenz* establece que *en todo proceso de inducción, la fuerza electromotriz inducida es proporcional a la velocidad de variación del flujo magnético inductor y su sentido es tal que la corriente inducida genera un campo magnético que se opone sistemáticamente a la acción magnética inductora.*

Cuarta ecuación: $\oint B \cdot ds = \mu \cdot \epsilon \frac{d\phi_E}{dt} + \mu \cdot i$

También conocida como *Ley de Ampère-Maxwell* expresa que *cuando una carga oscila, genera un campo magnético también oscilante, el cual a su vez, provoca la aparición de un campo eléctrico, igualmente oscilante, de dirección perpendicular al anterior.* Imagine el lector que la corriente de la figura 35 se invirtiera periódicamente, ello provocaría que la dirección de las líneas de fuerza

⁹¹ Dada la complicación matemática de esta teoría, el autor ha optado por citar las cuatro ecuaciones acompañándolas de enunciados y explicaciones asequibles a lectores no especialistas.

magnética oscilarían con igual frecuencia, provocando, de acuerdo con esta ley, la aparición de un campo eléctrico también oscilante con igual frecuencia cuyas líneas de fuerza serían perpendiculares a las magnéticas (y por tanto, paralelas a la dirección del hilo de corriente). Maxwell pensó que estas oscilaciones electromagnéticas se propagarían a distancia indefinida en forma de ondas transversales.

Posteriormente, por procedimientos matemáticos que aquí no detallaremos, Maxwell dedujo a partir de sus ecuaciones, la velocidad a la que se propagarían las ondas electromagnéticas previstas en su teoría, llegando a la siguiente expresión:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Por entonces se conocían ya los valores de la constante dieléctrica y la permeabilidad magnética del aire, así que introdujo los citados valores en la fórmula, obteniendo un valor muy próximo a la velocidad de la luz. En 1676 la había medido Õle Römer por procedimiento astronómico⁹², más tarde, en 1728, lo había hecho James Bradley también por vía astronómica⁹³, en 1849 Hippolyte Fizeau⁹⁴ y un año más tarde León Foucault, ambos por procedimientos ópticos. El hecho de haber calculado para las ondas electromagnéticas una velocidad igual a la de la luz era indicio inequívoco de que la luz es también una onda electromagnética. Así, en 1865, Maxwell escribía: “Difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz no es otra cosa que ondulaciones transversales del mismo medio que es la causa de los fenómenos eléctricos y magnéticos”.

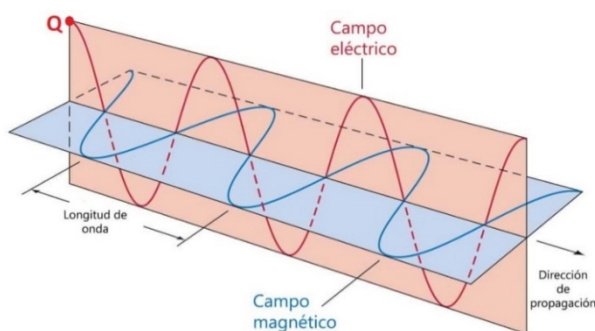


Figura 40 Cuando una carga oscila en un eje vertical se produce una onda electromagnética que se desplaza en dirección perpendicular a la línea de

Las ondas electromagnéticas fueron producidas por Heinrich Hertz en un laboratorio en 1888, lo que confirmó la teoría de Maxwell. En 1901 el ingeniero italiano Guillermo Marconi⁹⁵ realizó una transmisión mediante ondas electromagnéticas a través del océano Atlántico, entre Cornualles (Inglaterra) y San Juan de Terranova (Canadá). En 1940, Einstein se refería al momento crucial de Maxwell afirmando: «¡Los sentimientos que debió experimentar al comprobar que las ecuaciones diferenciales que él había formu-

lado indicaban que los campos electromagnéticos se expandían en forma de ondas a la velocidad de la luz! A muy pocos hombres en el mundo les ha sido concedida una experiencia de esa índole».

Rayos X, rayos gamma, ondas de TV, rayos infrarrojos, rayos ultravioleta, luz visible, microondas, etc. son radiaciones que ya predijo J.C: Maxwell hace más de un siglo y medio. En 1903 Albert A. Michelson afirmaba: «las leyes fundamentales de la física ya han sido descubiertas y están establecidas tan firmemente que la posibilidad de que se realicen más descubrimientos fundamentales es extremadamente remota; a lo sumo se perfeccionarán las determinaciones de las

⁹² Por observación de los satélites de Júpiter.

⁹³ Por medición del desplazamiento aparente de ciertas estrellas, debido a la traslación terrestre.

⁹⁴ Por procedimiento óptico.

⁹⁵ Premio Nobel de Física en 1909 por sus contribuciones al desarrollo de la telegrafía sin hilos.

constantes físicas alcanzando seis o siete cifras decimales». Pero nada más lejos de la realidad ya que en los primeros años del siglo xx se produjeron dos cambios trascendentales en la física con la teoría de los cuantos de Planck (1900) y la teoría de la relatividad especial de Einstein (1905), ambas consecuencia de la teoría electromagnética de Maxwell, que sentó las bases para estas dos ideas revolucionarias. Es evidente que Maxwell abrió las puertas a la física del siglo XX.

En 1987, Richard Feynman, premio Nobel de Física en 1965, señaló: «con una perspectiva muy amplia de la historia de la humanidad contemplada, pongamos por caso dentro de diez mil años, no cabe la menor duda de que se considerará que el hecho más significativo del siglo XIX es el descubrimiento realizado por Maxwell de las leyes del electromagnetismo»

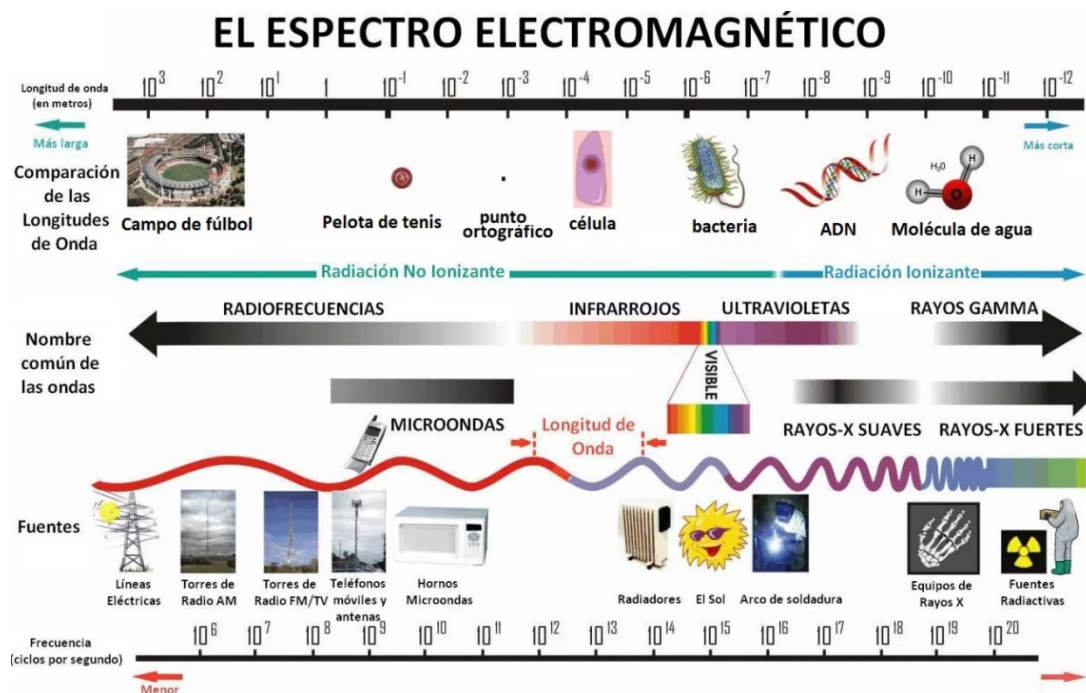
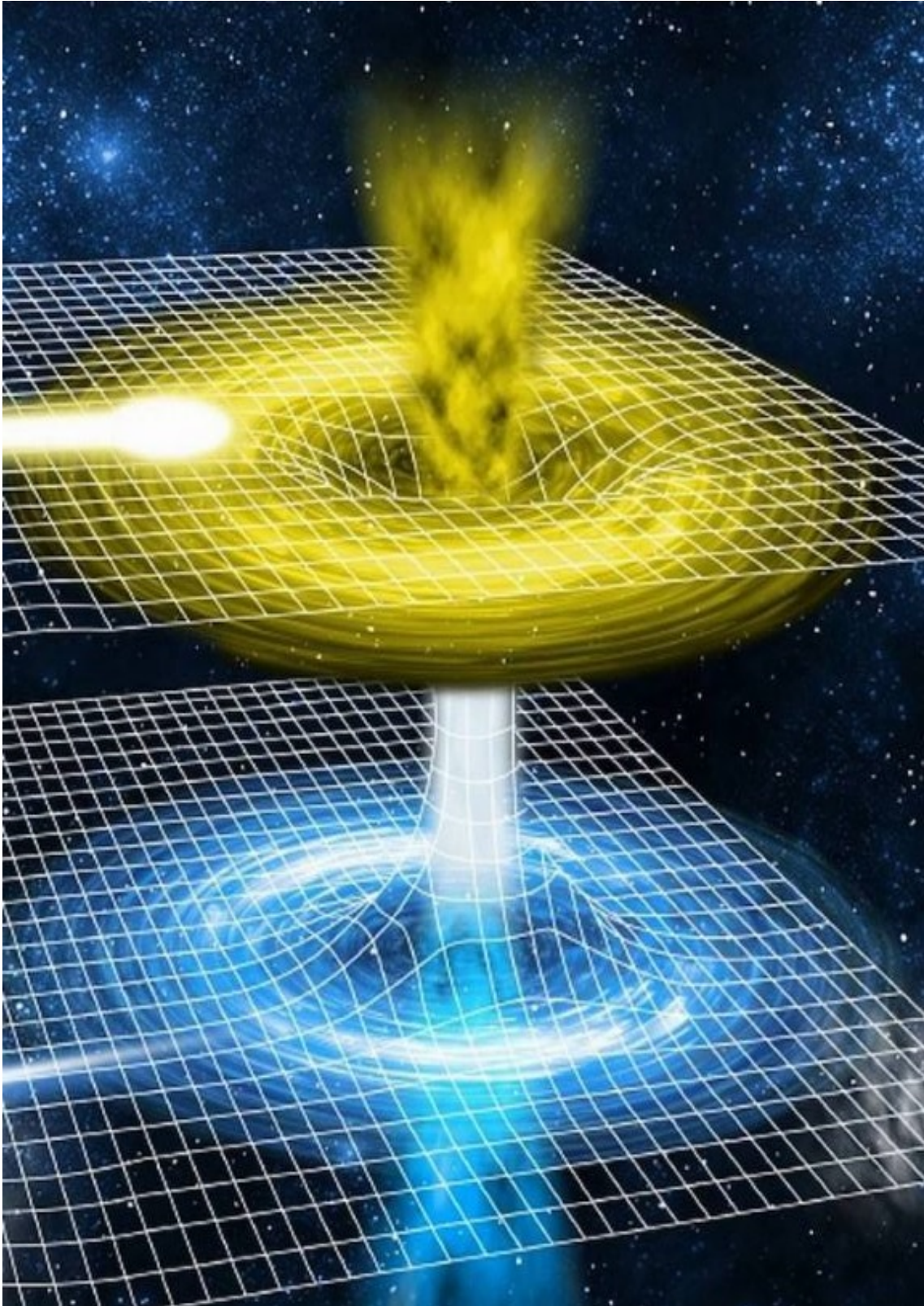


Figura 41 Espectro electromagnético comparativo. Apréciase que la luz es una parte ínfima del mismo.

Pese a ser una impresionante síntesis científica, la *Teoría Electromagnética* clásica ha tenido que ser reformada en el S. XX. Ya vimos en la Sección 12 que en 1900 Max Planck logró resolver el arduo problema del poder emisor del cuerpo negro proponiendo su hipótesis cuántica, pocos años antes Michelson y Morley habían demostrado experimentalmente la inexistencia del *éter luminífero*, extraña y sutil sustancia que llenaba por completo todo el universo, permitiendo la propagación de la luz en su seno⁹⁶. En 1905 Einstein dio a conocer su *Teoría Especial de la Relatividad* en la que establecía la velocidad de la luz como una constante universal insuperable. El posterior desarrollo de la investigación sobre la absorción y emisión de radiaciones por los átomos y moléculas puso de manifiesto que la teoría de Maxwell no servía para explicar dichos fenómenos ultramicroscópicos y por ello ha tenido que ser adaptada, conformando lo que hoy se conoce como *Teoría Electromagnética Cuántica*.

⁹⁶ Maxwell falleció en 1879 convencido de la existencia del éter.

Espacio y tiempo



Dos espacio-tiempo muy deformados forman un “agujero de gusano” por el que se podría viajar.

La historia de la ciencia nos demuestra que las teorías son perecederas. Con cada nueva verdad revelada tenemos una mejor comprensión de la naturaleza y nuestras concepciones y nuestros puntos de vista se modifican.

Nikola Tesla

II.1 ESPACIO Y TIEMPO

En un momento dado de la gran carrera de la evolución, el ser humano primitivo llegó a ser capaz de almacenar recuerdos en su memoria como no es capaz de hacerlo ningún otro animal. Los seres pertenecientes al género *homo* habían “apostado” decididamente por el crecimiento evolutivo de su cerebro; ello traía consigo la conquista de algunas habilidades muy singulares, como la conciencia del propio yo y el pensamiento abstracto. Ambas destrezas le permitían, entre otras cosas, imaginar acontecimientos que aún no habían sucedido, habilidad que le resultaba muy útil a la hora de prever situaciones de peligros potenciales u oportunidades beneficiosas, si bien era un arma de doble filo, toda vez que la previsión de peligros o calamidades le provocaban sufrimiento en forma de angustia y de miedo.

Así pues, desde que el hombre es lo que es, la concepción del tiempo como el contexto en el que se desarrolla la propia vida, es algo consustancial con su condición humana. Nuestros tatarabuelos cazadores-recolectores tuvieron conciencia del paso del tiempo mientras se sucedían las estaciones, los días y las noches, el nacimiento y la muerte de los congéneres y las migraciones de los animales de los que dependía su subsistencia. Posteriormente, cuando el ser humano se hizo sedentario convirtiéndose en pastor y agricultor, la concepción del tiempo estaba asociada a los ciclos lunares, las estaciones y a los ciclos vitales de las plantas que cultivaba, así como de los animales que pastoreaba. Poco a poco, la necesidad de controlar el tiempo y prever los acontecimientos cíclicos que de él dependen, supuso la aparición de los primeros calendarios. De otra parte, la observación del cielo permitió el descubrimiento de la relación que existe entre la disposición de los astros en el cielo nocturno y los grandes ciclos de la naturaleza, estaciones y fases lunares principalmente⁹⁷. Por este motivo, los calendarios de las más antiguas civilizaciones conocidas, combinan datos astronómicos y estacionales.

⁹⁷ Existen testimonios arqueológicos de la existencia de lugares destinados a rituales y, quizá, a la observación astronómica, siendo el más célebre el de Stonehenge, construido a finales del Neolítico o principios de la Edad del Bronce, en un lugar próximo a Salisbury (UK).



Figura 42 Posiblemente, el más antiguo calendario conocido, data del 8000 a.C. y se encuentra en Abernethy (Escocia). Mide el tiempo con las fases del Sol y de la Luna.

El ser humano es tendente a la creación de mitos relacionados con todo aquello que suscita en él sentimientos de temor o veneración. Son innumerables las civilizaciones que han elevado a la categoría de dioses al sol, la luna y los ríos. Igualmente, la imaginación ha construido mitos en torno a divinidades, como son los casos de *Quetzalcóatl*, la serpiente emplumada de los aztecas, *Viracocha*, el dios creador de los incas, *Amón*, el dios sol de los egipcios, *Anu*, señor de las constelaciones de los mesopotámicos, *Odin*, el padre de todos los dioses de los nórdicos o *Vishnú*, el dios trinitario, junto a

Brahma y *Shiva*, de los hindúes. En torno a estas deidades se han creado cosmogonías sobre el origen, la evolución y el final del mundo en las que, inevitablemente, se encuentra implícito el concepto de tiempo.

Dos son las percepciones que el ser humano tiene del tiempo. Por un lado está el *tiempo cíclico*, concepción recurrente de las grandes culturas americanas: mayas, aztecas⁹⁸ e incas y también de antiguas culturas indoeuropeas como la egipcia, la babilónica, la griega, la hindú y la budista entre otras muchas. En ellas se contempla el tiempo como una rueda en la que se suceden incesantemente las edades, con su nacimiento y extinción. El poeta griego Hesíodo (segunda mitad del S. VIII – primeros años del S. VII a.C.) en su obra *Los Trabajos y los Días*, Libro I, describe una cosmogonía en la que el mundo ha pasado por cinco edades: *Edad de oro*, de los hombres que hablan (algo parecido al paraíso terrenal de la cosmogonía judeocristiana), estos hombres se convirtieron en dioses. *Edad de plata*, de categoría muy inferior, en la que los hombres eran inicuos, no honraban a los dioses y fueron llamados los “dichosos subterráneos”. *Edad del bronce* de los hombres fuertes, violentos, feroces, pendencieros y de corazón duro. Tenían armas de bronce porque el hierro aún no se conocía. *Edad de los semidioses*, en la que los hombres eran mejores que los anteriores. Pese a ello, la guerra los destruyó a todos, unos en Cadmeida, frente a Tebas y otros en Troya, a causa de la princesa Helena. Zeus los llevó a la isla de los bienaventurados, allende el profundo océano. *Edad del hierro*, la de los hombres de hoy. Este es un mundo de trabajos y miserias en el que el bien y el mal se entremezclan. Zeus destruirá esta generación de hombres cuando se tornen blancos sus cabellos.

⁹⁸ La cosmogonía azteca contemplaba la evolución del mundo como una sucesión de eras o “soles”. Cuatro soles habían precedido al actual en los que el mundo había sido creado y posteriormente destruido en períodos múltiples de 52 años. El cuarto había finalizado con un descomunal diluvio del que sobrevivieron sólo un hombre y una mujer. Tezcatlipoca, en castigo por su desobediencia, los convirtió en perros, cortándoles la cabeza y colocándosela en el trasero. Cuando las tropas de Hernán Cortés llegaron a las puertas de México, los sacerdotes de la corte de Moctezuma vaticinaron que el quinto sol estaba a punto de concluir y que, según la tradición, unos monstruos llegados del oeste aniquilarían a toda la humanidad. Quizá sea esta la razón por la que un puñado de españoles conquistaron en tiempo récord el enorme imperio azteca.



Figura 42 Serpiente alquímica o uróboro, animal mítico que se engulle a sí mismo por la cola representando el tiempo cíclico.

En su Libro II, Hesíodo hace referencia a la relación que existe entre el tiempo y la observación astronómica y así, dice textualmente:

“Cuando Orión y Sirio lleguen a la mitad del Urano y cuando Eos, la de los dedos rosados, mire a Arctiro, oh Perses, guarda tus uvas, exponlas diez días a la luz de Helios, y pasados seis días más, encierra en los vasos esos dones de Dionisos, que inspira la alegría”.

“Cuando las Pléyades, las Híadas y la fuerza de Orión hayan desaparecido, acuérdate de que ha llegado el momento de labrar, y así será consagrado todo el año a los trabajos de la tierra”.

“Si se apodera de ti el deseo de la navegación peligrosa, teme la época en que las Pléyades, huyendo de la fuerza terrible de Orión, caen en el negro mar”.

Al menos en los 3000 últimos años ha pervivido el mito del dragón que se devora a sí mismo por la cola, como representación de la naturaleza cíclica de las cosas, presente en los jeroglíficos del antiguo Egipto, en el mito de *Sísifo*⁹⁹ de la antigua Grecia y en la mitología nórdica. Se debe a Heráclito de Éfeso (540-470 a.C.) la creación de la teoría del eterno retorno o del tiempo cíclico la cual afirma que el fundamento de todo está en el cambio incesante. El ente deviene y todo se transforma en un proceso de continuo nacimiento y destrucción al que nada escapa. También en la iconografía alquimista, el *uróboro* se representa como una serpiente de vientre verde, que representa el principio y dorso rojo que simboliza la consumación del *opus magnum*, proceso de creación de la *pedra filosofal*.

Por otro lado está la *concepción lineal del tiempo*, típica de la cultura judeocristiana, plasmada en la Biblia, en la que se contempla un comienzo con la creación del universo por *Yahvé* en siete días a partir de la nada y un final bajo forma de juicio universal¹⁰⁰. El tiempo lineal se encuentra magistralmente representado en un cuadro de Tiziano en el que aparecen tres cabezas humanas mirando cada una en una dirección diferente y debajo de ellas se encuentran tres cabezas de animales (de izquierda a derecha) un lobo, un león y un perro. La pintura es normalmente interpretada como la representación de "las tres edades del hombre": juventud, madurez y vejez. Así mismo, la dirección en la que miran cada uno de los personajes, reflejaría su relación con el Tiempo; pasado, presente y futuro. Incluso la luz contribuye a la representación alegórica: clara en el lado derecho hacia donde mira el joven y oscura del lado izquierdo como representación del pasado. De igual manera, las caras de los animales simbolizan las tres fases de la vida humana: el perro simboliza el aprendizaje de la juventud, el león la fuerza del adulto y el lobo la soledad del anciano.

⁹⁹ Hijo de Eolo y Enareta y marido de Mérope, fue castigado por Zeus a empujar cuesta arriba por una montaña una enorme piedra esférica la cual, poco antes de llegar a la cima, volvía a rodar hacia abajo, repitiéndose una y otra vez el frustrante y absurdo proceso.

¹⁰⁰ Espléndidamente representado por Miguel Ángel en la Capilla Sixtina del Vaticano.



Figura 42 Alegoría del tiempo, de Tiziano (National Gallery, Londres).

En cuanto al *espacio*, la más primitiva concepción del mismo es la distancia entre dos puntos. Esta noción, tan antigua como primaria, hubo de estar presente en el pensamiento del cazador cuando estimaba la distancia que le separaba de su presa mientras preparaba su lanza, su honda o su lanzadera. Durante tiempo inmemorial los nómadas han estimado las distancias que tenían que recorrer por jornada y el tiempo que invertirían en su caminata para llegar felizmente a su destino. Estas consideraciones nos llevan a aceptar que la más intuitiva noción del espacio es la distancia que media entre dos puntos no coincidentes. Esta noción se denomina en filosofía *espacio físico posicional* y su existencia o propiedades depende de los cuerpos. Una variante del concepto de espacio físico posicional es el *espacio físico geométrico*, concepto

acuñado por Euclides de Alejandría (325-265 a.C.), el cual se refiere al espacio que media entre más de dos puntos, comportando de paso las relaciones posicionales entre ellos. Tal es el caso de los más importantes teoremas geométricos, como el de Tales¹⁰¹, el de Pitágoras o los postulados de Euclides¹⁰².

Otra noción es el *espacio absoluto*, considerado este como un receptáculo universal en el que se encuentran los cuerpos y en el que tendrían lugar las diversas relaciones posicionales entre ellos. A diferencia del anterior concepto, el espacio absoluto es independiente de los elementos que contiene en su seno y su existencia sería anterior a la existencia de los cuerpos. Los filósofos presocráticos combinaban esta idea con la teoría del *horror vacui*, esto es, “la naturaleza aborrece el vacío”, idea que ha pervivido durante siglos, siendo un ingrediente esencial del pensamiento de quienes hicieron la Revolución Científica del S. XVII. Para Giordano Bruno el espacio es un continente universal, algo etéreo, espiritual, inmenso e infinito y Newton distingue entre espacio absoluto y espacio relativo, este último no es sino la medida del primero, y queda determinado por la posición respectiva de los cuerpos.

La idea del espacio absoluto se complementaba con la existencia del *éter lumínico o espacial* que lo llena todo. Esta sustancia inmaterial e invisible, en cuyo seno se mueven los astros del cielo y que permite la propagación de las ondas lumínicas, estuvo presente en la mente de los padres de la revolución científica y pervivió hasta finales del S. XIX¹⁰³. Al éter se le atribuían propiedades

¹⁰¹ Se atribuyen a Tales de Mileto (S. VI a.C.) dos conocidos teoremas, el primero establece que *si en un triángulo se traza una línea paralela a cualquiera de sus lados, se obtiene un triángulo que es semejante al triángulo dado*. El segundo afirma que *si un triángulo está inscrito en una circunferencia, coincidiendo uno de sus lados con un diámetro, es necesariamente recto*.

¹⁰² Se resumen en un solo enunciado: *Por un punto exterior a una recta se puede trazar una única paralela*.

¹⁰³ Cuando J.C. Maxwell dio a conocer su Teoría Electromagnética en 1864 manifestaba de modo explícito que las ondas electromagnéticas se propagan a través del éter. Decía: «En varias partes de este tratado se ha intentado explicar los fenómenos electromagnéticos por medio de la acción mecánica transmitida de un cuerpo a otro a través de un medio que ocupa el espacio entre ellos. La teoría ondulatoria de la luz también asume la existencia de un medio. Ahora tenemos que mostrar que las propiedades del medio electromagnético son idénticas a las del medio luminífero».

extraordinarias como su absoluta transparencia, su carácter inmaterial (y por tanto densidad nula) y elasticidad casi infinita. Newton y Descartes concebían un rayo de luz como un chorro de partículas que al rebotar sobre los objetos, vuelven hacia atrás y al llegar al ojo permiten la visión del objeto así iluminado. Al propio tiempo había otra línea de pensamiento sustentada por Christian Huygens, quien consideraba la luz como una onda análoga al sonido o las ondas superficiales en el agua. Por otro lado, en 1676, Olaf Römer había determinado la velocidad de la luz, aproximadamente $225.000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, un valor altísimo. Así pues, en la segunda mitad del S. XVII la controversia en torno a la naturaleza de la luz y su medio de propagación era monumental. Los partidarios de la naturaleza corpuscular explicaban muy bien la propagación rectilínea y la reflexión pero tenían serios problemas para explicar la refracción, la difracción, la polarización y no digamos la velocidad de propagación. Dada la altísima velocidad a la que viaja la luz ¿qué extraordinaria naturaleza debería tener el éter por el que se propaga?

A su vez, los partidarios de la naturaleza ondulatoria podían explicar, entre otros, los fenómenos de refracción y difracción. Ahora bien, tenían que aceptar la existencia de un medio transmisor, como lo es el aire para el sonido. En esa época se sabía que la velocidad del sonido en el aire es $340 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, que por el agua viaja a $1500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ y que por el hierro lo hace a $5130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, es decir, las ondas acústicas viajan tanto más velozmente cuanto más denso es el medio transmisor. Este hecho era totalmente contradictorio con la concepción que se tenía entonces de la luz y el éter ya que, si la luz era de naturaleza semejante al sonido y otras ondas materiales, la densidad del éter debería ser altísima para que la velocidad de propagación de la luz fuera del orden de las medidas que habían hecho Römer, Fizeau y Foucault. Ahora bien, no se podía pensar en un éter de altísima densidad, ya que impediría el movimiento de los astros a causa del rozamiento, y aún más, si el éter fuera un fluido en el seno del cual se desplaza la Tierra en su periplo anual en torno al Sol a la enorme velocidad de $30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ¿por qué no se aprecia un fuerte viento del éter en dirección contraria a la traslación terrestre?

La hipótesis del éter fue un tema muy debatido a lo largo de su historia, un verdadero galimatías científico, ya que requería la existencia de un material invisible e infinito sin interacción con los objetos físicos. A medida que se exploraba la naturaleza de la luz, especialmente en el siglo XIX, las cualidades físicas requeridas de un éter se volvían cada vez más contradictorias, tanto que a fines del citado siglo se cuestionaba su existencia, aunque no había una teoría física que lo reemplazara.

II.2 EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY

Así estaban las cosas cuando en 1897 tuvo lugar uno de los más famosos y trascendentales experimentos de la historia de la Física que permitió demostrar contundentemente la inexistencia del éter. En la última década del S. XIX nadie creía en la existencia del éter luminífero y la sospecha de que las ondas electromagnéticas, que tan magistralmente había estudiado y descrito Maxwell, se propagan por el espacio vacío, era general. Ahora bien, había que demostrar la inexistencia del éter.

Por entonces, un profesor de Física de la Universidad de Chicago de origen polaco, llamado Albert Abraham Michelson, había inventado pocos años antes un instrumento óptico que permitía medir distancias con una precisión comparable a la longitud de onda de la luz. Básicamente, el instrumento (fig. 43) consistía en una fuente luminosa cuya luz incide sobre un divisor plano y semitransparente, inclinado 45° respecto de la dirección del rayo incidente. Una mitad de la luz atraviesa el divisor

viajando horizontalmente hacia el espejo 1 y la otra mitad sigue un camino perpendicular hacia el espejo 2. La luz se refleja en ambos espejos volviendo al divisor central donde vuelve a suceder lo mismo, de manera que los dos rayos procedentes de los espejos viajan juntos hasta impactar en la pantalla superior. El resultado es la aparición de una imagen de interferencias, fruto de la superposición de las dos luces, como la que aparece en el esquema. Cualquier desplazamiento, por mínimo que sea, de uno de los dos espejos provocaría una modificación en la imagen de interferencias. En consecuencia, el instrumento permite detectar desplazamientos ínfimos e incluso medir distancias comparables a la longitud de onda de la luz (del orden de la milmillonésima del metro).

Los conceptos de espacio y tiempo se hallan fundidos en un concepto más superior: el movimiento, entendiéndose por tal, el cambio de posición de un cuerpo a lo largo del tiempo respecto de un sistema de referencia. El primero que estudió los movimientos simples por procedimiento experimental, encontrando las ecuaciones que relacionan el espacio y el tiempo en cada uno de

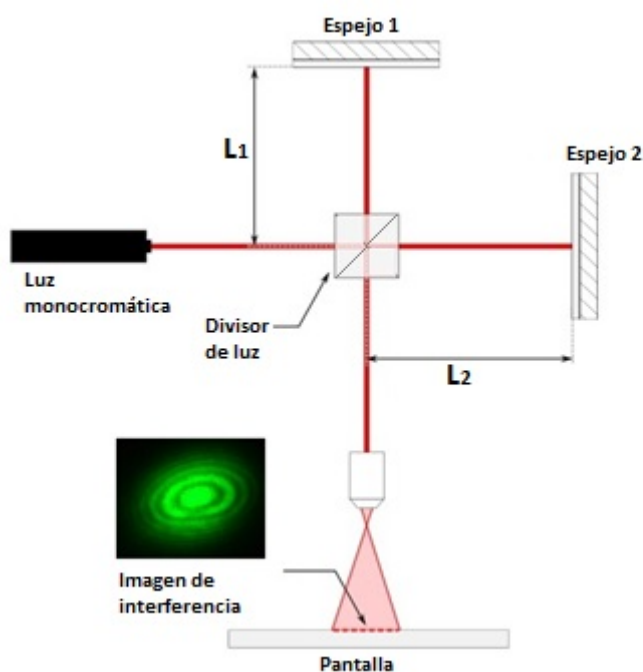


Figura 43 Esquema simplificado del interferómetro de Michelson. Se muestra la figura de interferencia obtenida en la pantalla al utilizar un láser verde.

ellos, fue Galileo. Él mismo destacó el carácter relativo de los movimientos, dado que su observación ha de hacerse desde un sistema de referencia. El sistema de referencia ideal sería, obviamente, aquel que estuviera en absoluto reposo ya que permitiría el conocimiento absoluto de los movimientos, pero por desgracia, el sistema de referencia absoluto no existe. ¿Lo es el suelo? No, porque el suelo es la superficie terrestre y nuestro planeta gira a razón de una vuelta diaria y se desplaza en torno al sol a gran velocidad. ¿Lo es el sol? Mucho menos, ya que el sol se desplaza arrastrando consigo a todos sus planetas a velocidad mucho mayor, participando del movimiento rotatorio de nuestra galaxia. Así pues hemos de contentarnos con sistemas de referencia que sabemos que no están quietos y aceptar que cualquier estudio u observación que hagamos de los movimientos será siempre relativo.

Ideas como las que acabamos de considerar, bullían en la cabeza de Michelson cuando entró en contacto con Edward Williams Morley, físico y profesor de Química. Ambos pensaban que, si realmente existiese el éter, la Tierra se desplazaría en su seno de igual manera que el balón chutado por un futbolista se mueve en el aire, y si la luz se propaga por el éter como el sonido lo hace por el aire, la velocidad de un rayo de luz emitido en la dirección en que se traslada la Tierra ha de ser menor que si ese rayo de luz fuera emitido en dirección contraria.

El mismo destacó el carácter relativo de los movimientos, dado que su observación ha de hacerse desde un sistema de referencia. El sistema de referencia ideal sería, obviamente, aquel que estuviera en absoluto reposo ya que permitiría el conocimiento absoluto de los movimientos, pero por desgracia, el sistema de referencia absoluto no existe. ¿Lo es el suelo? No, porque el suelo es la superficie terrestre y nuestro planeta gira a razón de una vuelta diaria y se desplaza en torno al sol a gran velocidad. ¿Lo es el sol? Mucho menos, ya que el sol se desplaza arrastrando consigo a todos sus planetas a velocidad mucho mayor, participando del movimiento rotatorio de nuestra galaxia. Así pues hemos de contentarnos con sistemas de referencia que sabemos que no están quietos y aceptar que cualquier estudio u observación que hagamos de los movimientos será siempre relativo.

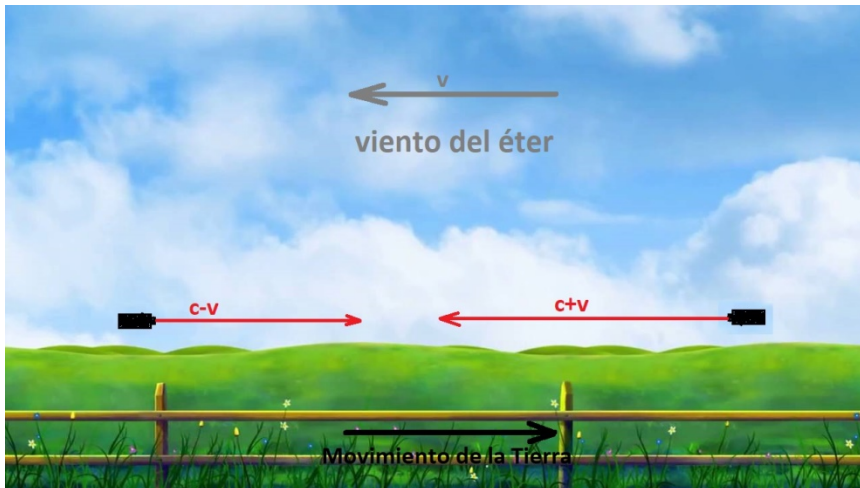


Figura 44 Si el movimiento de traslación terrestre es de izquierda a derecha, el viento del éter iría en dirección contraria, de forma que la luz de la linterna de la izquierda debería viajar más lenta que la que procede de la linterna de la derecha.

En efecto, la luz emitida en la misma dirección en que se traslada la Tierra en torno al Sol tendría una velocidad $c-v$ siendo c la velocidad de propagación de la luz en el éter y v la velocidad del “viento del éter” (o lo que es lo mismo, la velocidad de traslación de nuestro planeta). Por el contrario, si la luz fuese emitida en

dirección contraria a la traslación terrestre, o lo que es lo mismo, en la misma dirección que el “viento del éter” la velocidad observada desde el suelo sería $c+v$, es decir, sería mayor.

Conscientes de este hecho, Michelson y Morley acometieron la tarea de comprobar si la velocidad de la luz es distinta, según que viaje en la dirección de la traslación terrestre o en dirección contraria. La tarea era ardua, toda vez que a finales del S. XIX se sabía que la velocidad de la luz se aproxima a los $300.000 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ y que la velocidad de traslación terrestre se aproxima a los $30 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$, es decir, la segunda es diez mil veces más pequeña que la primera y, claro está, la diferencia entre $c+v$ y $c-v$ ha de ser extraordinariamente pequeña como para poder ser apreciada.

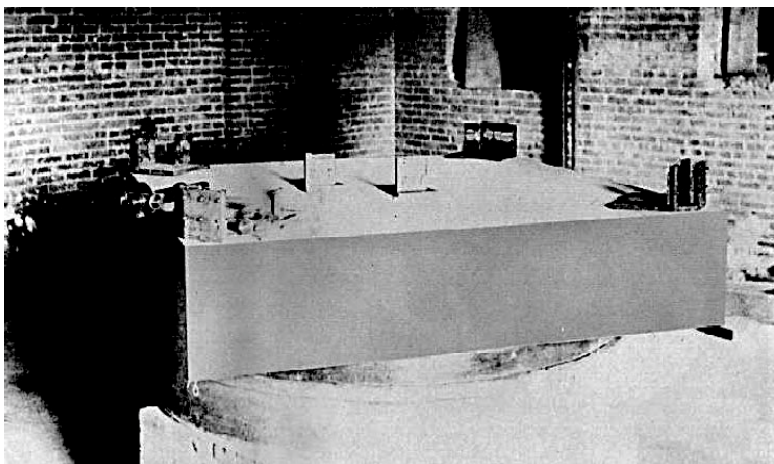


Figura 45 Montaje empleado por Michelson y Morley en su experimento de 1897 en Cleveland. El interferómetro estaba instalado sobre un bloque de hormigón que flotaba sobre un gran recipiente lleno de mercurio, con objeto de minimizar las vibraciones provenientes del suelo.

Afortunadamente, ambos investigadores disponían de la herramienta adecuada para notar diferencias tan ínfimas en la velocidad de la luz, y esa herramienta no era otra que el interferómetro que años antes había diseñado Michelson.

Las primeras veces que realizaron el experimento tuvieron dificultades por las vibraciones del suelo. Llegaron incluso a conseguir que la alcaldía de la ciudad restringiera el tráfico de

vehículos por las inmediaciones, pero ni siquiera esa medida era suficiente. Por fin, decidieron instalar el dispositivo sobre una pesada mesa de hormigón que flotaba en un recipiente lleno de mercurio.

Con ayuda del interferómetro, ambos investigadores pretendían demostrar la inexistencia del éter. Si ello fuera cierto, la luz procedente de la fuente luminosa monocromática viajaría según las líneas rojas representadas en la figura 46 y, tras reflejarse en los espejos, volvería por el mismo camino llegando finalmente a la pantalla inferior¹⁰⁴.

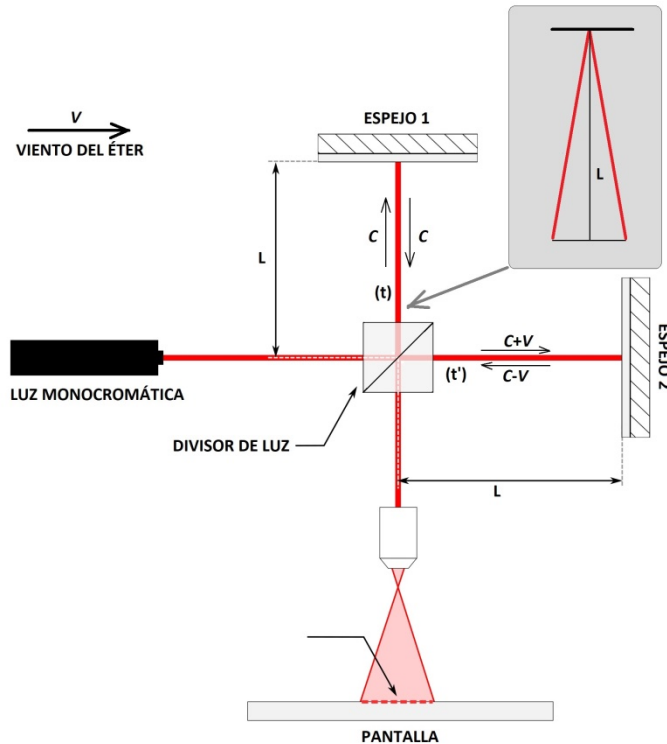


Figura 46 Esquema del experimento de Michelson-Morley suponiendo la existencia del éter.

su recorrido horizontal de ida y vuelta sería:

$$t' = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{1 - v^2/c^2}$$

Donde L es la distancia entre el divisor de luz y el espejo 2, v es la velocidad del supuesto éter y c es la velocidad de la luz en su seno.

Si comparamos ahora los tiempos t y t' llegamos a la conclusión de que no son iguales sino que $t < t'$. En efecto, observe el lector que el término v^2/c^2 es pequeñísimo, ya que $v \ll c$ y por tanto, el denominador tiene que ser ligerísimamente menor que la unidad¹⁰⁶ y su valor inverso excedería

Si, por el contrario, el éter existiera y el viento del éter corriera horizontalmente de izquierda a derecha (movimiento de la Tierra de derecha a izquierda), el rayo de luz vertical reflejado en el espejo 1 sería arrastrado hacia la derecha, según muestra la imagen complementaria. Ahora bien el tiempo invertido en su camino de ida y vuelta sería el mismo que en el supuesto de que el éter no existiera¹⁰⁵. Dicho tiempo sería:

$$t = \frac{2L}{c}$$

Fijémonos ahora en la luz horizontal que se dirige hacia el espejo 2. De existir el éter, el tiempo que invertiría la luz en

¹⁰⁴ El dispositivo experimental disponía de cuatro juegos de espejos en cada brazo del interferómetro cuya misión era aumentar el camino óptico hasta unos 11 m para cada brazo. Con ello pretendían mejorar la efectividad del instrumento.

¹⁰⁵ Por el mismo motivo, si un nadador atraviesa un río, el tiempo que invierte en atravesarlo es el mismo cualquiera que sea la velocidad de la corriente. Lo único que se modifica es el punto alcanzado en la otra orilla.

¹⁰⁶ Más adelante nos encontraremos de nuevo con el término $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ al tratar sobre la Teoría de la Relatividad. El citado término se denomina "factor relativista" y está presente en todas las ecuaciones deducidas por Einstein para el espacio y el tiempo.

sutilmente a la unidad. Es decir, si existiera el éter, la imagen de difracción en la pantalla del interferómetro debería ser diferente que si no existiera.

Una vez hechas todas estas consideraciones, Michelson y Morley decidieron repetir su experimento girando 90° la mesa que soportaba el interferómetro. Si el éter existiera, la imagen de difracción en la pantalla inferior debería modificarse. Pues bien, cuantas veces repitieron la prueba, el resultado fue siempre el mismo: La imagen de difracción en la pantalla no se modificaba al girar el dispositivo un ángulo recto. La conclusión era clara: el éter no existe y la luz descrita por Maxwell se propaga por el vacío, siendo su velocidad constante¹⁰⁷.

II.3 LA FLECHA DEL TIEMPO

Hemos visto en el capítulo II.1 que la percepción del tiempo como algo ajeno a nosotros, que corre como una cinta telegráfica que viene vacía desde el futuro, en la que se va escribiendo nuestra vida y vivencias en ese punto medio que llamamos presente y que se aleja en el pasado sin solución de continuidad, es algo inherente a la condición humana. Tenemos asumido que la cinta del tiempo que viene del futuro está blanca e impoluta, lo que en ella se escriba en el momento presente depende de nuestras decisiones o del destino y que cuando esa cinta pasa a ser pasado, lo escrito, escrito queda.

Esta concepción del tiempo, la más universal entre los mortales, es ni más ni menos que el concepto de tiempo absoluto que propugnó Aristóteles hace ya veinticuatro siglos y que sostuvo Newton en plena revolución científica. El pensamiento de ambos coincide en asumir que la medición del tiempo entre dos sucesos no simultáneos sería la misma, cualquiera que fuere el sujeto que lo hiciera y dónde estuviera. Esta concepción equivale a aceptar que el tiempo es algo absoluto, independiente del espacio y demás circunstancias, y está tan universalmente asumido, que forma parte de lo que en el capítulo I.3 denominábamos “pensamiento espontáneo”. Considerábamos entonces que, si bien el sentido común es la forma de pensamiento generalizado de todos los individuos de una determinada cultura, está sujeto a variaciones en función de la evolución de esa civilización. Pues bien, en lo que a la concepción del tiempo concierne, esta apenas ha variado a lo largo de los siglos y aún hoy, la concepción de un tiempo absoluto formado por el pasado, el presente y el futuro, es la idea generalizada en todos los ámbitos. Solamente un escaso fragmento de la población, con conocimiento siquiera somero de los principios relativistas, considera el tiempo como algo relativo, cuya medición depende de la velocidad del observador respecto del acontecimiento observado.

Ciertamente, la Teoría de la Relatividad acabó con la idea de un tiempo absoluto y afianzó la convicción de que, si un suceso es observado por varios individuos, cada uno de ellos debería tener su medida particular del tiempo transcurrido en dicho evento, y sería la que registraría un reloj que se moviera con cada uno de ellos. Esto equivale a aceptar que, relojes idénticos moviéndose con observadores diferentes a velocidades distintas, no coincidirían. Pero aún hay más, en 1915 A. Einstein daba a conocer su *Teoría de la Relatividad General* en la que proponía una síntesis de los conceptos de espacio y tiempo. La idea consistía en suponer la existencia de un *espacio-tiempo*,

¹⁰⁷ Por este hallazgo y por la invención del interferómetro, Michelson obtuvo el Premio Nobel de Física en 1907.

algo así como un espacio tetradimensional en el que el tiempo sería la cuarta coordenada. Imaginar un espacio tetradimensional es para nosotros, seres tridimensionales, algo tan inasumible como explicar a un ser bidimensional qué es la altura. Según esta idea, un suceso cualquiera que se produzca en algún lugar del espacio, en un determinado momento, podría ser representado en un sistema de cuatro coordenadas: las tres espaciales y el tiempo. Las cuatro coordenadas deben tener las mismas propiedades y, de la misma manera que las coordenadas espaciales son reversibles, es decir, su valor puede estar a un lado del origen o del otro, con la coordenada tiempo debe ser igual, es decir, no debe haber diferencia importante entre las direcciones hacia adelante y hacia atrás. Esto ha supuesto la introducción de lo que Stephen Hawking¹⁰⁸ llama *tiempo imaginario* en el que, a diferencia del tiempo “real”, no hay ninguna distinción entre las direcciones hacia adelante y hacia atrás¹⁰⁹.

Juzgadas las cosas desde la teoría relativista, la coordenada tiempo es tan reversible como las coordenadas espaciales. Pero esto es algo que repugna a nuestra intuición y, por tanto, es difícil de asumir. En nuestro orden de magnitud, el tiempo es irreversible y los procesos naturales asimétricos. Cojamos una copa de vidrio y dejémosla caer; todos sabemos lo que sucede. Pidamos a otra persona que grabe en vídeo el proceso y veamos después ese vídeo en sentido inverso; todos juzgamos de todo punto irreal lo que veríamos ¿alguien en su sano juicio cree posible que los trozos de vidrio asciendan espontáneamente desde el suelo para reunirse ordenados en nuestra mano conformando la copa intacta? El mundo que nos rodea está repleto de manifestaciones de la irreversibilidad del tiempo. En los días de invierno, los radiadores calientes transmiten el calor a las habitaciones frías ¿hay alguna posibilidad de que en algún momento la casa se enfríe aún más, a costa de que los radiadores se calienten más de lo que ya están? Todos los ríos fluyen de las montañas hacia el mar ¿existe algún río que fluya del mar a las montañas? Hinchemos un globo elástico con la boca y, una vez lleno, soltémoslo; cuantas veces hagamos el experimento, siempre pasa lo mismo: el aire sale espontáneamente del globo ¿cree el lector que existe alguna posibilidad de que en otro experimento un globo vacío se llene espontáneamente de aire?

En su intento de descubrir las leyes que gobiernan la naturaleza, los físicos han identificado tres tendencias que se manifiestan en todos los procesos naturales y que determinan que estos evolucionen espontáneamente en una determinada dirección:

La primera es la tendencia a *evolucionar hacia los estados de mínimo contenido energético* determinando, por ejemplo, que los cuerpos caigan espontáneamente, pasando de un estado de mayor energía potencial a otro menor. De análoga forma, si aplicamos fuego a un pedazo de leña, este arde convirtiéndose en dióxido de carbono y vapor de agua, es decir, el combustible, de notable capacidad calorífica, se convierte en sustancias químicas de pobre contenido energético¹¹⁰.

La segunda es la tendencia a *evolucionar hacia los estados de mayor caos*. El caso, ya visto, de la copa de vidrio es un claro ejemplo. Por igual motivo el alcohol se disuelve espontáneamente en el

¹⁰⁸ HAWKING, S. (1988) *Historia del Tiempo*. Cap. 9. Trad. Miguel Ortuño. Ed. Crítica. Barcelona.

¹⁰⁹ En el capítulo II.17 dedicado al espacio-tiempo relativista, volveremos sobre este asunto.

¹¹⁰ Ese es el motivo por el que todos los seres vivos exhalamos dióxido de carbono y vapor de agua como resultado de nuestra actividad metabólica.

agua; si en un vaso con agua dejamos caer unos pocos mililitros de alcohol, en pocas horas, sin intervención alguna, el alcohol se dispersa por la masa de agua hasta convertirse en una disolución hidroalcohólica. Ello se debe a que el agua por un lado y el alcohol por otro constituyen un sistema más organizado que la disolución hidroalcohólica. Por tanto, querido lector, descarte toda esperanza de que, cuando descorche una botella de vino añejo pueda encontrarse con un “agua de castañas” en cuyo fondo se halla el alcohol.

Esta tendencia está científicamente expresada en el *Segundo Principio de la Termodinámica*, según el cual *en cualquier sistema cerrado, el desorden o la entropía¹¹¹ siempre aumenta con el tiempo*. Así pues, la *Teoría del Bing Bang*, que admite la existencia de un universo en expansión, es coherente con este principio entrópico.

En su afán por establecer las leyes que gobiernan los procesos de transformación de las sustancias, los químicos han diseñado una ley que aglutina las dos tendencias que hemos considerado, para el caso de las reacciones en vasija abierta, a la presión atmosférica. Entre 1875 y 1878 el químico norteamericano Josiah W. Gibbs, considerado el padre de la Química Física, una especialidad dedicada a los aspectos físicos de los procesos químicos, definió para las reacciones químicas dos funciones muy útiles, a saber, la *entalpía*, que representa el calor de una reacción a presión constante, y la *entalpía libre* que determina si una reacción puede evolucionar espontáneamente a temperatura y presión constante. La segunda magnitud se llama actualmente *energía de Gibbs* en su honor. Pues bien, todas las transformaciones químicas siguen la ley expresada por la siguiente ecuación:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Donde ΔG es la variación de *entalpía libre*, ΔH es la variación *entalpía*, es decir, el calor de la reacción a presión constante, ΔS representa la variación de *entropía*, o lo que es lo mismo, la variación del desorden provocado por la reacción y T es la temperatura. Pues bien, para que una reacción progrese es preciso que lo haga con disminución de la *entalpía libre¹¹²*, es decir, ΔG tiene que ser negativa. Esta condición se daría inequívocamente si ΔH fuera negativa¹¹³ e ΔS fuera positiva¹¹⁴, como es el caso de la explosión de la nitroglicerina, donde a partir de una molécula de tamaño grande y con un gran contenido energético se forman moléculas pequeñas (N_2 , CO_2 y H_2O) con muy bajo contenido energético. Este es sin duda el caso más favorable, pero también puede suceder que un proceso sea desfavorable entálpicamente (es el caso de las reacciones endotérmicas) o entrópicamente (esto sucede en las reacciones de síntesis, donde a partir de moléculas pequeñas se producen otras mayores y más organizadas). Eso sí, en todo caso, el balance de las variaciones entálpica y entrópica ha de resultar negativo, de lo contrario, la reacción no es posible.

¹¹¹ Se trata de una función de estado de difícil concepción para un profano, por ello, en este libro nos referiremos a ella como una medida del desorden o caos en los sistemas.

¹¹² Esto equivale a decir que la entalpía libre global de los productos de reacción tiene que ser menor que la entalpía libre global de los reactivos.

¹¹³ Ese es el caso de las reacciones exotérmicas, en las que el contenido energético de los productos es menor que el de los reactivos. Un ejemplo es las combustiones.

¹¹⁴ Eso sucede cuando las moléculas de los reactivos son mayores y más organizadas que las que conforman los productos.

La tercera tendencia es un principio térmico que establece que *el calor fluye siempre desde los cuerpos de mayor temperatura hasta los más fríos*. El ejemplo ya visto de los radiadores no es más que un caso particular de los casi infinitos posibles. La naturaleza es algo vivo donde la energía es como la savia que alimenta los cambios que en ella se producen. Todos los procesos naturales, desde la explosión de una supernova hasta el minúsculo calentamiento que se produce en nuestro cerebro cuando un pensamiento fugaz se nos pasa por la mente, comportan transformaciones energéticas. De todas ellas, la más degradada es la transmisión de calor desde los cuerpos calientes hasta los fríos. Tan es así que la ciencia estima que el universo estará vivo mientras haya cambios con sus transformaciones energéticas asociadas, que llegará un momento en el que todas las formas de energía se habrán transformado en calor, que entonces aún quedará vida mientras haya diferencias de temperatura y flujos caloríficos entre los cuerpos y que llegará finalmente un día en el que todas las temperaturas lleguen a ser iguales, entonces habrá llegado lo que los físicos llaman *muerte térmica del universo*.

En 1927 el astrónomo Arthur S. Eddington acuñó la expresión *flecha del tiempo* para referirse a la dirección con que discurre sin interrupción desde el pasado hasta el futuro, pasando por el presente, con la importante característica de su irreversibilidad, es decir, que futuro y pasado, en línea con el presente, muestran entre sí una neta asimetría.

A modo de resumen, hemos visto que la existencia de un tiempo en el que los acontecimientos evolucionan espontáneamente en una única dirección es algo que forma parte de la esencia misma del universo en su totalidad. La flecha del tiempo determina la vida de las estrellas desde su nacimiento hasta su extinción, rige el desarrollo de todos los fenómenos naturales desde el más grande hasta el más ínfimo, incluso las transformaciones de unas sustancias en otras no escapan del cumplimiento de este designio universal. Esta es la percepción que tenemos de la evolución del universo, pero una teoría científica, de difícil comprensión intuitiva, nos invita a pensar que, posiblemente, el tiempo cosmológico es reversible y que si el universo en expansión nació a resultas de una gran explosión, puede que en algún momento esa expansión se detenga para iniciar un inexorable colapso que acabaría en el punto de partida.

II.4 LA MEDIDA DEL TIEMPO: RELOJES DE SOL

Desde que el ser humano abandonó su condición de cazador recolector para asentarse en un emplazamiento fijo, sus cosechas y ganados pasaron a ser su principal preocupación. Con ello sintió la necesidad de medir el tiempo con la finalidad de coordinar actividades comunales, regular siembras y cosechas y prever el almacenaje y conservación de alimentos. En un principio fueron el Sol, la Luna, las migraciones de las aves, y en general los acontecimientos naturales cíclicos, los elementos de los que se sirvió para cuantificar el paso del tiempo. Desde estos hechos, hasta las medidas extremadamente precisas de los intervalos de tiempo que con fines científicos se hacen en los laboratorios de investigación, se ha recorrido un largo y apasionante camino que se inició en el antiguo Egipto, Grecia y Roma con relojes de sol, clepsidras, relojes de aceite, de agua y de arena.

El uso de los relojes de sol estaba muy extendido en el antiguo Egipto, de hecho, los obeliscos eran no solo monumentos sino también relojes de sol públicos. Corría el año 255 a.C. cuando el bibliotecario mayor de Alejandría, Eratóstenes de Cirene (276-194 a.C.) comprobó algo que ya era

conocido entonces: Al llegar el mediodía del 21 de junio, la luz del sol iluminaba por completo el fondo de un profundo y estrecho pozo que se hallaba en la ciudad de Siena¹¹⁵. Con toda seguridad, Eratóstenes paseaba por la plaza que flanqueaba la fachada de la gran biblioteca que él dirigía; en el centro había un obelisco y durante años él se había fijado en la corta sombra que el obelisco proyectaba en el mediodía del 21 de junio.

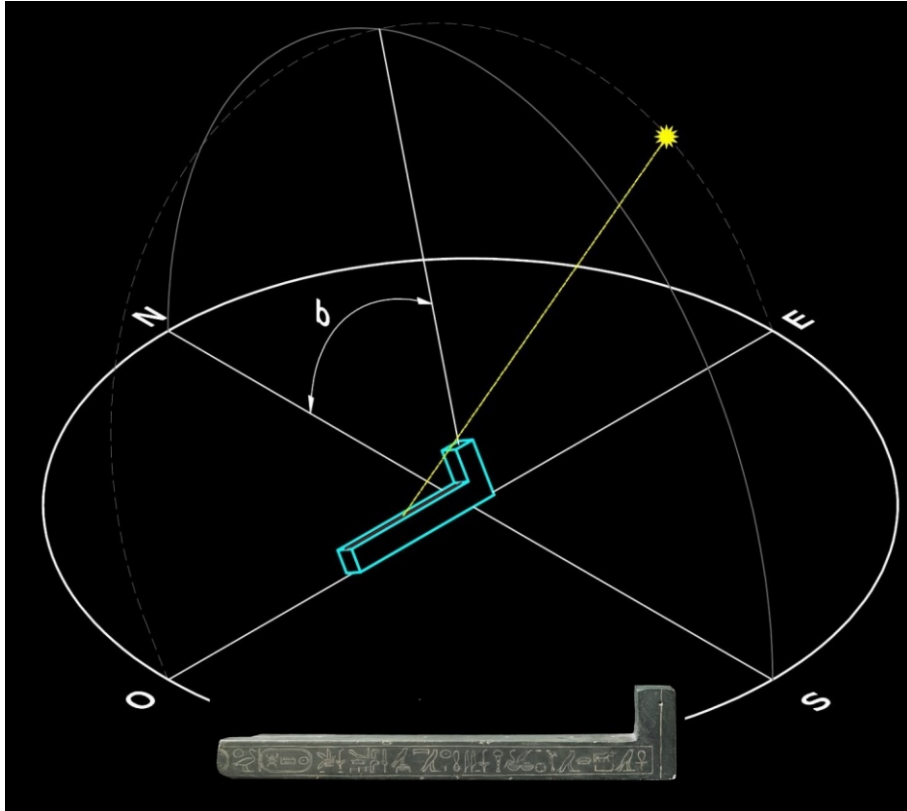


Figura 47 Reloj solar egipcio *sechat* del 3.500 a.C. Se colocaba en dirección E-O y se inclinaba de forma que el *nomon* apuntara al sol del mediodía. De esta forma la sombra del *nomon* señala la hora en cualquier época del año.

En general, es característica general de los seres humanos el hacerse preguntas, ahora bien, la mente del científico es algo especial. El científico se interesa por fenómenos o aspectos que pasan inadvertidos para la mayoría de los mortales; quizá se deba a una manera de ser o quizá se deba a que los conocimientos que el científico tiene le permiten ver lo que otros no ven. Elucubraciones aparte, no cabe duda de que el fenómeno de la verticalidad de los rayos solares en Siena en el mismo día y hora en que, en Alejandría, la luz solar incide sobre el suelo con un cierto ángulo, debió interesar vivamente a la aguda mente de Eratóstenes. El comercio entre las dos ciudades era entonces intenso y las numerosas caravanas se desplazaban entre ambas poblaciones en línea casi recta, siguiendo el curso del Nilo, de forma que la distancia entre ambas era bien conocida: 5000 estadios (924 km)¹¹⁶

¹¹⁵ Hoy sabemos que la antigua ciudad egipcia (actualmente Asuán) se hallaba muy próxima al trópico de Cáncer, paralelo terrestre en el cual el sol del mediodía, el 21 de junio, se halla en la perpendicular del suelo, es decir, un obelisco vertical situado allí, no proyectaría sombra alguna.

¹¹⁶ La distancia aérea entre ambas ciudades es 843 km.

II.5 RELOJES MECÁNICOS Y CIENCIA: RÖMER Y LA VELOCIDAD DE LA LUZ

El avance en las técnicas de medida del tiempo continuó en la baja Edad Media con los primeros relojes mecánicos accionados por pesas. La regulación de la marcha se hacía por medio de un ingenio llamado *foliot*¹¹⁸. Consistía en una rueda dentada que accionaba las paletas de un eje que terminaba en la parte superior de la maquinaria, en un travesaño equipado con dos pesas. Al acercar estas al eje, el reloj adelantaba y viceversa.

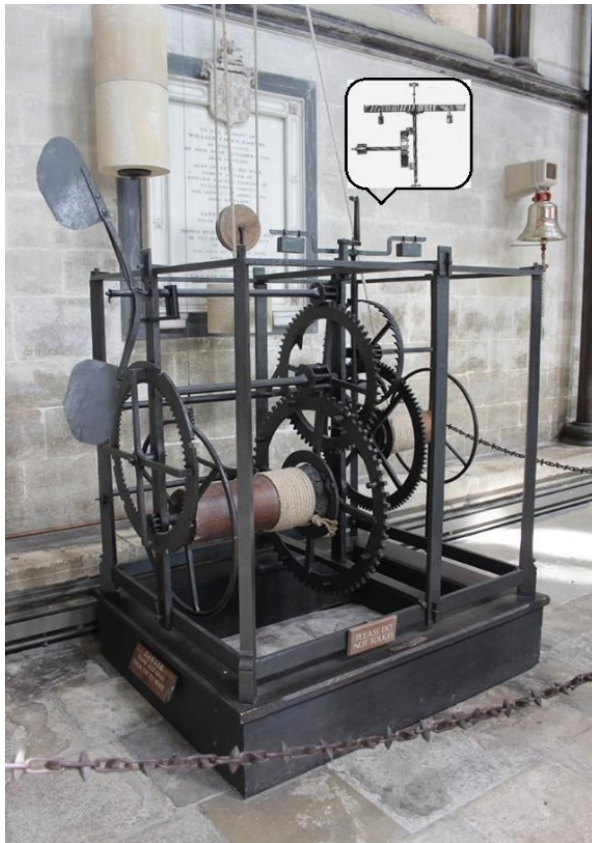


Figura 49 Reloj medieval de la catedral de Salisbury (U.K.) de comienzos del S, XIV regulado a *foliot* (ver detalle explicativo).

Dado su gran tamaño y coste, los relojes medievales estaban situados en torres y fachadas, siendo de pública utilidad. También hubo maquinarias más pequeñas, instaladas en la pared o en un pedestal, en las viviendas de gente pudiente. Los relojes mecánicos supusieron la conquista de la medida del tiempo de forma continuada, de noche o en días nublados y con sus campanadas determinaron la ordenación de la vida comunal en las poblaciones.

Hubo que esperar a la primera mitad del S. XV para introducir en los relojes el resorte elástico como elemento impulsor, lo que permitió que estos pudieran transportarse con facilidad. La relojería mecánica experimenta extraordinarios avances en el S. XVII con la incorporación del péndulo como elemento regulador, el volante con espiral, inventos ambos del físico holandés Christian Huygens y el escape de áncora de G. Graham. La principal ventaja de estas innovaciones era una mejora sustancial de la regularidad en la marcha del reloj y por tanto, una mejora en la precisión.

La aplicación práctica de los avances científicos ha dado lugar a los avances tecnológicos y, viceversa, los avances tecnológicos han posibilitado los avances científicos. Se trata de una retroalimentación mutua que viene dándose desde el principio. Así, por ejemplo, los avances en la física de los semiconductores ha permitido la construcción de grandes computadoras, esenciales para la investigación científica de hoy. Esto ha pasado siempre: la ciencia y la técnica se retroalimentan mutuamente y la sinergia entre ambas produce un mayor y más rápido desarrollo de una y otra.

¹¹⁸ Parece ser que deriva del término francés *fou* (loco) debido a sus movimientos circulares de vaivén.

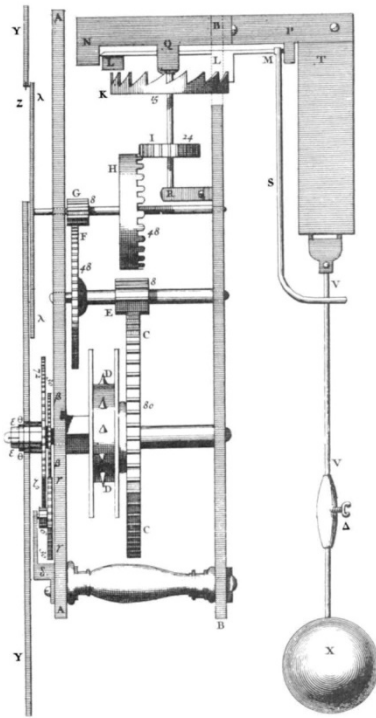


Figura 50 Diseño de Huygens para una maquinaria de reloj regulado por péndulo.

Pues bien, la aparición de los relojes regulados a péndulo supuso la conquista de los minutos y los segundos en la medición del tiempo. A partir de entonces se sofisticó la mecánica y se sumó a la única aguja horaria una segunda aguja llamada “minutera”. Con frecuencia suele suceder que la conquista de una cifra decimal más en la medición de las magnitudes supone entrar en un orden nuevo en la apreciación u observación de los fenómenos con la aparición de nuevos problemas, planteamiento de nuevas preguntas y, en definitiva, la reorientación de las investigaciones. Y esto es precisamente lo que pasó cierta noche de 1676 cuando el astrónomo danés Ole Römer (1644-1710) observaba con su anteojo los satélites de Júpiter. Hacía años que observaba con atención dichos satélites y se había percatado de que estos desaparecen al pasar por la sombra del planeta para volver a aparecer al rebasar la sombra del mismo. Así pues, Römer consideraba que los satélites de Júpiter son unos inmejorables relojes astronómicos, toda vez que la regularidad de sus apariciones y desapariciones es total.

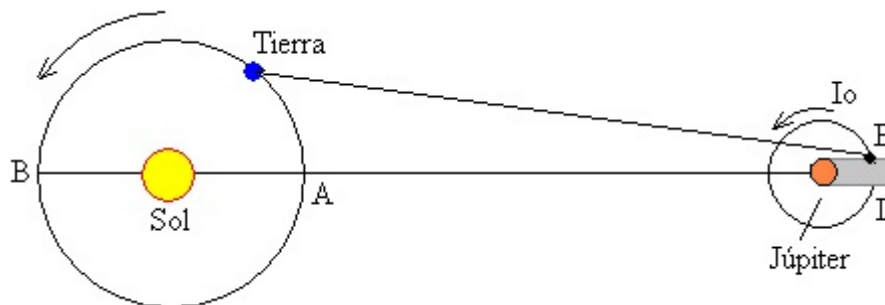


Figura 51 Esquema del método de Römer para determinar la velocidad de la luz.

Haciendo uso de un reloj de péndulo que Huygens había inventado veinte años antes, Römer determinaba con la mayor precisión posible el período de *Io*, el más interno de los satélites de Júpiter. Por estar tan cercano al gran planeta, *Io* gira a gran velocidad completando una revolución completa en 42h y 30m, lo que supone que *Io* efectuaría 103 revoluciones en seis meses terrestres.

Durante medio año, el observador terrestre ve la aparición de *Io* oculto en la sombra de Júpiter, y durante el otro medio año la desaparición (eclipses) en dicha sombra. Supongamos que la Tierra está en la posición A, la más cercana a Júpiter (oposición), cuando *Io* aparece de la sombra de Júpiter, es evidente que el mismo acontecimiento ocurrirá 42.5 horas más tarde, cuando *Io* haya completado una vuelta. Teniendo en cuenta que, pasado medio año, la Tierra estará en el punto B, Römer calculó la hora en que *Io* debería reaparecer saliendo de la sombra de Júpiter y se encontró con que el satélite reaparecía con un retraso de casi 18 m respecto del momento que él había calculado. Römer interpretó que el retraso se debía al tiempo que había necesitado la luz para recorrer el espacio

correspondiente a un diámetro de la órbita terrestre. Como por entonces ese dato se conocía, pudo de inmediato calcular la velocidad de la luz:

$$c = \frac{\text{Diámetro órbita terrestre}}{\text{retraso aparición Io}}$$

Actualmente sabemos que el diámetro medio de la eclíptica terrestre es 149 millones de km y las modernas determinaciones del retraso que observó Römer son de 8m y 20s, así pues, la velocidad de la luz, medida hoy por el método de Römer es:

$$C=1,49.10^{11}/500=2,89.10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

La determinación que hizo Römer fue de 232.558 km.s⁻¹ y difería por defecto en un 22% de las medidas modernas, pero ello no le resta mérito, ya que sus hipótesis y predicciones son consideradas correctas y los errores que cometió se debieron a los medios realmente deficientes de que disponía en pleno S. XVII.

II.6 RELOJES MECÁNICOS Y CIENCIA: EL CRONÓMETRO DE MARINA

En los siglos XVII y XVIII Inglaterra, España y Francia se disputaban la hegemonía marítima como medio imprescindible para mantener sus vastas posesiones de ultramar. Ello pasaba por poseer una gran flota militar y mercante que permitiera y asegurara las comunicaciones entre los territorios colonizados y la metrópoli. Ahora bien, había un problema de capital importancia por resolver: la determinación exacta de la posición de un navío en alta mar. Hasta casi finales de la Edad Media, la navegación era de cabotaje, esto es, las rutas marítimas seguían la línea de la costa y rara vez los navíos se aventuraban a una travesía en la que se perdiera de vista la tierra. Ya en el S. XV las galeras que surcaban el Mediterráneo hacían algunas travesías por alta mar y así, cuando Cristóbal Colón presentó su proyecto de llegar a las indias navegando hacia el oeste a través de *la Mar Océana* la idea debió parecer temeraria, incluso descabellada. Y no era para menos, ya que conocer la posición en el mar era una cuestión tan incierta como crucial para la navegación, cuando no de vida o muerte.

La posición en la superficie terrestre viene dada por dos coordenadas: la latitud y la longitud. La determinación de la primera era algo factible ya en el S. XV, pues bastaba con disponer de un astrolabio, de un cuadrante o de una ballestilla, unas buenas tablas astronómicas y pericia suficiente para determinar la altitud sobre el horizonte de un astro de referencia. El verdadero problema era la determinación de la longitud. Sabido es que el sol, la luna y los restantes astros que brillan en el cielo salen por el este y se ponen por el oeste a causa de la rotación de la Tierra y que la hora a la que salen o se ponen en el horizonte, así como sus posiciones intermedias, dependen de la hora, es decir, del tiempo. Sabido es también que cuanto más al oeste se esté, tanto más tarde un determinado astro alcanzará una determinada posición. Así pues, el problema de la determinación de la longitud geográfica pasa por resolver otro problema: determinar la hora exacta en el mar¹¹⁹. Cuando Colón inició su primer viaje, no existían relojes suficientemente

¹¹⁹ A comienzos del S. XVII, los países poderosos (España, Francia, Portugal e Inglaterra) intentaban lograr la hegemonía marítima. Felipe III, rey de España (1598-1621), ofreció una recompensa de 6000 ducados como premio, 2000 de renta vitalicia y otros 1000 de costas a quien resolviese el problema de la longitud.

precisos que permitieran conocer la hora exacta a lo largo de un viaje oceánico. Por ello, se navegaba “a la estima”, midiendo regularmente la velocidad del navío y así, conocido el número de días y horas desde la salida del puerto, era posible conocer con cierta aproximación la distancia recorrida.

En el S. XV se estimaba la velocidad del barco por el procedimiento de la “corredera de barquilla” y un reloj de arena. La corredera de barquilla era una tabla con flotadores unida a una cuerda. En un momento dado, un marinero arrojaba la barquilla por popa, un segundo marinero ponía en marcha un reloj de arena y un tercero soltaba libremente cuerda, de forma que la barquilla se mantuviera en el agua lo más inmóvil posible. Cuando la arena del reloj pasaba íntegramente al vaso inferior uno de los marineros contaba los nudos que habían pasado por su mano¹²⁰. De esta manera, conocido el tiempo de navegación y la velocidad E-O del navío, se estimaba la longitud geográfica. Ello obligaba a navegar siguiendo siempre un paralelo, y una vez alcanzada la longitud deseada, se navegaba en dirección norte o sur hasta alcanzar el destino. Esta forma de navegación hacía los viajes trasatlánticos más largos de lo que ya de por sí eran, y por si fuera poco, la llegada al destino deseado era incierta¹²¹, estando supeditada a la pericia del capitán y sus oficiales.



Figura 52 Equipo de medida de la velocidad de un navío por el procedimiento de la *corredera de barquilla*. La cuerda poseía nudos a distancias regulares para determinar rápidamente su longitud.

Ciertamente, en el S. XVII existían relojes de péndulo notablemente precisos, pero no podían usarse en los barcos debido a que el bamboleo los detiene. En 1714, a instancias de Jorge I, el gobierno inglés ofreció un premio de 20.000 libras a quien lograra determinar la longitud en el mar con un error máximo de 0,5° (equivalente a 2 minutos de tiempo). Un relojero inglés llamado John Harrison diseñó varios ingenios: H1, H2, H3 y H4. El último era un cronómetro que incorporaba un volante de inercia y espiral elástica, como elementos reguladores. Sus diseños, especialmente el cuarto, fueron un rotundo éxito¹²², tanto que el H4 fue utilizado por R. Cook (1775) en su viaje de tres años alrededor del mundo con gran éxito y durante más de dos siglos fue conocido como “reloj de marina”.

¹²⁰ El procedimiento hizo historia, siendo este el origen de la unidad *nudo* para medir la velocidad de los barcos. La unidad nudo actual equivale a una milla náutica por hora (1,852 km/h). Dicha unidad de velocidad se utiliza internacionalmente en navegación marítima y aérea y también en meteorología.

¹²¹ Cristóbal Colón engañó a las tripulaciones de las tres carabelas haciéndoles creer que se habían adentrado en el océano mucho menos de lo real. Sin duda, el astuto almirante, evitó a toda costa que el miedo y el desánimo dieran al traste con la arriesgada empresa.

¹²² El diseño H4 de J. Harrison equipado con volante de inercia y espiral elástica fue sofisticado en el S. XIX por grandes relojeros como Louis Breguet, G.F. Roskopf pasando a las muñecas y los bolsillos de los ciudadanos durante los siglos XIX y XX hasta que fueron desbancados por los relojes de cuarzo.

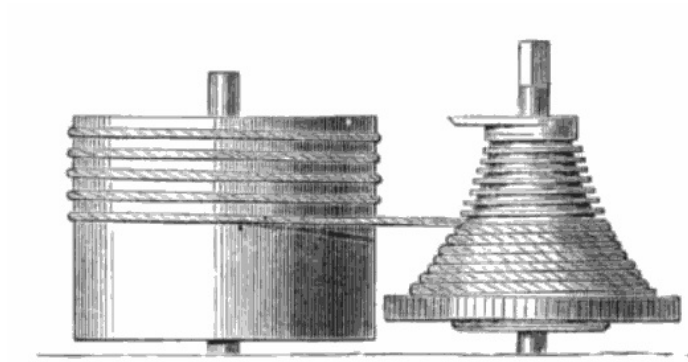


Figura 53 Complejo barrilete-caracol de un reloj de marina de comienzos del S.XIX.

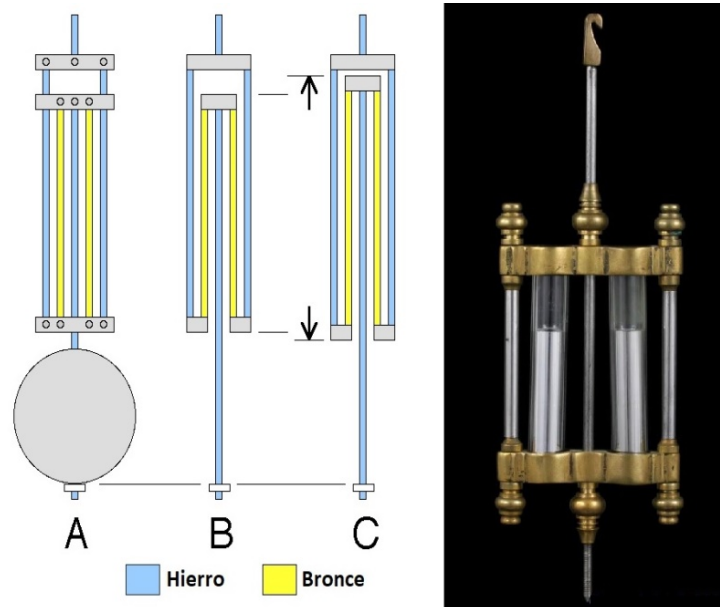


Figura 54 Péndulos termo-compensados de varillas (izquierda) y de mercurio (derecha).

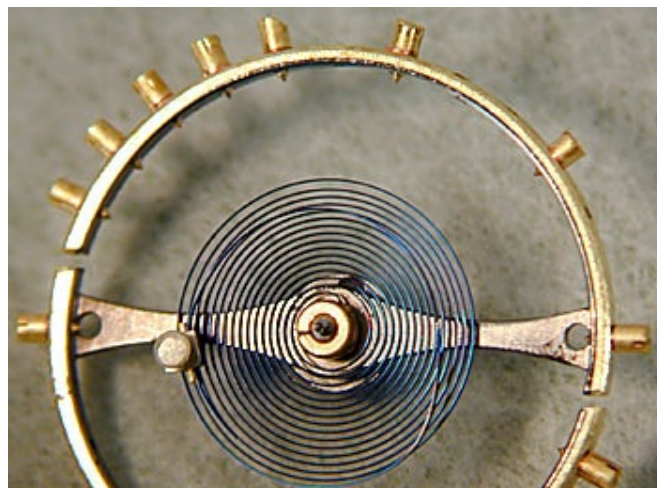


Figura 55 Volante termo-compensado

II.7 LA CONQUISTA DE LOS SEGUNDOS: MEJORAS EN LA RELOJERÍA MECÁNICA

A medida de que el conocimiento científico ha ido avanzando, la determinación del tiempo como magnitud física fundamental, se ha ido haciendo cada vez un asunto más necesario. De otro lado, la carrera de la cronometría a la que nos referimos en el párrafo anterior seguía siendo una cuestión de vital importancia para los países que aspiraban a mantener o acrecentar sus imperios por medio de la hegemonía marítima. En este contexto, ya en pleno siglo XIX, la relojería mecánica se había sofisticado en aras de una mayor precisión

En los siglos XVII y XVIII se había extendido el empleo de resortes de acero arrollados en espiral como elemento motriz, en sustitución de las pesas. Esta invención supuso la construcción de relojes más fácilmente transportables, ahora bien, la energía elástica que proporciona un resorte tensado es proporcional a la deformación del mismo, conforme establece la Ley de Hooke. Por consiguiente, la fuerza con que el resorte empuja la maquinaria es máxima en un principio y se va aminorando a medida de que el resorte se destensa, lo que provoca el retraso del reloj. Para superar esta circunstancia adversa, los relojes de resorte incorporaban un caracol que se interponía entre el barrilete que aloja el resorte y la rueda primera de la maquinaria, ambos estaban unidos por una cuerda¹²³. De esta manera, el par motriz es prácticamente constante desde el inicio hasta el final. La aparición de nuevos aceros con mejores propiedades elásticas hizo caer en desuso el caracol, estando ausente en los relojes del S. XX.

En la carrera hacia la exactitud, la relojería se encontró con otro problema: Siendo el péndulo, en principio, un regulador mucho más preciso que el *foliot* medieval, este sufre modificaciones de longitud por causa de las variaciones de temperatura, motivando que los relojes adelanten en época fría y viceversa. Uno de los procedimientos para minimizar este efecto era sustituir la varilla pendular por dos o más varillas de hierro y de bronce. El coeficiente de dilatación del hierro es $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$ y el del bronce es $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ C}^{-1}$. Combinando adecuadamente ambos materiales, se consigue que el centro de gravedad del conjunto pendular se mantenga casi fijo. Otro procedimiento inventado por C. Graham (1673-1751) es el péndulo de mercurio; puesto que la densidad de este elemento es triple que la del bronce, las variaciones del nivel del metal líquido motivadas por la temperatura compensan las variaciones de longitud del péndulo.

El problema de la temperatura también afectaba a los relojes regulados por volante y espiral; las variaciones de longitud de este último afectaban a la marcha del reloj, de forma que con el frío este adelanta y viceversa. Como remedio, L. Breguet ideó el volante bimetálico (figura 55), con el frío los arcos del volante se abren aumentando el diámetro efectivo; se compensa así el acortamiento térmico del espiral haciendo que la marcha del reloj sea regular a cualquier temperatura.

II.8 MEDIR MILISEGUNDOS: RELOJES DE CUARZO

Ya en el S. XX aparecen los relojes electrónicos, en un principio se utiliza un diapasón que, accionado por un circuito oscilante, mueve los engranajes. Posteriormente aparece el reloj de cuarzo digital ideado por Joseph Horton y Warren Morrison, mucho más barato y eficiente, que se

¹²³ De esta época viene la expresión “dar cuerda” a un reloj, es decir, tensar el muelle para que este funcione.

ha popularizado hasta el extremo en la actualidad. Este diseño es el que desde hace décadas se utiliza en la investigación científica, en sustitución de los antiguos cronómetros mecánicos.

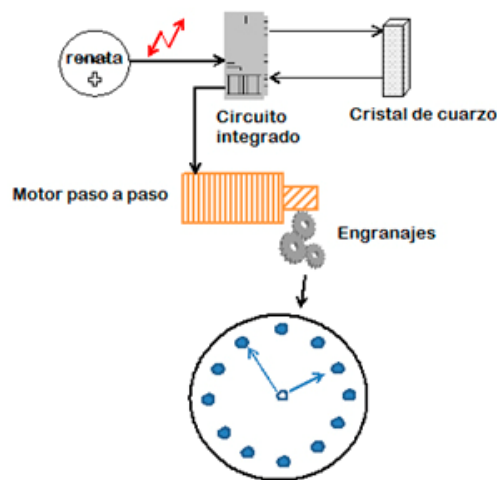


Figura 56 Esquema de un reloj de cuarzo. La vibración de la lámina producida por el circuito genera una señal eléctrica de la misma frecuencia. Esta nueva onda realimenta el circuito electrónico, corrigiéndose las desviaciones de frecuencia que pudieran producirse respecto de su valor nominal.

El reloj de cuarzo es un reloj electrónico que se caracteriza por poseer una pieza de material piezoeléctrico que sirve para generar los impulsos necesarios a intervalos regulares, que permitirán la medición del tiempo. El cuarzo se talla habitualmente en forma de lámina y se introduce en un cilindro metálico. Éste tiene por función la protección del mineral. Para que vibre el cristal de cuarzo, debe ser alimentado por un campo eléctrico oscilante generado por un circuito electrónico.

Cuando un cristal de cuarzo es comprimido o expandido, genera una diferencia de potencial y, viceversa, al serle aplicada una diferencia de potencial alterna, este se contrae y expande rítmicamente. Si la frecuencia del potencial eléctrico alterno coincide con la frecuencia natural de vibración del material piezoeléctrico, se da una resonancia manifestada como una amplificación de las oscilaciones¹²⁴. Puesto que la frecuencia de

vibración del cuarzo es extremadamente constante, el resultado es que el conjunto oscilador-cuarzo adquiere esa misma frecuencia y como consecuencia, el reloj así constituido es enormemente regular y fiable. Así pues, el cuarzo hace el papel de regulador y estabilizador de la frecuencia, lo que servirá finalmente para dar una medida del tiempo. La frecuencia natural de oscilación de un cristal de cuarzo depende tanto de su forma como de su tamaño, por lo que puede ser seleccionada por el constructor. La medida del tiempo se muestra en la forma tradicional de esfera y manecillas o bien en pantalla digital.

II.9 CONTANDO MILMILLONÉSIMAS DE SEGUNDO: RELOJES ATÓMICOS

La medida del tiempo se ha hecho tradicionalmente por comparación del tiempo, objeto de medida, con el número de ciclos u oscilaciones del patrón de tiempo propio del ingenio relojero usado para tal fin. Así, el número de vueltas dado al reloj de arena, el volumen de agua vertido por la clepsidra, el número de oscilaciones efectuadas por el péndulo o el avance de las manecillas (proporcional al número de oscilaciones efectuadas por el volante o el péndulo) proporcionan la medida de la magnitud. Todo esto requiere que el patrón de tiempo del reloj sea lo más estable

¹²⁴ En un reloj de cuarzo tenemos dos osciladores, uno electrónico y otro piezoeléctrico. El primero es intenso, pero sujeto a variaciones por causas variadas en tanto que el segundo no es intenso, pero es extremadamente regular. Siendo sus frecuencias muy parecidas, se producirá el acople entre ambos y el resultado será un oscilador intenso y muy regular. En resumidas cuentas, un reloj de cuarzo es un complejo en el que la potencia que mueve las manecillas corre de cuenta de un circuito electrónico y la exactitud es proporcionada por un cristal de cuarzo piezoeléctrico.

posible, siendo ello determinante para su exactitud. Ciertamente, a lo largo de los siglos se han arbitrado soluciones tan variadas como ingeniosas, algunas de las cuales se han expuesto anteriormente, para lograr la máxima estabilidad del patrón de tiempo de los relojes mecánicos, y no menos cierto es que la aparición de los osciladores electrónicos y de

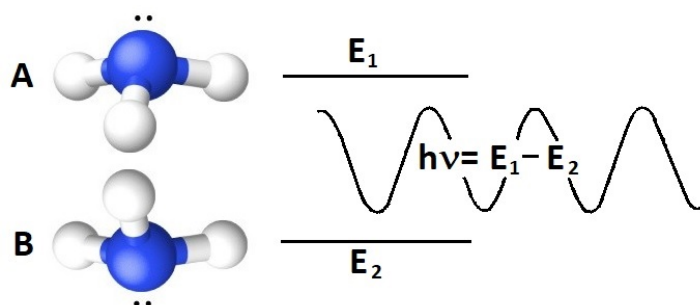


Figura 57 La estructura piramidal de la molécula de amoníaco es causa de que, al ser excitada por una radiación del rango de las microondas, esta experimenta transiciones entre las formas A y B, reemitiendo la misma frecuencia con absoluta estabilidad: $2,387013 \cdot 10^{10}$ Hz.

A mediados del S. XX aparecen los relojes atómicos, en los que la base de tiempo es la oscilación de una molécula o de un átomo entre dos de sus estados energéticos. Estos lo hacen en ciertas condiciones mediante un dispositivo denominado MASER¹²⁵. Cuando una molécula o un átomo se hallan en un estado energético adecuado y se ven afectados por una onda electromagnética, esta puede inducirles a emitir energía en

forma de otra radiación electromagnética, con la misma longitud de onda, que refuerza la onda de paso y desencadena una cascada de fenómenos que llevan a aumentar mucho la intensidad del impulso original. Como vemos, estamos ante un nuevo caso de dos osciladores acoplados, similar al de los relojes de cuarzo. La diferencia con ellos está en que, en el caso de los MÁSERES de amoníaco, el oscilador de frecuencia ultra-estable es la molécula NH₃. Ahora bien, el lector motivado y curioso podría hacerse la siguiente pregunta ¿qué tiene de especial la molécula de amoníaco NH₃ que no tienen otras similares como el agua OH₂ o el metano CH₄, que la hace ideal para la medición exacta del tiempo? La respuesta está en su forma geométrica; la molécula de amoníaco tiene geometría piramidal, ocupando el átomo de nitrógeno el vértice de la pirámide, la base de la pirámide es triangular, de forma que cada átomo de hidrógeno ocupa uno de los tres vértices. Por otro lado, la altura de la pirámide es muy baja en comparación a la amplitud de la base y, dado que los enlaces N-H son inateriales, y por tanto extremadamente elásticos, la molécula de amoníaco es capaz de transformarse con suma facilidad entre las formas A y B representadas en la figura 57, cuando está a una cierta temperatura. Esta transformación, lejos de ser caótica e irregular, tiene una frecuencia propia, esto es, la molécula de amoníaco en condiciones adecuadas, pasa de la forma A a la B 23.870.130.000 veces por segundo ¡y nunca con otro ritmo! En consecuencia, el patrón de tiempo de un reloj MASER de amoníaco tiene una constancia y una estabilidad que jamás pudo soñar Ch. Huygens cuando instalaba los péndulos como reguladores de los relojes mecánicos.

En 1955 se construyó el primer reloj basado en las oscilaciones de la transición hiperfina del electrón $6s^1$ del ¹³³Cs, fueron sus artífices Louis Essen y John V.L Parry. La precisión alcanzada con este tipo de reloj atómico es tan elevada que admite únicamente un error de un segundo en 30.000 años. Hoy día, existen algunos relojes de cesio cuya exactitud es tal que tardarían 52 millones de años para desfasarse un segundo; Ello significa que si ese reloj hubiera comenzado a

¹²⁵ Iniciales de *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*.

funcionar el día en que desapareció el último dinosaurio y hubiera mantenido su marcha ininterrumpidamente hasta hoy, ¡habría experimentado una variación de $\pm 1s$!

Ahora bien ¿por qué motivo el átomo de cesio proporciona el mejor patrón de tiempo? Sabido es que el cesio es el mayor de los átomos de la familia de los elementos alcalinos, situados en la columna más a la izquierda del Sistema Periódico. Todos ellos se caracterizan por tener un único electrón externo, estando los restantes alojados en capas completas más internas. El citado

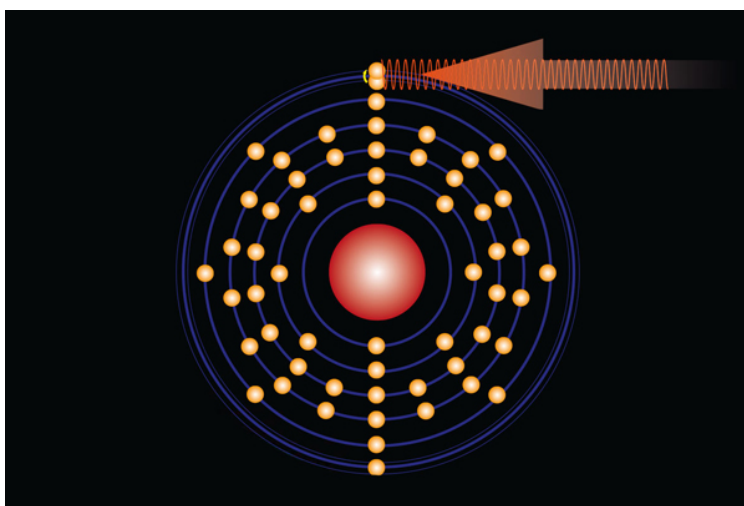


Figura 58 El electrón solitario del átomo de cesio está casi libre y es capaz de saltar entre dos niveles cuánticos, energéticamente muy próximos. La frecuencia con que se producen estas transiciones es extremadamente estable: 9.192.631.770 veces por segundo.

electrón solitario se halla muy débilmente atraído, pudiendo separarse del átomo con suma facilidad¹²⁶. En el caso del cesio la situación es aún más drástica debido a que es el alcalino de mayor tamaño, el electrón solitario se halla muy distante del núcleo, y por si ello fuera poco, la acción atractiva nuclear sobre el electrón solitario está fuertemente “pantalleada” por las capas electrónicas internas. Como consecuencia, el electrón externo del cesio es capaz de experimentar transiciones entre niveles energéticos muy próximos con gran facilidad. En

definitiva, si para hacer saltar a un electrón externo de un átomo cualquiera a un nivel energético superior se precisa irradiarlo con rayos UV como mínimo, en el caso del átomo de cesio basta con irradiarlo con micro-ondas.

El dispositivo que aprovecha esta extraordinaria propiedad se conoce como *reloj de cesio* y consiste básicamente, en un horno que dota de energía térmica a los átomos, los cuales son agrupados y focalizados formando un haz que pasa por un filtro magnético. Cada átomo tiene uno de los dos posibles estados de energía. Estos estados energéticos de los átomos se conocen como niveles “hiperfinos” de energía, pero llamémoslos el estado **A** y el estado **B** para simplificar, siendo $E_A < E_B$ (ver la figura 58). El filtro magnético tiene por finalidad eliminar los átomos que se encuentren en el estado **B**, dejando pasar los del estado **A**.

Los átomos en estado **A** (baja energía), llegan a un resonador donde se someten a radiación de microondas, lo que desencadena la transición de los átomos al estado **B** (alta energía) por absorción de la radiación de microondas. Detrás del resonador, los átomos que están todavía en el estado **A** de baja energía, se eliminan mediante un segundo campo magnético. Un detector cuenta todos los átomos que han cambiado al estado **B**. Variando ligeramente la frecuencia de las microondas se modifica el porcentaje de átomos energéticos que emergen por el segundo filtro;

¹²⁶ He aquí la razón de la fuerte reactividad de estos elementos.

cuando ese porcentaje llega a su valor máximo se ha conseguido la sintonía entre la frecuencia propia de las transiciones energéticas en el cesio y la frecuencia del oscilador.

Finalmente, la señal eléctrica del generador de microondas, ya sintonizado con el cesio, es enviada a un contador digital que la traduce a unidades de tiempo.

Como vemos, de nuevo se repite el esquema del funcionamiento de los relojes de cuarzo y de amoníaco. Si entonces, el oscilador electrónico se sintonizaba con las vibraciones del cuarzo piezoeléctrico o con las inter-conversiones de la molécula de amoníaco, ahora la sintonía del oscilador electrónico se hace con la frecuencia de las transiciones hiperfinas del átomo de cesio.

RELOJ ATÓMICO DE CESIO

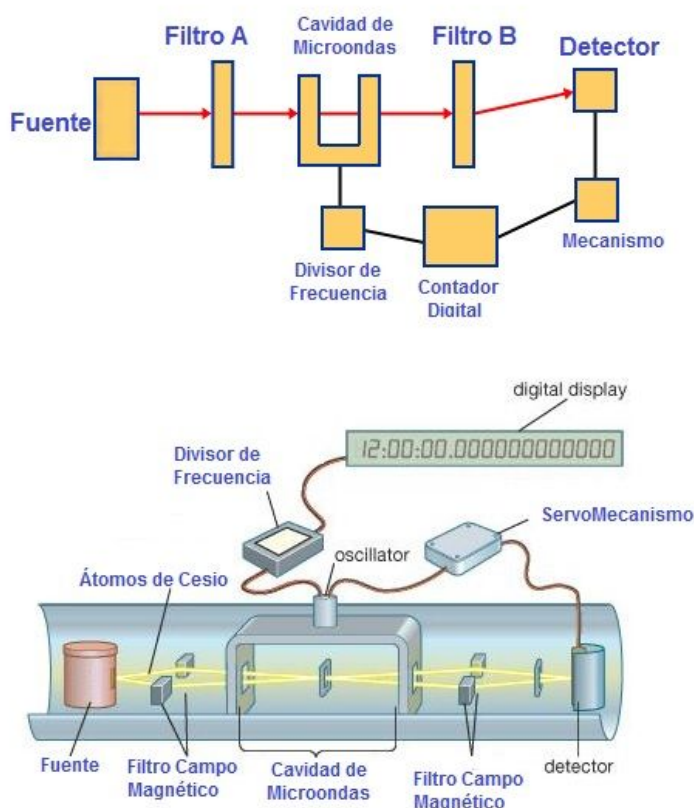


Figura 58 bis Esquema de un reloj de cesio.

En el año 1967 los relojes atómicos basados en cesio habían conseguido fiabilidad suficiente como para que la Oficina Internacional de Pesas y Medidas eligiera la frecuencia de vibración atómica de los dispositivos creados y perfeccionados por Essen como nuevo patrón base para la definición de la unidad de tiempo físico. Según este patrón, *un segundo se corresponde con 9.192.731.770 ciclos de la radiación asociada a la transición hiperfina del isótopo de Cesio-133 en su estado fundamental* (Definición internacional del segundo).

Hubo momentos en el que la medida del tiempo no tenía más pretensiones que conocer groseramente la

hora del día. Ello se hacía silenciosamente mientras la sombra del *gnomon* se proyectaba sobre las líneas horarias del plano del reloj solar o mientras la arena pasaba de la cavidad superior a la inferior. Más adelante, en las noches en que Ole Römer enfocaba su telescopio hacia Júpiter, intentando medir el período de las apariciones y desapariciones de *Io*, el lento y acompasado tic-tac del reloj de péndulo acompañaba al esforzado astrónomo. Casi un siglo después, el rápido tic-tac del reloj de volante que se hallaba en el camarote del capitán Cook se mezclaba con el rumor que la brisa marina producía en los focos del HMB Endeavour. Aquel tic-tac era la salvaguarda del navío y todos confiaban en él.

Hasta los años setenta del S. XX el tenue tic-tac del reloj de pulsera o de bolsillo ha acompañado las vidas de cuantos hoy peinamos canas, ha acompañado nuestro sueño en la mesilla de nuestro dormitorio, ha regido la regularidad de los trenes, autobuses, centros de enseñanza y, en fin, la vida entera. Ya a finales del S. XX el tic-tac se apagó para siempre para volver de nuevo al silencio, de las vibraciones del cuarzo. Pudiera pensarse que el reloj ha desaparecido de nuestras vidas pero es todo lo contrario. Hoy el reloj está en nuestra muñeca, en nuestro teléfono, en la TV y en nuestro ordenador. Tenemos acceso a la hora exacta en cualquier momento o circunstancia, tanto si estamos en nuestra casa como en el trabajo o en nuestro vehículo. Actualmente, el *Tiempo Atómico Internacional* se obtiene del tiempo suministrado por la media de unos 400 **relojes atómicos** de alta precisión en más de 50 laboratorios repartidos por varios países. Son la unidad base de la relojería moderna. La hora suministrada por ese organismo es repartida por todo el mundo y lo tenemos en tiempo real en nuestros teléfonos inteligentes y en nuestros ordenadores personales.

Actualmente, la medida exacta del tiempo es fundamental en el desarrollo de la investigación científica, especialmente la astronómica y es de vital importancia para mantener el sistema GPS. Sin él la navegación aérea y marítima perdería las altas cotas de seguridad que hoy tiene. Pero este es un asunto que dejaremos para más adelante.

II.10 LA MEDIDA DEL ESPACIO: GEOMETRÍA

Desde la más remota antigüedad, el ser humano necesitó cuantificar las distancias para estimar las posibilidades de llegar felizmente hasta un destino deseado, una cuestión nada baladí en un tiempo en el que llegar al final del viaje podía ser una cuestión de vida o muerte. Por tanto, es muy probable que el nacimiento de la Geometría estuviera vinculado a la medida de distancias terrestres. No en vano, el nombre de esta especialidad matemática, de raíces griegas, significa “medida de la Tierra”. Por otro lado, la geometría desde sus inicios, se ocupa del estudio de las figuras en el plano o en el espacio, incluyendo puntos, rectas, ángulos, curvas, superficies, polígonos, poliedros, etc.

Muchos de los elementos y recursos de la geometría, de los que hoy disponemos, son herencia de antiguas civilizaciones. Así, el sistema sexagesimal empleado para medir arcos y tiempos tiene su origen en la antigua Sumeria y los teoremas fundamentales de la geometría fueron establecidos en la Grecia clásica, siglos antes del nacimiento de Cristo.

Puesto que la observación del cielo es algo que los humanos han hecho desde lo más hondo de la noche de los tiempos se concluye que, por necesidad, la astronomía es una antigua ciencia, probablemente el más antiguo de los saberes. El conocimiento de las posiciones de los astros ha servido para la orientación y para reconocer las distintas estaciones. También el sol, la luna y los planetas más visibles han sido venerados, mitificados e incluso, adorados. Aún hoy pervive entre muchos de nosotros la creencia de que la posición de los astros en el momento del nacimiento es determinante en el desarrollo de la vida del recién nacido, como atestiguan los numerosos horóscopos existentes en las páginas finales de muchos diarios y diversas publicaciones periódicas.

En el capítulo II.4 se expuso cómo Eratóstenes, por un ingenioso procedimiento geométrico, logró determinar la longitud del radio terrestre. Su contemporáneo Aristarco de Samos (310-230 a. C.), considerado el *Copérnico de la antigüedad*, defendía la idea de que la Tierra gira en torno al Sol y

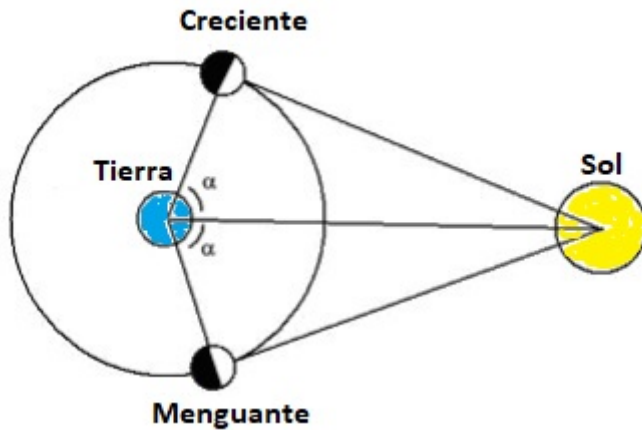


Figura 59 Esquema del procedimiento geométrico de Aristarco para la estimación de la relación de distancias Tierra-Luna y Tierra-Sol.

por tanto, no es el centro del universo. La idea pugnaba con la descripción geocéntrica que había hecho Aristóteles; quiso el destino que los trabajos de Aristarco desaparecieran en uno de los incendios que sufrió la Biblioteca de Alejandría y que en el siglo II d.C., Ptolomeo consolidara la teoría geocéntrica de Aristóteles. Para colmo de males, en la época medieval se hizo de ello una cuestión de fe y hubo que esperar hasta el S. XVI para que

Nicolás Copérnico resucitara la idea de Aristarco. Reconocido como el más grande astrónomo de la antigüedad, el de Samos determinó la relación de distancias de la Tierra a la Luna y de la Tierra al Sol por procedimiento geométrico. Quizá sea esta la primera aplicación de la geometría a la medida de distancias astronómicas, de la cual tengamos constancia.

Aristarco supuso que cuando la Luna está en cuarto creciente o menguante, las líneas Tierra-Luna y Luna-Sol forman un ángulo recto. En esas condiciones midió el ángulo que forman las visuales de la Tierra al Sol y de la Tierra a la Luna, que resultó ser 87° . Ello le permitió estimar que la distancia al Sol debe ser 18 veces mayor que la distancia a la Luna¹²⁷.

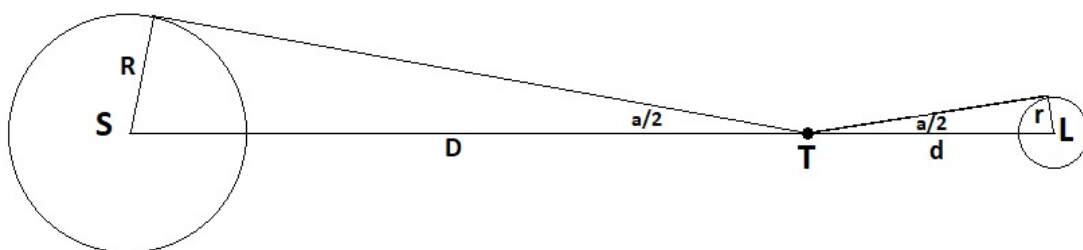


Figura 60 Esquema del procedimiento geométrico de Aristarco para determinar la relación de tamaños entre el Sol y la Luna.

El resultado de Aristarco era altamente inexacto, pero no le resta mérito ya que la idea era correcta y las causas de su error se debieron a los escasos medios de que disponía: una simple plomada y un rudimentario transportador de ángulos.

¹²⁷ Por entonces no se conocía la trigonometría. Con los métodos de observación actuales, sabemos que el ángulo que midió Aristarco es realmente de $89^\circ 50'$ lo que lleva a la conclusión de que la distancia al Sol es trescientas cincuenta veces superior que la distancia a la Luna.

Igualmente ingeniosa fue la determinación que hizo de la relación de tamaños entre el Sol y la Luna. Tras conocer que el Sol está a distancia mucho mayor que la Luna y que su diámetro aparente es casi igual, Aristarco pensó que el ángulo $\alpha/2$ bajo el que se ve el radio de ambos cuerpos celestes debe ser el mismo, tanto si se mira a la Luna como si se mira al Sol y por tanto, los triángulos rectángulos de la figura 60 han de ser semejantes. Puesto que recientemente, él había determinado la relación de distancias $D/d=18$ pudo concluir que la relación de los radios¹²⁸ solar y lunar es igualmente $R/r=18$ y por tanto, la relación de volúmenes Sol-Luna ha de ser 18^3 , es decir, el Sol es 5832 veces mayor que la Luna.

Finalmente, expondremos el procedimiento por el que consiguió establecer la relación de tamaños entre la Tierra y la Luna. En primer lugar, determinó la velocidad angular con que se desplaza la Luna en torno a la Tierra. Para ello midió el ángulo con el que se ve el satélite, que resultó ser $0,5^\circ$, él sabía que el período lunar es de 29,53 días (o lo que es lo mismo, $29,53 \times 24=708,72$ horas), es decir, que la Luna describe un arco de 360° en ese tiempo y por tanto su velocidad angular debe ser: $360^\circ/708,72h = 0,51$ grados/hora

En segundo lugar, Aristarco utilizó las observaciones realizadas durante un eclipse lunar máximo, en el que el centro de nuestro satélite pasa por el centro de la sombra proyectada por nuestro planeta.

Supuso que, dada la gran distancia a la que se encuentra el Sol, los rayos de su luz llegan casi paralelos a la Tierra, de forma que la sombra que esta proyecta, tiene casi igual tamaño que el

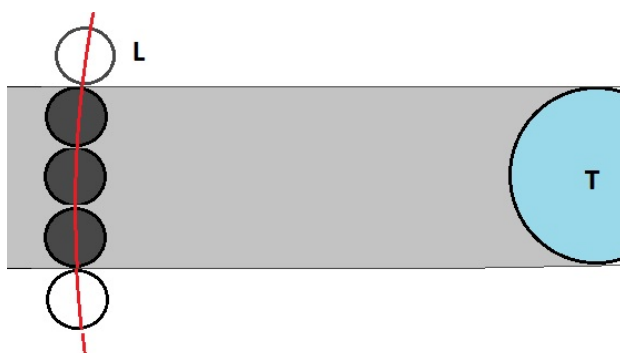


Figura 61 Procedimiento de Aristarco para la determinación de la relación de tamaños entre la Tierra y la Luna.

propio planeta. Durante el desarrollo de un eclipse lunar total, midió el tiempo que tardó la Luna en oscurecerse, por entrar en el haz de sombra terrestre, y volver a brillar por haber salido de él. El tiempo estimado por Aristarco fue aproximadamente de 3 horas. Puesto que él conocía la velocidad de traslación de nuestro satélite, más en concreto, había determinado que la Luna se desplaza en una hora una longitud equivalente a su propio diámetro, concluyó que en el tiempo de duración del eclipse, la Luna se

había desplazado una longitud equivalente a tres diámetros lunares y por tanto, los diámetros terrestre y lunar deben estar en la proporción 3/1.

Medio siglo después, Eratóstenes de Cirene determinó el radio terrestre por un procedimiento geométrico que ya hemos visto en el capítulo II.4. Ello permitió que Hiparco de Nicea (190-120 a.C.) determinara hacia el 150 a.C. los tamaños de la Luna y del Sol siguiendo los procedimientos geométricos de Aristarco. Esta vez llegó a la conclusión de que el diámetro terrestre es 3,7 veces

¹²⁸ Hoy sabemos que la relación entre los diámetros solar y lunar es 400, cifra muy superior a la determinación de Aristarco.

mayor que el lunar. Tomando como dato la longitud del radio terrestre, 6.366 km que había determinado Eratóstenes, el de Nicea pudo determinar que el radio de la Luna es 1.722 km.

Así pues, el diámetro de la Luna sería 3.438 km y correspondería a un arco de 0,51°. Como la longitud de la circunferencia total es $2\pi r$ y corresponde a un arco de 360°, Hiparco planteó la siguiente proporción:

$$\frac{3.438 \text{ km}}{0,51^\circ} = \frac{2\pi r}{360^\circ}$$

De donde

$$r = \frac{3438 \cdot 360}{2\pi \cdot 0,51} = 386,241 \text{ km}$$

Que es el valor obtenido por Hiparco para la distancia Tierra-Luna. Puesto que el valor medido actualmente es 384.000 km, la determinación del griego es excelente, dada la época en que se realizó.

Han sido numerosos los astrónomos de la antigüedad clásica que han utilizado la geometría para la determinación de distancias, tanto astronómicas como terrestres. Cabe citar a Tales de Mileto (624-546 a.C.), Anaximandro de Mileto (610-545 a.C.), Eudoxo de Cnido (390-337 a. C.), Euclides de Megara (325-265 a.C.), Apolonio de Pérgamo (262-190 a. C.), Claudio Ptolomeo (100-170 d.C.), si bien nos hemos referido a los que aportaron las mejores determinaciones astronómicas: Aristarco e Hiparco.

De la Edad Media hay que destacar a los astrónomos árabes, que recogieron los trabajos de los griegos, indios y persas concentrando su producción entre los siglos XI al XIII en la península ibérica, más en concreto, en la Escuela de Traductores de Toledo creada por el rey castellano Alfonso X. Allí se tradujeron del árabe las Tablas Toledanas, recopilación de todos los datos astronómicos de la antigüedad hecha por Azarquiel (1029-1087). Dichas tablas, ya traducidas, pasaron a llamarse *Tablas Alfonsíes* en honor al rey castellano. Los trabajos de investigación y traducción de esta admirable escuela permitieron que obras fundamentales de la antigua cultura griega fueran rescatadas del olvido y transmitidas a la Europa medieval a través de España. A partir de estas versiones, y gracias a las mismas, España transmitió a Europa todos aquellos saberes. También en Toledo se tradujo el *Almagesto* de C. Ptolomeo, compendio de la teoría geocéntrica del universo que pervivió hasta el S. XVI. Finalmente, hemos de citar a Johann Müller, más conocido como Regiomontano (1436-1476), considerado el padre de la trigonometría moderna y autor de varias obras de matemáticas, astronomía y cosmología.

En los primeros años del S. XVI un treintañero monje prusiano estudiaba Matemáticas, Astronomía y Teología en la Universidad de Padua. Vuelto a su país, Nicolás Copérnico se dedicó a su parroquia al tiempo que trabajaba intensamente la astronomía y en 1527 publicaba su obra maestra *De revolutionibus orbium coelestium*, que cambiaría definitivamente la concepción cosmológica del universo. Dejando de lado los que, sin duda, son los aspectos más importantes de su obra y los motivos por los que, después de que publicara su trabajo, todo en la ciencia habría de cambiar, nos centraremos aquí en los dos métodos geométricos que él ideó para medir distancias entre planetas en el Sistema Solar.

Copérnico ideó dos métodos para determinar la distancia de los planetas al Sol. El primero, más sencillo, es aplicable a los planetas interiores (Mercurio y Venus).

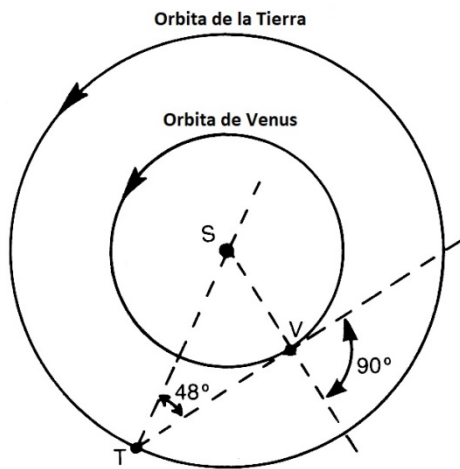


Figura 62 Esquema del procedimiento geométrico de Copérnico para determinar distancias con los planetas interiores.

Sea el caso de Venus. Es sabido que, visto con antejo o telescopio, Venus se muestra en fases similares a las de la Luna. Cuando al alba o al atardecer alcanza su máxima declinación sobre el horizonte, el planeta se encuentra en cuadratura con el Sol y la Tierra, como se muestra en la figura 62. En esas condiciones es fácil medir el ángulo que forman las visuales TS y TV, que es de 48° . Desde que Hiparco determinara por primera vez la distancia de la Tierra al Sol, esa medida se había consolidado y mejorado. Así pues, no le resultó difícil a Copérnico hallar la distancia de Venus al Sol mediante un simple cálculo trigonométrico:

$$SV = TS \cdot \text{sen}48^\circ$$

Es decir, si el radio de la órbita terrestre es una *Unidad Astronómica*, Venus dista 0,74 UA del Sol, y por igual procedimiento, Mercurio, cuya declinación máxima es 28° , dista 0,47 UA del astro rey.

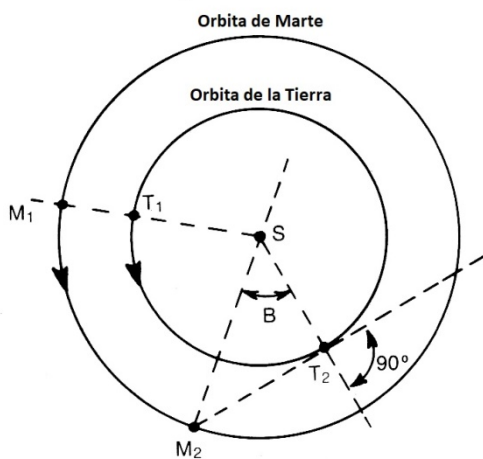


Figura 63 Esquema del procedimiento de Copérnico para planetas exteriores.

El procedimiento geométrico para los planetas exteriores es algo más complicado y se expresa en la figura 63 para el caso de Marte. Es preciso iniciar la determinación en un momento en que Marte, la Tierra y el Sol estén en conjunción, es decir, en una misma línea recta¹²⁹, en nuestro esquema, posiciones M_1 , T_1 y S. A partir de ese momento se ha de esperar a que la visual dirigida al Sol forme un ángulo recto con la visual dirigida a Marte¹³⁰, en nuestro esquema, posiciones M_2 , T_2 y S. En esas condiciones, el ángulo ST_2M_2 es recto. En el tiempo

transcurrido desde que las posiciones de los dos planetas T_1 y M_1 pasan a ser T_2 y M_2 hay un tiempo en días, t perfectamente cognoscible.

A continuación, procede determinar los ángulos T_1ST_2 y M_1SM_2 que han descrito ambos planetas en el tiempo t . Puesto que Marte está más alejado del Sol que la Tierra, el año marciano es mayor¹³¹ y por tanto, el ángulo barrido por Marte en el tiempo t es menor que el ángulo barrido en ese tiempo por la Tierra. Más en concreto, los ángulos barridos por ambos planetas en el tiempo t pueden conocerse mediante la expresión:

¹²⁹ En estas condiciones, Marte alcanza su máxima declinación en la medianoche.

¹³⁰ En esas condiciones, Marte alcanza su máxima declinación en el crepúsculo o en el alba.

¹³¹ El año marciano es 687 días terrestres.

$$\frac{t}{\text{período de traslación}} = \frac{\text{ángulo barrido}}{360^\circ}$$

Puesto que $B=T_1ST_2-M_1SM_2$ (ver la figura 63), Copérnico pudo determinar el valor del ángulo B, que resultó ser de 49° , y puesto que el triángulo M_2ST_2 es recto,

$$SM_2 = \frac{ST_2}{\cos B} = \frac{ST_2}{\cos 49} = 1,5 ST_2$$

Es decir, Marte se encuentra a 1,5 unidades astronómicas del Sol.

Por supuesto, este método es válido para Júpiter y el resto de los planetas exteriores.

Modernamente, tanto para los planetas interiores como exteriores, las distancias se miden por un procedimiento parecido al radar, si bien en astronomía se emplean señales electromagnéticas muy focalizadas que se dirigen hacia el planeta objeto de medición. El dispositivo experimental mide el tiempo que tarda la señal en ir y volver tras reflejarse en el planeta y, puesto que la velocidad de esas ondas es la de la luz, puede conocerse la distancia en tiempo real con una estimable precisión.

II.11 TRIANGULACIÓN Y PARALAJE

El método de la *Triangulación* para medir distancias a puntos no accesibles era ya conocido en el antiguo Egipto, en el segundo milenio antes de Cristo, y está documentalmente probado que los egipcios conocían la relación entre las longitudes de los catetos de un triángulo rectángulo y la

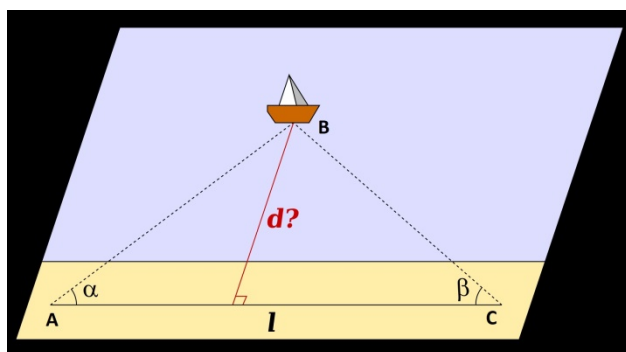


Figura 64 Determinación de la posición de un punto inaccesible por triangulación.

pendiente de la hipotenusa. Parece ser que Thales de Mileto, en el S. VI a.C., empleó triángulos semejantes para calcular la altura de las pirámides de Gizeh midiendo la longitud de sus sombras y comparándolas con su propia sombra y cinco siglos después Herón de Alejandría determina una distancia entre dos puntos por triangulación utilizando para ello un instrumento que hoy se conoce como el *dioptra de Herón*¹³². Más tarde, ya en plena Edad Media, se introdujo en Al-

Andalus la técnica de la Agrimensura (delimitación de terrenos mediante la trigonometría) por medio de los tratados árabes sobre el astrolabio. Siglos después, Tycho Brahe utilizó la triangulación para muchas de sus determinaciones astronómicas.

La triangulación ha sido la técnica más utilizada en cartografía durante siglos hasta que las técnicas GPS han irrumpido, con enorme ventaja, en la determinación de posiciones y medición de distancias.

¹³² Instrumento precursor del actual *teodolito*.

Mediante triangulación, se pueden obtener las coordenadas de un punto no accesible B (el barco de la figura 64). Primero, se calcula la distancia (A-C) existente entre dos puntos accesibles de la costa (cuyas coordenadas son A y C). Si medimos la amplitud de los ángulos de vértices (A) y (C), mediante trigonometría, obtendremos las distancias (A-B) y (C-B) y, por tanto, las coordenadas del tercer punto no accesible: B.

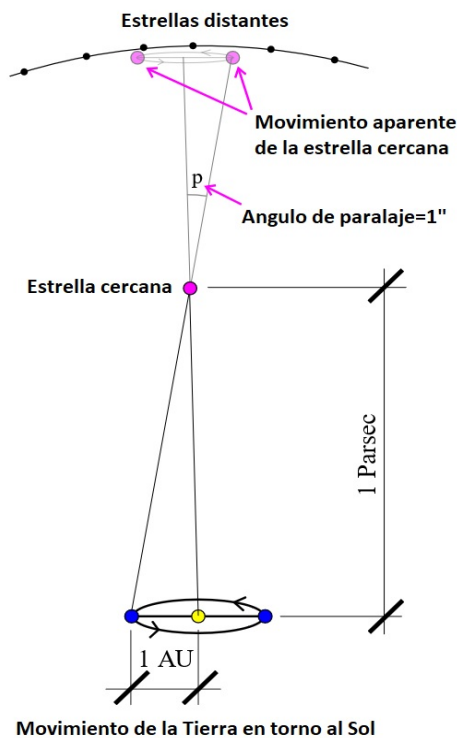


Figura 65 Esquema explicativo del paralaje.

La triangulación se usa en astronomía no solo para medir distancias en el Sistema Solar sino también fuera de él. La aplicación de la geometría en la medición de distancias a estrellas próximas se denomina *Paralaje*. Podemos apreciar el fenómeno del paralaje sin más que coger un lápiz con una mano, estirando el brazo por delante de nosotros y observar un paisaje cerrando primero un ojo y después el otro. Vemos que el lápiz está en línea recta (en astronomía se dice “en conjunción”) con un determinado objeto del paisaje al mirar con el ojo izquierdo y con otro objeto al guiñar el derecho. Obviamente, ello se debe a la separación que existe entre nuestros ojos y que constituye la base de la visión binocular que nos permite apreciar la distancia a la que se encuentran los objetos con tan solo mirarlos¹³³.

En astronomía se aprovecha la separación que existe entre dos posiciones diametralmente opuestas de la Tierra en el transcurso de medio año. El método, creado por el astrónomo alemán

Friedrich Bessel (1784-1846), se usa para la determinación de distancias a estrellas cercanas. Se basa en el hecho de que la posición aparente de una estrella cercana varía a lo largo del año debido a las dos posiciones extremas de la Tierra en su eclíptica, distantes dos *unidades astronómicas* (AU).

Como puede suponer el lector, los ángulos de paralaje astronómico son extremadamente pequeños, en general, fracciones de segundo de arco y por tanto, los medios técnicos de medición de esos ángulos son sofisticados y costosos. Este método ha dado lugar a la creación del *parsec*, la unidad de longitud astronómica más empleada junto con el *año-luz*¹³⁴. Según se aprecia en la figura 65, un *parsec* es la distancia que corresponde a un ángulo de paralaje de 1". Las equivalencias del parsec con otras unidades astronómicas son:

$$1 \text{ pc} = 206.265 \text{ AU} = 3,08 \cdot 10^{13} \text{ Km} = 3,26 \text{ a.l.}$$

¹³³ Nuestro complejo ojos-cerebro es una eficazísima máquina de triangulación que nos ha legado la Naturaleza a través de la evolución. Compartimos tan valiosa herramienta con los restantes simios y, en general, aquellos seres cuya supervivencia depende de la estimación de distancias (depredadores en general). Todos estos seres tenemos los ojos en la cara, dirigidos hacia adelante para asegurar la visión binocular y no laterales, como es el caso de los herbívoros y otros animales no depredadores, para los que lo importante es un campo de visión lo más amplio posible para detectar al depredador cuanto antes y escapar de él.

¹³⁴ El año luz es la distancia que recorre la luz en un año terrestre.

Por otro lado, puesto que el ángulo de paralaje es inversamente proporcional a la distancia, es fácil determinar esa distancia si se dispone del ángulo de paralaje. Así, por ejemplo, la estrella más cercana a nosotros es la enana roja α -Centauri, visible con un ángulo de paralaje de 0,769", equivalente a 1,3 pc o bien, 4,3 años luz.

II.12 LAS DISTANCIAS EN EL UNIVERSO

Cuando en una noche clara contemplamos las estrellas, podemos observar que unas brillan más que otras. A esa intensidad se le llama *magnitud aparente*. Ahora bien, que una estrella brille más o menos depende no solo de su tamaño y temperatura sino también de la distancia a la que se encuentre. Por ello, es preciso distinguir entre la *magnitud absoluta*, consecuencia directa de su tamaño y temperatura y *magnitud aparente*, esto es, el brillo con que la vemos desde la Tierra.

Fue Hiparco de Nicea quien clasificó por primera vez las estrellas más visibles en el año 150 a.C. clasificándolas por brillos y estableciendo cinco categorías, de 1 a 6. Tres siglos después, Claudio Ptolomeo recopiló y completó el catálogo de Hiparco en su *Almagesto*. En dicha obra figuran las estrellas de brillo 6 como las más débiles a simple vista y las de brillo 1 las más intensas. Ahora bien, por la manera en que nuestros ojos captan la luz, una estrella de magnitud 1 no es el doblemente brillante que una de magnitud 2, sino un poco más. Realmente, la escala de magnitudes estelares es una escala exponencial:

MAGNITUD	1	2	3	4	5	6
LUMINOSIDAD	1	2,5	6,3	15,6	39	100

Puesto que la luminosidad de un foco emisor es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, la magnitud aparente está relacionada con la magnitud absoluta mediante la sencilla expresión:

$$\text{Magnitud aparente} = \frac{\text{Magnitud absoluta}}{D^2}$$

Esta relación entre las magnitudes absoluta y aparente es absolutamente lógica y, si bien contribuye a ordenar nuestras ideas en el asunto, realmente no es práctica. Por ello, los astrónomos convienen en el empleo de una fórmula que las relaciona:

$$M - m = 5 - 5 \log D$$

Donde M es la magnitud absoluta, definida como *el brillo que tendría la estrella si estuviera a la distancia de 10 parsecs* (unos 33 años-luz) y m es la magnitud aparente, es decir, el brillo percibido de la estrella, por estar a la distancia D . Esta sencilla ecuación tiene tres variables: M , m y D . Por consiguiente, si conociéramos las magnitudes aparente y absoluta de una determinada estrella podríamos calcular a qué distancia se encuentra. La magnitud aparente puede obtenerse directamente por medio de las sofisticadas técnicas fotométricas de que hoy se dispone.

En cuanto a la determinación de la magnitud absoluta, puede determinarse indirectamente por vía espectrofotométrica y constituye una operación más ardua. En lo que se refiere a sus propiedades emisivas, las estrellas se comportan como cuerpos negros. En el capítulo I.12 nos

referimos a las características emisivas del cuerpo negro ideal con la pretensión de exponer la Teoría Cuántica de Max Planck y vimos que, cuanto más alta es su temperatura, tanto más tendente al violeta y alejado del rojo es su espectro emisivo.

Pues bien, esto es, precisamente, lo que sucede con la luz emitida por las estrellas. El análisis espectral varía de unas estrellas a otras, de forma que las de mayor temperatura dan un espectro más desplazado hacia el violeta, en tanto que las más “frías” dan un espectro más tendente hacia el rojo.

En los primeros años del S. XX el astrónomo danés Ejnar Hertzsprung trabajaba en el estudio de la correlación que existe entre la luminosidad de las estrellas y su temperatura superficial. Como resultado, llegó a elaborar en 1905 un diagrama cartesiano que relaciona ambas magnitudes. Independientemente, en 1913 el astrónomo estadounidense Henry Norris Russell construyó un diagrama que relacionaba la luminosidad de las estrellas con la composición espectral de su luz. La síntesis de ambos trabajos se conoce actualmente como el *Diagrama de Hertzsprung-Russell*, más brevemente, como *Diagrama HR*, representado en la Figura 67.

Por otro lado, la mayoría de las estrellas están actualmente clasificadas bajo el sistema de Morgan–Keenan (MK), utilizando las letras *O*, *B*, *A*, *F*, *G*, *K*, y *M*, una secuencia que abarca desde las más calientes (tipo *O*) a las más frías (tipo *M*). Cada clase de letra se subdivide usando un dígito numérico, con el *0* para las estrellas más calientes y *9* para las más frías (por ejemplo: *A8*, *A9*, *F0*, *F1* forman una secuencia de las más calientes a las más frías). La radiación electromagnética procedente de la estrella es analizada mediante su dispersión por un prisma o por una red de difracción en un espectro, mostrando así el arcoíris de colores (espectro electromagnético visual) entremezclados con líneas de absorción (ver la Figura 66). Cada línea indica la presencia de un determinado elemento químico, junto con la intensidad de la línea que determina la abundancia de ese elemento

Todo ello se encuentra incluido en el moderno diagrama HR, del cual podríamos decir que es a las estrellas lo que la Tabla Periódica es a los elementos químicos. Es una de las herramientas más potentes y más empleadas en astrofísica porque, pese a su simplicidad, contiene gran cantidad de información relevante acerca de las estrellas. En el eje de horizontal figuran las temperaturas estelares en sentido inverso, las más calientes a la izquierda y las más “frías” a la derecha y en el

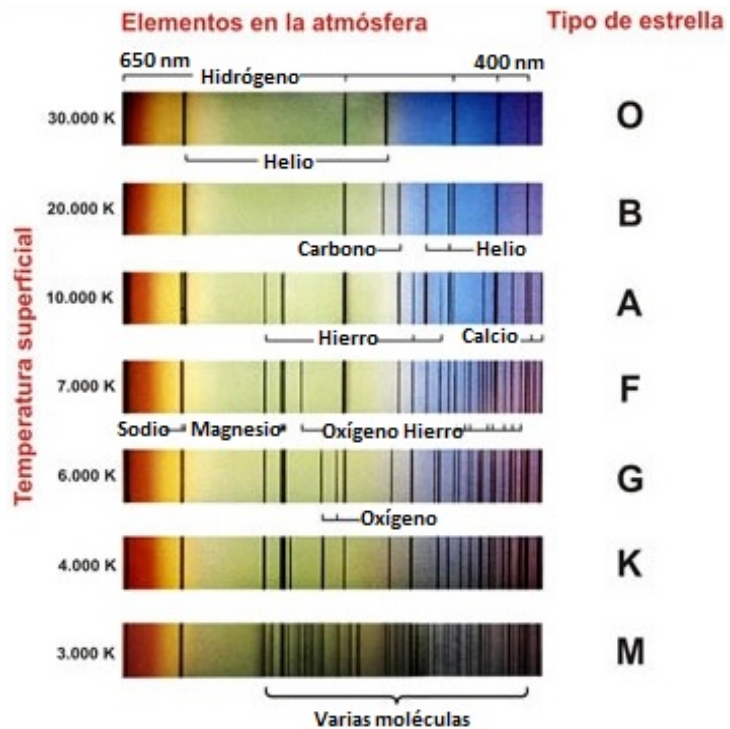


Figura 66 Clasificación espectral de las estrellas.

eje vertical se consigna la magnitud absoluta en unidades solares¹³⁵. Por tanto, las estrellas más calientes y emisivas se encontrarán en la esquina superior izquierda del diagrama en tanto que las más “frías” y menos emisivas se encontrarán en la esquina diametralmente opuesta.

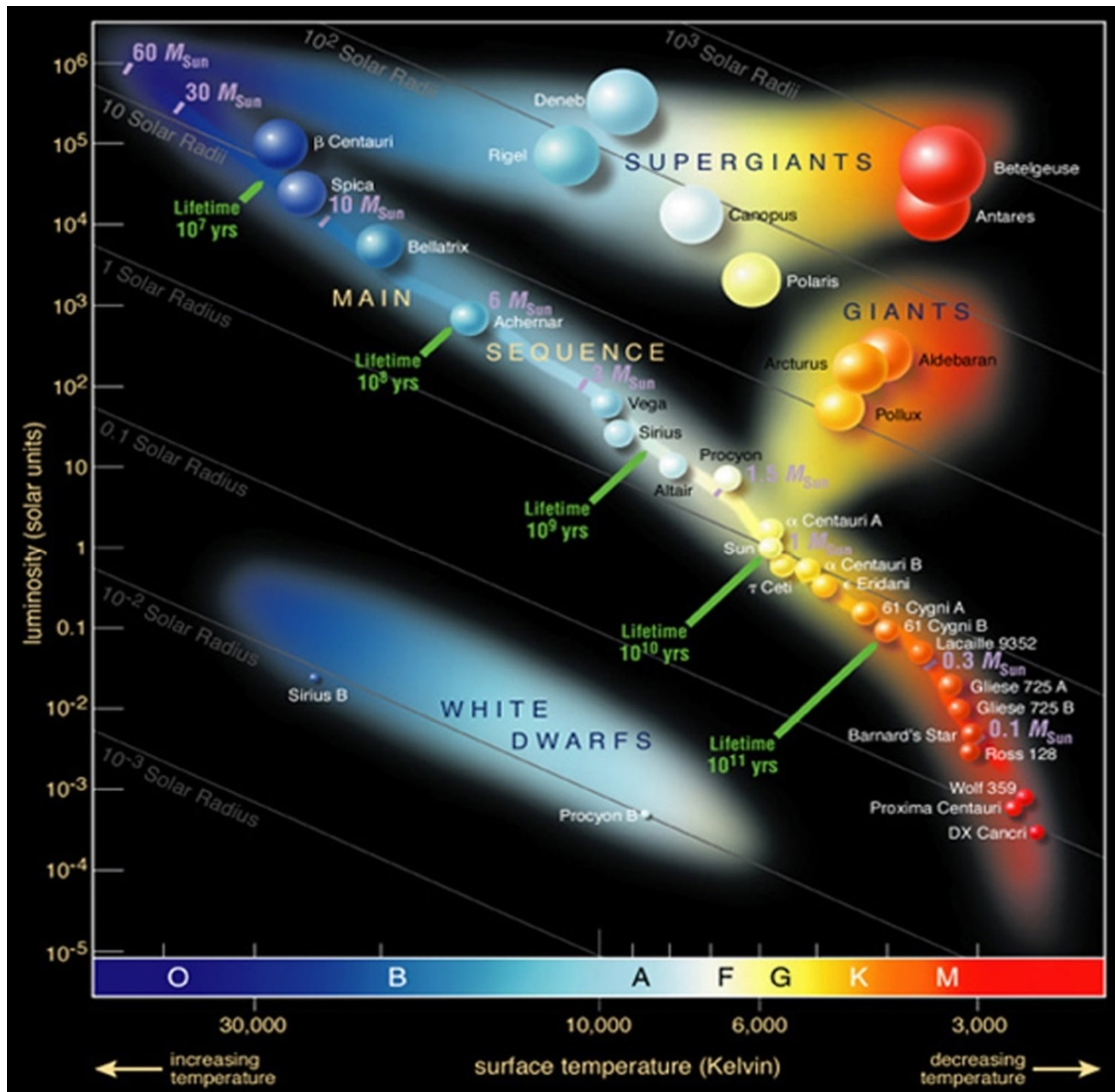


Figura 67 Diagrama de Hertzsprung-Russell, en el que se correlacionan la magnitud absoluta de las estrellas y el espectro de su luz, directamente relacionado con su temperatura.

(Tomado de <https://www.eso.org/public/images/eso0728c/>)

Por otro lado, sabemos que el poder emisivo de un cuerpo negro esférico es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura¹³⁶ y al cuadrado de su radio (o lo que es lo mismo, proporcional a la superficie emisiva). Estas relaciones son muy útiles en astrofísica, toda vez que las estrellas son cuerpos negros esféricos. Por tanto, es posible relacionar su luminosidad y temperatura a través de su radio. Si nos fijamos en la figura 67 apreciaremos que en el diagrama HR se consignan los radios de las estrellas siguiendo líneas descendentes que van de izquierda a derecha, conforme

¹³⁵ Adjudicando al Sol el valor unidad, la magnitud, por ejemplo, 10^2 de las estrellas Vega o Sirio (en el centro del diagrama) significa que ambas son 100 veces más emisivas que el Sol.

¹³⁶ La ley deducida por Joseph Stephan en 1879 a partir de consideraciones teóricas de Ludwig Boltzmann establece que la potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) de un cuerpo negro a la temperatura T es: $E = \sigma \cdot T^4$ siendo σ una constante de proporcionalidad que lleva el nombre de su creador.

a una escala referida al Sol. Podemos ver que dos estrellas supergigantes como *Betelgeuse* y *Antares* tienen sus radios mil veces mayores que el solar y enanas blancas como *SiriusB* y *ProcionB* tienen radios cien veces menores que el solar.

Al analizar con detenimiento el diagrama HR vemos que nuestras intuiciones, que hemos adquirido a través del estudio de la relación entre color, energía emitida y temperatura, se cumplen en la realidad. Pero observamos que las estrellas no se diseminan por el diagrama sino que siguen un camino, denominado secuencia principal, o se agrupan en algunas regiones, la de las enanas blancas o la de las gigantes y supergigantes. Estas agrupaciones tan nítidas de las estrellas en el diagrama sugieren que las estrellas tienen un ciclo de vida propio y que se van “desplazando” por el diagrama en las distintas fases de su evolución. Así, nuestro Sol que está en la parte intermedia, con el paso del tiempo irá consumiendo completamente su combustible nuclear y se irá expandiendo y enfriando, se convertirá en una gigante roja y por tanto subirá por la secuencia principal hasta entrar en la rama de gigante roja. Gracias al diagrama HR, los astrofísicos pueden estimar las masas de las estrellas y por tanto su tiempo de vida. Sin duda, este es un ejemplo de la poderosa e inquietante simplicidad de la naturaleza, aunque no siempre sea el caso.

II.13 LAS DISTANCIAS EN EL MICROCOSMOS

Ciertamente, las distancias astronómicas están tan alejadas de nuestro orden de magnitud que no podemos acceder directamente a ellas, por ello es preciso recurrir a métodos indirectos. Hemos visto que para estimar las distancias siderales es preciso emplear procedimientos como la Geometría, el paralaje o el análisis espectral. Pues bien, cuando se trata de medir las distancias ultracortas, propias de las dimensiones moleculares, de nuevo hemos de recurrir a las técnicas indirectas.

De todas ellas, la más sencilla es la medición microscópica; basta con observar el objeto a medir y, sabiendo el tamaño del campo visual del microscopio, dado por la potencia amplificadora del instrumento, por comparación puede saberse el tamaño del objeto en cuestión. Este método se

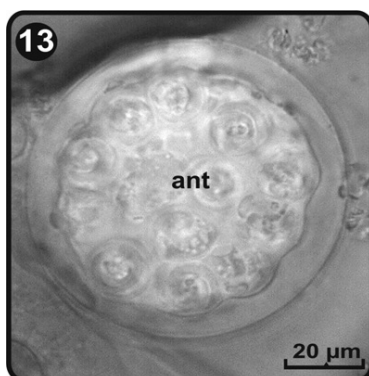


Figura 68 Medición del tamaño de una célula por microscopía.

utiliza en citología y en todos aquellos campos en los que sea de aplicación el microscopio óptico (metalografía, petrografía, etc).

El microscopio óptico tiene limitaciones impuestas por la longitud de onda de la luz, que se hacen patentes a partir de los 1500 aumentos. A partir de ahí se hace preciso emplear otras radiaciones cuya menor longitud de onda permitan lograr imágenes nítidas a mayores ampliaciones.

El microscopio electrónico tiene una concepción parecida al óptico, pero ahora son los electrones, y no la luz, los encargados de formar la imagen ampliada del objeto. Ahora

bien, a diferencia de la luz, los electrones no impresionan nuestra retina, por lo que la imagen se recoge en pantalla o en placa fotográfica. Puesto que la longitud de onda de los electrones empleados en microscopía es 100.000 veces menor que la longitud de onda de la luz, el

microscopio electrónico permite ampliaciones de hasta diez millones de aumentos. Con estas técnicas se puede observar y medir las dimensiones de los virus o de las moléculas de proteínas.

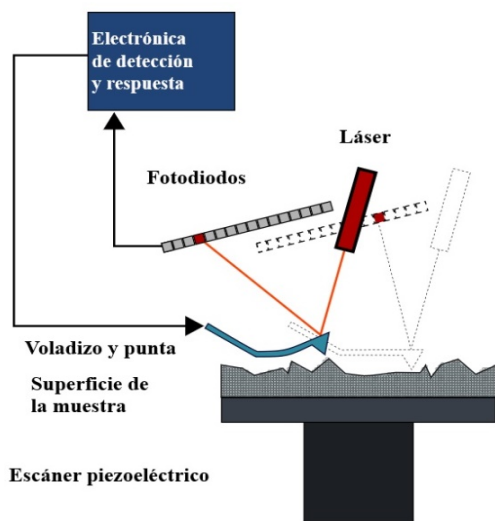


Figura 69 Esquema del microscopio de fuerza atómica.

El microscopio de fuerza atómica ha sido esencial en el desarrollo de la nanotecnología, para la caracterización y visualización de muestras nanométricas.

El *microscopio de efecto túnel* está basado en una propiedad cuántica de los electrones¹³⁷. Cuando una punta conductora de tamaño casi atómico es colocada muy cerca de la superficie objeto de examen, una corriente de polarización (diferencia de voltaje) aplicada entre las dos puede permitir a los electrones pasar al otro lado mediante el efecto túnel a través del vacío entre ellas. La *corriente de tunelización* resultante es una función de la posición de la punta, cuando esta pasa por las proximidades de un átomo la corriente se incrementa. La información es adquirida monitorizando la corriente conforme la punta barre nanométricamente la superficie, la señal eléctrica es enviada a un dispositivo que la amplifica y posteriormente construye la imagen. La microscopía de efecto túnel es una técnica muy sofisticada y costosa, ya que requiere superficies de muestra extremadamente limpias y estables, puntas afiladas nanométricamente, excelente control de vibraciones, y electrónica muy sofisticada.

Cuando se trata de medir distancias aún más cortas, ya del orden de moléculas pequeñas, los métodos, por supuesto indirectos, son aún más intrincados. Entre ellos están el *microscopio de fuerza atómica*, el *microscopio de efecto túnel* y los métodos de *difracción* (de rayos X, de electrones y de neutrones).

El *microscopio de fuerza atómica* es un instrumento mecano-óptico capaz de detectar fuerzas del orden de la millonésima de newton. Al rastrear una muestra, es capaz de registrar continuamente su topografía mediante una sonda o punta afilada de forma piramidal o cónica. La sonda va acoplada a un listón o palanca microscópica muy flexible de sólo unos 200 μm . El microscopio de fuerza atómica ha

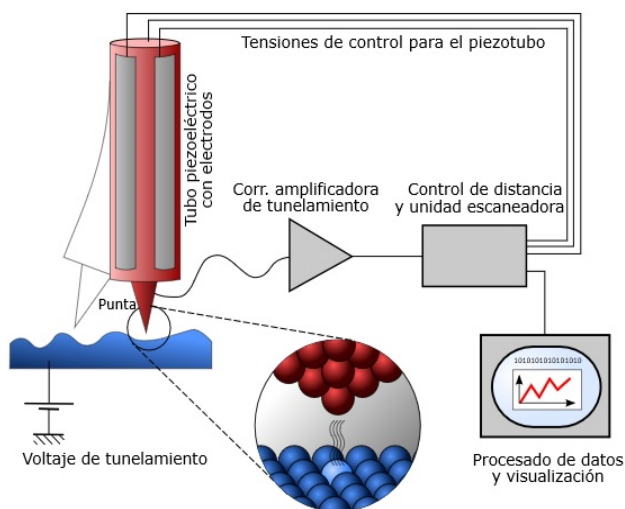


Figura 70 Esquema del microscopio de efecto túnel.

¹³⁷ El *efecto túnel* es un fenómeno cuántico por el que una partícula viola los principios de la física clásica, atravesando una barrera de potencial superior a la energía cinética de la propia partícula.

Otra posibilidad para apreciar las dimensiones atómicas y moleculares es la *difracción*. Cuando una onda se encuentra con un obstáculo que la detiene, los bordes del obstáculo provocan el cambio de dirección de la onda, de forma que la “sombra” resultante no tiene bordes nítidos. Se trata de un fenómeno exclusivo de las ondas que todos hemos podido observar. Así, por ejemplo, si estamos junto a una tapia y del otro lado hay una persona hablando, podemos llegar a escuchar lo que dice debido a que las ondas acústicas bordean la tapia llegando, eso sí, atenuadas, hasta nuestro oído. Otro ejemplo: la preciosa bahía de San Sebastián tiene una amplia bocana, en medio de la cual se encuentra la isla de Santa Clara. El oleaje marino en la costa guipuzcoana suele venir con dirección noroeste. Así pues, si la citada isla obstaculiza el paso de las olas, no debería haber oleaje en el centro de la playa de la Concha, cosa que, sabemos todos, no sucede. Lo cierto es que, sea cual fuere la dirección del oleaje, las olas llegan hasta la playa por igual. Ello es la prueba evidente de que las ondas marinas se difractan al pasar por las inmediaciones de la isla, homogeneizando así el oleaje en toda la playa.

En espectroscopía de luz visible se utilizan redes de difracción para dispersar la luz en sus distintas longitudes de onda. Tenemos una evidencia clara del efecto dispersor de las redes de difracción

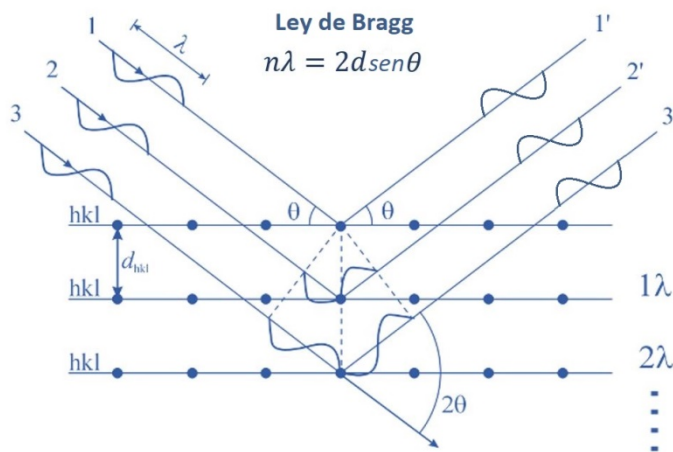


Figura 71 Cuando los RX inciden sobre una sustancia cristalizada las alineaciones de átomos actúan como redes de difracción.

contemplando a simple vista las irisaciones arco iris que se producen en los CD y DVD.

Cuando se trata de estimar separaciones entre los átomos ordenados tridimensionalmente en una sustancia pura y cristalizada, la longitud de las ondas luminosas es demasiado grande en comparación al tamaño de los objetos estudiados. En estos casos se recurre a otras ondas mucho más cortas como los Rayos X, los electrones o los neutrones¹³⁸. Al

incidir estos sobre la sustancia cristalizada, las alineaciones de átomos actúan como redes de difracción. Las imágenes de difracción se recogen en placa fotográfica y permiten calcular la distancia entre las alineaciones atómicas. Ello da cuenta del tamaño efectivo de los átomos.

II. 14 EN MEDIO DEL OCÉANO DIMENSIONAL

El ser humano lleva implícito en su ADN el imperioso deseo de saber, se hace preguntas e imagina explicaciones acerca de los acontecimientos que suceden en su entorno. La percepción de los hechos le llega a través de los sentidos, los instrumentos que nos ha donado la naturaleza por vía evolutiva para relacionarnos con el mundo en el que estamos. Somos herederos de los logros que

¹³⁸ Tenga en cuenta el lector que las partículas en movimiento exhiben comportamiento ondulatorio conforme establece el Principio de L.V. de Broglie. La longitud de onda y el impulso de la partícula están relacionadas por la expresión: $\lambda = h/mv$ donde h es la constante de Planck y mv es su impulso lineal.

a través del juego de la vida y de la muerte fueron conquistando los seres que nos precedieron. Desde aquel primitivo celentéreo de finales de la era Paleozoica, dotado de un rudimentario sistema nervioso, pasando por el gran saurio del Mesozoico al que siguió el primitivo mamífero del Terciario, y hasta llegar nosotros, las leyes de la evolución han determinado nuestra forma corporal, nuestra manera de ser y nuestros medios de comunicación con el exterior.

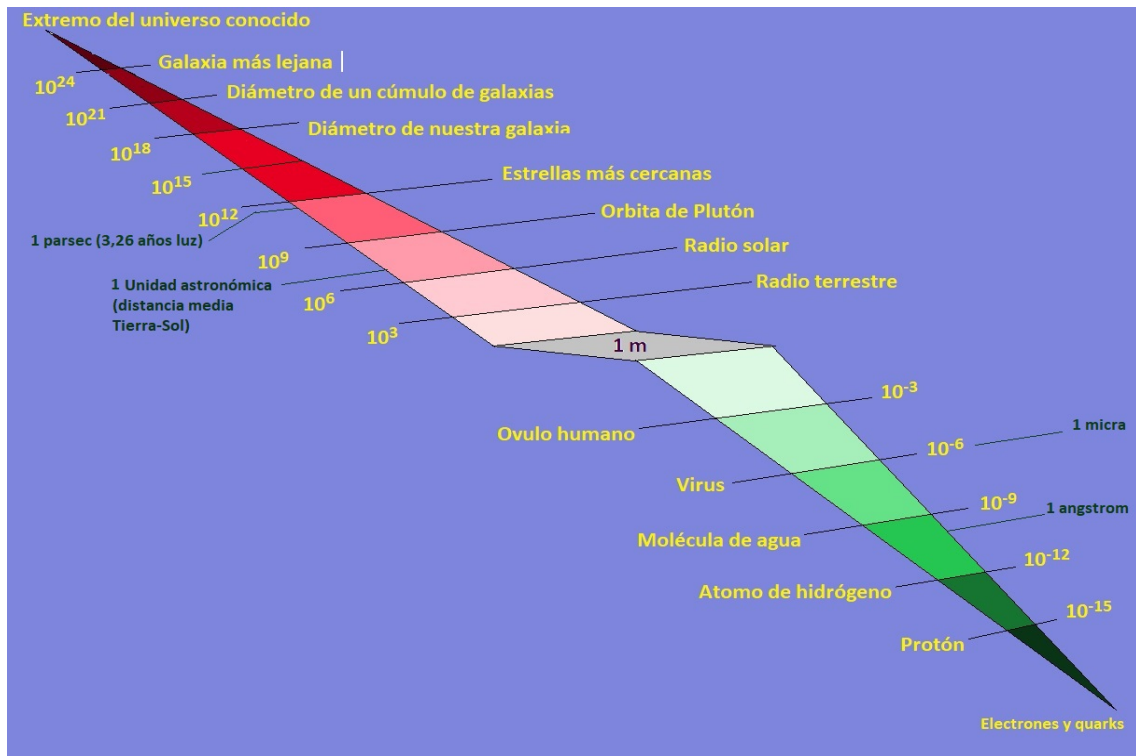


Figura 72 Escala universal de longitudes. El ser humano ocupa la dimensión del metro y se encuentra en el medio de un océano cuyas orillas están a enormes distancias.

Puesto que somos el resultado de la evolución, todo nuestro ser está adaptado al medio en el que nos hemos desarrollado. Si fuéramos seres galácticos de formidables dimensiones, veríamos las estrellas y las galaxias muy próximas a nosotros, casi podríamos tocarlas como si fueran las luces de un árbol navideño. Por el contrario, si fuéramos seres ultra-pequeños, de tamaño comparable a un protón, veríamos los átomos que constituyen la materia, conformados por una enorme corteza electrónica, con forma de nube esférica y en el medio, en el más absoluto vacío, un minúsculo núcleo en cuyo interior se alojarían nuestros congéneres, los protones, y nuestros primos, los neutrones. Pero, sueños aparte, la realidad es que nuestros orígenes y nuestra existencia se hallan confinados en un insignificante planeta que orbita en torno a una estrella que se encuentra en los suburbios de una gran galaxia y, claro está, nuestra percepción del Cosmos es necesariamente pobre y aldeana. Estamos hechos en un orden dimensional de metro, una ballena azul nos parece un ser descomunal, las dimensiones de nuestro sistema solar nos parecen inabarcables y por otro lado, cada una, de los treinta billones de células que conforman nuestro cuerpo, nos parecen muy pequeñas, y no digamos cada una de las moléculas de agua que hay en 18 mililitros de esa sustancia¹³⁹.

¹³⁹ 18 gr de agua es la cantidad que los químicos llaman *mol* y contiene la astronómica cantidad de $6,023 \cdot 10^{23}$ moléculas, cantidad muy superior al número de granos de arena que hay en una playa.

Nuestra existencia se desarrolla en el medio de un gran océano dimensional, estamos en algún punto del mismo y las dos orillas de ese océano, los límites del universo por un lado y los límites del inframundo de los *fermiones* y *bosones*¹⁴⁰ por otro, están a enorme distancia. Hemos visto que los astrónomos estiman las distancias entre las estrellas muy lejanas observando su brillo y su color o bien por el procedimiento del *paralaje* cuando se trata de estrellas “cercanas”, pero es seguro que ni siquiera el más avezado de ellos es capaz de concebir las distancias de proporciones cósmicas que maneja.

De igual manera, los químicos y los físicos se afanan en conocer las dimensiones de los átomos y de sus núcleos. Recurren a técnicas tremendamente sofisticadas y costosas para, a duras penas, estimar el minúsculo tamaño de las unidades estructurales de la materia. La ciencia actual estima que el átomo de hidrógeno, el más pequeño de todos, es un corpúsculo de apenas un *angstrom* ($1 \text{ \AA} = 10^{-9} \text{ m}$) de diámetro y estima también que el núcleo del helio, con sus dos protones y sus dos neutrones, tiene un diámetro aproximado de un *femtómetro*, unidad de longitud cien mil veces más pequeña que el *angstrom*. Concebir esas dimensiones es tan duro para nuestra mente como concebir las distancias siderales. Por ello, se propone el siguiente ejercicio mental: Imagine el lector la plaza de toros de las Ventas (Madrid), piense en un garbanzo colocado en el centro del ruedo, imagine después unos mosquitos sobrevolando los graderíos y, finalmente, haga desaparecer la plaza, quedándose mentalmente con el garbanzo y los mosquitos. En ese momento tendrá la visión intuitiva más acertada de lo que es un átomo.

La ciencia va mucho más allá de lo que nuestros sentidos nos permiten. Si cogemos en nuestras manos un trozo de plomo se nos antoja pensar que se trata de un material denso e impenetrable, y eso es precisamente lo que nuestros sentidos perciben. Pero la ciencia nos revela que la práctica totalidad de la masa está en los núcleos atómicos y que, por tanto, toda la materia está tremendamente vacía, incluso el denso trozo de plomo al que nos hemos referido. ¿Alguien se imagina qué densidad tendría un material que estuviera conformado exclusivamente por núcleos atómicos, en íntimo contacto los unos con los otros? ¿Cómo sería el campo gravitatorio en su entorno? Aunque parezca mentira, parece que esa situación existe en el universo, probablemente en forma de agujeros negros o estrellas enanas.

La ciencia describe la materia como un aglomerado de partículas másicas apiñadas en minúsculos núcleos atómicos, rodeados de una nebulosa casi esférica de electrones. Los átomos a su vez se encuentran agrupados a cierta distancia unos de otros en ordenaciones superiores que llamamos moléculas, en número y geometría bien definidos y a su vez, las moléculas se hallan, a veces ordenadas tridimensionalmente en los sólidos, otras veces desordenadas, en el caso de los líquidos, e incluso, pueden estar a grandes distancias unas de otras en caótico movimiento, como es el caso de los gases. Vistas las cosas así, podríamos sacar la conclusión de que, en esencia, la materia en lo que a su estructura íntima se refiere, se parece bastante al espacio sideral. En ambos casos los espacios vacíos son enormes en comparación con los tamaños de los cuerpos.

La naturaleza nos ha dotado de unos sentidos que nos permiten percibir el exterior solamente en nuestro orden de magnitud. Sabemos que los núcleos atómicos no pueden tocarse porque lo impide la nube electrónica que les rodea y sabemos también que las cortezas atómicas son un

¹⁴⁰ Los *fermiones* y los *bosones* son los dos tipos de partículas elementales constituyentes de la materia. Nos encontraremos de nuevo con ellas en la parte tercera de este libro.

“totum revolutum” bastante ordenado, regido por unas pocas leyes cuánticas inamovibles, a saber: el *Principio de Mínima Energía*¹⁴¹, el *Principio de Máxima Multiplicidad*¹⁴² y el *Principio de Exclusión*¹⁴³. Sabemos que las fuerzas que mantienen a los electrones en sus posiciones en torno a los núcleos son extraordinarias, del orden de mil veces más intensas que las fuerzas gravitatorias que rigen el movimiento de los astros. Finalmente, sabemos también que cuando dos materiales se ponen en contacto, la distancia entre los átomos superficiales de uno y otro cuerpo es comparable a la distancia entre, la Tierra del Sol. Seamos conscientes de ello, pero no caigamos en la tentación de pensar que, cuando damos la mano a un amigo o acariciamos a un ser querido, todo se reduce a un conjunto de atracciones y repulsiones electrostáticas. Eso sería prosaico y muy triste.

II.15 CONOCER LA POSICIÓN: EL SISTEMA GPS

El conocimiento de la posición geográfica ha sido desde siempre un asunto capital. Lo fue tanto en las expediciones de los descubridores como en los grandes viajes comerciales, lo es en las confrontaciones bélicas, en la planificación de territorios, en cuestiones políticas y, en fin, en una larga lista de situaciones.

Vimos en el capítulo II.6 que el conocimiento de la posición es más difícil de lograr si se está en el mar que si se está en tierra firme, donde abundan los accidentes terrestres que sirven como referencias. Vimos también que las potencias hegemónicas de los siglos XVII y XVIII se afanaron en la resolución del problema, conscientes de que la hegemonía marítima era el mejor camino para mantener o acrecentar sus imperios.

En la década de los sesenta del S. XX se utilizaba el sistema de navegación OMEGA, que utilizaba como referencia pares de estaciones radioemisoras terrestres para determinar la posición geográfica. El procedimiento tenía limitaciones ya que se circunscribía a territorios políticamente “permitidos”. Conscientes de la necesidad de un sistema de posicionamiento universal que asegurara la hegemonía, el gobierno de los EEUU puso a punto un sistema de localización en el que las referencias son satélites artificiales. De esta manera es posible cubrir la totalidad de la superficie terrestre al margen de casuísticas políticas o de cualquier otra naturaleza.

El Sistema de Posicionamiento Global, más conocido por sus siglas en inglés, *GPS (Global Positioning System)*, es un sistema que permite determinar en toda la Tierra la posición de un objeto (una persona, un vehículo) con una precisión de hasta centímetros (si se utiliza GPS diferencial), aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión. El sistema fue desarrollado, instalado y empleado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos¹⁴⁴. En sus inicios, el

¹⁴¹ También conocido como *Principio de Aufbau* (en alemán, *Aufbauprincip* significa “Principio de construcción”). Fue enunciado por Niels Böhr y establece que los electrones se alojan en los niveles energéticos de menor energía posible.

¹⁴² Enunciado en 1927 por el físico alemán Friedrich Hund, establece que, cuando en una corteza atómica hay varios orbitales de la misma energía, los electrones los ocupan lo más desapareados posible, ocupando el mayor número de ellos.

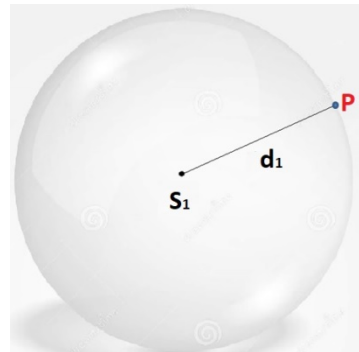
¹⁴³ Enunciado por Wolfgang Pauli en 1925, establece que cuando dos electrones de un mismo átomo ocupan un mismo nivel energético, lo hacen acoplado sus momentos magnéticos, de forma análoga a como lo harían dos imanes.

¹⁴⁴ Actualmente la UE, China y Rusia disponen de sistemas de posicionamiento global propios.

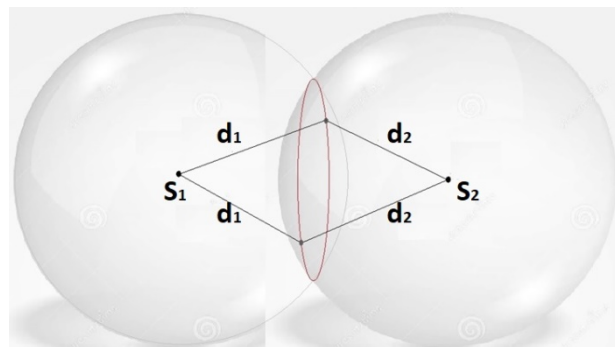
sistema GPS fue desarrollado para fines militares, pero en la actualidad su uso está extendido a nivel global para fines civiles (navegación aérea y marítima, tráfico rodado, cartografía, geodesia, etc.).

Para determinar las posiciones en la superficie terrestre, el sistema GPS se sirve de 24 satélites y utiliza la *trilateración*, un procedimiento geométrico basado en la triangulación que ya vimos en el capítulo II.11. Veamos en qué consiste:

Si estando en algún lugar desconocido del espacio P dispusiéramos de un punto de referencia de posición conocida S_1 , (imagen superior) la medición de la distancia a dicho punto de referencia d_1 nos permitiría afirmar tan solo “que nos hallamos en algún punto de la esfera imaginaria de centro S_1 y radio d_1 ”.



Ahora bien, si estuviéramos en algún lugar desconocido del espacio disponiendo de dos puntos de referencia S_1 y S_2 la medición de las distancias a uno y otro punto referente d_1 y d_2 nos permitiría saber que estamos en algún punto de la circunferencia que determina la intersección de las esferas imaginarias de centros S_1 y S_2 y de radios respectivos d_1 y d_2 . Dicha circunferencia no es sino la línea de intersección de las superficies esféricas de radios d_1 y d_2 .



Finalmente, si dispusiéramos de un tercer punto de referencia S_3 , la medición de las distancias a cada uno de los tres puntos de referencia d_1 , d_2 y d_3 nos permitiría saber que estamos en uno de los dos puntos (P o P') que determina la intersección de las tres esferas imaginarias de centros S_1 , S_2 y S_3 y de radios respectivos d_1 , d_2 y d_3 ; dichos puntos son P y P' . Si este problema geométrico se planteara en la superficie de la Tierra, es evidente que el punto P estará en la superficie terrestre y el P' fuera de ella, por lo que sería automáticamente descartado.

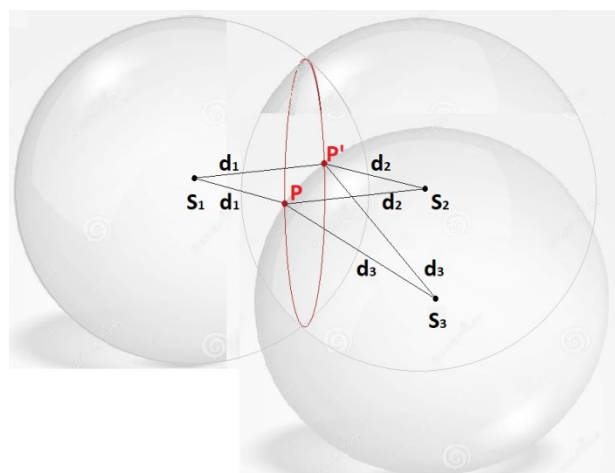


Figura 73 Esquema de la *Trilateración*

Así pues, para determinar la posición en un punto cualquiera de la superficie terrestre, basta con tener tres puntos de referencia fijos y medir la distancia a cada uno de ellos. Dicho así, la cosa parece muy sencilla, pero la materialización de la idea presenta no pocas dificultades. Si los puntos de referencia han de tener posiciones perfectamente conocidas la cuestión es ¿qué puntos exteriores a la Tierra reúnen esas condiciones? ¿La Luna? ¿Los planetas? ¿El Sol? La solución a este problema son los satélites

artificiales; estos artefactos pueden girar en órbitas perfectamente conocidas y controlables desde tierra. Como sabemos, actualmente orbita en torno al planeta toda una constelación de satélites de todo tipo y con muy variadas aplicaciones. Hay satélites meteorológicos, otros son enlaces de telecomunicaciones, los hay geoestratégicos con finalidades militares... y también hay satélites GPS.

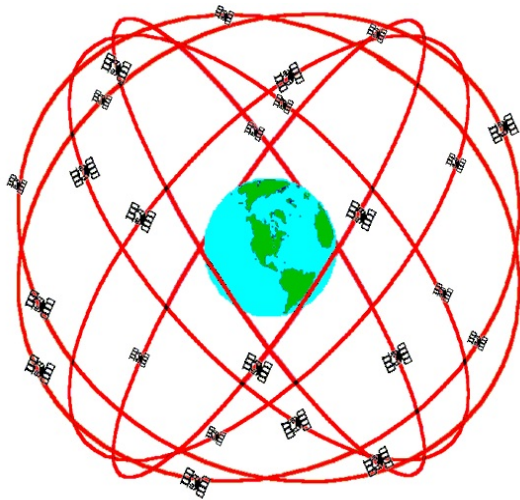


Figura 74 Constelación de los 24 satélites del Sistema GPS global.

Estos últimos llevan en su interior un reloj atómico de cesio que fue descrito en el capítulo II.9, un generador de señales y un emisor de las mismas. Más adelante sabremos para qué sirven.

El sistema GPS global que tú utilizas, querido lector, cuando te pones de viaje y activas el navegador de tu vehículo, tiene tres componentes: el espacial, el de control y el de usuario.

El *componente espacial* está constituido por una constelación de 24 satélites en órbita terrestre a gran altura¹⁴⁵ distribuidos en 6 planos orbitales. Estos planos están separados entre sí por aproximadamente 60 grados en

longitud y tienen inclinaciones próximas a los 55 grados en relación al plano ecuatorial terrestre. Fue concebido de manera que existan como mínimo 4 satélites visibles por encima del horizonte en cualquier punto de la superficie y en cualquier altura.

El *componente de control* está constituido por 5 estaciones de rastreo distribuidas a lo largo del globo y una estación de control principal (*MCS-Master Control Station*). Este componente rastrea los satélites, actualiza sus posiciones orbitales y calibra y sincroniza sus relojes. Otra función importante es determinar las órbitas de cada satélite y prever su trayectoria durante las 24 horas siguientes. Esta información es enviada a cada satélite para después ser transmitida por este, informando al receptor local dónde es posible encontrarlo.

El *componente del usuario* incluye todos aquellos elementos que se usan en un receptor GPS para recibir y convertir la señal GPS en posición, velocidad y tiempo. Incluye además todos los elementos necesarios en este proceso, como las antenas y el software de procesamiento.

¹⁴⁵ Los satélites GPS son unos sofisticados instrumentos de unos 900 kg, van equipados con un reloj atómico de cesio de altísima precisión y con un complejo sistema de producción y emisión de ondas electromagnéticas de 1,57 y 1,23 GHz. Orbitan a 20.200 km de altura y dan una vuelta completa a la Tierra cada 12 h. Sus órbitas están elegidas de forma tal que es posible "ver" al menos cuatro de ellos en todo momento, desde cualquier punto de la superficie terrestre.

Una vez que sabemos cómo se resuelve el problema de los puntos de referencia, abordaremos el segundo problema: ¿Cómo medir la distancia hasta cada uno de ellos?

La solución consistiría en medir el tiempo que una señal emitida desde el satélite, tarda en llegar hasta el receptor (nuestro navegador), ahora bien, esa señal, que tiene que ser necesariamente electromagnética, viaja a la velocidad de la luz, de forma que los tiempos que tendríamos que medir son extraordinariamente pequeños. De esa forma, podríamos determinar la distancia al satélite por medio de una sencilla operación:



Figura 75 El componente de usuario del GPS mide las distancias a tres satélites y, en tiempo real, determina la posición geográfica.

$$d = c \cdot \Delta t$$

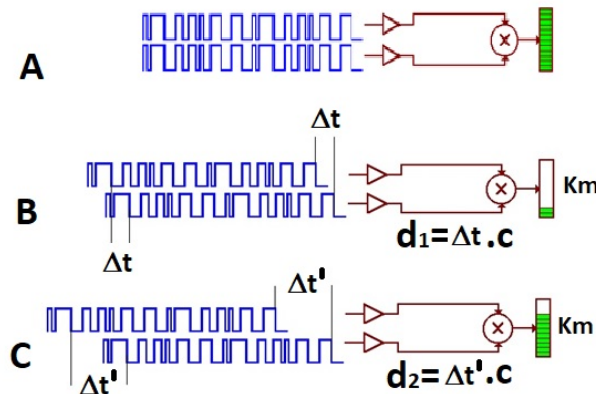


Figura 76 Sistema de señales codificadas GPS para la medición de la distancia navegador-satélite en tiempo real.

Siendo Δt el tiempo invertido por la señal en ir del satélite a nuestro navegador y c la velocidad de la luz (300.000 km/s).

Gracias a la extraordinaria precisión de los relojes atómicos, es posible medir ese minúsculo tiempo. Veamos cómo: Tanto el satélite como nuestro navegador generan la misma señal codificada¹⁴⁶, y lo hacen exactamente al mismo tiempo, con una sincronía perfecta. Ahora bien, el reloj de cesio del satélite es incomparablemente más preciso que el reloj de cuarzo de nuestro navegador, lo que significa que la sincronía entre el satélite y el navegador se

perdería en poco tiempo. Para conseguir que ambos generen la señal sincrónicamente, el satélite emite además una segunda señal de sincronización que “pone en hora” permanentemente al reloj de cuarzo de nuestro navegador. Por medio de este ingenioso procedimiento, el reloj de nuestro instrumento, cuyo costo es de unos pocos cientos de euros, se comporta como un costosísimo

¹⁴⁶ Se trata de una señal irregular en la que se alternan pulsos positivos y negativos que siguen una secuencia irregular previamente establecida en un código.

reloj atómico. Además, el satélite emite una tercera señal que informa en tiempo real de su situación.

Nuestro navegador capta la señal emitida por el satélite y la compara con la que él genera. Puesto que tanto el satélite como el navegador generan la misma señal codificada en perfecta sincronía, ambas señales deberían ser exactamente iguales en tiempo y forma si la señal del satélite llegara instantáneamente, como muestra el caso **A** de la Figura 76. Pero no es así, ya que la señal tarda un brevísimo tiempo en llegar hasta el navegador, lo que supone que las señales recibida y generada están desfasadas un intervalo Δt o $\Delta t'$, según sea la distancia a la que se encuentra el satélite.

Así pues, cuando nuestro navegador está funcionando, está recibiendo las señales de tres satélites, recibe la información de su situación geográfica exacta, compara las señales codificadas con sus propias señales, que él genera sincrónicamente con los satélites, calcula las distancias a los tres y finalmente, en tiempo récord, determina por trilateración la posición geográfica en la que estamos.

Pero aquí no acaba todo. El software de nuestro navegador contiene un plano del territorio con todos los datos digitalizados de los elementos del terreno sobre el que opera. Combinando estos datos con los de la posición geográfica, el navegador compone en la pantalla el plano visual, la posición del vehículo y todo tipo de informaciones adyacentes que pudieran resultar de interés para la conducción, todo ello en tiempo real, con un retardo de tan solo unas pocas décimas de segundo.

II.16 ESPACIO Y TIEMPO RELATIVOS

Comúnmente, concebimos el movimiento como el cambio de posición de un objeto al transcurrir el tiempo. Esta concepción nos resulta obvia porque se basa en un conjunto de percepciones básicas en nuestra vida, como son el espacio y el tiempo. Aún más, intuitivamente damos por supuesto que el movimiento de un cuerpo lo percibimos al detectar un cambio de su posición respecto de un referencial y sólo tenemos conciencia de que un cuerpo se mueve si sus posiciones a lo largo del tiempo pueden ser referidas a un sistema fijo de observación. Permanecer en un avión comercial en plena noche a 11.000 m de altura, viajando con velocidad constante a más de 900 km/h no produce la menor sensación de movimiento, porque allí se carece de toda referencia. Por el contrario, ver en un cine la filmación de una cámara instalada en un fórmula-1 produce una sensación de agobio y vértigo, propios de quien viaja a alta velocidad, aunque estemos cómodamente sentados en la butaca.

El movimiento es considerado como el fenómeno físico más elemental y las leyes de los movimientos simples, así como el resto de las leyes de la Mecánica, son sencillas y de una lógica aplastante. Todas ellas se basan en tres principios establecidos por Newton:

1. *Las leyes de la Mecánica son las mismas en todos los sistemas referenciales inerciales*¹⁴⁷.

¹⁴⁷ A falta de un sistema de referencia *absoluto*, el cual estaría en reposo absoluto, nos hemos de contentar, como mejor opción, con un sistema de referencia no acelerado, que tuviera velocidad constante, al que llamaremos sistema de referencia *inercial*.

2. *La determinación del espacio existente entre dos puntos es la misma, cualquiera que sea el referencial de observación.*
3. *El tiempo es absoluto, esto es, “fluye” o “corre” con regularidad, independientemente del observador y su referencial.*

Efectivamente, en el avión mencionado más arriba podría jugarse una partida de billar exactamente igual a como podría hacerse en el salón de un casino, la distancia entre dos puntos geográficos, medida desde el avión, sería igual a la determinación que de esa distancia haríamos desde el suelo y, desde luego, el tiempo empleado por el avión para su vuelo, sería el mismo para el piloto que para el controlador aéreo. Todas estas, son convicciones que tenemos muy asumidas, que tenemos comprobadas una y otra vez y que por ello nos resultan muy intuitivas hasta el punto de que nos repugna cualquier otra posibilidad que no encaje con ellas.

Desde los tiempos de Galileo se ha construido una ciencia que pretende explicar la Naturaleza en toda su extensión, para ello se han realizado experimentos en el laboratorio que pretenden reproducir en condiciones controladas los fenómenos naturales objeto de estudio. Así, por ejemplo, en 1798, Henry Cavendish determinó el valor de la Constante de Gravitación empleando una balanza de torsión y un par de esferas de plomo de no más de 100 kg. Análogamente Charles Coulomb estableció la ley de la Electrostática experimentando con pequeños péndulos de hilo de seda y médula de saúco¹⁴⁸. En general, toda la Física clásica ha sido construida por procedimientos análogos, siempre experimentando sobre fenómenos de nuestro orden de magnitud.

En la década de los sesenta, las cápsulas Apolo que volvían de la Luna entraban en las capas altas de la atmósfera terrestre a más de 50.000 km/h. Esta es la mayor velocidad alcanzada por el ser humano en toda su historia, pero no representa más que el 0,005 % de la velocidad de la luz. Por otro lado, la distancia más grande a la que el ser humano ha viajado es la que media entre la Tierra y la Luna, un valor ínfimo respecto de la distancia a la estrella más cercana a nosotros. Finalmente, nuestra propia existencia tiene una duración extremadamente efímera si se compara con el tiempo sideral.

Todas estas reflexiones llevan inevitablemente a la conclusión de que nuestras percepciones, hechas en el mundo próximo a nosotros, nos dan una visión pobre y aldeana del gran mundo que nos rodea y que extrapolar las leyes físicas, establecidas por los científicos en sus laboratorios, al Gran Universo, pretendiendo explicar satisfactoriamente con ellas cuanto en él ocurre, es sencillamente utópico.

La Física tiene vocación cosmológica y pretende explicar cómo es el mundo y cuáles son sus leyes en su integridad, ahora bien, en el mundo se dan muchas situaciones que exceden en gran medida a nuestras condiciones habituales. Por ello, la Física Newtoniana, basada en los tres principios anteriormente enunciados, debe ser revisada en profundidad, incluso en sus conceptos más fundamentales, como lo son el espacio, el tiempo y la masa.

En 1905, Albert Einstein propuso en su *Teoría de la Relatividad Especial* un conjunto de postulados aparentemente absurdos y contrarios a toda intuición, que permiten elaborar la mejor explicación de que hoy disponemos para el comportamiento de Universo. Estos postulados establecen que *la distancia entre dos puntos, el intervalo de tiempo que media entre dos eventos y la masa de un cuerpo son magnitudes cuyo valor depende de la velocidad del observador respecto del fenómeno observado. Aún más, los eventos en diferentes posiciones que ocurren de manera simultánea en un marco, no son simultáneos en otro marco que se mueva respecto del primero con velocidad*

¹⁴⁸ Ver de nuevo el capítulo I.17.2

uniforme. Así pues, el espacio, el tiempo y la masa absolutos, pilares de la Física Newtoniana, no existen.

La Física Relativística está formada por un conjunto de leyes que se derivan de dos principios establecidos por Einstein, experimentalmente comprobados:

1. *No es posible detectar el movimiento absoluto y uniforme¹⁴⁹*
2. *La velocidad de la luz en el vacío (300.000 km/s) es independiente del movimiento del foco que la emite, siendo a su vez la máxima velocidad posible.*

El primer principio es obvio, comprobamos a diario que no se puede saber si un ascensor sube o baja si estamos en su interior, aislados de toda referencia, mientras este asciende o desciende con velocidad uniforme y que sólo tendremos conciencia de que se mueve y de cómo lo hace, cuando frena o arranca, es decir, cuando su movimiento deja de ser uniforme. Igualmente, un péndulo colgado del techo de un avión que vuela rectilínea y horizontalmente, con velocidad constante, permanece inmóvil y vertical de igual forma que si estuviera suspendido del techo de una habitación.

El segundo principio es otra cuestión. Vimos en el capítulo II.2 que en 1887 A. Michelson y E.W. Morley, con ayuda de un ingenioso instrumento inventado por el primero, hicieron un conjunto de experimentos en Cleveland de transcendentales consecuencias y con una conclusión bien clara: *La velocidad de la luz en el vacío es una constante universal.*

II.16.1 ADICIÓN DE VELOCIDADES

A partir de estos principios, por procedimientos matemáticos que aquí no detallamos, A. Einstein dedujo que si un vehículo, por ejemplo, un tren, se mueve en una determinada dirección con velocidad v_1 respecto de un observador externo y sobre él un cuerpo (en nuestro caso, el abyecto

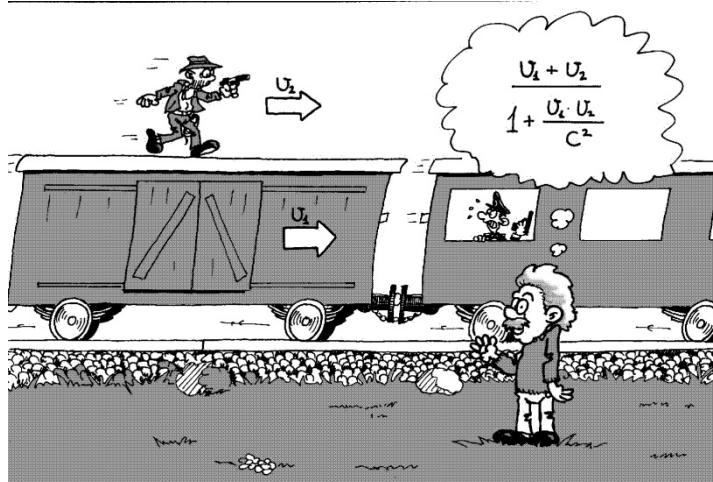


Figura 77 Adición relativística de velocidades

bandido de la Figura 77) se mueve en esa misma dirección con velocidad v_2 respecto del vehículo, la velocidad de dicho cuerpo respecto de un observador que se hallara en el tren (en nuestro caso el abnegado policía) sería sencillamente v_2 cualquiera que fuera la velocidad del tren. Ahora bien juzgadas las cosas desde fuera, desde el punto de vista de un observador externo (en nuestro caso el clarividente Albert) la velocidad del bandido sería:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}$$

Puede que el lector se quede perplejo ante esta extraña expresión, pero ha de fijarse en que, tanto la velocidad del forajido respecto del tren como la del tren respecto del observador externo, son

¹⁴⁹ Como vemos, Einstein recoge el mismo principio que Newton.

ínfimas en comparación a la velocidad de la luz. Eso significa la fracción $v_1 \cdot v_2 / c^2$ es prácticamente nula con lo cual, en nuestro orden natural de magnitudes, lo que observamos es la adición de velocidades tal y como la describió Galileo:

$$v = v_1 + v_2$$

Así pues, la ley relativista de adición de velocidades solo tiene significación en el ámbito de las grandes velocidades, próximas a la de la luz.

Supongamos ahora que asistimos a un letal duelo entre dos naves enemigas en plena *Star Wars*. En su frenético combate, ambas naves se desplazan a la velocidad de la luz y en un momento dado, la que va detrás dispara su rayo LASER contra la que le precede. Si, juzgando las cosas desde fuera y estando inmóviles, pensáramos en términos de física clásica, tendríamos que aceptar que la luz LASER de la nave atacante viajaría a la velocidad $2c$ respecto de nosotros, pero el perspicaz Albert no pensaría así. En ese caso se cumpliría que la velocidad de la luz LASER respecto del observador externo sería:

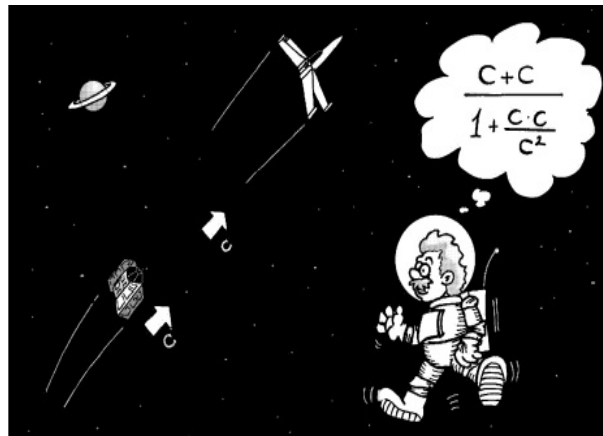


Figura 78 Según la Teoría de la Relatividad, no es posible rebasar la velocidad de la luz.

$$v = \frac{c + c}{1 + c \cdot c / c^2} = c$$

Este resultado repugna a nuestra intuición, pero no debemos olvidar que nuestra intuición, o si se prefiere decir, nuestro pensamiento espontáneo, es el fruto de nuestras vivencias, y nuestras experiencias siempre han tenido lugar en nuestro orden de magnitud. Como conclusión hemos de asumir que, a la hora de enjuiciar acontecimientos que exceden a nuestro orden de magnitud, la intuición no sirve y es mala consejera.

II.16.2 DILATACIÓN DEL TIEMPO

A partir de los principios fundamentales, Einstein llegó a deducir una ecuación que permite determinar cómo será el intervalo de tiempo transcurrido entre dos eventos no simultáneos en función de la velocidad del observador respecto del fenómeno en el que se dan los eventos.

Sea el caso de un reloj de péndulo que es observado por dos sujetos, el observador S es nuestro amigo Albert, y se mueve con velocidad v respecto del reloj mientras que el observador S_0 se mantiene en reposo respecto de él.

La duración del tic-tac para este último, Δt_0 recibe el nombre de *tiempo propio*. Nuestra intuición nos invita a pensar que el observador en movimiento deberá percibir la duración del tic-tac exactamente igual, pero en realidad no es así. Einstein dedujo una expresión que permite determinar ese tiempo en función de la velocidad del observador. Dicha expresión es:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Esto significa que el tiempo que dura un evento es mínimo para un observador que no se mueva respecto de él y dicho tiempo se dilata para un observador que se mueva respecto de dicho evento.

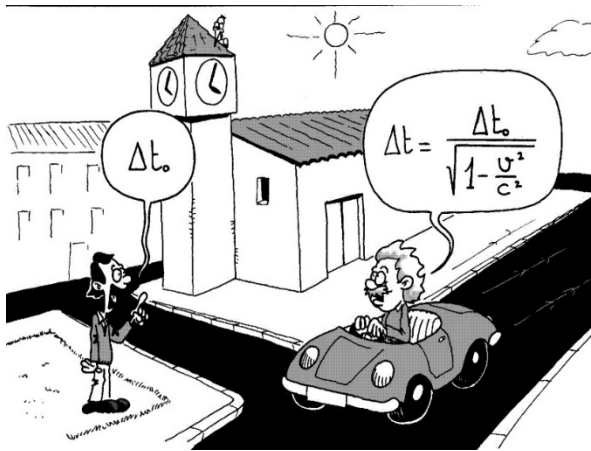


Figura 78 Las unidades del tiempo no son las mismas para un observador fijo que para un observador móvil.

El caso límite sería el de un observador que se desplazase a la velocidad de la luz respecto del reloj. En ese caso,

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{0} = \infty$$

Es decir, la duración del tic-tac del reloj sería infinita, lo que significa que para ese observador, el tiempo "no pasa".

Con objeto de ilustrar que la magnitud tiempo no es absoluta, sino que su valor depende de la velocidad del observador, se propone un conocido y clásico problema conocido como "Paradoja de los gemelos".

Supongamos que nuestro astronauta Pedro Duque tiene un hermano gemelo llamado Luis. Ambos tienen 25 años de edad y Pedro efectúa un viaje de ida y vuelta a la estrella Vega, que está a 26 años-luz de la Tierra, efectuando todo su recorrido con una velocidad $0,98c$ ¿qué edades tienen Pedro y Luis cuando el primero regrese a la Tierra?

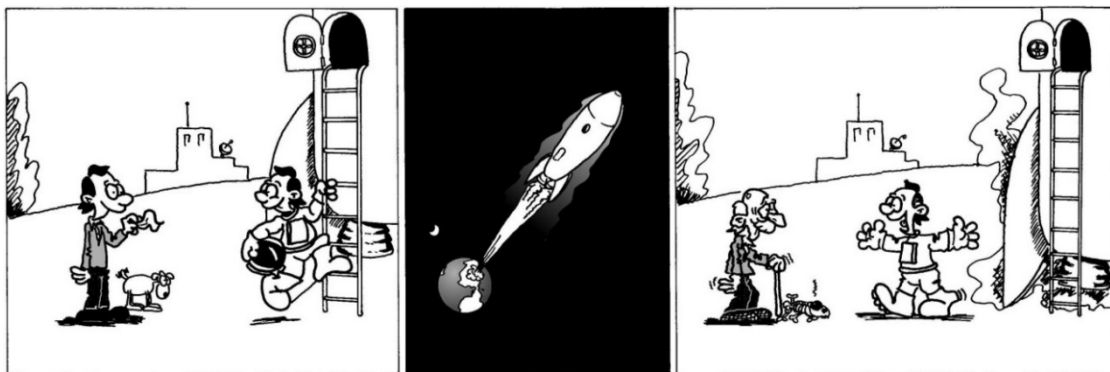


Figura 79 Paradoja de los gemelos: Pedro se va de viaje galáctico a enorme velocidad y su gemelo Luis se queda en tierra. A su vuelta, Pedro es mucho más joven que Luis.

El tiempo transcurrido para Luis es:

$$\Delta t_0 = \text{espacio/velocidad} = (26+26)c/0,98c = 53,06 \text{ años}$$

Pero para Pedro el tiempo transcurrido valdrá:

$$\Delta t = \Delta t_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 53,06 \text{ años} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,98c}{c}\right)^2} = 10,56 \text{ años}$$

Luego la edad de Pedro será $25+10,56=35,56$ años y la de Luis $25+53,06=78,06$ años!!

En 1963, Pierre Boule publicó su novela "El planeta de los Simios"¹⁵⁰, en ella se narra la historia del periodista Merou, que en el año 2500 viaja acompañando a una expedición hacia la estrella Betelgeuse. A su vuelta se encuentra con un planeta habitado por simios civilizados en el que los humanos viven salvajes y dominados por los primeros. El relato finaliza, y esto es lo que nos interesa aquí, en medio de un desierto. Por detrás de una gran duna emerge la gran mano de piedra que sostiene la antorcha de la estatua de la Libertad, como mudo testigo de una civilización ya desaparecida. El desenlace de esta novela encuentra su verosimilitud en la *ley relativista de la expansión del tiempo* que acabamos de considerar.

II.16.3 CONTRACCIÓN DE LONGITUDES

De igual forma que en los casos anteriores, Einstein dedujo una ecuación que expresa la dependencia de una longitud respecto de la velocidad de quien mide dicha longitud.

Sea una barra de longitud L_0 que llamaremos *longitud propia*, medida por un observador S_0 inmóvil respecto de ella. Un observador que pasara a la velocidad v en la misma dirección que la longitud de la barra, mediría su longitud apreciando un valor:

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Llevando las cosas al extremo, si la velocidad del observador llegara a ser la máxima posible, es decir, c entonces la longitud que dicho observador apreciaría para el pez de la Figura 80 sería nula, esto es, la longitud del mismo se habría contraído infinitamente.

II.16.4 SIMULTANEIDAD

Desde una concepción de tiempo absoluto, los acontecimientos simultáneos son aquellos que suceden al mismo tiempo, estén donde estén, y todos los observadores los juzgarán simultáneos independientemente de sus circunstancias particulares.

El 22 de noviembre de 1963 estuvo marcado por el luto y la tragedia en el mundo de la política y la literatura con la pérdida de personalidades muy importantes en estas áreas. Aquel día, el entonces presidente de los Estados Unidos, John F. Kennedy, era asesinado cuando hacía su entrada en coche descubierto en la ciudad de Dallas. Ese mismo día fallecía en Los Ángeles, a los 69 años, el célebre escritor Aldous Huxley, autor de la novela "Un mundo feliz". Las noticias fueron recogidas por la prensa de la época quedando para siempre en la memoria colectiva como dos hechos luctuosos simultáneos. Ahora bien, para un extraterrestre que pasara por las inmediaciones de nuestro planeta a altísima velocidad, las muertes de estos dos insignes personajes pudieron no ser simultáneas.

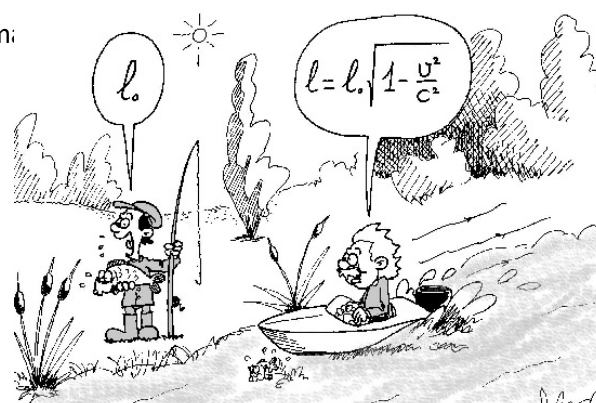


Figura 80 El pescador presume ufano de la longitud l_0 del pez que ha cobrado pero para Albert, el pez es más pequeño.

¹⁵⁰ En 1968 Franklin Schaffner dirigió la película homónima, protagonizada por Charlton Heston, que fue un rotundo éxito de taquilla en un tiempo en el que la ciencia-ficción se hallaba en pleno apogeo.

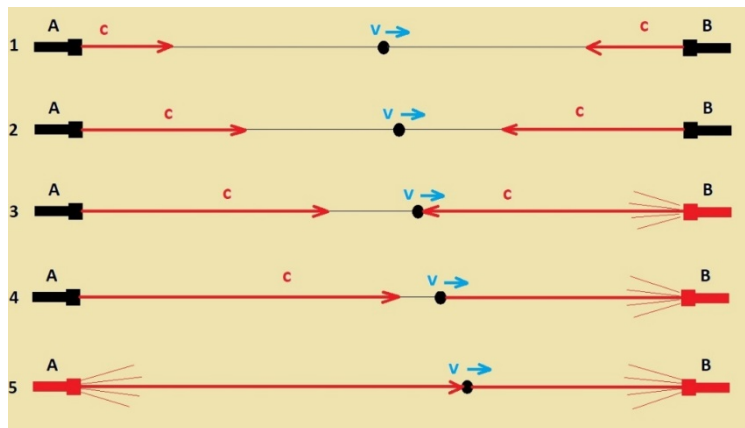


Figura 81 Esquema ilustrativo de la simultaneidad relativista. El movimiento del observador es la causa de que las luces de las dos linternas, encendidas al mismo tiempo, no sean vistas simultáneamente.

Hagamos un experimento mental imaginando dos linternas A y B separadas por una gran distancia y en el medio un observador (Figura 81). Supongamos que en el momento 1 se encienden las dos linternas simultáneamente y en ese mismo momento, el observador inicia un movimiento hacia la derecha a la velocidad v .

La luz de ambas linternas viaja al encuentro del observador de forma que, en el momento 3, cuando la luz de la linterna B llega hasta donde se

encuentra este, el observador ve que la linterna B se ha encendido, no así la A, puesto que su luz no ha llegado aún hasta él. Habrá de transcurrir un tiempo, hasta el momento 5, para que la luz de A llegue hasta el observador. Será entonces cuando este vea que A se ha encendido y no antes.

Si el observador hubiera estado en reposo, las luces de las dos linternas habrían llegado hasta él a un mismo tiempo y este las habría visto encenderse simultáneamente.

De nuevo nuestra intuición se resiste a aceptar esta realidad, ello se debe a que, por muy rápido que nos movamos, nuestra velocidad es despreciable en comparación a la de la luz, de manera que nuestras observaciones son siempre como si estuviéramos en reposo.

II.17 EL ESPACIO-TIEMPO

Desde que en 1687 Newton diera a conocer su *Teoría de la Gravitación Universal* toda la mecánica celeste tenía una explicación sencilla. Durante más de dos siglos, los astrónomos dispusieron de una ecuación que les permitía predecir posiciones, velocidades y geometría orbital de los cuerpos celestes. Fue posible predecir la existencia de planetas en torno a las estrellas, explicar el movimiento rotacional de las galaxias, la periodicidad de ciertos cometas y la excentricidad de sus órbitas. Incluso fue posible predecir la existencia de planetas antes de que nadie los hubiera visto, como es el caso de Neptuno (Véase el capítulo I.10. La lista de éxitos científicos derivados de la aplicación de la teoría de Newton era tan espléndida que hasta finales del S. XIX era considerada como uno de los pilares más inamovibles del saber y parecía predecir con exactitud todos los fenómenos astronómicos. ¿Todos? Realmente, casi todos.

En el mundillo de los astrónomos había una “mosca molesta” que incordiaba el estado de “comodidad” que la ley de Newton ofrecía. Se trataba del planeta Mercurio, el más pequeño y más próximo al Sol de todos. Cuando los astrónomos aplicaban la fórmula de Newton para calcular su órbita alrededor del Sol, y su posición aparente en el cielo, visto desde la Tierra, y posteriormente comparaban esos cálculos con las observaciones, encontraron que había una pequeña diferencia en la posición real de Mercurio: cada año parecía cambiar su posición (medida en el instante de su máximo acercamiento al Sol un ángulo muy pequeño, de 5,75 segundos de

arco¹⁵¹. Ciertamente, se trata de una desviación muy pequeña que al más común de los mortales le pasaría inadvertida o bien la consideraría como un error de medida sin más repercusiones.

En la parte primera de este libro hemos insistido varias veces en que la ciencia es revisionista en extremo, se halla en continua contrastación y los científicos, curiosos impenitentes y maniáticos de la exactitud, se fijan en lo que no se fija nadie y no se dan por satisfechos mientras haya algún enigma por explicar. A finales del S. XIX los métodos de observación astronómica eran lo suficiente precisos como para considerar que la discrepancia existente en las posiciones prevista y observada de Mercurio, fuera inasumible. Se pensó que la discrepancia podría deberse a la acción gravitatoria ejercida sobre el planeta por Venus y la Tierra, y en mayor medida por los planetas gigantes Júpiter y Saturno. Se rehicieron los cálculos incluyendo ahora las acciones gravitacionales de los restantes planetas y de esta forma se redujo muy considerablemente la discrepancia. Hechas así las cosas, la diferencia de posiciones teórica y observada en el transcurso de un año era ahora de tan sólo 0,43''¹⁵². Era un error ínfimo pero inquietante, habida cuenta de que esos mismos cálculos daban resultados exactos con otros planetas. La idea rondaba la mente de algunos científicos de la época: ¿Y si la Ley de la Gravitación Universal no es tan universal como creemos?

Así estaban las cosas cuando en los primeros años del S. XX Albert Einstein trabajaba en su *Teoría de la Relatividad Especial* (Ver el capítulo II.17) barajando en todo momento una premisa: "Nada puede propagarse más rápido que la luz". En sus elucubraciones se propuso un experimento mental: ¿Qué sucedería si en un momento dado, el Sol desapareciera de repente? Era sabido que la luz del Sol, viajando a $300.000 \text{ Km.s}^{-1}$ recorre los 150 millones de kilómetros que distan entre la Tierra y el Sol en 8 minutos, es decir, el Sol está a 8 minutos-luz de la Tierra. Si en un momento dado el Sol desapareciera, dispondríamos de 8 minutos adicionales de luz hasta que se hiciera la oscuridad. Ahora bien, la Teoría de la Gravitación Universal sostiene que la acción gravitacional de las masas es consustancial a ellas, esto es, si hay masa hay gravedad y viceversa. Por tanto, si desapareciera el Sol, en ese mismo momento debería desaparecer la atracción gravitacional que ejerce sobre los planetas y estos, la Tierra entre ellos, saldrían disparados en dirección tangencial de la misma manera que una piedra sale disparada al soltar la honda, y esto ocurriría *inmediatamente*, sin ningún retraso, ni de 8 minutos ni de nada. Esto chocaba frontalmente con la relatividad especial que acababa de publicar, era un contrasentido. Una información -la luz- viajaría a 300.000 km/s , mientras que otra información -la gravitacional- viajaría con velocidad infinita, y ambas informaciones estarían originadas por el mismo fenómeno, la desaparición instantánea del Sol. O bien su teoría de la relatividad especial no era correcta (y había cosas que sí podían ir más rápido que la luz, con velocidad infinita, de hecho) o bien la teoría de Newton de fuerza instantánea no era correcta. He ahí su dilema.

En el capítulo I.4 afirmábamos que "la construcción del conocimiento científico sólo ha sido posible a través de un proceso lento e incierto de franquear obstáculos epistemológicos muy resistentes". Ciertamente, la mente de Einstein tuvo que superar

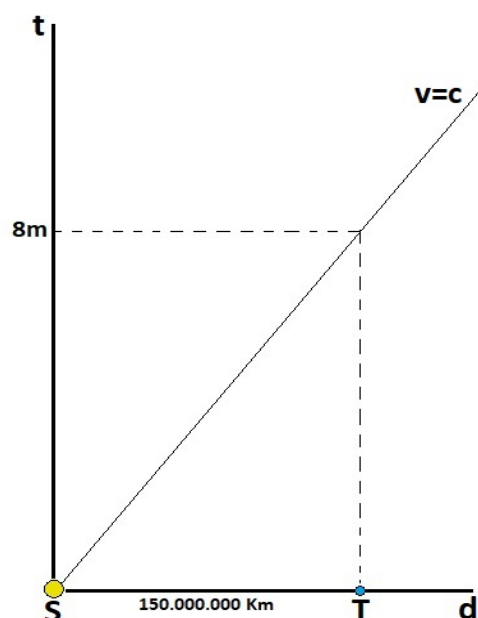


Figura 82 Diagrama espacio-tiempo para el sistema Tierra-Sol.

¹⁵¹ Aproximadamente, el ángulo con el que se vería una moneda de 1 Euro a 1 km de distancia.

¹⁵² Aproximadamente, el ángulo visual de 1 euro visto desde una distancia de 12 km.

el obstáculo ideológico que suponía la teoría de Newton. También, en el capítulo I.11 afirmábamos que “*La formulación de hipótesis es la parte más noble y creativa de la investigación científica*”, y a fe que la mente de Einstein era creativa.

Así pues, decidido a no abandonar los principios de su relatividad especial, Einstein acometió la revisión de la teoría de la gravitación de Newton con una idea extraordinariamente creativa y genial: suponer que la gravedad (que está por todos los lados y en todo momento en el universo) está *íntimamente unida al espacio y al tiempo* (que obviamente están también por todos lados del universo y en todo instante), y aún más, que en presencia de una masa, el espacio-tiempo se “deforma” de manera que cualquier otra masa nota ese espacio-tiempo deformado y se ve obligada a seguir trayectorias diferentes a cuando estaba en el espacio-tiempo sin deformar (en ausencia de masa). El espacio-tiempo concebido por Einstein es tan imposible de representar gráficamente como de imaginarlo por nosotros, seres tridimensionales¹⁵³, pero por fortuna, los problemas astrofísicos involucran la marcha de la luz desde un punto a otro del espacio con lo cual nos basta con un diagrama bidimensional en cuyo eje vertical se representa el tiempo y en el eje horizontal se representa una longitud. Yendo más lejos, también son asequibles los diagramas tridimensionales en los que el eje vertical sigue siendo el tiempo y los dos horizontales son las dos coordenadas del plano euclídeo.

En la Figura 82 se representa el experimento mental imaginado por Einstein cuando elaboraba su Teoría General de la Relatividad. En el eje horizontal se representa la distancia media entre la Tierra y el Sol y en el eje vertical el tiempo.

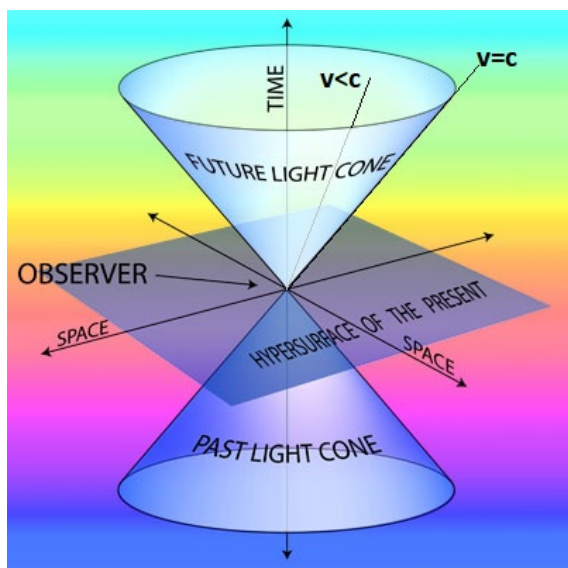


Figura 83 Diagrama espacio-tiempo para dos dimensiones espaciales y el tiempo. El observador ocupa el origen, en el encuentro de los vértices del cono del pasado y del futuro, situado en el plano del presente.

<https://alienspesciencenews.wordpress.com>

propagarían con igual velocidad en todas las direcciones del plano de la superficie del agua. Esos frentes de onda serían los cortes que podría hacerse a los conos del diagrama a distintas alturas (o valores) de la coordenada tiempo.

Si en un momento dado, que se representa en el origen de coordenadas, desapareciera el Sol, su última luz saldría en el espacio-tiempo siguiendo la línea recta. Durante un tiempo, los habitantes del planeta no nos percataríamos del fenómeno (línea de trazos vertical) hasta que, pasados 8 minutos, se haría para nosotros la noche perpetua, que en el diagrama es el punto en el que se cortan las dos líneas.

De igual forma, la luz que vemos de las galaxias distantes partió de ellas hace millones de años, así pues, debemos ser conscientes de que cuando miramos al cielo estrellado nocturno, vemos cómo fue en el pasado y no cómo es en el presente

Si introdujéramos una segunda dimensión espacial, propia de un espacio euclídeo plano, el diagrama espacio-tiempo sería tridimensional y tendría forma cónica. Supongamos que en un estanque dejáramos caer una piedra; de todos es conocida la formación de las ondas según líneas circulares concéntricas que se

¹⁵³ ¿Alguien se cree capaz de explicarle a un ser bidimensional qué es la altura?

El tiempo concebido por Einstein, una coordenada más, es necesariamente reversible, razón por la cual, el diagrama de la figura 82, también conocido como *Diagrama de Minkowsky*, es dúplex, consta de dos conos invertidos con un único vértice, el inferior es el cono del pasado y el superior el del futuro, en tanto que el plano que los biseca es el plano del presente. Puesto que la velocidad máxima posible es la de la luz, todas las demás velocidades han de ser menores. Por tanto, solo el espacio del diagrama contenido en el interior del cono es el que alberga los sucesos posibles y todo lo que quede fuera de él no es posible.

La representación gráfica del espacio tridimensional euclídeo deformado por las masas presenta las mismas dificultades que el diagrama espacio-tiempo tetradimensional. Por ello hemos de contentarnos con representar a lo sumo el espacio bidimensional deformado para conseguir representaciones asequibles a nuestra intuición.

La genial idea de Einstein de la deformación del espacio por causa de las masas se complementa con otra no menos genial: Los cuerpos como la Tierra no están forzados a moverse en órbitas curvas por causa de una fuerza llamada gravedad, en su lugar estos siguen la trayectoria más parecida a una recta en el espacio deformado, lo que se conoce como una *geodésica*. Todo navegante sabe que el camino más corto entre dos puntos de la superficie terrestre es el que corresponde a un círculo máximo de la esfera terrestre que pasara por los dos puntos.

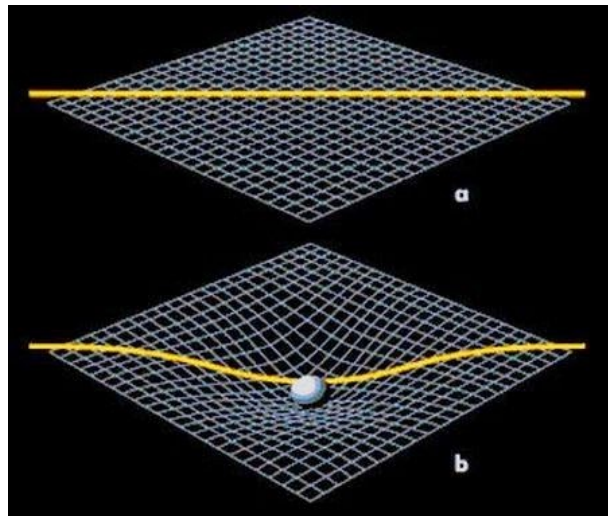


Figura 84 La presencia de un cuerpo másico en el espacio bidimensional (a) deforma a este (b) siendo la causa de la curvatura de las trayectorias “rectas”.

Así pues, según la *Teoría General de la Relatividad*, todos aquellos cuerpos celestes que describen trayectorias curvas en el entorno de los astros de gran masa siguen líneas rectas en el espacio-tiempo tetradimensional¹⁵⁴, según se muestra en las Figuras 84 y 85.

Uno de los primeros éxitos de la *Teoría General de la Relatividad* fue la solución al problema del planeta Mercurio que hemos expuesto anteriormente. Por ser el más cercano al Sol, este planeta es el que con mayor intensidad experimenta los efectos gravitatorios solares, su órbita es más elíptica que las de Venus y la Tierra (ver la figura 85), de forma que esa elipse debe rotar en torno al Sol a razón de un grado por cada diez mil años. Eso explica el desfase de 0,43” observado para Mercurio.

Pero la primera gran confirmación de la Teoría de Einstein llegaría en 1919, cuatro años después de que fuera publicada. La teoría predecía que la luz se propagaría en línea “recta” por el espacio deformado por las masas, es decir, que seguiría líneas curvas en el espacio euclídeo. De acuerdo con la teoría, la trayectoria seguida por la luz de una estrella debería curvarse al pasar por las inmediaciones del Sol, de forma que una estrella que estuviera en perfecta conjunción con el Sol y la Tierra debería ser visible. En condiciones normales no es posible observar si esto se cumple o no, debido a que la enorme luminosidad del Sol lo impide por completo. Ahora bien, el 29 de mayo de 1919 estaba previsto un eclipse de sol que sería total en el Atlántico Sur. Dicho eclipse duró en

¹⁵⁴ Es como ver a una aeronave volando en pleno día sobre un terreno montañoso, aunque el avión sigue una línea recta en el espacio tridimensional, su sombra proyectada sobre el suelo sigue una trayectoria curva en el espacio bidimensional.

el punto de observación elegido 6 minutos y 51 segundos, uno de los más largos del S. XX. Se tomaron numerosas fotografías de la corona solar en la que se distinguían algunas de las estrellas más luminosas. Tras varios meses de análisis, los astrónomos reconocieron algunas estrellas que en el momento del eclipse estaban en línea recta con el Sol y la Tierra y sin embargo ¡eran visibles! Se compararon las posiciones reales y aparentes de unas trece estrellas y la conclusión fue tajante: el análisis de las medidas obtenidas de la desviación de los rayos de luz confirmaba la influencia del campo gravitatorio sobre la luz, tal y como predecía la teoría de Einstein. Se había verificado una de las predicciones teóricas más espectaculares que se haya hecho jamás y además tan sólo cuatro años después de haberse realizado.

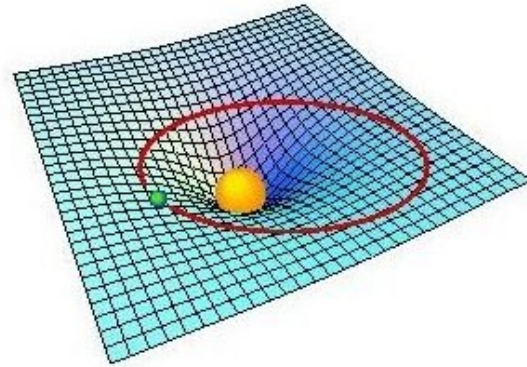


Figura 85 Según la Relatividad General, la Tierra sigue una trayectoria "recta" en el espacio-tiempo curvado por el Sol.

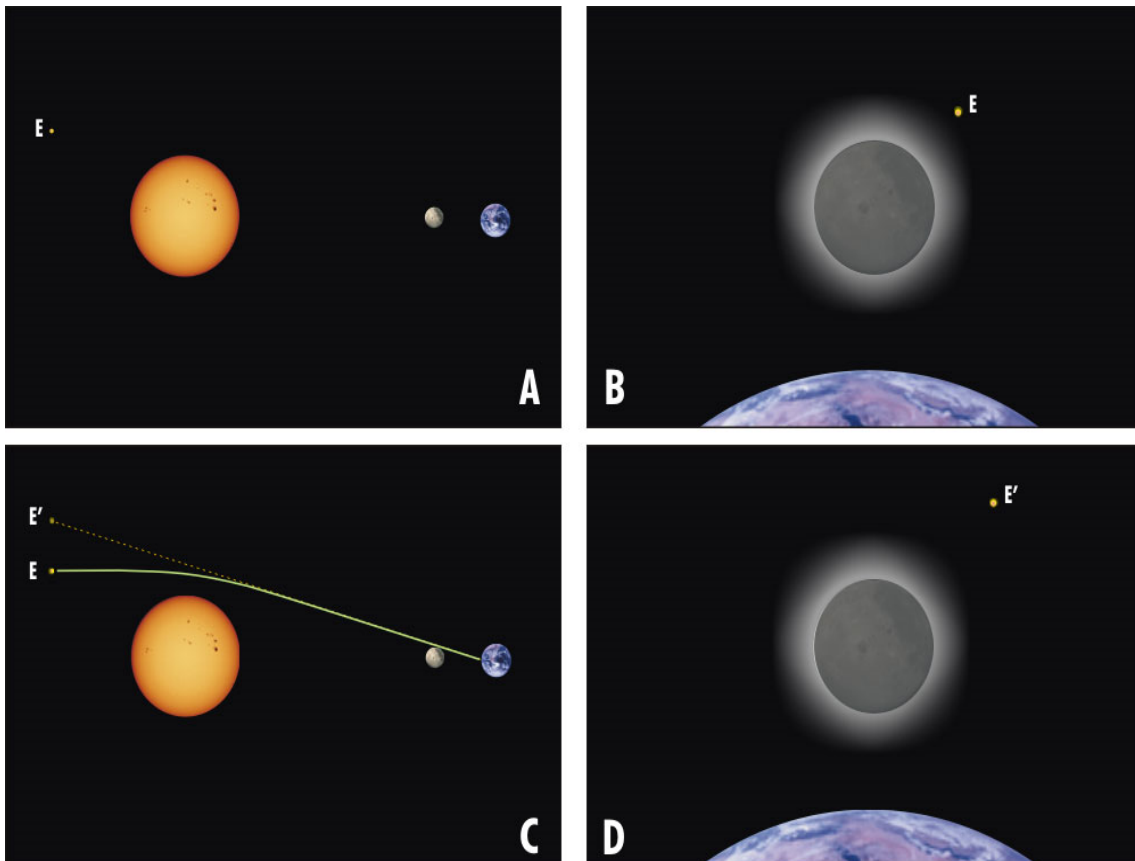


Figura 86 Esquema de la observación del eclipse solar de 1919 que permitió validar la Teoría General de la Relatividad. (A y B) La Luna interpuesta entre el Sol y la Tierra permite la observación de la estrella E. (C y D) La posición aparente de la estrella E' se aprecia más alejada del disco solar, debido a la curvatura que experimenta la trayectoria de la luz al pasar por las proximidades del Sol.

En este capítulo hemos visto que la Teoría de la Relatividad General es una nueva teoría de la gravitación que sustituye a la que en pleno siglo XVII elaborara Newton. Se trata de una teoría armoniosa con los planteamientos de la Relatividad Especial y se basa en el principio universal de

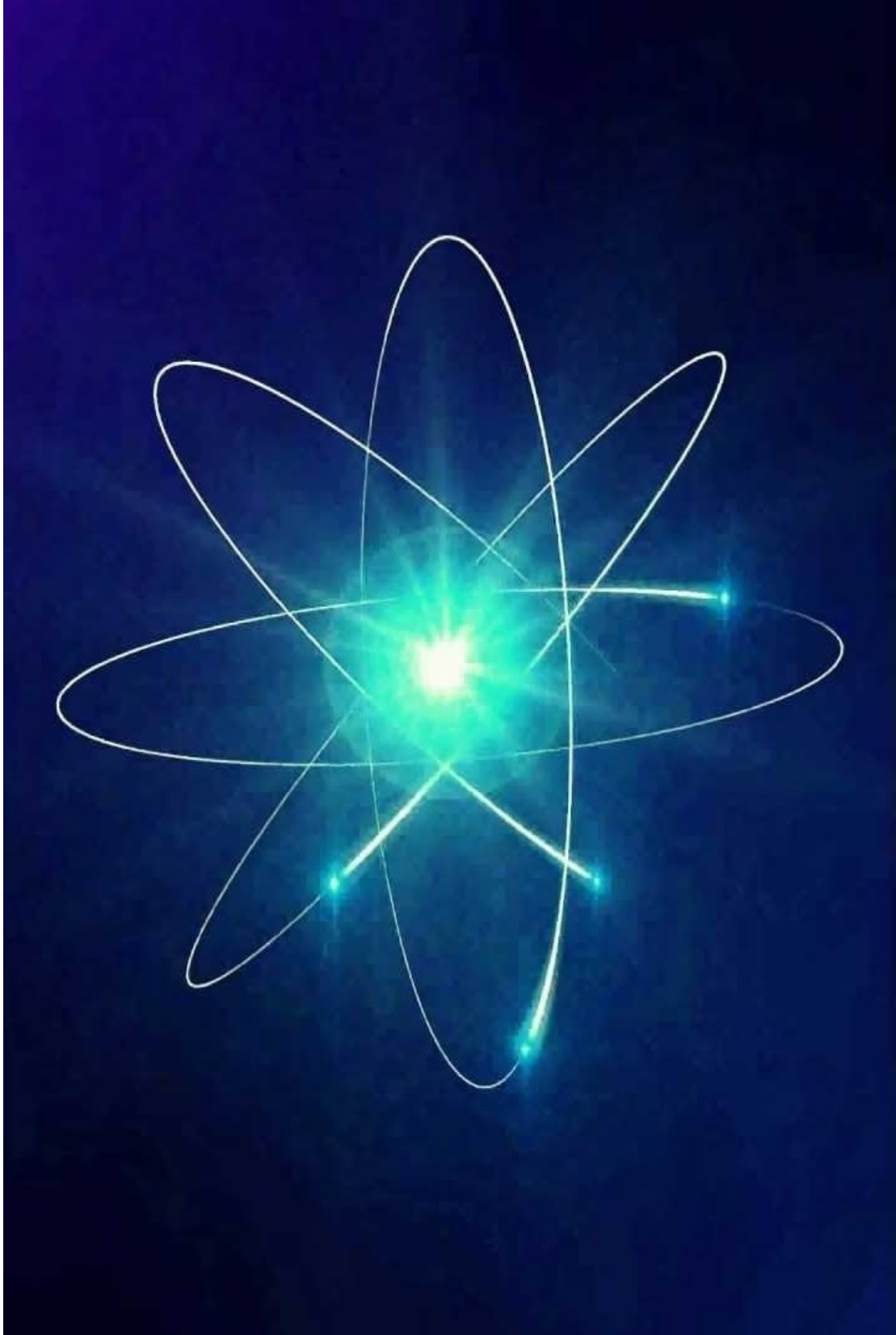
que *nada viaja más rápido que la luz*. Asumir esta teoría supone aceptar que la gravedad, siendo una consecuencia intrínseca de la masa, no se propaga instantáneamente sino que, a lo sumo, se propaga a la velocidad de la luz. Así pues, se hace preciso aceptar que las deformaciones del espacio tiempo se propagan de forma análoga a como se propagan el sonido o la luz.

En los últimos años del S. XX la carrera hacia el descubrimiento de las *ondas gravitacionales* estaba en pleno proceso. Actualmente, el LIGO¹⁵⁵ es un complejo sistema de detección de ondas gravitacionales que dio sus primeros frutos el 15 de septiembre de 2015 al detectar por primera vez las ondas gravitacionales anunciadas por Einstein cien años antes. Paralelos a este proyecto están el interferómetro italofrancés VIRGO ubicado en Pisa, el TAMA japonés y el GEO alemán. Finalmente, citaremos el proyecto LISA¹⁵⁶ soportado por la NASA y la ESA cuya finalidad es detectar y estudiar las ondas gravitacionales desde el espacio, en mucho mejores condiciones que desde tierra.

¹⁵⁵ Iniciales de *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*

¹⁵⁶ *Laser Interferometer Space Antenna*

La materia



Modelo atómico de órbitas excéntricas.

“Dios es capaz de crear partículas de materia de distintos tamaños y formas, y quizás de densidades y fuerzas distintas, y de este modo puede variar las leyes de la naturaleza, y hacer mundos de tipos diferentes en diferentes partes del universo. Yo por lo menos, no veo en esto nada contradictorio.

Isaac Newton”

III.1 EL PENSAMIENTO ATOMISTA

La costa de Tracia, al norte del mar Egeo, es particularmente luminosa. Su situación mirando al sur es motivo de que el mar que la baña sea turquesa al amanecer, a medida que transcurre el día se va haciendo más y más refulgente para resplandecer cegador al mediodía. Entre la cercana isla de Tasos y la desembocadura del río Néstos hay una larga playa de finísima arena.

Corría el año 430 antes de Cristo cuando cierta mañana de la primavera, un hombre de treinta y tantos años paseaba descalzo por la playa cercana al delta del Néstos. Aquel hombre venía con cierta frecuencia desde la cercana ciudad de Abdera a solazarse con la caricia de la brisa y la soledad del lugar. Nuestro personaje era, ciertamente, un ser nada habitual. Siendo muy joven había aprendido astrología y teología con sabios caldeos que acompañaron al rey persa Jerjes I en su campaña militar contra los griegos en las guerras médicas. Posteriormente había estudiado en la escuela que el afamado maestro Leucipo tenía en Abdera, allí había compartido estudios y diversión con Protágoras y Anaxarco, y de Leucipo había aprendido una forma de pensamiento muy especial, consistente en hacerse preguntas ante cualquier hecho que suscitara su atención.

Aquella mañana el hombre paseaba sobre el suelo húmedo de la playa, había cogido un puñado de arena y miraba absorto los finos granos. Todos y cada uno de ellos tienen la misma textura que las rocas, se decía. Sin duda, estos minúsculos granos son fragmentos de ellas. El joven Demócrito (460-370 a.C.) recordaba las ideas que en tantas ocasiones había oído a su maestro: Si cojo un pedazo de madera y lo divido en dos partes tendré dos pedazos de madera, si dividiera uno de ellos tendría otros dos pedazos más pequeños que podría dividir en otros dos aún menores, y así sucesivamente... ¿hasta cuándo? Como cualquier otra sustancia, la madera es finita, tiene límites en su tamaño, en su resistencia y en todas sus propiedades, entonces ¿por qué habría de ser infinita en su capacidad de división?

Pensando de esta manera imaginaba qué sucedería si dividiera uno de los granos de arena que había en su mano ¿hasta dónde podría llegar la división de aquellos ínfimos fragmentos de roca? Convencido de que toda la materia es finita y persuadido de que llegaría un momento en que ya no podría dividir más, imaginó unos minúsculos fragmentos que ya no podría dividir. Con seguridad, pensaba, han de ser tan pequeños que es imposible verlos.

Demócrito no llegó a percatarse de que las combinaciones de unos pocos tipos de *átomos*¹⁵⁷, bastaban para explicar toda la diversidad de la materia. Por el contrario, el filósofo pensaba que el átomo de los granos de arena era exclusivo de la arena; lo mismo pasaba para la madera y para cualquier otra sustancia. Para él, cada una poseía su propio tipo de átomo. En conclusión, para Demócrito el átomo era la fracción más pequeña posible de cada sustancia¹⁵⁸.

Sus ideas acerca de la estructura de la materia pueden resumirse en tres postulados:

- *Los átomos son eternos, indivisibles, homogéneos, indestructibles, e invisibles.*
- *Los átomos se diferencian solo en forma y tamaño, pero no por cualidades internas.*
- *Las propiedades de la materia varían según el agrupamiento de los átomos.*

La manera como Demócrito concibió su modelo de átomo dista mucho del método científico actual. Debemos tener presente que una de las corrientes filosóficas de la Antigua Grecia, el racionalismo, no vacila en afirmar la existencia de cosas que, aunque no sean observables, son así, obligadas por la fuerza del razonamiento lógico. Si bien las ideas de Demócrito fueron seguidas por un escaso número de pensadores entre los que hay que citar a Epicuro de Samos (342-270 a.C.) y, ya en el Renacimiento, a Giordano Bruno, lo cierto es que, pasado casi un siglo de que Demócrito difundiera sus ideas acerca de la materia, otro filósofo nacido en Estagira (Macedonia), Aristóteles (384-322 a.C.) acérrimo defensor del pensamiento platónico, disintió profundamente con el pensamiento del primero.

Aristóteles proponía un universo esférico y finito, que tendría a la Tierra como centro, formado por la combinación de elementos básicos basados en los cinco elementos presocráticos¹⁵⁹, a saber, tierra, agua, aire, fuego y éter. En su *Física*, cada uno de estos elementos tiene un lugar adecuado, determinado por su peso relativo. En cuanto al quinto elemento, Aristóteles sostuvo que todos los cielos, y cada partícula de materia en el universo, estaban formados a partir de otro elemento, que era el quinto y que él llamó “éter” el cual se suponía que no tenía peso y era incorruptible. Al éter también se lo llamaba “quintaesencia”, o sea, la “quinta sustancia”.

El prestigio que alcanzó Aristóteles rebasó su época y por otro lado quiso el destino que, tras la destrucción de la biblioteca de Alejandría, fueran sus obras las que más se conservaran por haber sido más copiadas, suerte que no tuvo la extensa obra de Demócrito. Así pues, durante el período helenístico y toda la Edad Media, fue el pensamiento aristotélico el que prevaleció y hubo que

¹⁵⁷ En griego, el término “*tomo*” se refiere a la parte de un todo y “*átomo*”, su antónimo, significa “lo que no se puede dividir”.

¹⁵⁸ Habrían de pasar más de veintitrés siglos para que J. Dalton retomara estas ideas con una brillante innovación: los átomos se unen unos a otros en proporciones y geometrías bien definidas originando las partículas más elementales de las distintas sustancias.

¹⁵⁹ La filosofía presocrática es el período de la historia de la filosofía griega que se extiende desde su comienzo, con Tales de Mileto (nacido en el siglo VII a. C.), hasta las últimas manifestaciones del pensamiento griego no influidas por el pensamiento de Sócrates, aun cuando sean cronológicamente posteriores a él.

esperar a que la vieja alquimia se convirtiera en la Química actual para que las ideas atomísticas del griego fueran rescatadas del olvido y elevadas a la categoría de teoría científica.

III.2 MATERIA Y ENERGÍA EN EL UNIVERSO

Nuestros sentidos nos ponen en comunicación con el mundo exterior y como resultado de las sensaciones que percibimos, nuestra mente genera un *modelo mental* del mundo que nos rodea, es decir, una representación inmaterial que luego utilizamos para tomar decisiones a la hora de interactuar con el entorno. En ello están de acuerdo los epistemólogos y la gnoseología¹⁶⁰ en general. Vimos además en el capítulo I.3 que el *Pensamiento espontáneo* es toda forma de razonamiento que desarrolla cualquier individuo manejando sus propios recursos, conocimientos, recuerdos y formas de pensamiento aprendidas, siguiendo las reglas de la lógica y del sentido común.

En general, se asume que *Materia* es todo aquello que tiene una inercia y ocupa un espacio. Tiene unas propiedades cuya cuantía depende de la cantidad de materia considerada¹⁶¹, como es el caso de la masa y el volumen y otras cuya magnitud no depende de la cantidad de materia referida¹⁶² como es la densidad, la dureza, el color y el calor específico entre otras.

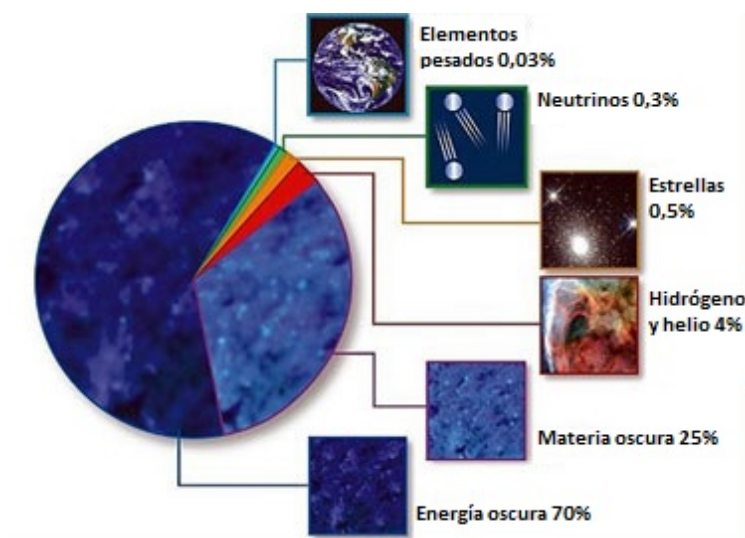


Figura 87 Composición porcentual del universo según una reciente publicación de la NASA.

Tanto las ideas aristotélicas sobre la naturaleza de la materia como la descripción atomística de Demócrito responden a la lógica del sentido común, si se las considera enmarcadas en su tiempo, como lo fuera considerar al Sol una deidad si nos trasladamos al antiguo Egipto. Ahora bien, la idea atomística ha resistido mucho mejor el paso del tiempo que la de las cinco esencias constituyentes de la materia. Ciertamente, pensar que la materia debe estar constituida

por partículas elementales es una suposición de lo más lógico, que fue asumida por John Dalton en el S. XVIII y todos los científicos de los dos siglos siguientes. Ya en el S. XX se incorporan los planteamientos cuánticos en los que los conceptos de dualidad onda-corpúsculo y de indeterminación difuminan la línea de pensamiento que inaugurara Demócrito hace ya veinticuatro siglos. Hoy, ya en pleno S. XXI, el *Modelo Standard de Partículas* es el corpus teórico

¹⁶⁰ También llamada *Teoría del Conocimiento*.

¹⁶¹ A estas propiedades se les llama *extensivas*.

¹⁶² A estas propiedades se les llama *intensivas*.

más aceptado para explicar la estructura de la materia¹⁶³. Se le llama modelo y no teoría porque le faltan aún ciertas confirmaciones necesarias para alcanzar ese rango.

Cuando en una noche estrellada contemplamos el cielo es fácil que nuestra imaginación se desboque y pensemos en todo cuanto hoy sabemos de las estrellas y las galaxias. Somos conscientes de las enormes distancias que nos separan de ellas, de sus gigantescas dimensiones y de la energía descomunal que emiten. Todo ello lo sabemos gracias a los muchos materiales divulgativos de que hoy disponemos sobre esos temas. Pero de lo que no somos conscientes es que esos mundos inconmensurables que se ofrecen a nuestra vista no son sino una pequeña porción de la materia existente en el universo.

Las estimaciones más consensuadas actualmente por los astrofísicos establecen que el universo está compuesto por un 26,8 % de *materia oscura*, un 68,3 % de *energía oscura* y tan solo un 4,9 % corresponde a la materia visible¹⁶⁴, es decir, vemos tan solo una pequeña parte del mismo. Así pues, existe mucha más materia oscura que visible. Su nombre hace referencia a que no emite ningún tipo

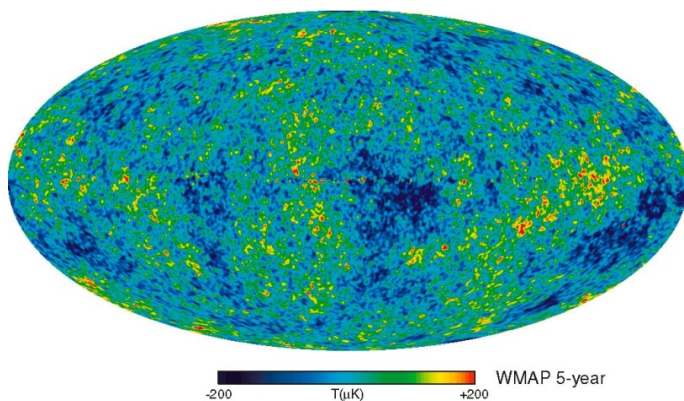


Figura 88 Mapa de la distribución no uniforme de la radiación cósmica de microondas, obtenida por la sonda WMAP de la NASA.

de radiación electro-magnética, ni por debajo de la frecuencia de la luz visible ni por encima de ella; de hecho, no interactúa con ninguna forma de radiación electromagnética, siendo completamente transparente en todo el espectro electromagnético. Su existencia se puede inferir a partir de sus efectos gravitacionales en la materia visible, tales como las estrellas o las galaxias, así como en las anisotropías de la *radiación de fondo*¹⁶⁵, presente en el universo. No

se sabe con certeza de qué está compuesta la materia oscura, se supone que algunos de sus constituyentes son neutrinos¹⁶⁶ ordinarios y pesados, otras partículas elementales recientemente postuladas, cuerpos astronómicos como las estrellas enanas, los planetas y nubes de gases no luminosos. Las pruebas actuales favorecen los modelos en que el componente primario de la materia oscura son las nuevas partículas elementales llamadas colectivamente materia oscura no bariónica¹⁶⁷. Se piensa que buena parte de esta materia se halla distribuida por todo el universo en forma de filamentos gaseosos de baja densidad, formando una red por todo el espacio, en cuyos nodos se encuentran los diversos cúmulos de galaxias.

¹⁶³ Le dedicaremos la debida atención en el capítulo siguiente.

¹⁶⁴ Datos obtenidos por la sonda espacial Planck (22-marzo-2013).

¹⁶⁵ Es una radiación del tipo microondas descubierta en 1965 que llena el universo por completo. Tiene una frecuencia de 160,2 Ghz correspondiente a una longitud de onda de 1,9 mm y se corresponde con la emisión de un cuerpo negro que estuviera a 2,725K. Su existencia es la prueba más sólida de la validez de la *Teoría del Big-Bang*.

¹⁶⁶ Partículas subatómicas que tienen masa muy pequeña, difícilmente mensurable, sin carga y con spin de valor 1/2

¹⁶⁷ Los bariones son una familia de partículas en la que están los protones y los neutrones, constituyentes de la materia ordinaria que podemos ver y tocar.

El otro componente importante del cosmos es la *energía oscura*, una forma de energía presente en todo el espacio, que produce una presión que tiende a acelerar la expansión del universo, algo así como una fuerza gravitatoria repulsiva. Considerar la existencia de la energía oscura es la manera más acertada de explicar las observaciones recientes de que el universo parece estar en expansión acelerada desde hace unos 6000 millones de años. La causa sería que la densidad de la materia ha seguido disminuyendo, mientras que la energía oscura ha permanecido constante.

III.3 VARIACIÓN RELATIVÍSTICA DE LA MASA

Cuando en el capítulo II.17 nos ocupábamos del espacio y del tiempo relativo, abordamos todas aquellas leyes inherentes al espacio, al tiempo y al movimiento que son consecuencia de la *Teoría de la Relatividad Restringida*. Ahora bien, quedan dos leyes importantes que se refieren a la masa, las cuales se omitieron allí intencionalmente, y que es preciso considerar ahora.

La masa de los cuerpos es un concepto considerado tradicionalmente como absoluto e invariable. Nuestra intuición, conformada por nuestras propias vivencias y experiencias, nos empuja a considerarla como una propiedad intrínseca de cada cuerpo, independiente de cuantas circunstancias concurren en quien la mide. Una de las conclusiones de Einstein, comprobada posteriormente hasta la saciedad por los científicos, es que el valor que un observador aprecia para la masa de un objeto, depende de la velocidad del observador respecto de dicho objeto.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Así pues, la masa estimada para un cuerpo es tanto mayor cuanto más grande sea la velocidad, relativa al cuerpo, de quien la mide. En el rango de velocidades propias de nuestra vida ordinaria

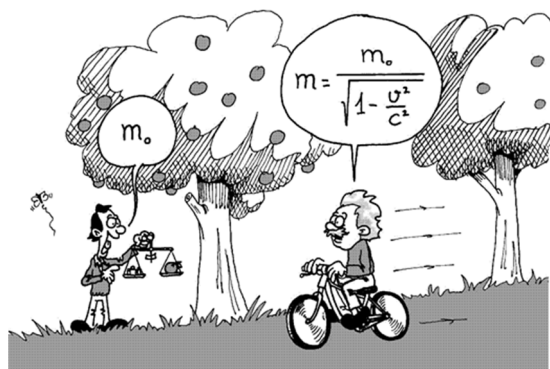


Figura 89 El observador en movimiento aprecia masa mayor que el observador inmóvil.

siempre es $v \ll c$ de forma que el denominador es prácticamente igual a la unidad, siendo entonces $m \cong m_0$ pero, llevadas las cosas hasta el extremo, si la velocidad del observador llegara a ser igual a la de la luz, el denominador tendería a cero y en consecuencia, la masa del cuerpo tendería al infinito.

La *Ley de la variación relativista de la masa* es armoniosa con el resto de las leyes relativistas, e incluso con nuestra intuición. Hagamos un experimento mental:

Supongamos que aplicamos una fuerza constante f a un cuerpo de masa m . Por la física clásica sabemos que ese cuerpo aumentará su velocidad con una aceleración que cumple la ley clásica $f = m \cdot a$. Si la fuerza siguiera ejerciéndose indefinidamente, la velocidad crecería y crecería hasta rebasar el valor c , violando así el más importante principio relativista. Ahora bien, si la masa crece por efecto del aumento de la velocidad del cuerpo haciéndose infinita cuando su velocidad

alcanzara la de la luz, en ese momento la aceleración tendría que ser nula, pese a que la fuerza impulsora no lo fuera.

III.3.1 EQUIVALENCIA MASA-ENERGÍA¹⁶⁸

La ley clásica $f=m.a$ para el caso de una partícula impelida por una fuerza, puede ser escrita bajo la forma

$$f = m \frac{dv}{dt} = \frac{dp}{dt}$$

Siendo $p=mv$ el *impulso lineal*. Esto equivale a decir que “la fuerza ejercida sobre un cuerpo se invierte en variar su impulso lineal”.

Por otro lado, una fuerza impelente desarrolla una energía que sigue la ley clásica

$$dE = F.ds$$

Siendo s el desplazamiento que la fuerza provoca.

Combinando estas dos leyes clásicas e introduciendo en ellas la ley relativística de la variación de la masa que acabamos de ver, Einstein pudo deducir la expresión:

$$dE = c^2 . dm$$

Su significado y trascendencia es muy grande ya que permite afirmar que *a toda variación de masa le corresponde una variación de energía, pudiendo transformarse una en otra*. El hecho de que ambas magnitudes sean equivalentes permite englobar los Principios de Conservación de la Energía y de la Masa en uno más general: el *Principio de Conservación de la Masa-Energía*. La que, sin duda, es la ecuación más famosa de la historia de la ciencia:

$$E = m . c^2$$

Es la misma que la anteriormente citada. En ella se resume una de las más paradigmáticas concepciones, como es la equivalencia entre la masa y la energía. De conformidad con esta línea de pensamiento, asumimos que la energía global de un cuerpo es la suma de su energía en reposo y su energía cinética clásica, esto es:

$$E = m_o . c^2 + \frac{1}{2} m_o . v^2$$

Retomemos ahora el experimento mental del punto anterior. Si nos hallamos en el dominio de las bajas velocidades (nuestro orden de magnitud) la energía desarrollada por una fuerza impelente se invierte en incrementar la energía cinética, algo que nos es absolutamente familiar. Ahora bien, si nos hallamos en el dominio de las altas velocidades, próximas a la velocidad de la luz, hemos visto que la velocidad apenas crece, por grande que sea la fuerza impelente, no pudiendo rebasar el valor c pero, entonces ¿qué pasa con la energía desarrollada por la fuerza? Pues, sencillamente,

¹⁶⁸ En este punto, al autor se ve obligado a utilizar la notación diferencial, que puede asustar a no pocos lectores. Debe quedar claro que es una situación puntual y necesaria, debido a que nos hemos de referir a variaciones de magnitudes así, por ejemplo, si v es una velocidad dv es la variación de la velocidad en un tiempo extremadamente corto.

se invierte en incrementar la masa. Precisamente, por todos estos motivos, los físicos miden las masas de las partículas en unidades de energía, más concretamente en *electrón-voltios*¹⁶⁹, siendo de uso común los múltiplos de esta unidad, tales como el *MeV* (10^6 eV) y el *GeV* (10^9 eV)¹⁷⁰.

La variación relativista de la masa solo se aprecia experimentalmente en el rango de las altas velocidades, y esto solo sucede cuando se experimenta en física de partículas. Pensemos que, pese a que la masa en reposo de un protón es tan solo $1,67 \cdot 10^{-27}$ Kg, conseguir un haz de protones acelerados hasta velocidades próximas a la de la luz supone el consumo de una enorme cantidad de energía ya que a esas enormes velocidades la masa de las partículas se habrá incrementado extraordinariamente, dificultando con su inercia todo intento de aceleración. No debe extrañarnos por tanto, que el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN¹⁷¹, probablemente la más titánica construcción humana realizada hasta la fecha, encerrado en un túnel anular a 200 m de profundidad en el subsuelo de la ciudad de Ginebra y capaz de acelerar protones hasta alcanzar los 7 TeV ($7 \cdot 10^{12}$ eV) requiera una potencia eléctrica de 180 Mw, aproximadamente el 10% del consumo total de la ciudad que tiene encima.

III.4 PARTÍCULAS ELEMENTALES

La idea primigenia que estableciera Demócrito cuatro siglos antes de nuestra era sigue hoy vigente. Desde que, a principios del S. XX Ernest Rutherford propusiera la existencia de átomos nucleares que concentran la casi totalidad de su masa en el minúsculo núcleo, la carrera hacia el inframundo nuclear con el afán de descubrir las partículas últimas que constituyen la materia, no ha cesado.

Los medios experimentales para explorar la estructura y composición de los núcleos se basan fundamentalmente en provocar transmutaciones, a base de golpearlos con partículas. Diríase de forma metafórica que los físicos estudian la naturaleza y propiedades de las partículas subatómicas “jugando al billar con ellas”. En multitud de ocasiones, las partículas ofrecen resistencia a entrar en contacto unas con otras, debido a la presencia de carga eléctrica de igual signo en ambas y otras veces se debe a otros motivos. Por ello, el avance del conocimiento en este campo pasa por acelerar las partículas y lanzarlas, como si de proyectiles se tratara, contra la muestra objeto de experimentación.

Desde que en 1919 E. Rutherford provocara y estudiara las primeras reacciones nucleares, haciendo pasar las partículas α ¹⁷² procedentes de una fuente radiactiva de Polonio¹⁷³ a través de diversos gases, se puso en marcha una apasionante carrera que hoy, cien años después, sigue atrayendo la atención de buena parte de la comunidad científica. En un principio, las transmutaciones nucleares estudiadas eran las que se producen de forma espontánea, es decir, la energía que poseen las partículas según salen de la fuente es suficiente para que se produzca el

¹⁶⁹ 1eV es la energía cinética que adquiere un electrón al ser sometido a la diferencia de potencial de 1 voltio.

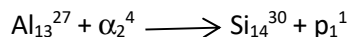
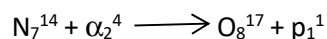
¹⁷⁰ 1 MeV equivale a $1,783 \cdot 10^{-34}$ Kg

¹⁷¹ ¹⁷¹ *Centre Européen des Recherches Nucleaires*, organización científica supranacional dedicada a la investigación en Física de Partículas.

¹⁷² Las partículas α son uno de los tres componentes habituales de las emanaciones radioactivas. Son núcleos de helio, el más elemental de los gases nobles, tienen carga eléctrica positiva y son muy abundantes en el Sol y las restantes estrellas.

¹⁷³ Elemento radiactivo descubierto por María Curie en 1898.

choque de las mismas contra el blanco, produciéndose la reacción. De este tipo son, por ejemplo, las transmutaciones del nitrógeno y del aluminio¹⁷⁴:



Pronto se dieron cuenta los físicos de que, acelerando las partículas proyectiles, se podía desencadenar muchas otras reacciones que hasta el momento no eran posibles. Así se inició la construcción de máquinas aceleradoras más y más potentes, de las que damos una escueta referencia en la tabla.

TIPO	EPOCA	PARTÍCULA ACELERADA	ENERGÍA MÁXIMA
Cockcroft-Walton	1937	Partícula α	1 MeV
Van der Graaf	1930	Partícula α	10 MeV
Ciclotrón	1934	Deuterón y partícula α	40 MeV
Sincrociclotrón	1948	Protón y partícula α	350 MeV
Betrón	1940	Electrón	300 MeV
Acelerador lineal	1950	Electrón, protón	1 GeV
LHC	2008	protón	7 TeV

Como fruto de la intensa investigación en este campo, la ciencia actual dispone de un *Modelo Standard de la Física de Partículas*, que constituye la mejor descripción de la estructura íntima de la materia de que hoy disponemos. Se le llama “modelo” y no “teoría” porque aún tiene por resolver unas cuantas cuestiones fundamentales como, por ejemplo, que no explica la existencia de la *materia oscura* ni de la *energía oscura* o a qué se debe que ciertas partículas tengan masa y otras no. En cualquier caso, el Modelo Estándar es una teoría comprensiva que identifica las partículas básicas y especifica cómo interactúan éstas.

De acuerdo con Modelo Standard, las únicas partículas elementales existentes en la naturaleza son *leptones* y *quarks* ya que no tienen estructura interna, es decir, no están compuestas por ninguna otra partícula más inferior. En un orden más superior, hay otras partículas llamadas *hadrones* que están formadas por dos o más quarks; hay dos clases, los *bariones*¹⁷⁵, formados por tres quarks y los *mesones*, formados por un quark y un *antiquark*¹⁷⁶.

Las partículas tienen unas propiedades intrínsecas que permiten distinguir unas de otras.

- *Masa* que se mide en unidades de energía múltiplos del eV¹⁷⁷
- *Carga eléctrica* que puede ser positiva o negativa. Una característica de los quarks es que tienen carga eléctrica fraccionaria (+2/3 e) para unos tipos y (-1/3 e) para otros. Sin embargo, nunca se detectaron quarks libres, siempre están confinados en hadrones, de tal modo que la suma algebraica de las cargas de los quarks que constituyen un determinado hadrón es siempre un múltiplo entero de e. El protón, por ejemplo, está

¹⁷⁴ Se informa al lector del significado de los subíndices y superíndices que acompañan a los símbolos de los elementos. Los subíndices son los *números atómicos* (número de protones) y los superíndices son los *números másicos* (número de protones y neutrones).

¹⁷⁵ En este grupo se encuentran los protones y los neutrones, que forman los núcleos atómicos.

¹⁷⁶ El *antiquark* es la antipartícula del quark

¹⁷⁷ Recuerde el lector la equivalencia relativista entre masa y energía y la variación que la masa sufre con la velocidad.

formado por dos quarks de carga (+2/3 e) y un quark de carga (-1/3 e) de modo que su carga es (2/3 + 2/3 -1/3) e, o, simplemente, e. Es decir, el quantum de la carga eléctrica continúa siendo e (1,6.10⁻¹⁹ C).

- *Carga de color*, inherente a los quarks, que puede ser de tres clases: rojo, verde y azul. En consecuencia, cada uno de los seis tipos de quarks que aparecen en la figura 90, puede tener uno de estos tres “colores”, lo que nos da 18 quarks distintos. Si a ello le sumamos sus correspondientes antipartículas, tenemos como resultado la existencia de 36 quarks distintos¹⁷⁸.
- *Spín*, se trata de una propiedad descubierta por Otto Stern y Walther Gerlach en 1940 relacionada con el momento magnético¹⁷⁹. Los *leptones* y los *quarks* tienen número de spín semientero mientras que otras partículas lo tienen entero o no lo tienen. Aquellas partículas cuyo spín es semientero (+1/2 o -1/2) cumplen el Principio de Exclusión (ver el capítulo II.14), es decir, cuando dos de estas partículas comparten un mismo estado acoplan sus spines¹⁸⁰.

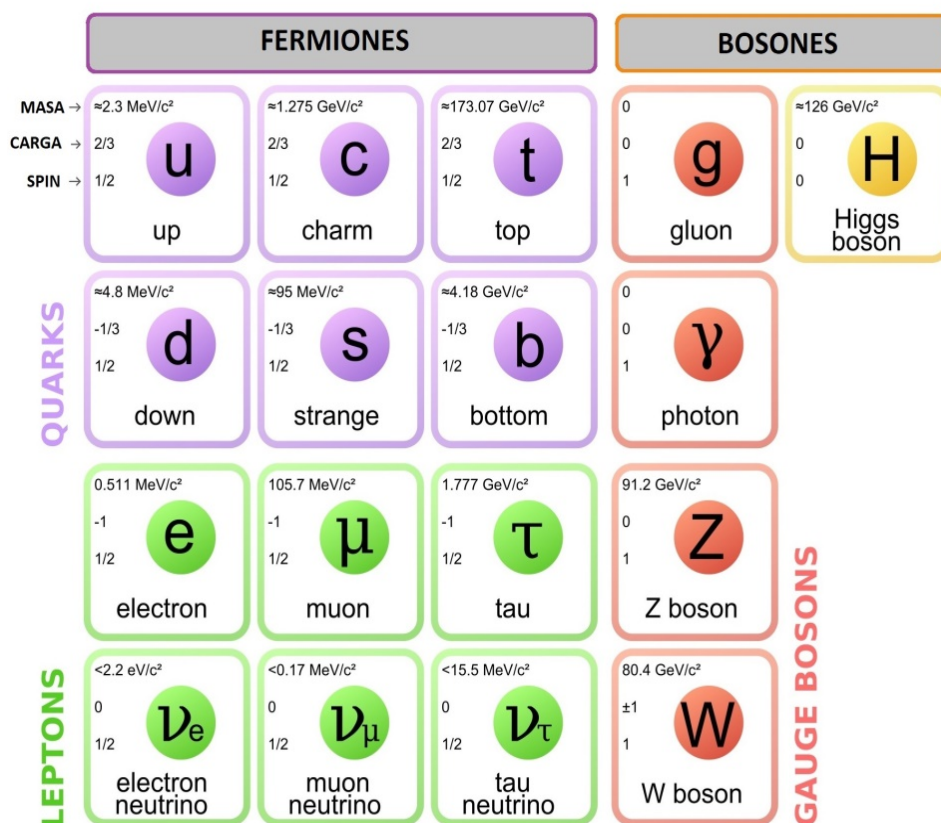


Figura 90 Clasificación de las partículas elementales (Modelo Standard).

¹⁷⁸ La *carga de color* no es, hoy por hoy, una magnitud mensurable. Es tan sólo una propiedad ideada para justificar las diferentes clases de *quarks* reconocidos.

¹⁷⁹ Muy probablemente, el lector está concibiendo las partículas como minúsculas bolitas. Imagine que las partículas se comportaran como diminutos imanes lineales, con sus polos norte y sur bien diferenciados y le será fácil comprender que las partículas con *spin* no nulo son sensibles a los campos magnéticos y se orientan en su seno como si de brújulas se tratara. El *spin* se denota por un parámetro llamado *número cuántico de spin*.

¹⁸⁰ Imagine el lector que introduce dos imanes lineales en una caja de zapatos y, una vez cerrada, agita con las manos la caja. Los imanes terminan por acoplarse juntando lo más posible sus polos opuestos.

Resumiendo, según el *Modelo Standard*, la gran cantidad de partículas hasta hoy detectadas, cerca de 300 en aceleradores colisionadores de partículas o en rayos cósmicos, puede ser agrupada en *leptones*, *quarks* y *hadrones* o, también, en *leptones*, *bariones* y *mesones*, pues los hadrones pueden ser divididos en *bariones* y *mesones*.

El número cuántico de *spín* es también un criterio muy utilizado para “poner orden” en el parque zoológico de las partículas subnucleares. Conforme a él, se distingue entre *fermiones* y *bosones*. Los primeros se caracterizan por tener *spín* semientero y los segundos por tenerlo entero (0, 1, 2, ...).

En otro orden de cosas, el *Modelo Standard* propone la existencia de cuatro tipos de interacciones fundamentales: *gravitacional*, *electromagnética*, *fuerte*¹⁸¹ y *débil*¹⁸². Cada una de ellas es motivada por una propiedad fundamental de la materia: *masa*, *carga eléctrica*, *carga de color* y *carga débil*, respectivamente. Como consecuencia, en la naturaleza existen cuatro tipos de fuerzas: *fuerza gravitacional*, *fuerza electromagnética*, *fuerza fuerte (de color)* y *fuerza débil*. Todas las fuerzas que puedan parecerse distintas (fuerzas elásticas, de rozamiento, intermoleculares, atómicas, de viscosidad ...) no son sino casos particulares o resultantes de estas cuatro fuerzas fundamentales.

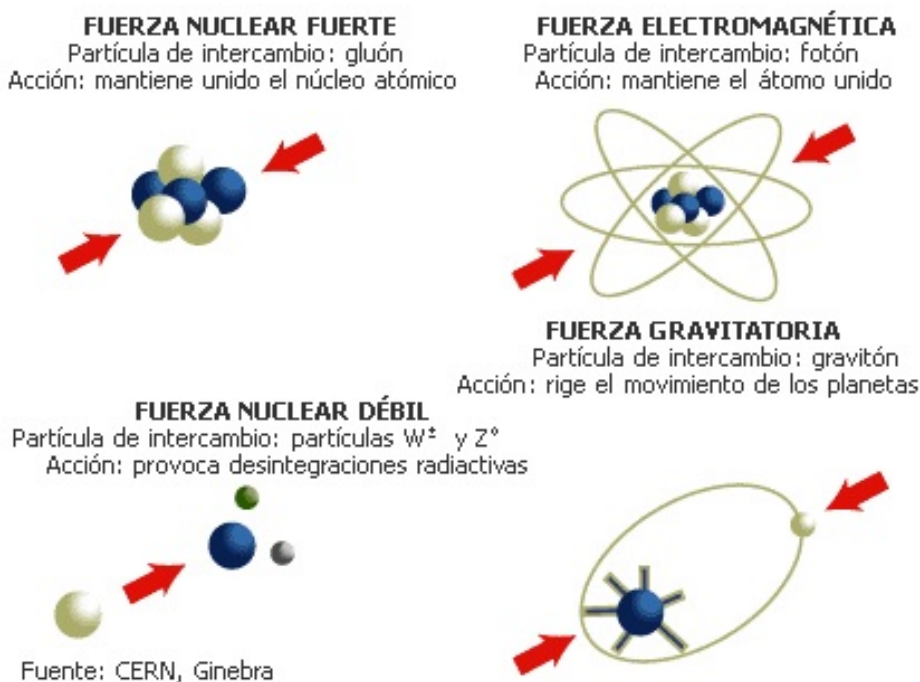


Figura 91 Esquema de las cuatro fuerzas fundamentales

¹⁸¹ La *interacción fuerte* es la que se da en el interior de los núcleos atómicos y mantiene confinados en su interior a los protones y los neutrones. Es preciso aceptar su existencia y pensar que la repulsión electrostática entre los protones declina a distancias tan cortas, manteniendo así la estabilidad de los núcleos.

¹⁸² La interacción nuclear débil se produce entre partículas leptónicas o hadrónicas. Explica algunos procesos nucleares, como la desintegración de los núcleos, en la que un neutrón se transforma en un protón y un electrón. También explica las transformaciones entre leptones.

La *interacción fuerte* es la más intensa de las cuatro, a las distancias ultracortas propias del interior del núcleo atómico; así se explica que los núcleos sean estables pese a la repulsión electromagnética existente entre los protones. A distancias mayores, propias de la corteza atómica, las *interacciones fuertes* decaen por debajo de las *interacciones electromagnéticas*; así se explica la estabilidad de la corteza electrónica que rodea al núcleo de los átomos. La *interacción gravitatoria* es la más débil de las cuatro, siendo la responsable de la mecánica celeste en el universo.

Llegados aquí, surgen preguntas: ¿Cómo se produce la interacción? ¿Quién o qué “transmite el mensaje” de la fuerza entre las partículas que interactúan? El *Modelo de Partículas* propone que las interacciones fundamentales se dan merced al intercambio de unas *partículas mediadoras* virtuales. Esas partículas mediadoras serían los *fotones* en la interacción electromagnética, los *gluones* en la interacción fuerte, los *bosones W y Z* en la interacción débil y los *gravitones* (aún no detectados) en la interacción gravitacional. Así pues, las partículas con carga eléctrica interactuarían intercambiando fotones, los protones y neutrones de los núcleos se atraerían intercambiando gluones, las partículas con carga débil intercambiarían bosones W y Z y las masas se atraerían intercambiando gravitones.

Ya se habrá dado cuenta el lector de que el *Modelo de Partículas* está construido en base a un principio filosófico de simetría en la naturaleza. La idea de base en la construcción de este modelo es aceptar la existencia de cuatro tipos de partículas elementales que interactúan de forma distinta y específica intercambiando unas partículas portadoras o mediadoras que son también específicas de cada uno de los cuatro tipos.

Sabemos que las masas crean un campo de fuerzas gravitatorias en su entorno ejerciendo una interacción atractiva con otras masas y análogamente, las cargas eléctricas crean un campo electromagnético (si están en reposo se percibe únicamente el campo eléctrico y si están en movimiento se percibe también el componente magnético) interactuando con otras cargas eléctricas. Siguiendo pues con el principio filosófico de simetría, es obligado aceptar que debe existir un *campo de fuerza fuerte* que se extendería al minúsculo espacio del núcleo atómico y un *campo de fuerza débil* que se extendería al espacio ocupado por partículas de carga débil. Las partículas mediadoras serían los *quantos* de los campos correspondientes¹⁸³: los fotones son los quantos del campo electromagnético, los gluones lo son del campo fuerte, los bosones W y Z serían los quantos del campo débil y los gravitones serían los quantos del campo gravitatorio.

El problema en esa bella simetría de cuatro cargas, cuatro interacciones, cuatro fuerzas, cuatro tipos de partículas mediadoras y cuatro campos es que aún no fue detectado ningún gravitón y la gravedad en sí, no encaja bien, hoy por hoy, en esa teoría llamada *Modelo Estándar*.

III.5 LA PARTÍCULA DE DIOS

Desde que en 1897 J. Thompson determinara la relación carga/masa de los corpúsculos constituyentes de los rayos catódicos (así los llamó Thompson en sus publicaciones) fue prendiendo en la comunidad científica la idea de que los átomos están compuestos por partículas

¹⁸³ Recuerde el lector que en el capítulo I.17 se trató el *Principio de la Cuantización Electromagnética*.

más inferiores y al propio tiempo el trabajo de los científicos se orientó a descubrir esas partículas constituyentes y sus propiedades. Así, en 1910 Robert A. Millikan determinó la carga del electrón. En aquellos años E. Rutherford, H. Geiger y E. Marsden definían la masa de las partículas alfa y de los protones. Años después, James Chacwick descubre el neutrón y sus propiedades: ausencia de carga y masa igual que la del protón. Sucesivamente, durante los años cuarenta y cincuenta, aparecen en escena más y más partículas, unas con carga, cada una con sus propiedades másicas, electromagnéticas y de spin.

A comienzos de los años sesenta la colección de partículas conocidas y caracterizadas era considerable y empezaba a dibujarse la idea de que las partículas consideradas elementales hasta entonces, no son tan elementales como se pensaba. Por otro lado, los *físicos de altas energías*¹⁸⁴ se preguntaban por qué razón unas partículas tienen una masa detectable y otras no.

La segunda mitad del S. XX fue una época de descubrimiento de nuevas partículas, nuevas fuerzas y nuevos campos. El espacio alberga una variedad de influencias invisibles que llamamos campos, los cuales producen diversos efectos sobre la materia. Por cada tipo de partícula hay un campo específico y en su seno, las partículas de ese tipo interactúan entre sí con una clase de fuerza también específica. Por ello, los campos y las partículas reciben igual o análoga denominación. El campo electromagnético podría llamarse campo de fotones, el campo nuclear fuerte podría llamarse campo de gluones, el campo débil podría llamarse campo de bosones W y Z y el campo gravitatorio sería un campo de supuestos gravitones que aún no hemos detectado. En este contexto se inscribe el mecanismo propuesto por Peter Higgs, en 1964, que pretende dar respuesta a la cuestión de a qué se debe la existencia de la masa en las partículas.

La propuesta de Higgs consiste en considerar la existencia de un campo cuántico que permea todo el universo, cuyo efecto sería dotar de masa a todas las partículas que interactuaran con las partículas asociadas a este campo, denominadas *bosones de Higgs*. El *Modelo Standard de Partículas* sostiene que cada campo tiene su bosón específico¹⁸⁵ y en consecuencia, el campo de Higgs tendría su partícula mediadora: el *bosón de Higgs*. Ciertamente, todos estos planteamientos son difícilmente comprensibles por pertenecer a un orden de magnitud absolutamente inaccesible a nuestros sentidos. Como remedio a esta circunstancia podríamos pensar que la forma en que las partículas adquieren masa a través de la interacción con el campo de Higgs es análoga al papel secante absorbiendo tinta. Trozos de papel secante representan partículas individuales y la tinta representa energía. Diferentes partículas "se empapan" de diferentes cantidades de energía, dependiendo de la capacidad de "absorción de energía" y de la fuerza del campo de Higgs.

El campo de Higgs recuerda al ya olvidado *éter luminífero*, fluido ultraelástico e inmaterial que se hacía necesario en un tiempo en el que las ondas luminosas se asemejaban a las ondas materiales y se asumía la necesidad de un medio elástico transmisor. Podríamos pensar que, el campo de Higgs es como el fluido que llena el universo y que todo aquello que se mueva en su seno ha de vencer una resistencia que se interpreta como masa. Ahora bien, esta comparación no explica la existencia de

¹⁸⁴ La *Física de Altas Energías* es la especialidad que estudia las partículas constituyentes de la materia, sus propiedades e interacciones. Se llama así porque la experimentación en este campo requiere el empleo de costosísimos dispositivos capaces de dotar a las partículas de enormes energías, suficientes para provocar que estas lleguen a interactuar entre sí.

¹⁸⁵ Recuerde el lector que un bosón es una partícula que tiene spin entero o nulo y no cumple el Principio de Exclusión. Todas las partículas mediadoras (fotones, gluones, bosones W y Z) son bosónicas.

la masa en reposo. Es preferible, por tanto, pensar que el *campo de Higgs* es un campo cuántico cuyo cuanto es el *bosón de Higgs*, el cual no posee spin, ni carga eléctrica ni carga de color, es muy inestable y apenas tiene existencia propia, siendo su vida media del orden de 10^{-21} s.

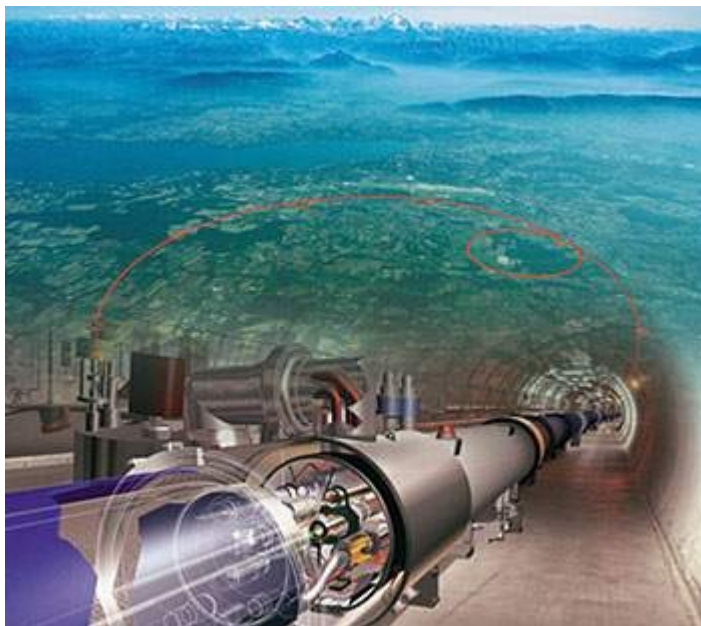


Figura 92 Composición fotográfica de un segmento del Gran Colisionador de Hadrones y su ubicación bajo la ciudad de Ginebra, junto al lago Lemán.

Recién iniciado el S. XXI, dos eran los centros que se disputaban el honor de ser los primeros en detectar el esquivo bosón responsable de la masa en el universo. En EEUU está el Fermilab, centro de Física de Altas Energías que utiliza un Tevatrón, el segundo acelerador más potente, capaz de acelerar protones hasta 7 TeV. En Europa el CERN,¹⁸⁶ dependiente de la Organización Europea para la Investigación Nuclear, haciendo uso del acelerador LHC, la más potente máquina aceleradora de protones a nivel mundial, situada a 200 m por debajo de la ciudad de Ginebra. Se trata de un anillo de 27

Km en cuyo interior se ha hecho un vacío casi absoluto. Por procedimientos electromagnéticos los protones son acelerados para, llegado un momento, deflectarlos hacia fuera del bucle para hacerlos impactar contra un blanco de forma parecida a como un pastor acelera con su honda una piedra para lanzarla a gran velocidad.

El 4 de octubre de 2012, el CERN anunció la observación de una nueva partícula, consistente con el bosón de Higgs y el 14 de marzo de 2013 se confirmó con nuevos y más precisos experimentos. Ese mismo año, Peter Higgs y Francois Englert recibieron el Premio Nobel de Física “por el descubrimiento teórico de un mecanismo que contribuye a nuestro entendimiento del origen de la masa de las partículas subatómicas, y que recientemente fue confirmado gracias al descubrimiento de la predicha partícula fundamental por los experimentos ATLAS y CMS en el Colisionador de Hadrones del CERN”. La noticia corrió por los medios de comunicación como arde un reguero de pólvora. Los periodistas acuñaron el apelativo “partícula de Dios” al bosón responsable de la existencia de la masa en el universo. Esta denominación, alejada por completo del modo de ser y hacer científico, no nos gusta nada a los físicos. No obstante, en una obra como esta, el autor se permite la licencia de utilizarla como título de este capítulo.

III.6 EL NUCLEO ATÓMICO

En los últimos años del S. XIX el conocimiento científico acerca de la estructura y composición de la materia se hallaba en un “momento dulce” para que se produjeran avances muy importantes.

¹⁸⁶ Centre Européen des Recherches Nucleaires

Desde hacía más de un siglo los químicos habían recuperado del olvido la idea atomística, los físicos habían reconocido la naturaleza eléctrica de la materia y se había establecido la ley que gobierna las interacciones entre las cargas. En 1897 J. Thompson experimentaba con los rayos catódicos que el alemán J. Plücker había descubierto 29 años antes. Thompson conocía los trabajos que había hecho E. Goldstein diez años antes y sabía que en un tubo de descarga a baja presión, los átomos gaseosos sometidos a una fuerte diferencia de potencial originan una emanación que va hacia el cátodo (potencial positivo) y otra emanación que se dirige hacia el ánodo (potencial negativo). Sus observaciones experimentales le llevaron a la conclusión de que la emanación que se dirige hacia el cátodo, *rayos catódicos*, y la emanación que se dirige hacia el ánodo, *rayos anódicos*, deben su existencia al hecho de que los átomos han de estar formados por cargas eléctricas de uno y otro signo. La fuerte diferencia de potencial, pensaba Thompson, llega a descoyuntar a los átomos en partículas de carga positiva y negativa que se precipitan hacia ambos extremos del tubo de descarga.

Como resultado de sus experiencias, Thompson propuso un modelo de átomo en el que las cargas negativas, los electrones, se hallan incrustados en una masa positiva, de igual manera a como los frutos secos se encuentran en el interior de un *plum-cake*. Este es el nombre con el que se conoce el que fuera primer modelo atómico, que el lector podrá ver en la figura 33 del capítulo I.18

Los últimos años del S. XIX fueron apasionantes en lo que a la ciencia concierne, fue entonces cuando se produjeron descubrimientos y avances que tendrían una enorme repercusión. Pocos meses antes de que Thompson iniciara sus investigaciones, el químico francés Henry Becquerel había descubierto el fenómeno de la radioactividad en las sales de uranio. El modelo atómico de Thompson no convencía, ya que no se explica cómo las cargas negativas pueden estar incrustadas en la masa positiva. Los experimentos en electrostática revelan que las cargas se sitúan en la superficie del cuerpo que las soporta, distribuyéndose homogéneamente, lo más distantes posible unas de otras.

En 1907, un profesor de Física de la universidad de Manchester que llevaba varios años investigando la radioactividad, ideó un experimento con el que pretendía probar en qué forma se distribuyen las cargas en los átomos. El citado profesor, Ernest Rutherford, estaba convencido de que las cargas negativas, más móviles que las positivas, deben situarse en la superficie del átomo tal y como sucede en cualquier cuerpo electrizado. Ahora bien, lo que no tenía claro es si las cargas de uno y otro signo se hallan en un mismo corpúsculo, tal y como había propuesto Thompson o, por el contrario, se hallarían separadas de él.

El experimento que ideó Rutherford es, sin duda, uno de los más bellos e ingeniosos jamás hechos y figura con merecimiento propio entre los más famosos de la historia de la ciencia. La idea consistía en lanzar un haz de partículas alfa, que el propio Rutherford había descubierto y caracterizado, contra una fina lámina de oro. Hacía nueve años que Marie y Pierre Curie habían descubierto dos elementos mucho más radioactivos que el uranio; se trataba del Polonio y del Radio. Rutherford decidió utilizar como fuente de partículas alfa una muestra de radio que colocó en el interior de un pequeño bloque cúbico de plomo al que se había practicado una perforación. De esta forma, las emanaciones de la muestra solo podrían salir por la boca del orificio en direcciones paralelas. Como blanco utilizó "pan de oro"¹⁸⁷; la elección del oro se debe a que este

¹⁸⁷ Lámina finísima de otro que utilizan los escultores para dorar sus obras de arte.

metal es el más maleable de todos y se puede obtener láminas de hasta 0,006 mm de grosor. La obsesión de Rutherford era interponer al paso de las partículas una superficie monoatómica, a ser posible, pero como eso no es factible dada la extrema pequeñez los átomos, se tuvo que contentar con la lámina de pan de oro.

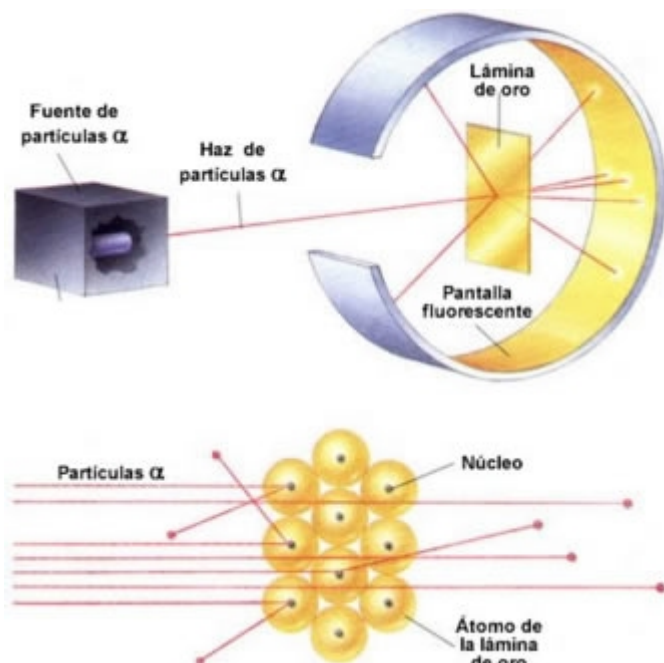


Figura 93 Esquema del experimento de Rutherford.

Como detector dispuso una pantalla de vidrio recubierta con una pintura que contenía sulfuro de zinc, una sustancia que es fluorescente al recibir el impacto de las partículas.

Dispuestas así las cosas, las partículas alfa atravesarían la lámina de oro y serían detectadas en la pantalla. Las escintilaciones eran observadas por medio de un microscopio situado por detrás de la pantalla.

Rutherford pensaba que si el átomo fuera como Thompson lo había descrito, las partículas alfa atravesarían la lámina sin desviación alguna, concentrándose en un punto

situado en línea recta con la fuente. Pero los resultados experimentales fueron muy distintos ya que, si bien un alto porcentaje de las partículas atravesaban la lámina sin deflectarse, un porcentaje significativo de las mismas cambiaba de dirección, e incluso algunas rebotaban hacia atrás, tal como se muestra en la figura 93.

Piense el lector que es un policía aduanero que ha recibido la información de que en un cargamento de pacas de algodón viene un alijo de droga y que la droga se halla encapsulada en ovoides huecos de acero que se encuentran distribuidos en el interior de los paquetes de algodón. Para comprobar la existencia de la droga sin destruir los paquetes, el ingenioso policía decide poner un paquete delante de una tapia perfectamente enfoscada y disparar con su pistola muchas veces, siempre con la misma dirección en diversas zonas del paquete. Si todos los impactos de bala aparecieran en línea con la posición del arma al hacer el disparo, es indicio de la no existencia de droga pero si alguno de los impactos no estuviera en línea sería indicio de que la bala ha chocado contra algún envase de acero y se ha desviado. Pues bien, esta es la forma en que pensó Rutherford al analizar sus datos experimentales.

Rutherford y su equipo hicieron un estudio estadístico sobre los porcentajes de partículas alfa no deflectadas y las que se desviaban, clasificando las escintilaciones observadas por ángulos de deflexión y porcentajes. Llegaron a varias conclusiones, inspirándose para ello en la morfología del sistema solar. Las resumimos en dos puntos:

- La práctica totalidad de la masa atómica se encuentra en el núcleo, en el cual se halla concentrada toda la carga positiva.

- Los electrones se encuentran a una cierta distancia del núcleo describiendo órbitas circulares, de forma que existe un equilibrio de fuerzas entre el efecto centrífugo del giro y la atracción electrostática nuclear.

Concibiendo el átomo como un minúsculo sistema planetario cuyo sol es el núcleo y los planetas son los electrones, se podía explicar el elevado porcentaje de partículas alfa que atravesaban la lámina sin cambiar de dirección. Piénsese que la masa de los electrones es ínfima en comparación a las partículas alfa. Por otro lado, el experimento revelaba otra tremenda realidad, cual es que un material tan denso como el oro¹⁸⁸ (muy superior a la del plomo) está tremendamente vacío, habida cuenta de que la masa está concentrada en los núcleos y entre ellos median separaciones comparables a las que existen entre los planetas del sistema solar. Esta consideración es generalizable a todo tipo de materiales.

Por el contrario, el hecho de que la masa de los núcleos ligeros y pesados sea mayor que la masa de sus nucleones por separado es indicativo de que estos núcleos son inestables. En base a todo lo expuesto, los físicos nucleares utilizan el concepto *energía de enlace nucleón-nucleón* como una medida de estabilidad de los núcleos:

$$E_{n-n} = \frac{\Delta m}{A} \cdot c^2$$

Donde Δm es el defecto o exceso másico y A es el número de nucleones (número másico) y c es la velocidad de la luz. Por motivos obvios la variación másica ha de ser mayor en los elementos pesados que en los ligeros, pero si se divide esa cantidad por el número de nucleones, lo que tenemos es la variación másica por nucleón. En la figura 95 se ve claramente que la energía de enlace entre nucleones es máxima para los elementos intermedios, siendo por tanto los núcleos más estables, en tanto que la estabilidad nuclear desciende notablemente en los núcleos pesados y drásticamente en los ligeros.

Ahora ya tiene el lector en sus manos la explicación de la abundancia de hierro y níquel en el interior magmático de nuestro planeta. También podrá comprender el origen de la energía que se desprende cuando los núcleos de elementos pesados como el uranio o el plutonio se escinden, originando núcleos intermedios, algo que sucede en el interior de los reactores nucleares que generan buena parte de la energía eléctrica que consumimos. Y, finalmente, también el lector podrá atisbar el origen de la enorme energía que se produce en el Sol y en todas las estrellas, merced a la fusión de núcleos ultraligeros como el hidrógeno y el helio dando lugar a elementos de mayor tamaño como el carbono y el litio

III.7 COMPOSICIÓN DEL NÚCLEO ATÓMICO

En el capítulo III.4 vimos que el núcleo de los átomos contiene *protones* y *neutrones*, los primeros están formados por dos *quark U* y uno *D*, teniendo cada uno de ellos una carga de color distinta (rojo, azul y verde). A su vez, los segundos están formados por dos *quark D* y uno *U*, de igual manera el color de cada uno de ellos es diferente. Puesto que los *quark* son *fermiones*, esto es, tienen espín $\frac{1}{2}$, tanto *protones* como *neutrones* son *hadrones* con espín $\frac{1}{2}$.

¹⁸⁸ La densidad del oro puro es 19,32 g.cm⁻³ y la del plomo 11,34 g.cm⁻³

La única diferencia entre ellos es que los protones tienen carga eléctrica positiva y los neutrones no, como resultado de la adición de las cargas de los quarks constituyentes. Hasta aquí, es lo que sabemos a las luces del Modelo Standard de Partículas que ya vimos en el capítulo III.4.

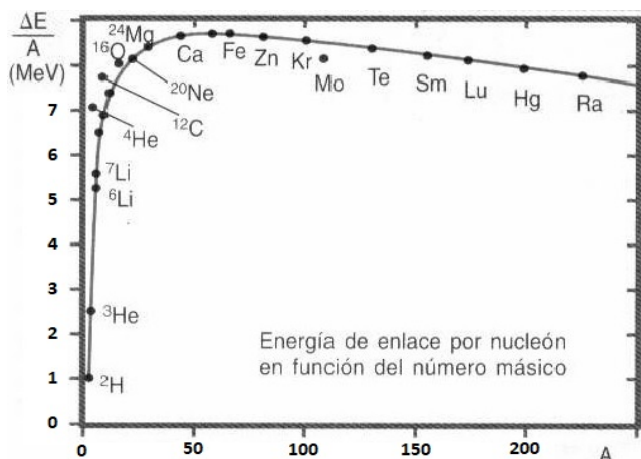


Figura 95 Estabilidad de los núcleos en función de su número másico.

Así pues la carga positiva nuclear es el resultado de la adición de las cargas protónicas y, puesto que la carga del protón es igual que la del electrón, pero de signo contrario, el hecho de que los átomos en su estado elemental sean eléctricamente neutros es indicio inequívoco de que el número de protones nucleares es igual al número de electrones corticales. Por ello, los núcleos pueden ser descritos con dos parámetros: el *Número Atómico* y el *Número Másico*. El primero expresa el número de protones de que consta el núcleo y el segundo es la suma del

número de *protones* y del número de *neutrones* (indistintamente, también se les llama *nucleones*). Así, por ejemplo, el núcleo más complejo existente en la naturaleza es el isótopo pesado del uranio, que se representa como U_{92}^{238} . Ello quiere decir que está compuesto por 92 *protones* y 238 *nucleones*, es decir, $238-92=146$ *neutrones*.

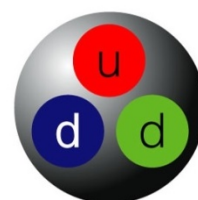
Se llaman *isótopos* a aquellos núcleos que tienen igual número atómico pero diferente número másico. Ello quiere decir que el número de protones es el mismo y difieren tan solo en el número de neutrones, Puesto que el número de electrones de la corteza es igual al número de protones del núcleo se concluye que los isótopos tienen las mismas propiedades químicas, difiriendo tan solo en las propiedades físicas¹⁸⁹. También puede suceder que dos elementos distintos (cuyos números atómicos son diferentes) tengan igual número másico. En ese caso se les llama *isóbaros*. Obviamente, los isóbaros tienen propiedades químicas diferentes, por ser elementos distintos.

Un protón está formado por dos *quark Up* y un *quark Down*

Un neutrón está formado por un *quark Up* y dos *quark Down*



Carga total:
 $+ 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$



Carga total:
 $+ 2/3 - 1/3 - 1/3 = 0$

Figura 94 Composición del protón y del neutrón según el Modelo Standard.

Se conocen isótopos estables de todos los elementos del Sistema Periódico hasta el número atómico 83, concretamente el Bi_{83}^{209} . A partir de ese elemento, los núcleos hoy conocidos son

¹⁸⁹ Una gran mayoría de los elementos químicos se presentan bajo dos o más formas isotópicas, siendo generalmente una de ellas la más abundante. Tal es el caso del U_{92}^{235} y el U_{92}^{238} siendo el primero, mucho más escaso, el empleado como combustible en las centrales nucleares.

radioactivos, es decir, inestables. Abundan también los isóbaros, es decir, elementos distintos que coinciden en su número másico, ahora bien, solo uno de ellos es estable y abundante.

Por otro lado se dan cuatro tendencias en los núcleos atómicos que sugieren la existencia de ciertas leyes que rigen su estructura y estabilidad. La primera tendencia se muestra en el gráfico de la figura 95, en la que se aprecia que, con excepción del hidrógeno, no hay ningún núcleo que posea menos neutrones que protones. Realmente, la relación entre ambos números nunca excede de 1,6 y en los elementos presentes en la naturaleza, dicha relación no excede de 1,2. Todos los que están por encima son artificiales y, obviamente, inestables.

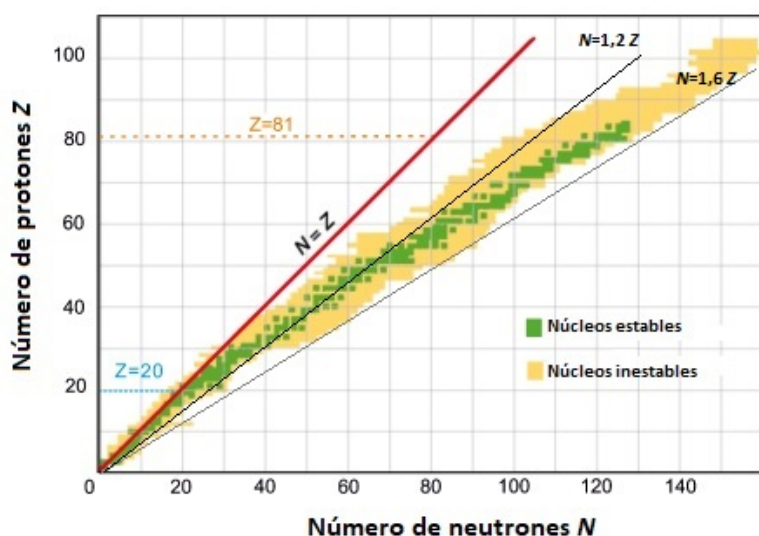


Figura 95 Gráfico de la relación entre el número de protones y el número de neutrones en los núcleos atómicos.

compendio de la segunda y la tercera, y es que los núcleos con números másicos pares son más estables y abundantes que los que tienen número másico impar.

Todo este conjunto de realidades observables sugiere la posibilidad de que los neutrones tengan una función aglutinadora de los protones, lo cual explicaría que los núcleos que ostentan la máxima estabilidad son los que poseen un 15% más de neutrones que de protones, como es el caso de los elementos Fe y Ni¹⁹⁰ (el Co es menos abundante por tener número atómico impar).

Desde que Rutherford demostró que toda la carga positiva del átomo se halla confinada en el ínfimo espacio nuclear, ha sido un verdadero enigma que cargas de igual signo puedan estar agrupadas de forma estable en tan minúsculo volumen ¿quizá la ley de Coulomb no se cumple a distancias tan cortas? o ¿quizá existe una fuerza mucho más poderosa que la repulsión electrostática, que decae rápidamente a distancias superiores al radio nuclear? El moderno *Modelo Standard de Partículas* es, hoy por hoy, el mejor esquema teórico de que se dispone para explicar la existencia de los núcleos, y se decanta por la segunda línea de pensamiento. Vimos en el capítulo III.4 que los protones y neutrones que conforman el núcleo se hallan inmersos en un campo cuántico que llamamos *campo fuerte*. Solo ellos son sensibles a ese campo e interactúan

En segundo lugar, los elementos con carga nuclear par son más abundantes, más estables y más ricos en isótopos que los elementos con número impar de cargas nucleares.

Una tercera tendencia es que los núcleos con número par de neutrones son más abundantes y más estables que los que tienen número neutrónico impar.

Finalmente, hay una cuarta tendencia que realmente es

¹⁹⁰ Esta puede ser la explicación de que el magma interno de nuestro planeta esté formado mayoritariamente por estos dos elementos.

atractivamente entre sí por medio de los *gluones*, las partículas bosónicas intermediarias de la interacción nuclear fuerte.

Ciertamente, las causas últimas de la estabilidad de los núcleos nos son desconocidas y las descripciones teóricas de que disponemos son escasas y muy poco intuitivas. Ello no debe extrañarnos, ya que el microcosmos nuclear está tan lejos de nuestro orden de magnitud como la más lejana de las galaxias. Pero hay un hecho real que viene a aportar luz sobre este difuso asunto:

A mediados del S. XX se conocía con bastante exactitud el valor de la masa en reposo de los protones y los neutrones¹⁹¹ e igualmente se había determinado con precisión suficiente la masa atómica de la práctica totalidad de los elementos. Si los núcleos están formados por un número entero de nucleones (protones y neutrones), la masa nuclear (o atómica) debería ser un múltiplo entero de la masa de las partículas que lo forman, es decir, debería ser un número entero en todos los casos. Pero realmente no es así; las masas atómicas de los elementos tienen decimales, en algunos casos bien distantes de los valores enteros, como es el caso del Cloro (35,5 u.m.a.) o del Cobre (63,54 u.m.a.). La explicación del hecho se encuentra en la existencia de los isótopos. En casi todos los casos, uno de ellos es el más abundante y el que más aporta a la masa atómica medida, pero además está la pequeña contribución ponderada de los restantes isótopos, que son los responsables de la existencia de los decimales. En resumen, *la masa atómica es la media ponderada de los números másicos de todos los isótopos de un elemento*.

Pero la cosa no termina aquí, ya que las masas isotópicas¹⁹² medidas no coinciden con la suma de las masas de los nucleones constituyentes. Para los elementos ligeros (los veinte primeros de la tabla periódica) y para los pesados (por encima del número atómico 180) la masa real de los núcleos es ligeramente superior a la suma de las masas de los nucleones constituyentes, en tanto que, para los elementos intermedios sucede lo contrario, esto es, la masa de los núcleos es ligeramente inferior a la suma de las masas de los nucleones constituyentes. Todo parece indicar que al formarse un núcleo a partir de sus nucleones separados se pierde masa si el núcleo es intermedio y se crea masa si el núcleo es ligero o pesado.

Estos hechos experimentales, enigmáticos de por sí, revelan algo importante a las luces de la Teoría de la Relatividad. Recordemos que en el capítulo III.3 vimos que la masa es una forma más de energía, por consiguiente, cuando se forma un núcleo intermedio a partir de sus nucleones separados, la disminución de masa supone un desprendimiento de energía y sabemos que en todo proceso en el que se desprende energía, el estado final es más estable que el inicial. En nuestro caso podemos concluir que los núcleos intermedios son más estables que sus nucleones separados.

III.8 Y DIJO DIOS: “HÁGANSE LOS ELEMENTOS”

En el capítulo III.2 vimos que la materia bariónica¹⁹³ supone tan solo un escaso 5 % del total del universo, correspondiendo un 25 % a la materia oscura y el 70 % restante a la energía oscura. Se

¹⁹¹ La masa de un nucleón (protón o neutrón) es 1 u.m.a. (unidad de masa atómica).

¹⁹² Se llama masa isotópica a la masa atómica de un isótopo puro.

¹⁹³ Se llama así a la materia formada por bariones, es decir, protones y neutrones (y también, por supuesto, electrones).

supone que ese exiguo cinco por ciento es la materia que conocemos: las masas estelares, el polvo sideral, los planetas y los asteroides. El resto, esa gran mayoría del 95 % nos es prácticamente desconocido, pese a que tenemos pruebas de su existencia. La mayoría de la materia bariónica se encuentra en las estrellas y en las nubes interestelares, como átomos o iones (plasma), sin embargo es posible encontrar otros tipos de materia en ciertos cuerpos astronómicos de alta densidad, como las enanas blancas o las estrellas de neutrones.

El análisis espectral de las luces estelares permite conocer la composición química de los astros merced al reconocimiento de las líneas de los espectros de emisión de los distintos elementos, superpuestas al espectro continuo de esas luces. Recuerde el lector que en la figura 66 del capítulo II.12 se representan los espectros de las luces de diferentes tipos de estrellas en los que aparecen superpuestas las líneas de emisión de algunos elementos. Por este procedimiento se ha llegado a establecer un ranking de abundancia de los distintos átomos en el universo. De todos ellos el hidrógeno es, con diferencia, el más abundante, en segundo lugar está el helio y en tercer lugar el oxígeno.

En la tabla adjunta se relacionan los diez elementos más abundantes en nuestra galaxia. En ella se aprecia que el hidrógeno es el más abundante seguido del helio. Estos dos son los elementos más simples y su gran abundancia concuerda con el *Modelo Cosmológico Standard* basado en la aceptación del *Big-Bang* primigenio, la existencia de la *radiación de fondo de microondas*, la estructura del universo a gran escala y la expansión del mismo. El tercer elemento en abundancia es el oxígeno y no los elementos de números atómicos 3, 4, 5, 6 y 7 como cupiera esperar. Sorprende, en principio, que el carbono, con número atómico $Z=6$, es menos abundante que el oxígeno, e igualmente sucede con el nitrógeno ($Z=7$) unas diez veces menos abundante que el oxígeno. Más razonable parece que elementos más pesados y complejos como el silicio, el magnesio y el azufre sean menos abundantes. El caso del hierro ($Z=26$) es singular, pero se explica su “anormalmente” elevada abundancia en base a tener en cuenta la gran estabilidad de su núcleo (ver la figura 95 en el capítulo III.7).

ELEMENTO	NÚMERO ATÓMICO	ABUNDANCIA PORCENTUAL
Hidrógeno	1	73,900
Helio	2	24,000
Oxígeno	8	1,040
Carbono	6	0,460
Neón	10	0,134
Hierro	26	0,109
Nitrógeno	7	0,096
Silicio	14	0,065
Magnesio	12	0,058
Azufre	16	0,044

La presencia del hidrógeno y el helio en el universo se explica en el modelo de la *Nucleogénesis Primigenia* acaecida entre los 100 y los 300 segundos después de que se produjera la Gran Explosión. En ese brevísimo lapso de tiempo, la densidad y la temperatura del naciente universo habrían descendido lo suficiente como para que se produjeran las reacciones de *fusión nuclear* que permitirían que los núcleos de hidrógeno se unieran dos a dos originando primero núcleos de deuterio, posteriormente tritio y finalmente núcleos de helio. Por regla general, las reacciones de

fusión son fuertemente exotérmicas; basta con observar de nuevo la figura 95 del capítulo anterior para darse cuenta del proceso de estabilización que supone el convertir núcleos ligeros (H y He) en otros más pesados como el oxígeno.

La brevedad del proceso de la *Nucleogénesis Primigenia*, tan solo tres escasos minutos, es importante ya que en ese breve tiempo no es posible que se formaran núcleos por encima del berilio ($Z=4$), pero sí isótopos pesados del hidrógeno, como el deuterio y el tritio¹⁹⁴, esenciales en las reacciones de fusión del hidrógeno. También se formaron pequeñas cantidades de litio-7. En el tiempo que precedió, la denominada *Era Leptónica*, de tan solo 100 s, la temperatura era demasiado elevada como para que dieran las fusiones nucleares; en esos momentos todo era una sopa leptónica en la que quarks, electrones y neutrinos se recombinaban para originar protones y neutrones.

En la breve era de la *Nucleogénesis Primigenia* se originó la gran mayoría del hidrógeno y el helio existentes en el universo. Las nubes de ambos gases perdían temperatura y densidad a medida que se expansionaban. Eran como grumos en la gran sopa cósmica en los que llegó un momento en el que la gravedad pudo manifestar sus efectos atractivos aglutinando a las grandes masas gaseosas. Pasados unos trescientos mil años, en la llamada *Era de la recombinación*, los electrones pudieron asociarse a los núcleos, constituyendo así a los átomos de hidrógeno. Se inició entonces un proceso de colapso en el cual, las otrora nubes cósmicas se constituyeron en *protoestrellas*, adoptando forma esférica. El colapso continuaba, aumentando la temperatura hasta que llegó un momento en el que los núcleos de H y He fueron capaces de iniciar reacciones de fusión.

Para entonces habían pasado ya mil millones de años desde el Big-Bang, acababan de formarse las primeras estrellas y en su interior se habían encendido los hornos estelares en los que se cocinarían los núcleos de los elementos medios hasta el hierro y el níquel en un proceso llamado *Nucleogénesis Estelar*.

Si nos fijamos de nuevo en la Figura 95 del capítulo III.7 veremos que, en conjunto, estos procesos son exotérmicos, ya que la energía de enlace nucleón-nucleón se incrementa hasta llegar al hierro. Así pues, el calor de las fusiones nucleares mantenía la temperatura necesaria para que prosiguiera la génesis de núcleos más complejos y mantenía un equilibrio con las fuerzas gravitatorias.

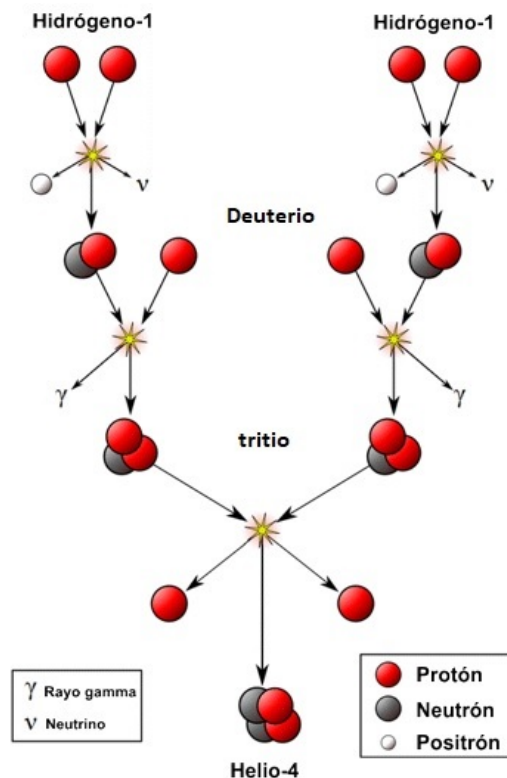


Figura 96 Esquema de la Nucleosíntesis acontecida en los tres primeros minutos de existencia del Universo.

¹⁹⁴ El deuterio es un núcleo de hidrógeno que, además, contiene un neutrón por lo que su número másico es 2. El tritio es el isótopo superpesado del hidrógeno, contiene dos neutrones en su núcleo.

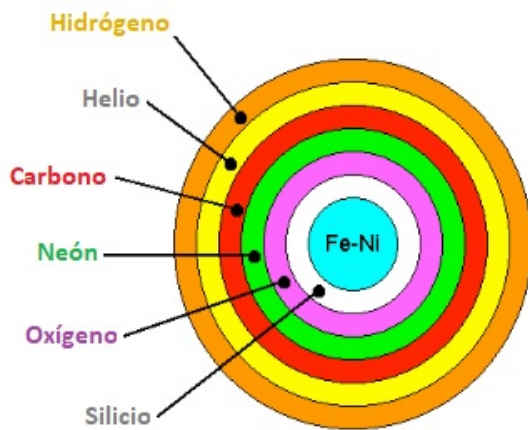


Figura 97 Los núcleos formados en la Nucleosíntesis Estelar se ordenan por densidades.

de la *Nucleosíntesis Estelar*. En este proceso un protón se fusiona con un núcleo de carbono-12 para producir nitrógeno-13 inestable y un fotón. El nitrógeno-13 sufre una desintegración beta para convertirse en carbono-13 liberando un positrón y un neutrino. El carbono-13 captura otro protón para formar nitrógeno-14 (y un fotón) que se fusiona con otro protón para formar oxígeno-15 (y un fotón). Después el oxígeno-15 sufre una desintegración beta positiva para dar nitrógeno-14, un positrón y un neutrino. Finalmente el nitrógeno-15 se fusiona con un protón para dividirse inmediatamente formando un núcleo de carbono-12 y otro de helio-4. El núcleo de carbono-12 así creado puede empezar otro nuevo ciclo. Como resultado del ciclo, se han reunido cuatro núcleos de hidrógeno para formar un núcleo de helio y se ha desprendido energía en forma de radiación γ , neutrinos y positrones.

El carbono se origina a partir del helio a través de un proceso propuesto por el astrónomo británico Fred Hoyle¹⁹⁶ conocido como *Triple alfa*. Este es un proceso en dos etapas donde primero se fusionan dos núcleos de helio (partículas alfa) para formar berilio-8 (^8Be). En el segundo paso, otra partícula alfa se incorpora al ^8Be , dando lugar a un núcleo de carbono-12 (^{12}C).

A lo largo de la vida de las estrellas, los núcleos se disponen según la gravedad, los más pesados debajo y los más ligeros arriba. De esta forma, las diferentes reacciones de fusión se disponen en capas concéntricas, según muestra la figura 97.

En el interior de las estrellas se sigue produciendo helio a partir del hidrógeno en un proceso en el que el carbono actúa como *catalizador*¹⁹⁵ en un mecanismo denominado *ciclo CNO* en el que intervienen el carbono, el nitrógeno y el oxígeno. Fue propuesto en 1938 por el físico norteamericano Hans Bethe, quien obtuvo el premio Nobel de Física de 1967 por su teoría

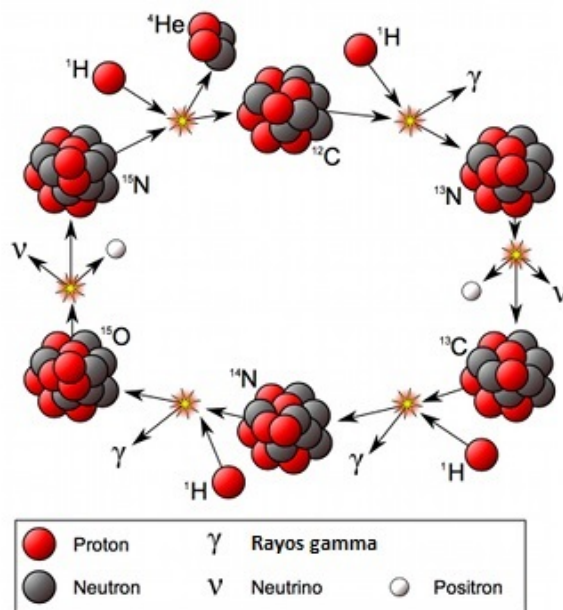


Figura 98 Esquema del ciclo CNO

¹⁹⁵ Se llama *catalizador* a una sustancia que interviene en una reacción sin consumirse, es decir, interviene en ella y se transforma, reapareciendo al final. Su presencia favorece el desarrollo del proceso.

¹⁹⁶ Sir Fred Hoyle (1915-2001), además de científico fue un gran divulgador. Mostró beligerancia con la Teoría de Edwin Hubble, acuñando el nombre "Big-Bang" para ridiculizar su teoría. Con el paso del tiempo, esa denominación, en principio satírica, ha pasado a ser el icono de la más grande teoría cosmológica actual.

Cuando la estrella se aproxima al final de su vida, el hidrógeno y el helio están muy agotados, las fusiones nucleares desprenden menos energía y la gravedad impone su ley contrayendo la estrella. Su masa se hace más densa, la temperatura se eleva por compresión y las fusiones nucleares interesan ahora a núcleos más pesados como carbono, oxígeno, neón y silicio.

La figura 97 representa la estructura de una estrella masiva en el final de su vida. En ella se representan las fases avanzadas de "quemado" de los elementos, la más interna corresponde a la fusión del silicio que origina los núcleos más estables: hierro y níquel. No todas las estrellas pueden crear la lista completa de elementos. Cuanto mayor es la estrella, más alta es la temperatura que puede alcanzar el interior y es más probable que se puedan formar elementos más pesados.

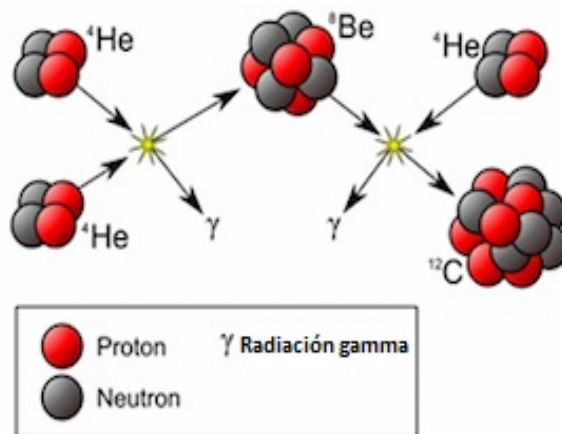
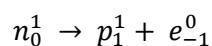


Figura 99 Nucleosíntesis del carbono.

En aquellas estrellas con menos de 8 veces la masa del Sol, sólo se quema hidrógeno y helio porque el corazón de la estrella nunca alcanza la temperatura y densidad necesarias para encender otra fase de quemado. Pero en las estrellas ocho veces más pesadas que el Sol, los procesos nucleares pueden continuar mucho más tiempo, hasta el quemado de silicio, dejando un "corazón" de hierro. Cuando esta fase de quemado termina, la estrella no puede soportar su propio peso y las capas exteriores caen rápidamente hacia el interior de la estrella, la compresión eleva la temperatura provocando la explosión característica de una *supernova tipo II*, que deja como remanente una estrella de neutrones.

Las explosiones de las supernovas son las responsables de la existencia de elementos más pesados que el hierro. Ya hemos visto que en el interior de las estrellas se pueden formar elementos ligeros y medios, siendo el hierro y el níquel el tope. Basta con que nos fijemos de nuevo en la figura 95 para darnos cuenta de que no es posible la generación de elementos más allá del hierro y el níquel por fusión de núcleos más ligeros.

En el breve tiempo que dura la explosión de una supernova se produce gran cantidad de neutrones que pueden ser absorbidos por los núcleos medios; no olvidemos que por carecer de carga, los neutrones no son repelidos por los núcleos. De esta forma se producen isótopos más pesados que, de nuevo, pueden captar más neutrones. Ello va acompañado de desintegraciones β en las que los neutrones se convierten en protones:



Las capturas neutrónicas y las desintegraciones β continúan mientras se van formando núcleos más y más pesados con mayores números atómicos.

Resumiendo, el hidrógeno se formó en un brevísimo tiempo tras la gran explosión (Nucleogénesis primigenia), las nubes de hidrógeno se aglutinaron formando estrellas en cuyo interior el

hidrógeno se fusionaba originando helio. A lo largo de su vida, las estrellas originan lentamente elementos medios por procesos de fusión nuclear (Nucleogénesis estelar) hasta llegar a producir hierro y níquel al final de su vida. Posteriormente, en las estrellas de gran tamaño, se produce el colapso que finaliza con la explosión supernova y es entonces cuando se generan los elementos más pesados que el hierro y el níquel -*Nucleogénesis explosiva*- Todos ellos se dispersan, unos, ya fríos, se convierten en planetas y asteroides y otros se aglutinan de nuevo para formar nuevas masas estelares.

III.9 ÁTOMOS

Cuenta la tradición que, cierto día estaban Anaxágoras, Protágoras y Demócrito en la escuela filosófica que Leucipo de Mileto tenía en la ciudad tracia de Abdera. Los tres personajes discutían sobre cuestiones relativas al razonamiento, cuando Demócrito exclamó: “Preferiría comprender una sola causa que ser rey de Persia”. No cabe duda de que el fundador de la teoría atomística era un impenitente curioso, con un afán desmedido por desentrañar los secretos que tan celosamente guarda la naturaleza. ¿Qué no habría dado el ilustre griego por saber lo que hoy conocemos acerca de la estructura íntima de la materia? Con toda seguridad, de no ser por los veintitrés siglos que les separan, el risueño Demócrito¹⁹⁷ habría colaborado feliz en el equipo de investigación de E. Rutherford en aquellos años fecundos en que experimentalmente se demostró que los átomos tienen partes, que su masa ocupa una ínfima porción de su volumen y que realmente, la materia está tan vacía como lo está el espacio interestelar.

Hemos dedicado los dos capítulos precedentes al conocimiento del núcleo, la parte más interna del átomo. Ahora toca conocer la parte externa, la corteza, para meternos de lleno, querido lector, en el campo de la Química.

Los átomos de los elementos en su estado fundamental¹⁹⁸ no exhiben carga eléctrica pese a estar formados por cargas de ambos signos. Por tanto se hace obligado pensar que el número de electrones presentes en su corteza es exactamente igual que el número de protones existentes en su núcleo. Puede suceder que un átomo pierda algún electrón o incorpore alguno. Esto sucede en las reacciones químicas o bajo condiciones físicas drásticas como, por ejemplo, una fuerte diferencia de potencial. En ambos casos el átomo se convierte en un *ión*. Hay iones positivos que llamamos *cationes* e iones negativos denominados *aniones*¹⁹⁹.

La corteza que recubre el núcleo atómico es un espacio inmaterial en el que se sitúan los electrones, siguiendo unas reglas muy estrictas que se mencionaron en el capítulo II.14. La corteza atómica está constituida por varias capas que, en principio, podríamos considerar concéntricas, cuya complejidad aumenta desde la más interna hasta la más externa. Por otro lado, las

¹⁹⁷ Demócrito fue conocido en su época por su carácter extravagante y extrovertido.

¹⁹⁸ Es el caso de los elementos puros, no combinados, a 25 C de temperatura y a la presión de 1 atmósfera.

¹⁹⁹ Las tres denominaciones tienen su origen en el comportamiento de los átomos y moléculas cargadas en los procesos electrolíticos. El término *ión* significa en griego “el que va”, refiriéndose al hecho de que los átomos y moléculas con carga se mueven en el seno de un campo eléctrico. *Anión* significa “el ión que se dirige al ánodo”, el polo positivo, y *cación* significa “el ión que se dirige hacia el cátodo, el polo negativo.

mencionadas *capas* están formadas por *subcapas* (o *niveles*) y estas, a su vez, agrupan *orbitales*²⁰⁰, zonas del espacio circundante al núcleo en donde se halla el electrón, sin que sea posible determinar en ningún momento su situación exacta.

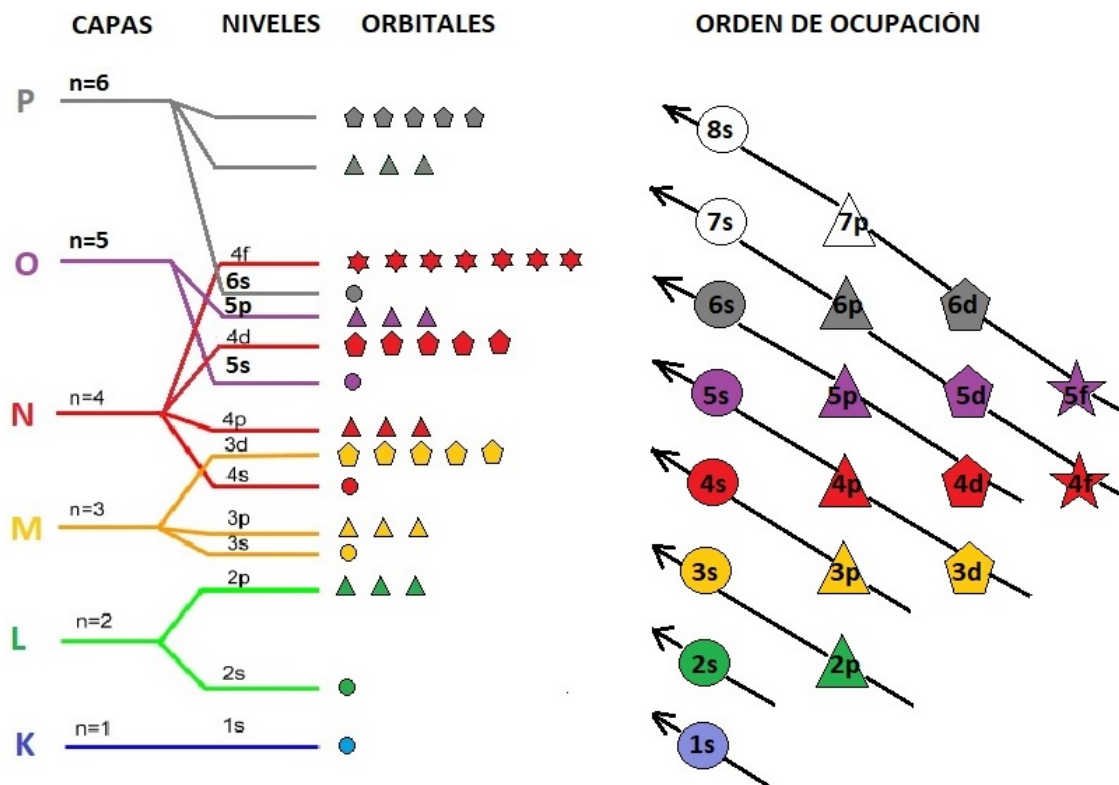


Figura 100 A la izquierda, diagrama de las capas electrónicas mostrando los niveles de que se compone cada una (cada capa se representa por un color) y los orbitales de que consta cada nivel (se utilizan figuras geométricas para designar cada tipo de orbital). A la derecha se representa el orden de ocupación de los niveles por orden de su energía creciente (Diagrama de Moeller).

Las *capas* se designan, desde la más interna hasta la más externa, **K, L, M, N, O, P** ... y, como hemos dicho antes, aumentan progresivamente su complejidad. La Figura 96 esquematiza la descripción de la corteza electrónica que haremos a continuación, con objeto de que le resulte al lector más fácil su comprensión. Así, la capa K (en color azul), la más interna, tiene un único nivel constituido por un único orbital *1s* (representado por un pequeño círculo) de geometría esférica. La segunda, la capa L (en color verde), tiene dos niveles, el *2s* y el *2p*. El primero tiene un único orbital esférico *s* y tres orbitales *p* (representados por tres triángulos). La tercera, la capa M (en color amarillo) tiene tres niveles, el *3s*, el *3p* y el *3d*, el primero tiene un solo orbital *s* de geometría esférica, el segundo consta de tres orbitales y el tercero tiene cinco orbitales (representados por pentágonos). La cuarta, la capa N (color rojo) tiene cuatro niveles, el primero consta de un solo orbital *4s*, el segundo consta de tres orbitales *4p*, el tercero tiene cinco orbitales *4d* y el cuarto nivel consta de siete orbitales *4f* (representados por estrellas). Por encima está la quinta, la capa O con cinco niveles *s, p, d, f* y *g* (no se representa el último) y, finalmente, la sexta, la capa P tiene seis niveles, de los cuales solo se representan los tres primeros.

²⁰⁰ En los primeros años del S. XX se pensó que los electrones giran en torno al núcleo describiendo órbitas, como lo hacen los planetas en torno al Sol. Con la irrupción de la Teoría Cuántica y la asunción del Principio de Incertidumbre hubo que desechar el concepto de *órbita* y sustituirlo por el de *orbital*.

Se ha de insistir en que la ocupación de los orbitales por parte de los electrones sigue tres reglas estrictas que se mencionaron en el capítulo II.14 y que ahora retomaremos.

- Principio de mínima energía: *Los electrones se sitúan en los orbitales de la mínima energía posible.* Como todo sistema natural, el átomo tiende a evolucionar de forma espontánea hacia aquellos estados en los que su energía sea mínima²⁰¹.
- Principio de máxima multiplicidad: *Cuando los electrones ocupan un mismo nivel, lo hacen ocupando el máximo número posible de orbitales*²⁰².
- Principio de Exclusión: *Cuando dos electrones ocupan un mismo orbital lo hacen con sus spines opuestos.*

Con estos tres principios, conocida la estructura de capas y niveles, sería relativamente fácil saber cómo es la corteza electrónica de los átomos, pero hay una circunstancia que viene a complicarlo todo: El hecho es que las capas K, L, M, N... tienen complejidad creciente. Si las imagináramos como familias de orbitales de distintos niveles podríamos pensar grosso modo que son como nubes de bordes indefinidos, que se confunden unas con otras, tanto más cuanto más externas y complejas son. En la figura 100 se detalla la “interpenetración” de unas capas con otras; podemos ver que la tercera capa (M) se confunde con la cuarta (N) de forma que el nivel $3d$ es más energético que el $4s$ y, a su vez, la cuarta capa (N) se confunde con la quinta (O) e incluso con la sexta (P), de forma que el orden de energía creciente de los niveles de las tres capas es $5s$, $4d$, $5p$, $6s$ y $4f$. Así pues, el orden de ocupación de orbitales no es el que corresponde a nuestro sentido de la lógica sino el que de forma tajante prescriben los tres principios arriba expuestos. Dicho orden de ocupación está esquematizado en el diagrama derecho de la figura 100.

El capítulo II.3 llevaba por título “La flecha del tiempo” y en él considerábamos dos tendencias universales que definen el sentido espontáneo de los acontecimientos naturales, los cuales se resumen en dos enunciados: *Principio de la evolución hacia los estados de menor contenido energético* y el *Principio de la evolución hacia el mayor caos*.

En los párrafos que siguen, el lector podrá percatarse de que los átomos son sistemas naturales que no escapan al cumplimiento de estas dos leyes universales y que los principios de ocupación de los orbitales por parte de los electrones no son sino corolarios de estos últimos. Así, el *Principio de mínima energía es consecuencia obvia del Principio de evolución hacia los estados de mínimo contenido energético* y los *Principios de máxima multiplicidad y de exclusión* son, sin paliativos, consecuencia directa del *Principio de la evolución hacia el mayor caos*.

El número máximo de electrones que puede albergar una capa depende de su complejidad. Teniendo en cuenta que en un orbital puede haber, como máximo, dos electrones con sus spines opuestos, se deduce de la figura 97 que la capa K albergará como máximo 2 electrones, la capa L alojará un máximo de 8 electrones, la M no puede contener más de 18, y así sucesivamente. La capacidad de las capas viene, por tanto, definida por la expresión:

²⁰¹ Por este mismo motivo los ríos fluyen de las montañas hacia el mar y no al revés y nuestro cuerpo ingiere proteínas, carbohidratos y lípidos, todos ellos ricos en energía y se desembaraza del dióxido de carbono y el agua, sustancias muy estables y pobres en energía.

²⁰² Podríamos permitirnos la licencia de pensar que los electrones exhiben un comportamiento casi humano: Si todos los espectadores que asisten a una proyección de cine van solos y la sala está a un 30% de ocupación, los espectadores tienden espontáneamente a situarse lo más alejados posible unos de otros.

$$N^{\circ} \text{ máx. electrones} = 2n^2$$

Siendo n el número cuántico principal, indicativo de la capa.

La tabla adjunta detalla el número máximo de electrones que pueden contener las cinco primeras capas y sus correspondientes niveles.

capas	K		L			M			N				O				
niveles	s	s	p	s	p	d	s	p	d	f	s	p	d	f	g		
Nº máx e ⁻	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	14	18		
	2		8			18			32				50				

Los electrones de un mismo átomo se encuentran en torno al núcleo y, por supuesto, interactúan entre sí. Pudiéramos pensar que se repelen, debido a que todos ellos tienen la misma carga negativa, y ciertamente así debe ser, pero no debemos olvidar que nos hallamos en el inframundo dimensional, donde son las leyes cuánticas las que gobiernan los procesos y no las leyes macroscópicas de nuestro orden de magnitud. Por tanto no debemos dejarnos llevar por nuestra intuición, que de poco vale en el mundo de lo ultrapequeño.

El hecho de que los gases nobles tengan una configuración electrónica con todas sus capas completas y exhiban la inercia química que les caracteriza, lleva a la conclusión de que las capas completas son estructuras muy estables. Ello está refrendado por el hecho de que los elementos adyacentes a los gases nobles en el Sistema Periódico (ver la figura 27 en el capítulo I.15) son muy reactivos, es decir, tienen una fuerte tendencia a ganar o perder un electrón (según sea el caso) para adquirir la configuración de un gas noble.

Por otro lado, el comportamiento químico de los elementos intermedios en el Sistema Periódico revela que los niveles completos son también estructuras estables (aunque menos que las capas) y ello determina, por ejemplo, que un elemento como el zinc se comporte de forma parecida al calcio. Finalmente, un nivel ocupado en un 50% es también una estructura de cierta estabilidad, menor, por supuesto, que una capa completa o un nivel completo.

Resumiendo, en este capítulo hemos visto que la nebulosa electrónica que rodea al núcleo es compleja y tiene una estructura que responde a un conjunto de reglas bien definidas e inamovibles y atisbamos que la estructura electrónica de los átomos es la responsable de que estos se unan formando estructuras superiores que llamamos *moléculas*.

III.10 ENLACES QUÍMICOS Y MOLÉCULAS

El hecho de que los electrones se encuentren a enorme distancia del núcleo en comparación con el tamaño de este último, determina que los electrones están sujetos a la atracción electromagnética del núcleo y no a la interacción fuerte que mantiene a los nucleones confinados en el reducidísimo recinto nuclear. Puesto que la interacción electromagnética es mucho menos intensa que las fuerzas nucleares, este es el motivo por el que los electrones más externos de la corteza de un átomo son susceptibles, bajo ciertas condiciones, de escapar de la influencia nuclear. A ello se ha de añadir que los electrones de la capa más externa se ven repelidos por los electrones

de las capas más internas, es decir, la atracción nuclear sobre los electrones externos está apantallada por la repulsión de las capas internas. La combinación de ambos efectos y la estabilidad que tienen las capas y niveles completos es la causa de la existencia de las moléculas y por tanto, de la gran diversidad de sustancias existentes en el cosmos.

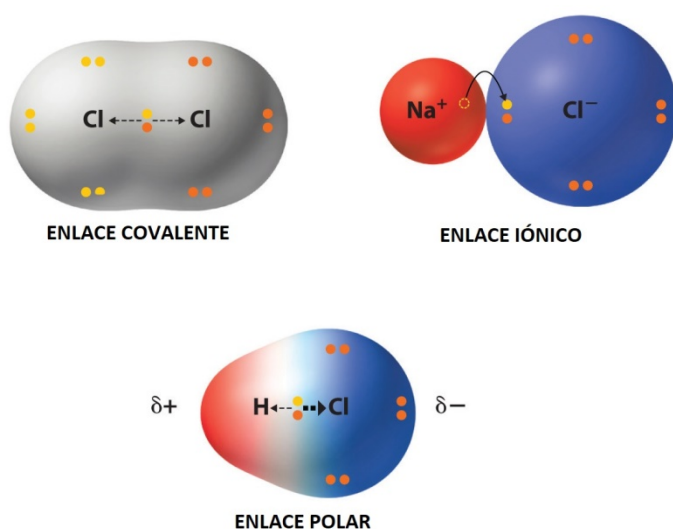


Figura 101 Esquema de los tres tipos de enlaces entre átomos.

Ya hemos dicho que los átomos, como cualquier otro sistema natural, tienden a evolucionar espontáneamente hacia los estados más estables, y lo hacen ganando, perdiendo o compartiendo electrones para llegar a adquirir la configuración cortical del gas noble más próximo en el Sistema Periódico. Cómo lo hagan es algo que depende de cada clase de átomo.

Supongamos que tenemos frente a frente un átomo de sodio y otro de cloro (Figura 101) el primero de ellos es un alcalino que se encuentra en la

columna izquierda del Sistema Periódico (ver la figura 1.27) y tiene un único electrón en su capa externa (las más internas están completas) el cual está fuertemente pantallado por las capas inferiores. El otro es un átomo de cloro, situado en el lado derecho de la Tabla Periódica, justo un lugar antes de un gas noble, es decir está a falta de un electrón para adquirir una estructura cortical estable. De forma espontánea, el electrón solitario del sodio pasa a la capa externa del cloro, de esta manera ambos átomos adquieren la configuración estable del gas noble adjunto (el argón). Puesto que en origen ambos átomos tienen las cargas nuclear y cortical igualadas, el resultado es que tanto el sodio como el cloro se ionizan adquiriendo carga positiva el primero y negativa el segundo. Finalmente, ambos iones se atraen. A esta forma de unión se le llama *enlace iónico*.

Supongamos ahora que tenemos dos átomos de cloro frente a frente, ambos tienen la misma apetencia de electrones para estabilizar así su estructura cortical. De forma espontánea se unen compartiendo dos electrones y de esta manera, merced a su asociación, adquieren la estructura del gas noble vecino (ver la figura 101). A esta forma de unión se le llama *enlace covalente*.

Finalmente consideremos el caso de un átomo de hidrógeno puesto frente a uno de cloro. El primero tiene un único electrón en su capa K y su tendencia es a conseguir un segundo electrón, para así adquirir la configuración estable del neón. En cuanto al átomo de cloro, ya sabemos cómo es y cuál es su tendencia. De forma espontánea, estos dos átomos se unen compartiendo dos electrones, ahora bien, en este caso los dos átomos son distintos, uno de ellos tiene más apetencia de electrones que el otro, en el caso que nos ocupa es el cloro. El resultado es una asociación por *enlace polar*, una forma de unión a medio camino entre el enlace covalente y el enlace iónico.

Así pues, generalizando, no hay más que un tipo de enlace, determinado por la tendencia de los átomos a adquirir una estructura cortical estable: una capa completa, un nivel completo o un nivel semicompleto. Los átomos se unen merced a la puesta en juego de los electrones más externos,

llamados *electrones de valencia*²⁰³. Realmente, los enlaces iónico y covalente no son sino casos extremos del enlace polar. En el primer caso el par electrónico de enlace es acaparado al cien por cien por el elemento fuertemente electronegativo y en el caso del enlace covalente, el par electrónico es compartido por los dos átomos al igual.

EL PROBLEMA DEL FERRETERO.

Con objeto de que los lectores menos versados en química capten la idea de *mol*, se propone el siguiente problema:

Un ferretero vende tornillería al por mayor a profesionales de la mecánica. Tiene a la venta tornillos de todo tipo, los hay pequeños, de 1g y también grandes, de 10 g y, por supuesto, muchos otros intermedios de 2, 3, 4... g. Dado que los vende al por mayor, no le resulta práctico contar, tornillo a tornillo, los que ha de incluir en un determinado pedido. Lo práctico para él es suministrar los tornillos en envases de mil unidades. De esta forma él puede manejar cómodamente cantidades muy grandes de tornillos sin más que contar unos pocos paquetes de mil unidades.

Además la idea tiene otra ventaja. Puesto que la masa de los tornillos se mide en gramos y la masa de los paquetes se mide en Kg, resulta que el número que expresa la masa de un tornillo y la masa del paquete que lo contiene coinciden, ya que el Kg es mil veces más grande que el g y el paquete contiene igual número de unidades (tornillos).

Es importante destacar que las sustancias formadas por enlaces iónicos, tales como el NaCl (sal común), el LiF o el KBr, no forman moléculas. Piense el lector que, por pequeña que sea la cantidad, son muchos trillones de iones de uno y otro signo los que se forman, los cuales se ordenan tridimensionalmente conformando un sólido iónico. La idea de la existencia de moléculas como entidades supratómicas ha de reservarse a las restantes sustancias no iónicas.

Ahora debemos pensar de forma menos simplista y considerar que, por pequeña que sea la muestra que se maneje, el número de átomos es elevadísimo. Los químicos utilizan un ingenioso concepto para cuantificar las sustancias, cuyas partículas son extremadamente pequeñas e inaccesibles desde nuestro orden de magnitud y poder establecer las proporciones entre ellas en nuestra realidad dimensional. Dicho concepto es el *mol*²⁰⁴.

La idea de *mol* permite manejar cantidades macroscópicas de sustancias en igual proporción a como estas se combinan a nivel atómico. La clave es establecer un número fijo de partículas de igual forma a como hace el ferretero del ejemplo anterior. En el caso de la química, los “paquetes” de partículas contienen siempre el astronómico número $6,022 \cdot 10^{23}$, llamado *número de Avogadro* en honor al creador de la moderna teoría atomística. A su vez, la masa de las moléculas se mide en *unidades de masa atómica* (uma), que son, y aquí es donde está la genialidad, $6,022 \cdot 10^{23}$ veces más pequeñas que el gramo. Como quiera que en química, la masa de las sustancias se mide en gramos, resulta que la masa de un mol de cualquier sustancia coincide numéricamente con la masa de cada una de sus partículas. Así, por ejemplo, si la masa atómica del sodio es 23 uma, en 23 g de

²⁰³ El término *valencia* deriva de la voz latina “*valentia*”=poder, capacidad y se refiere a la capacidad que un elemento tiene para combinarse con otros.

²⁰⁴ El término *mol* fue introducido por Wilhelm Ostwald en 1886, quien lo tomó del latín *Mole* que significa pila, montón.

sodio (un mol) habrá $6,022 \cdot 10^{23}$ átomos de ese elemento y por igual motivo, si la masa molecular del agua es 18 uma, en 18 g de agua habrá un número de Avogadro de moléculas.

III.11 UNA ESTRUCTURA PROVIDENCIAL: LA MOLÉCULA DE AGUA

El 11 de septiembre de 2019, la BBC News Mundo publicó una noticia científica con el siguiente titular: **“Agua en el planeta K2-18b: el “alucinante” hallazgo de una supertierra que podría alojar vida extraterrestre”**. De esta manera, el medio informativo se hacía eco del descubrimiento de agua en la atmósfera de un planeta que orbita alrededor de una estrella distante. Se llama K2-18b, es un exoplaneta (está fuera de nuestro sistema solar) y este hallazgo lo convierte en un candidato destacado en la búsqueda de vida extraterrestre. El K2-18b está a 111 años luz (unos 1.000 billones de kilómetros desde la Tierra) y había sido descubierto por medio del telescopio espacial *Hubble*, entre 2015 y 2017 junto con otros exoplanetas.

Hace pocos años, un grupo de investigadores de la Universidad de Northwestern idearon una herramienta para diagnosticar qué condiciones hacen que un planeta sea apto para sustentar vida, y como criterio principal establecieron el nivel de radiación que este recibe de la estrella en la que orbita. Si este nivel es muy elevado, bien porque la estrella es muy emisiva o bien porque el planeta está muy próximo a la estrella, la intensa radiación impide la vida y además elimina el agua por evaporación. Por el contrario, si el nivel de radiación recibido es demasiado bajo podrá haber agua líquida en su superficie pero la atmósfera gaseosa del planeta apenas contendrá ozono que filtre los rayos UV y la radiación que llegase a su superficie impediría la vida.

Por otro lado, los científicos están de acuerdo en que, para tener la posibilidad de albergar una vida compleja, los planetas necesitan ser capaces de mantener agua líquida. Si un planeta está demasiado cerca de su estrella, entonces el agua se evapora por completo y si está demasiado lejos de ella, entonces el agua se congelará, la atmósfera apenas contendrá vapor de agua y la ausencia de efecto invernadero será incapaz de mantener la superficie lo suficientemente caliente para la vida. Vemos pues, que el agua es esencial para la vida, y la evidencia es tal que la obsesión de los científicos que escudriñan el universo es la búsqueda de agua líquida. Por tanto, parece necesario que analicemos las razones por las que el agua es esencial para la vida.

III.11.1 EL ORIGEN DEL AGUA EN LA TIERRA

Empezaremos recordando que en el capítulo III.8 vimos que el hidrógeno y el oxígeno son, junto con el helio, los elementos más abundantes en el universo. Por cada parte de oxígeno hay 74 partes de hidrógeno. Vimos también en ese capítulo que cuando las estrellas envejecen y mueren por haber consumido su combustible nuclear, lo hacen de dos formas: Si son pequeñas se colapsan y enfrían convirtiéndose en estrellas de neutrones y si son grandes, el colapso sobre sí mismas origina una explosión supernova que dispersa todo su material. Este material contiene elementos medios hasta el hierro, entre ellos el oxígeno. Los materiales dispersados por la explosión se mezclan con el gas interestelar, formado mayoritariamente por hidrógeno y polvo cósmico.

Así pues, ya tenemos frente a frente al hidrógeno y al oxígeno, los componentes del agua. Las primeras moléculas de agua probablemente se formaron en regiones que los astrónomos llaman *nubes*, donde la densidad del gas es mayor que el valor promedio en el espacio. La unión entre el

hidrógeno y el oxígeno que lleva a la formación de las moléculas de agua, es un proceso exotérmico, más en concreto, por cada *mol* de agua (18 g de agua, o lo que es lo mismo, $6,022 \cdot 10^{23}$ moléculas) se desprenden 242 KJ si el agua queda en forma gaseosa y 285 KJ si el agua queda en estado líquido. Esta es una energía bastante grande y, para que el proceso se dé con intensidad, se requiere la presencia de algún elemento que absorba ese calor, y ese elemento no es otro que el polvo interestelar, formado por una infinidad de micropartículas sólidas²⁰⁵, “cenizas estelares”. Las partículas de polvo cósmico actúan también como adsorbentes de las moléculas²⁰⁶ originadas en las reacciones que tienen lugar en el seno de las nubes, entre ellas las del agua. Así pues, esas pequeñas moléculas se aglutinan adhiriéndose a la superficie de las partículas cósmicas.

Nuestro planeta, junto con el Sol y el resto de los que forman nuestro sistema solar, se formaron hace unos 4.600 millones de años, después de que una gran nube de gas y polvo se condensara y en su centro se originara el Sol. Una gran nube de polvo y gases en forma de disco giraba en torno de la estrella recién nacida (se le llama *disco protoplanetario*), en él había irregularidades, zonas más densas que otras, las cuales actuaron como centros gravitacionales que condujeron a la formación de los diferentes planetas. Las altas temperaturas y el fuerte viento del joven Sol evaporaron la mayor parte de los compuestos volátiles de los planetas más cercanos²⁰⁷, Mercurio, Venus, la Tierra y Marte en tanto que los más lejanos, Júpiter, Saturno Urano y Neptuno, mantuvieron una importante envoltura gaseosa, fundamentalmente de hidrógeno.

Ahora se nos plantea la gran pregunta: ¿Cómo se originó el agua en nuestro planeta? La Tierra se encuentra entre Venus y Marte y ninguno de los dos tiene la masa de agua líquida que hay en la Tierra, cubriendo nada menos que un 71% de su superficie. ¿Qué circunstancias especiales se dieron en la Tierra para que se convirtiera en lo que hoy es?

La teoría simplista de que el vapor de agua existe como una de tantas moléculas en el gas interestelar y que cuando la Tierra se condensó a expensas del disco protoplanetario que rodeaba al Sol, simplemente recibió su “ración” de agua, no resulta convincente ya que en un principio, la Tierra era una bola de magma y aún no había formado la costra pétreo que llamamos *litosfera*, lo que impediría la condensación de elementos volátiles y por tanto, la deposición de agua líquida en su superficie. Así pues, parece que la Tierra nació “seca” hace unos cuatro mil seiscientos millones de años y hay que pensar en que el agua debió llegar a ella después, cuando ya se había enfriado.

Más razonable es la *teoría de los planetésimos* según la cual, en el inicio del sistema solar una gran masa de gas y polvo se concentró gravitacionalmente. La masa central sufría una fuerte compresión gravitacional que desencadenó las primeras fusiones nucleares del hidrógeno, dando así lugar al recién nacido Sol. En su entorno giraba una ingente masa de polvo con forma de disco (*anillo protoplanetario*). El disco no era homogéneo y las zonas más densas actuaban como centros de aglutinamiento gravitatorio. Así, las partículas iban uniéndose y compactándose y cuanto más grandes llegaban a ser, mayor capacidad de atraer a más masas tenían. De esta forma aparecieron los diversos planetas. Había también un gran número de cuerpos semejantes a los asteroides o los cometas que venían de las partes externas y frías del sistema solar, en donde el agua se habría congelado en su superficie, Estos cuerpos eran atraídos por los jóvenes planetas y se precipitaban

²⁰⁵ Parece ser que tienen un tamaño aproximado de una micra (10^{-6} m).

²⁰⁶ Principalmente, amoníaco, metano y dióxido de carbono.

²⁰⁷ Por este motivo se les llama “planetas rocosos”

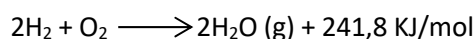
sobre ellos. De esta forma pudo ocurrir el suministro de agua a la Tierra, merced al bombardeo incesante de estos meteoritos.



Figura 102 Nube de polvo cósmico y gas en la nebulosa del Águila, imagen captada por el telescopio espacial Hubble el 1 de abril de 1995, considerada por la prensa científica como la más famosa de cuantas ha proporcionado. Se encuentra a 7000 años luz y se la conoce como *Los Pilares de la Creación* en clara referencia a los procesos de nacimiento de nuevas estrellas y de nucleogénesis de elementos químicos que en ella tienen lugar.

III.11.2 AGUA: LA MOLÉCULA DE LA VIDA

Si en un recipiente cerrado, a la temperatura ambiente, se ponen hidrógeno y oxígeno en proporción volumétrica 2:1, ambos gases coexisten y no reaccionan a no ser que se aplique una llama o se haga saltar una chispa eléctrica. Pese a que la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno es fuertemente exotérmica:



Los dos gases son capaces de coexistir y se requiere una notable energía de activación para que la reacción se desarrolle violentamente. Ello se debe a que, en las condiciones de nuestro ambiente, ambos gases se encuentran en forma molecular, es decir, los átomos están unidos de dos en dos, han adquirido la configuración cortical de gas noble y se encuentran en un estado estable (ver el capítulo III.10).

La molécula de agua es una estructura muy estable, como corresponde a la importante cantidad de energía que se desprende en su formación a partir de sus elementos constituyentes. Ello explica

su gran abundancia en el universo y en nuestro planeta. Otro dato que avala la estabilidad de la molécula H_2O es la energía del enlace²⁰⁸ H-O que es -464 KJ/mol .

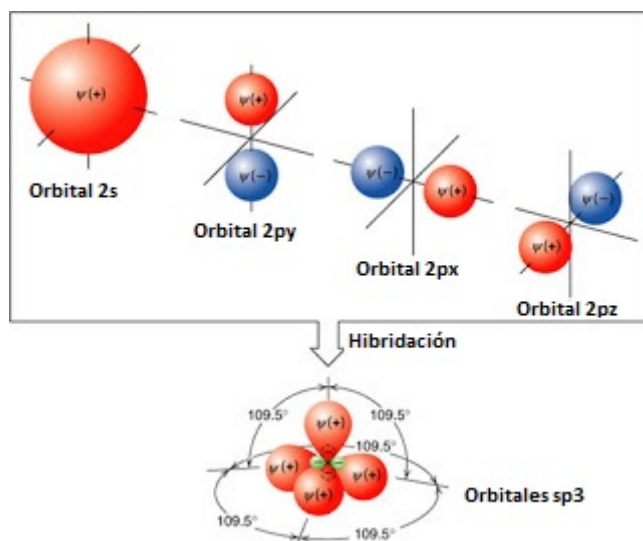


Figura 103 Hibridación de los orbitales de la capa L. Los cuatro orbitales atómicos son sustituidos por otros cuatro, híbridos de los anteriores e idénticos entre sí, dirigidos hacia los vértices de un tetraedro cuyo centro está ocupado por el núcleo atómico.

que ahora nos ocupa. En 1931 el químico estadounidense Linus Pauling²⁰⁹ propuso que los orbitales s y p de los átomos, tal y como han sido descritos en los capítulos antes mencionados, no son los que realmente tienen a la hora de enlazarse con otros átomos. En su lugar, los átomos disponen sus electrones de valencia en unos nuevos orbitales excéntricos, de igual geometría y dirigidos en direcciones lo más alejadas posible entre sí. La idea de Pauling es asumible por cuanto la hibridación de orbitales supone una regularización en la geometría de las nubes electrónicas y por tanto, supone ser una estructura más estable.

Pues bien, cuando el oxígeno se une al hidrógeno, hibrida sus orbitales $2s$, $2p_x$, $2p_y$ y $2p_z$ originando una estructura igual a la de

la figura 103. Dos de los orbitales híbridos contienen dos electrones (con sus spines opuestos, recordémoslo) y los otros dos contienen un solo electrón, y son precisamente estos dos últimos los que permitirán la unión a los dos átomos de hidrógeno. La molécula así constituida tiene forma

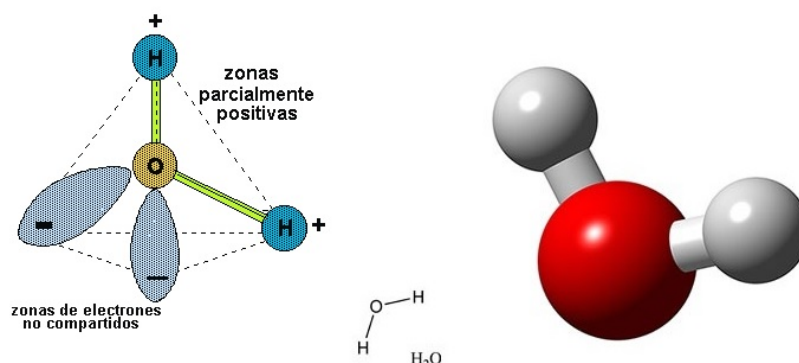


Figura 104 La teoría de *Orbitales Híbridos* explica satisfactoriamente la geometría de la molécula de agua y buena parte de sus propiedades.

²⁰⁸ Se llama *energía de enlace molar* a la energía que se requiere para romper un mol ($6,022 \cdot 10^{23}$) de los referidos enlaces.

²⁰⁹ Premio Nobel de Química en 1954 por su *teoría de los orbitales híbridos* y de los *orbitales moleculares*.

angular, y puesto que el oxígeno tiene más afinidad por los electrones que el hidrógeno, los pares electrónicos de los enlaces están desplazados hacia él, lo que unido a la existencia de los dos pares electrónicos propios, que no intervinieron en las uniones, determinan que el oxígeno acumule carga negativa y como consecuencia, los átomos de hidrógeno concentren una igual carga positiva al cincuenta por ciento cada uno.

En resumen, nos encontramos ante una diminuta molécula con forma angular cuyos brazos de tan sólo 0,958 Angstrom (Å) están separados formando un ángulo de $104,5^\circ$. En conjunto, el agua se comporta como un diminuto e intenso dipolo eléctrico²¹⁰ y es motivo de que las moléculas de agua se atraigan entre sí de forma particularmente intensa, inusual en moléculas de su orden de magnitud, proporcionándole así unas propiedades realmente extraordinarias.

Estas atracciones son la causa de que el agua sea líquida a la temperatura ambiente. Sorprende comprobar que otras moléculas de masa molecular mucho mayor sean gaseosas a la temperatura ambiente. Tal es el caso del cloro, con masa molecular igual a 71 uma, sus moléculas son cuatro veces más pesadas que las de agua y es un gas. Otras sustancias como el butano, con masa molecular 58 uma, también son gaseosas. La razón de esta anomalía hay que buscarla en la intensa atracción intermolecular entre las partículas de agua.

- El agua como agente termostático

El calor específico²¹¹ del agua es $4,18 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$, un valor bastante superior al de la mayoría de las restantes sustancias y solo superado por unas pocas, entre ellas el amoníaco. Un valor alto del calor específico significa que se necesita una dosis grande de calor para elevar en un grado la temperatura de un gramo de la sustancia en cuestión. Por otro lado, el calor de fusión del agua 334 J.g^{-1} así como su calor de vaporización 2.261 J.g^{-1} son también valores muy altos en comparación al resto de las sustancias. La causa de estos valores anormalmente elevados radica en la intensa atracción que existe entre las moléculas dipolares del agua, cualquiera que sea el estado en que se encuentre.

La gran capacidad que tiene el agua para absorber calor (o desprenderlo) sin apenas modificar sus condiciones físicas hacen de ella el elemento termostático más importante del cosmos. Así, las rocas superficiales de aquellos planetas que carecen de agua son materialmente fritas por la radiación de la estrella central para congelarse a temperaturas cercanas al cero absoluto en cuanto el planeta da media vuelta. Esta tortura térmica no se da en aquellos planetas que poseen agua en su superficie²¹².

Por otro lado el vapor de agua presente en la atmósfera ofrece un importante efecto de invernadero que impide la fuga de calor por reflexión.

²¹⁰ El momento dipolar de la molécula de agua es $6,2 \cdot 10^{-30} \text{ C.m}$

²¹¹ Es un parámetro característico de cada sustancia que cuantifica la cantidad de calor que se precisa para elevar en un grado la temperatura de cada gramo de esa sustancia.

²¹² Este es el motivo por el que los climas costeros son suaves, sin grandes variaciones de temperatura, en tanto que las zonas alejadas de los mares, como es el caso de Sáhara o Atacama tienen climas muy extremos.

- Dilatación anómala

Cuando el agua se congela, las moléculas se ordenan según el juego de atracciones y repulsiones entre ellas, formando una red tridimensional en la que los dipolos moleculares se disponen enfrentando sus zonas de carga opuesta y alejando lo más posible sus zonas de igual carga. El resultado es una disposición en la que las moléculas se encuentran a distancias ligeramente mayores que cuando están desordenadas, en forma líquida, es decir, el agua ocupa mayor volumen cuando está solidificada que cuando está en forma líquida, y ello tiene una importantísima consecuencia: el agua es una sustancia con la rara propiedad de que la fase sólida flota sobre la líquida. En el resto de las sustancias sucede lo contrario, el sólido se hunde en su propio líquido.

El hecho es providencial ya que, en nuestro planeta, la congelación del agua en los lagos, ríos y mares se produce en la superficie, la costra de hielo flota y cubre la masa líquida impidiendo que la congelación prosiga. Gracias a ello, las masas de agua terrestre nunca se congelan en su totalidad, y de esta manera, los seres que habitan en ellas pueden seguir viviendo.

Esto no es todo, el agua líquida se introduce por las pequeñas fisuras y grietas de las rocas y al congelarse, el aumento de volumen las rompe y desmenuza. Este es uno de los mecanismos de la erosión de la superficie terrestre que forma parte del ciclo geológico y hace de la Tierra un planeta cambiante y vivo.

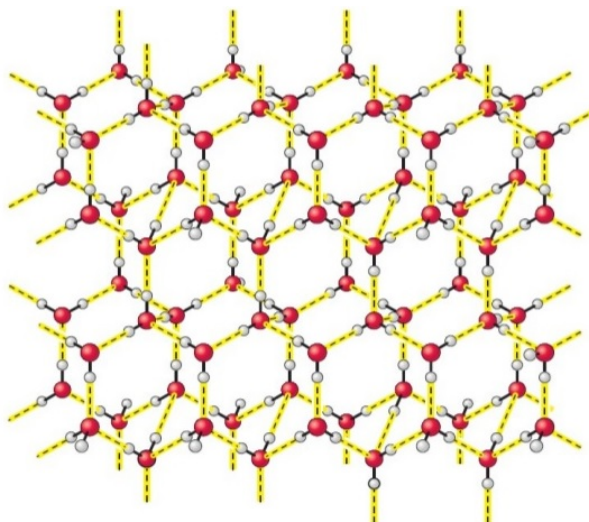


Figura 105 Estructura reticular del hielo

- Poder disolvente

En el capítulo III.10 vimos que una buena parte de los sólidos está formada por iones positivos y negativos ordenados tridimensionalmente y sujetos a posiciones fijas por fuerzas eléctricas (por ejemplo, cloruro sódico, fluoruro potásico, nitrato sódico, etc.) y hay otros formados por moléculas con polaridad, en los que estas se han unido, aproximando sus zonas de polaridad eléctrica opuesta y alejando lo más posible las zonas de igual polaridad. El resultado en ambos casos es una estructura sólida en la que las partículas se hallan en posiciones fijas.

Dado el minúsculo tamaño de las moléculas de agua, a estas les es posible meterse en el interior de la red sólida aprovechando los espacios que existen entre las partículas del soluto. A continuación, las moléculas de agua (en este caso, el disolvente) se asocian a las partículas, según se representa en la figura 106, a este fenómeno asociativo soluto-disolvente se le llama *solvatación*. Una vez que las partículas están rodeadas por moléculas de agua se desprenden de sus posiciones y se dispersan en el líquido pasando a formar parte de la disolución.

Pero queda una cuestión por esclarecer ¿Por qué motivo los iones “solvatados” se desgajan espontáneamente de la red cristalina? La respuesta la encontraremos al revisar el capítulo I.17.2 dedicado a la Ley de la Electrostática. Allí vimos que la fuerza con que se atraen o repelen dos cargas (según que sean opuestas o iguales, respectivamente) depende de la naturaleza del medio en el que se encuentran. Sucede que entre las partículas de un sólido hay vacío, y la constante de Coulomb para el vacío es $K_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{C}^{-2}$. Cuando el agua rodea a los iones se interpone entre ellos, ahora bien como la constante de Coulomb para el agua es 81 veces más pequeña que la del vacío el resultado neto es que las fuerzas atractivas entre los iones se debilitan hasta hacerse ochenta y una veces menos intensas. He aquí el motivo por el que la red cristalina se desmorona, produciéndose así la disolución y he aquí también el motivo por el que el agua es el disolvente por antonomasia.

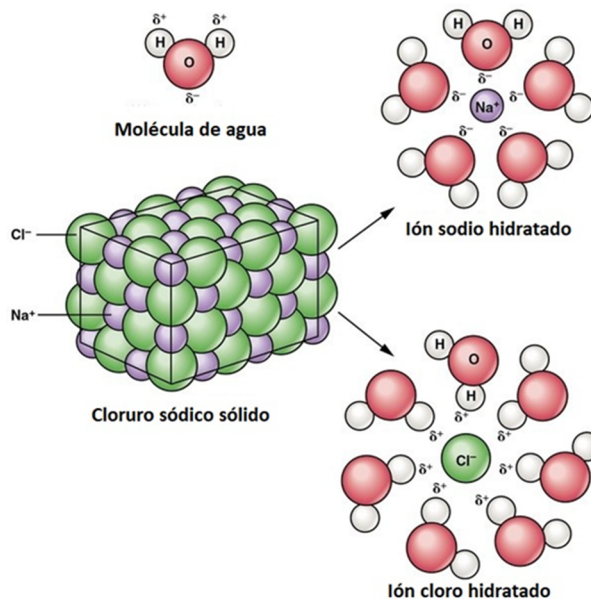


Figura 106 Proceso de disolución de un sólido iónico o polar por el agua.

- El agua es el medio ideal para los procesos químicos

Para que dos sustancias reaccionen es preciso que sus moléculas lleguen a entrar en contacto, ello nos lleva a la convicción de que las reacciones químicas tienen lugar en fase gaseosa o líquida. Por motivos obvios, los sólidos difícilmente pueden reaccionar, toda vez que sus partículas están situadas en posiciones fijas y todo lo más que puede pasar es que un sólido reaccione con un líquido o un gas, eso sí, el proceso se ceñirá tan solo a la superficie del sólido. Puesto que el agua es el disolvente universal por excelencia, podremos decir que el agua es el medio más común para las reacciones químicas.

La presencia de agua en nuestro planeta es garantía de que en él se den muchos más procesos químicos, y más variados, que en un planeta que no la contenga, entre ellos, los de la vida. Sabemos que hace unos 4.000 millones de años, la Tierra recién formada era una gran bola de magma recubierta de una costra litosférica por cuyas grietas emanaba lava, vapor de agua, dióxido de carbono y óxidos de azufre y nitrógeno que se incorporaban a una atmósfera densa e irrespirable que ejercía un fuerte efecto invernadero. Las tormentas, con fuerte aparato eléctrico, eran “el pan nuestro de cada día”. Aquellas descargas, sumadas a la intensa irradiación ultravioleta, provocaban muy variadas reacciones endotérmicas²¹³ entre las moléculas gaseosas y todos aquellos gases se disolvían en los primitivos océanos. De esta forma era posible que aparecieran moléculas más complejas a partir de las moléculas sencillas que había en la atmósfera: H₂O, CO₂, NH₃, CH₄, CO, SO₂, NO y NO₂ principalmente. Hace unos 3.800 millones de años los

²¹³ Por lo general, las reacciones endotérmicas no son espontáneas, a menos que se aporte desde el exterior la energía que ellas necesitan para progresar.

océanos eran ya una descomunal sopa en la que había una gran variedad de moléculas disueltas, entre ellas aminoácidos y otras moléculas orgánicas²¹⁴. Junto a ellas había también moléculas de mayor tamaño, resultantes de la unión de aminoácidos y otras moléculas similares, que tenían una extraordinaria propiedad: eran capaces de hacer copias de sí mismas capturando en el entorno moléculas simples de las que ellas mismas estaban compuestas. Estamos hablando, querido lector, del comienzo de la vida en nuestro planeta²¹⁵.

Actualmente, es consenso que la vida se inició en el agua, todas las evidencias geológicas y paleontológicas apuntan hacia esa idea. Pero aún hay más, si nos fijamos en la estructura de los seres vivos comprobaremos que las unidades estructurales de los mismos, las células, tienen un protoplasma acuoso en el que se encuentra el núcleo, y si las comparamos con las formas más primitivas y simples de la vida, los virus, veremos que estos y los núcleos celulares están formados esencialmente por ácidos nucleicos. Mientras los virus, descendientes directos de las primitivas moléculas autorreproductoras, están expuestos a todo tipo de agresiones que provocan en ellos mutaciones y muerte, los núcleos de las células se han rodeado de una membrana protectora (membrana nuclear) y de una pequeña porción de “océano” (protoplasma). Merced a todo ello, pueden mantener una actividad bioquímica segura y fiable.

- Otras propiedades que hacen del agua un elemento esencial para la vida

Ya hemos visto que la intensa dipolaridad de la molécula de agua es la causa de atracción inusualmente elevada entre sus moléculas. Es esta atracción la responsable de que el agua sea líquida a la temperatura ambiente y no un gas, como es el caso de moléculas similares tales como CH_4 , NH_3 , ClH , SH_2 e incluso algunas con masas moleculares mayores como SO_2 , ClO_2 o C_3H_8 .



Figura 107 El astronauta Myke Fincke jugando con un decilitro de agua en la Estación Espacial Internacional el 29 de mayo de 2011.

Cuando el agua está en fase líquida, las moléculas no están ordenadas tridimensionalmente si bien gozan de una movilidad que en fase sólida no tienen, eso sí, su proximidad es comparable a la que tienen en el hielo. Ello es motivo de que, en fase líquida, las moléculas de agua superficiales formen una capa o película cuya consistencia se mide con una magnitud denominada *tensión superficial*. La tensión superficial del agua es “anormalmente” elevada y es la causa de que cualquier masa de agua tienda a adoptar forma esférica²¹⁶. Este hecho se da en todo el universo y, por supuesto, en la Tierra. Así, el agua evaporada de los mares, ríos y lagos asciende hasta las zonas frías de la atmósfera

donde se condensa formando minúsculas gotitas que forman las nubes. Estas son arrastradas por el viento y cuando las condiciones de condensación son las adecuadas, crecen de tamaño hasta

²¹⁴ Se llaman así a todas aquellas moléculas en las que el carbono es el principal constituyente. El nombre alude al hecho de que los seres vivos están formados por este tipo de moléculas.

²¹⁵ En 1954 Stanley Miller y Harold Urey realizaron un experimento que merece estar en la *Top Ten* de los experimentos más bellos y trascendentes de la historia de la ciencia. En él llegaron a demostrar cómo pudo aparecer la vida en nuestro planeta en un proceso como el descrito aquí.

²¹⁶ La esfera es el cuerpo geométrico con el mayor volumen encerrado en la menor superficie.

que caen por su propio peso en forma de lluvia. Es así como funciona el ciclo del agua en nuestro planeta.

Otra consecuencia de la fuerte dipolaridad del agua líquida es el fenómeno de la *capilaridad*. Por su carácter polar, las moléculas de agua se adhieren con intensidad a las superficies de los objetos, en el lenguaje coloquial decimos que el agua “moja” refiriéndonos al hecho de que al sacar del agua un cuerpo sumergido este mantiene adherida una película del líquido.

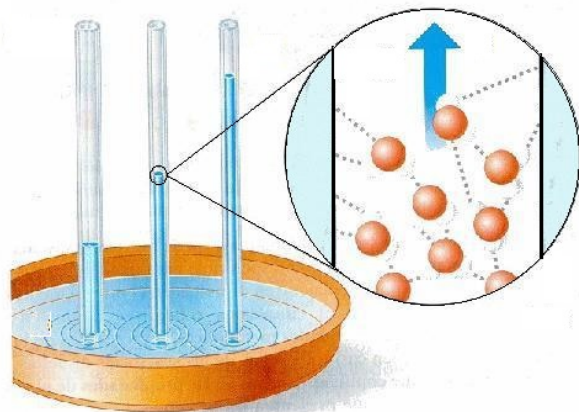


Figura 108 El ascenso del agua por los capilares es tanto más acusado cuanto más estrecha sea la tubería y cuanto mayor sea la adherencia.

Cuando el agua llena un conducto muy estrecho (figura 108) el agua sube por causa de la adherencia a las paredes y a la tensión superficial. Este efecto es tanto más acusado cuanto más estrecho sea el capilar.

Este fenómeno es el que permite que la savia de las plantas ascienda por el tallo hasta lo más alto de ellas; así es posible que los nutrientes del suelo y las moléculas orgánicas formadas por la fotosíntesis lleguen a todas sus partes permitiendo así la vida de los vegetales

Hay, finalmente, una tercera propiedad que deriva directamente del pequeño tamaño y el carácter polar de las moléculas de agua. Vimos en el capítulo II.3 que los sistemas naturales tienden de forma espontánea hacia los estados de mayor desorganización, tendencia cuantificable en términos de la variación de una magnitud termodinámica conocida como *entropía*. Los procesos de disolución son entrópicamente favorables a todas luces, ya que se trata de la destrucción del orden reticular de un sólido cuyas partículas se dispersarán en el seno de un líquido. Esto es, sin duda, un aumento del caos. Pues bien, esta tendencia es la responsable de la existencia de un fenómeno esencial para la vida que llamamos *ósmosis*.

La figura 109 muestra la naturaleza del fenómeno de la ósmosis. Tenemos un recipiente compartimentado en dos partes separadas por un tabique semipermeable²¹⁷, en la izquierda hay agua pura y en la derecha hay una disolución azucarada. Si no hubiera tabique, las moléculas de sacarosa se difundirían

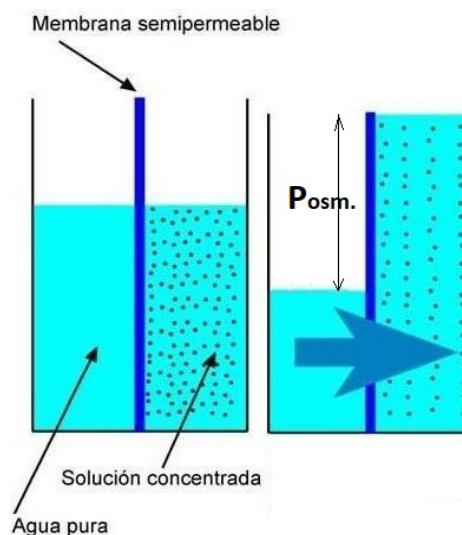


Figura 109 El fenómeno de la ósmosis se mide en términos de presión.

²¹⁷ El término semipermeable se refiere al hecho de que el tabique sea poroso, siendo los poros lo suficientemente pequeños como para que las partículas del soluto, demasiado grandes, no lo puedan atravesar pero las moléculas del disolvente, muy pequeñas, puedan pasar a su través.

hacia la izquierda y las de agua hacia la derecha, de forma que al cabo de cierto tiempo, toda la masa líquida se habría homogeneizado de forma espontánea. Ahora bien, la presencia del tabique semipermeable impide que las moléculas de sacarosa, demasiado grandes, no puedan desplazarse hacia la izquierda pero las diminutas moléculas de agua sí pueden pasar hacia la derecha. Lo que sucede en estas condiciones es que, por causa de la tendencia hacia la homogeneización, el agua pasará hacia la derecha diluyendo la disolución azucarada. Pero a medida de que esto sucede, el nivel del vaso izquierdo desciende y el del vaso derecho se eleva. Así pues, el fenómeno se detiene cuando la tendencia osmótica del agua se equilibre con la presión hidrostática que se le opone. He aquí la razón por la que el fenómeno de la ósmosis se mide en términos de una presión.

La ósmosis es esencial para la vida. La actividad de las células de cualquier ser vivo es una compleja trama de procesos bioquímicos, en esencia, reacciones en fase acuosa en las que, por lo general las moléculas reaccionantes son de considerable tamaño en relación a las del agua. Los distintos orgánulos de las células están recubiertos de membranas semipermeables de sofisticada textura. Su comportamiento es bastante más complejo que el del tabique del experimento esquematizado en la figura 109. Las membranas celulares son capaces de aprovechar los fenómenos osmóticos permitiendo el paso de las especies químicas en uno u otro sentido en función de las necesidades del momento.

Muchas funciones vitales como la respiración celular, la absorción de nutrientes o la evacuación de catabolitos, son procesos basados en el fenómeno de la ósmosis.

III.12 ESTADOS DE LA MATERIA

El 27 de junio de 2017 la agencia de noticias Europa Press facilitaba una noticia que ese mismo día era publicada por el diario 20 Minutos con el siguiente titular: "Catalunya alcanzó los 40 grados en el episodio de calor más intenso en junio desde 2003". Dicho titular no pilló de sorpresa a nadie, en unas fechas en las que el recién iniciado verano entraba con una intensa ola de calor en todo el continente europeo. Pero el texto del titular era mejorable porque inducía a errores.

Existen numerosas situaciones de la vida ordinaria en las que se pone de evidencia que la confusión entre los conceptos de calor y de temperatura es un hecho general. Por si ello fuera poco, incluso empleando un léxico correcto, expresamos de forma científicamente errónea los conceptos de calor y temperatura. Sirvan de ejemplo las siguientes frases:

"Hoy hace mucho calor", para decir que la temperatura ambiente es alta.

"Este niño tiene demasiado calor", para decir que tiene fiebre, tras haberle puesto el termómetro.

"El frigorífico produce frío", para decir que el frigorífico baja la temperatura.

"La llama de un encendedor tiene mucho más calor que un gran témpano de hielo", cuando en realidad, se refiere a la temperatura.

Estas frases de la vida ordinaria denotan la tendencia generalizada a confundir calor y temperatura. Como primera aproximación al concepto de calor, debemos tener en cuenta que se

trata de una magnitud extensiva²¹⁸ que se mide con unidades de energía, es decir, en Julios²¹⁹. De hecho, el calor puede convertirse en otras formas de energía, así, en una central térmica el calor se convierte en energía eléctrica y en una máquina de vapor, el calor se convierte en energía cinética. En cuanto a la temperatura, destacaremos que se trata de una magnitud intensiva²²⁰, que se mide en grados²²¹ y cuyo valor asciende cuando un cuerpo recibe calor.

Por consiguiente, calor y temperatura son magnitudes distintas que se miden con unidades distintas, si bien sus variaciones en un cuerpo se producen en la misma dirección, es decir, cuando uno crece, la otra también crece, y viceversa. Esta es la causa del confusiónismo generalizado que existe entre los dos conceptos.

El filósofo romano Tito Lucrecio Caro afirmaba en su obra “De Rerum Natura” que los cuerpos macroscópicos, aparentemente estáticos, están compuestos a pequeña escala de átomos que se mueven rápidamente chocando entre ellos. Este punto de vista atomista que había instaurado Demócrito de Abdera hacía doscientos años, fue raramente considerado en siglos posteriores, cuando las ideas aristotélicas eran las dominantes. Tuvieron que pasar dieciocho siglos para que Daniel Bernoulli publicara la obra *Hydrodynamica*, sentando las bases de la *Teoría Cinética de los Gases* y proponiendo que los gases se componen de un gran número de moléculas que se mueven en todas las direcciones, que su impacto en una superficie causa la presión del gas que sentimos, y que lo que se experimenta en forma de calor es simplemente la energía cinética de su movimiento. Dicha teoría fue mejorada, y definitivamente consagrada, por los trabajos de James C. Maxwell y Ludwig Boltzmann.

La *Teoría Cinética de la Materia* es, hoy por hoy, el marco conceptual vigente para concebir la estructura y propiedades de los materiales en sus diferentes estados y se resume en tres postulados:

1. *La materia, ya sea sólida, líquida o gaseosa, está formada por partículas que interactúan entre sí.*
2. *Las partículas poseen energía cinética. En los sólidos y líquidos es vibracional mientras que en los gases es traslacional.*
3. *La energía cinética media de las moléculas (tanto vibracional como traslacional) es proporcional a la temperatura absoluta del sistema.*

Hemos de tener en cuenta que, por pequeño que nos parezca un cuerpo, el número de partículas que lo constituyen es siempre elevadísimo. Hay que pensar también que a una determinada temperatura, no todas las partículas tienen la misma energía cinética. Con toda probabilidad, habrá partículas que tengan poca y otras que tengan mucha y con toda probabilidad también, una determinada partícula que ahora tiene poca energía cinética, luego puede tener mucha y

²¹⁸ Una magnitud es extensiva si su cuantía es proporcional al tamaño o masa del cuerpo que la sustenta.

²¹⁹ Otras unidades de frecuente uso en calor son el KJ (10^3 J) y la caloría (4,18 J)

²²⁰ Una magnitud es intensiva cuando su valor no depende del tamaño o masa del cuerpo que la sustenta. Por ejemplo, el color, la acidez y la densidad, son propiedades intensivas.

²²¹ Lo más habitual es medir la temperatura en grados centígrados, si bien unos y otros son unidades de igual tamaño. La única diferencia es que el origen de la escala centígrada coincide con el punto de congelación del agua en condiciones normales, mientras que la escala Kelvin, también llamada *absoluta*, tiene su origen en el *cerro absoluto* (-273 °C), de forma que el punto de congelación del agua en la escala absoluta es 273 °K. La escala centígrada no es la escala *Internacional de Temperaturas*, de modo que toda temperatura expresada en °C debe ser escrita e introducida en los cálculos en forma de °K: $T^{\circ K} = T^{\circ C} + 273$

viceversa. Ahora bien, por encima de todas estas consideraciones, teniendo en cuenta que la población de partículas es inmensa y que por ello, las leyes estocásticas del azar se cumplen al ciento por ciento, podemos afirmar con certeza que el valor medio de la energía cinética de las partículas permanece constante mientras no se modifique la temperatura.

Cuando se suministra una cierta cantidad de energía calorífica a un cuerpo, la energía cinética media de sus partículas aumenta, esto es, la energía que se le da en forma de calor queda almacenada en él en forma de energía cinética molecular. Si el sistema tiene poca masa, es decir, si tiene “pocas” partículas, la energía cinética media de las mismas se incrementará más que si el sistema tiene mucha masa, ya que en este segundo caso son más partículas las que entran en el reparto de la energía y obviamente, tocan a menos. Dicho en otros términos, si se da una cierta cantidad de calor a un cuerpo y su masa es grande, su temperatura se elevará poco. Por el contrario, si la masa del mismo es pequeña, su temperatura se elevará mucho.

Estas ideas quedan bellamente resumidas en una sencilla ecuación, conocida como *Principio de la Calorimetría*:

$$Q = m \cdot c_{esp} \cdot \Delta T$$

En ella se relaciona la variación de la temperatura de un cuerpo ΔT al recibir o ceder una cantidad de calor Q , siendo m su masa y c_{esp} su calor específico²²².

Resumiendo, *la energía calorífica que se da a un cuerpo queda almacenada en este, en forma de energía cinética de sus partículas y por tanto, se eleva su temperatura. Pero pueden pasar más cosas:*

- Las dimensiones de los cuerpos se modifican.

El fenómeno de la dilatación térmica de los cuerpos es bien conocido desde hace bastante tiempo. La explicación de este hecho hay que buscarla en la estructura íntima de la materia. Sabemos que las moléculas, tanto en sólidos como en líquidos están ligadas por unas uniones inmatrimoniales de naturaleza electrostática, que llamamos “enlaces intermoleculares” en Química o “fuerzas de cohesión” en Física. Pues bien, cuando la energía cinética de las moléculas se incrementa, aumenta ligeramente la distancia de equilibrio o longitud de enlace entre las mismas. El resultado macroscópico es el pequeño aumento de sus dimensiones, conocido como *dilatación térmica*.

- Pueden producirse cambios de estado.

Vimos en el capítulo anterior que los sólidos están formados por partículas tridimensionalmente ordenadas en posiciones fijas, según determinan las fuerzas atractivas y repulsivas que se dan entre ellas. Cuando la materia se encuentra en estado sólido, la única energía cinética es la vibración de las moléculas en sus posiciones fijas. A temperaturas muy próximas al cero absoluto (-273 C) la vibración de las partículas es casi nula y todas las sustancias son sólidas, incluso las muy ligeras como el hidrógeno y el helio. A medida que reciben calor se incrementa la energía vibracional y llega un momento en el que las fuerzas intermoleculares no son capaces de soportar la vibración. En esa situación la red sólida se desmorona y colapsa, como se viene abajo un

²²² Da cuenta del calor que se requiere para modificar en un grado la temperatura de la unidad de masa de ese cuerpo.

edificio sacudido por un seísmo de grado 9 en la escala de Richter. En ese momento, el sólido se está fundiendo.

Unos sólidos se funden a temperaturas muy bajas, como es el caso del oxígeno y el nitrógeno, otros como el etanol, lo hacen a temperaturas más elevadas (-114 C), el agua lo hace a 0 C y algunos sólidos, como el oro, lo hacen a temperaturas muy altas (1.064 C), ello depende de la fortaleza de los enlaces interpartículas.

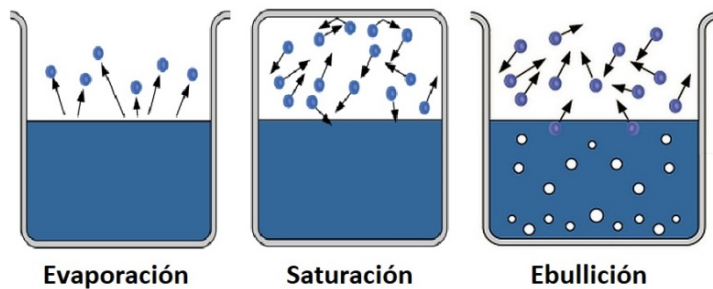


Figura 111 Tanto la evaporación como la ebullición son la transformación de un líquido en gas.

Cuando un sólido llega a la temperatura de fusión, su conversión en líquido requiere una energía adicional que se conoce como *calor latente de fusión*, esto es, la cantidad de calor que se necesita para convertir un gramo de un sólido en líquido. Su valor depende de las atracciones que median entre sus partículas.

Una vez que el cuerpo ha pasado a estado líquido, se ha perdido la organización tridimensional y las partículas vibran ahora mucho más, impidiendo toda posibilidad de ordenación (solidificación). En este estado, las partículas desordenadas siguen a distancias medias ligeramente superiores que cuando están ordenadas en forma sólida. Por este motivo todos los sólidos se hunden en sus propios líquidos. La excepción es el agua; esta providencial anomalía ya fue expuesta en el capítulo anterior.

La agitación de las moléculas en fase líquida es notablemente superior que en fase sólida y ello es causa de que algunas moléculas que en un momento dado acumulan mucha energía cinética y se hallan próximas a la superficie, sean capaces de atravesar la película superficial escapando de la masa líquida y convirtiéndose en moléculas gaseosas. Para ello necesitan una energía adicional que se llama *calor latente de vaporización*²²³, un parámetro de análoga significación que el ya citado calor latente de fusión y que, como él, es específico de cada sustancia.

La evaporación es un fenómeno superficial. Si la vasija que contiene el líquido está abierta, la evaporación prosigue hasta que todo el líquido se evapora. Si la vasija estuviera cerrada, la masa gaseosa llega a saturarse, estableciéndose un equilibrio dinámico entre las moléculas que escapan de la masa líquida y las moléculas gaseosas que se “zambullen” incorporándose al líquido.

Cuando la temperatura alcanza el *punto de ebullición*, la agitación molecular es ya tan intensa que en el mismo seno de la masa líquida se producen de forma estocástica violentas separaciones de moléculas que originan diminutas vesículas las cuales, rápidamente, se llenan de más moléculas gaseosas aumentando así su tamaño, esas burbujas ascienden y liberan el gas en la superficie. Cuando la evaporación se generaliza a toda la masa líquida, dejando de ser un fenómeno exclusivamente superficial, se le llama *ebullición*.

²²³ Se define como *el calor que es preciso suministrar para convertir 1 g de un líquido en gas, sin variar la temperatura.*

Cuando la materia se encuentra en fase gaseosa, las distancias entre las moléculas son enormes en comparación a sus tamaños. Estas se mueven caóticamente en todas direcciones chocando elásticamente entre ellas y también contra las paredes sólidas de la vasija que lo contiene. La energía cinética ahora es traslacional y no vibracional, como sucedía en los estados líquido y sólido.

La *Teoría Cinética de los gases* explica que la presión que ejercen es el resultado de los choques de las partículas gaseosas contra las paredes. Parece razonable aceptar que la presión debe ser mayor cuanto mayor sea la frecuencia de choques y cuanto mayor sea su violencia, y ello depende, obviamente, de la temperatura (recordemos que la temperatura es una magnitud proporcional a la energía cinética molecular media). Por todo ello, las tres magnitudes definitorias del estado de un gas ideal están relacionadas por la sencilla expresión:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Siendo P la presión, V el volumen, T la temperatura, n la cantidad de gas expresada en moles y R una constante universal cuyo valor es $8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

En nuestro planeta el agua de los mares, lagos y ríos se evapora en grandes cantidades por la acción solar. Cada gramo de agua evaporada le roba al entorno 2,26 KJ en forma de calor, moderando así la excesiva elevación de temperatura que provocaría la insolación (esto último es lo que pasa en los desiertos). El vapor de agua es arrastrado por los vientos y en los lugares en los que las condiciones son adecuadas, se produce la condensación formando nubes y lluvia. Entonces cada gramo de vapor que se convierte en agua líquida devuelve al entorno la energía de vaporización que requirió. De esta forma, los procesos de evaporación y condensación actúan como distribuidores del calor recibido del sol en grandes áreas del planeta.

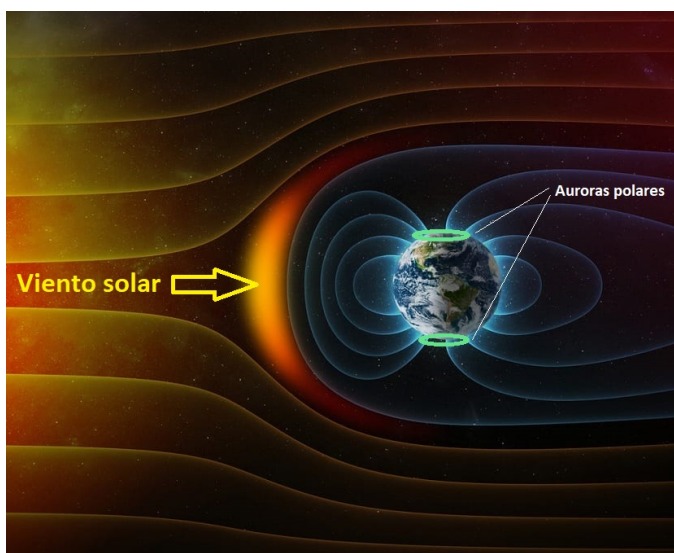


Figura 112 El campo magnético terrestre desvía el viento solar impidiendo que este "barra" la atmósfera.

Por otro lado, la Tierra se comporta como el recipiente cerrado de la figura 111. El motivo más importante por el que la atmósfera (y con ella el agua) no escapa del campo gravitatorio terrestre es la presencia del campo geomagnético. Su presencia impide que las partículas cargadas (protones, electrones y partículas alfa) del viento solar empujen a las moléculas gaseosas de la atmósfera arrastrándolas. Una prueba de la interacción entre el viento solar y el campo magnético terrestre son las auroras que se producen en ambos polos. Marte,

nuestro planeta vecino, tiene una atmósfera unas cien veces menos densa que la terrestre y el agua en ella, es muy escasa. Ciertamente, la gravedad de Marte es un 26,5 % de lo que es la terrestre y ello podría hacer pensar que esta es la causa de la escasa atmósfera del planeta, pero no menos cierto es que Marte está a una distancia del Sol 1,5 veces la distancia Tierra-Sol, lo que supone que el viento solar en Marte ha de ser menos intenso que en la Tierra. Uno y otro efecto

se compensarían y cupiera pensar que el planeta rojo debería tener una atmósfera comparable a la terrestre. Pero no es así, y la razón primordial está en el hecho de que el campo magnético de Marte es mucho menos intenso que el terrestre, y esta circunstancia es definitiva. Las observaciones hechas en los últimos años revelan que Marte está perdiendo lentamente su atmósfera y que su destino es quedarse sin ella.

III.13 EL CUARTO ESTADO DE LA MATERIA

En la antigüedad se pensaba que la materia está constituida por cuatro esencias: Tierra, aire, agua y fuego. Diríase que, a la hora de concebir los principios que conforman los materiales, la mente de los pensadores echó mano de lo que a primera vista parece más elemental. Sin embargo, en esta tercera parte de la presente obra, hemos visto que la estructura íntima de la materia es bastante más compleja a como se pensó hasta ya iniciado el Renacimiento.

El dicho castellano “no le busques tres patas a un banco, que tiene cuatro” tiene cierta relación con la descripción de los estados de la materia, que hemos visto en el capítulo anterior. Llegados a este punto, cabe preguntarse ¿cuál es la cuarta pata del banco de la materia y dónde se encuentra? Resulta, apreciado lector, que esa desconocida pata es la más grande de todas, se llama *plasma* y es el 99,9 % de la materia observable del universo. Pese a ser el estado de la materia más importante por ser la más abundante y trascendente, el plasma es el gran desconocido, y ello se debe a que es un estado de la materia alejado de nuestras condiciones naturales, al que difícilmente se puede acceder para su observación y estudio.

La práctica totalidad de la materia observable del universo (todo lo que no es materia oscura ni energía oscura) es plasma, y lo sabemos porque casi todo lo que emite luz²²⁴ es plasma, y es la luz el medio casi único por el que podemos estudiarlo. También hay plasmas en nuestro mundo terrestre, pero se trata de situaciones escasas y efímeras. Así, por ejemplo, hay presencia de materia en este estado en las descargas atmosféricas (rayos y relámpagos) o en dispositivos artificiales como los tubos de descarga (lámparas de neón, tubos fluorescentes, aparatos de descarga en gases a muy baja presión, etc.).

Como primera aproximación, podemos considerar el plasma como un gas fuertemente ionizado con igual número de cargas positivas y negativas libres. Las cargas negativas son mayoritariamente electrones y las positivas son iones atómicos, las unas y las otras tienen su origen en los átomos gaseosos de los que procede. Se puede obtener materia en estado de plasma por dos vías: Una diferencia de potencial eléctrico muy alta o una temperatura muy elevada. Una fuerte diferencia de potencial es capaz de arrancar los electrones más externos de la corteza atómica, dicho en términos vulgares, es como descoyuntar átomos mediante un campo eléctrico muy intenso. La otra vía, una temperatura muy elevada, provocaría la ionización de los átomos a causa de la gran excitación de estos por la temperatura.

En esencia, la materia en forma de plasma difiere poco, a primera vista, de los gases. Al igual que ellos, el plasma no tiene la rigidez de los sólidos ni la densidad de los sólidos y los líquidos. Al igual que los gases, los plasmas no tienen forma propia y son compresibles como ellos. Pero la principal

²²⁴ Aquí el autor se permite la licencia de utilizar el término “luz” para referirse a todo el espectro electromagnético.

característica que diferencia a los plasmas de los gases es su conductibilidad eléctrica, debido a que están formados por iones. Por este mismo motivo, los plasmas responden a las acciones electromagnéticas, pudiéndose confinar en espacios delimitados por paredes inmateriales de naturaleza magnética²²⁵.

El proceso de formación de un plasma es bastante sencillo, bien sea por una fuerte diferencia de potencial o por elevación de la temperatura. Cuando una masa gaseosa es sometida a una de estas condiciones (o a ambas a un mismo tiempo) algunos átomos gaseosos se ionizan liberando un electrón y generando un ión atómico positivo. Las drásticas condiciones reinantes (campo eléctrico muy intenso y temperatura muy elevada) aceleran

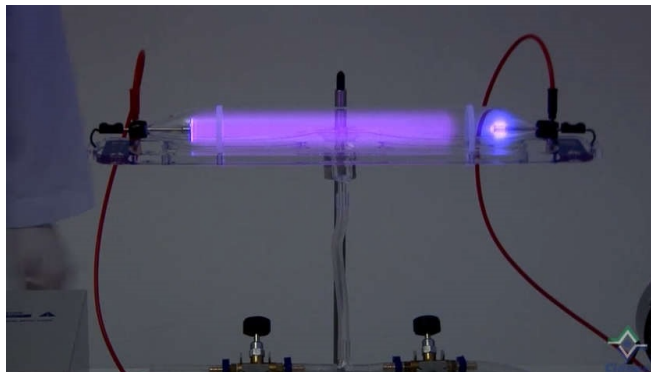


Figura 113 El gas a baja presión se somete a una fuerte diferencia de potencial, pasando a estado de plasma.

los electrones²²⁶ libres y los iones positivos en sentidos contrarios, estos chocan contra nuevos átomos, ya de por sí muy energizados, arrancando de ellos más electrones y generando más iones positivos. De esta manera se da un proceso multiplicativo “en cadena” que en poco tiempo convierte a toda la masa gaseosa en plasma. Si las condiciones drásticas que lo originan cesasen, los iones y los electrones se recombinan rápidamente pasando de nuevo al estado gaseoso.

Otra característica importante de los plasmas es su emisión electromagnética. Los plasmas emiten frecuencias correlativas con la estructura cortical de los átomos ionizados que los componen. El análisis de los espectros de emisión de los plasmas aporta información valiosísima de la estructura y organización de las capas y niveles que constituyen la corteza de los átomos. Vimos en el capítulo I.15 que el análisis de los espectros de emisión atómicos permitió elaborar los modelos de *órbitas permitidas* de N. Böhr y de *órbitas excéntricas* de A. Sommerfeld, que tanto han supuesto en el avance de la ciencia del S. XX.

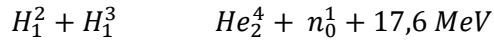
Por otro lado, cuando el plasma se genera a partir de moléculas poliatómicas sencillas, como es, por ejemplo, el agua, las moléculas se disocian originando radicales y átomos libres muy reactivos los cuales producen otras especies nuevas, en general endotérmicas e inestables. En el caso del agua se producen H_2 , O_2 , H_2O_2 y pequeñas cantidades de O_3 (ozono). Los plasmas son, por tanto, medios muy reactivos.

En nuestro planeta, el plasma se produce de forma natural en el transcurso de las de las tormentas con aparato eléctrico; las diferencias de potencial de varios millones de voltios entre distintas nubes o entre las nubes y la tierra son la causa de la ionización de las moléculas del aire. También se puede obtener plasma por esta misma vía, según muestra la figura 113.

²²⁵ Veremos más adelante que esta propiedad es la que permite obtener y mantener plasma artificial para su investigación y posible aprovechamiento energético.

²²⁶ Dada su muy pequeña masa, los electrones llegan a adquirir velocidades muy próximas a la de la luz y por tanto, su energía cinética llega a ser comparable, e incluso superior que la de las moléculas más pesadas.

La elevación de la temperatura es la vía más universal para producir y mantener el plasma en el mundo extraterrestre. Es precisamente en las estrellas donde las temperaturas por encima del millón de grados, proveen las condiciones necesarias para la existencia de plasmas estables. Desde hace algo más de tres décadas se trabaja intensamente en la producción y mantenimiento del plasma del hidrógeno y del helio con el fin de aprovechar la energía termonuclear del proceso:



En la reacción se funden un núcleo de deuterio con otro de tritio (isótopos “pesado” y “superpesado” del hidrógeno). El primero se obtiene del agua pesada (óxido de deuterio) presente en el agua natural en la proporción 1/3200 y el segundo se obtiene al bombardear litio con neutrones lentos (2,5 MeV):



La razón del empleo de los isótopos pesados del hidrógeno, muy escasos y costosos de obtener, en lugar del hidrógeno normal, muy abundante y asequible, se debe a que la masa del deuterio y el tritio son doble y triple que la del hidrógeno, de forma que es posible desencadenar su fusión sin requerir las elevadísimas temperaturas, propias de las masas estelares.

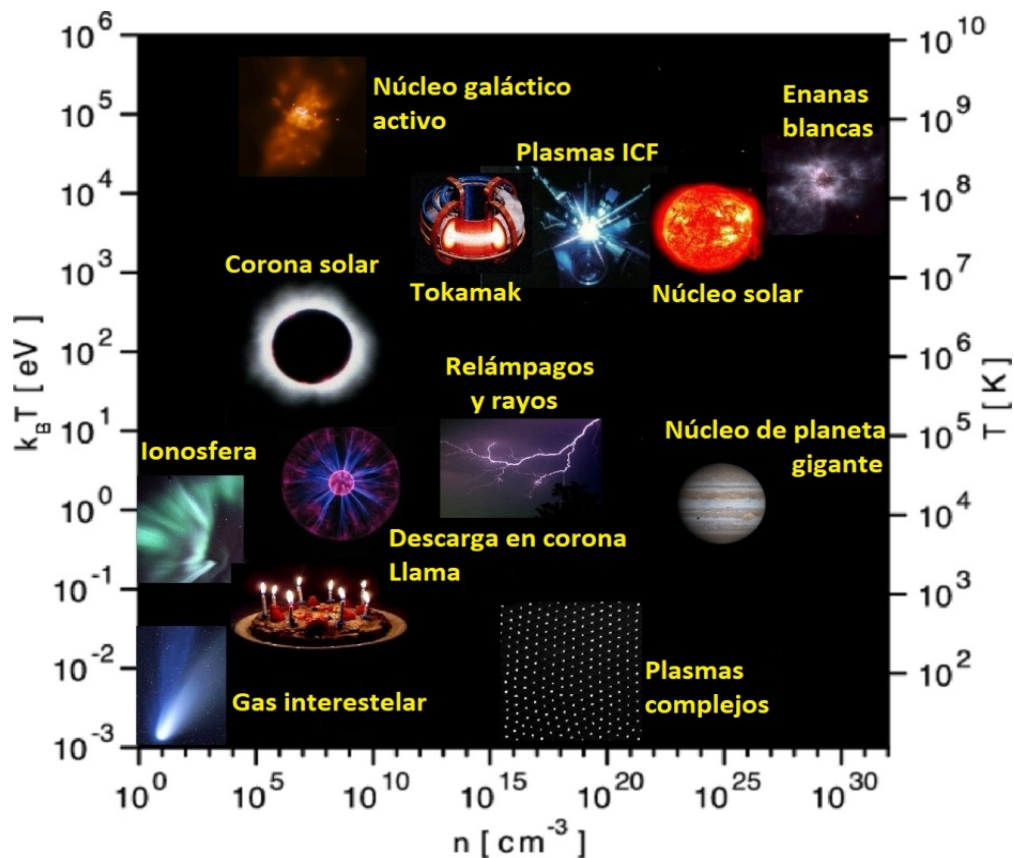


Figura 114 Gráfico representativo de algunos plasmas naturales y artificiales con expresión de la energía promedio de sus partículas (izquierda), su temperatura (derecha) y su densidad (abajo).

La obtención del combustible (deuterio y tritio) y la generación del plasma para obtener y controlar la energía de fusión no son operaciones exentas de dificultades, pero lo más problemático a la hora de aprovechar esta forma de energía, es el confinamiento y mantenimiento del plasma. Aparte de la gravedad que, como ya sabemos, es el medio por el que el plasma se genera y se mantiene

en el universo, se dibujan dos medios para conseguirlo a pequeña escala, para el aprovechamiento humano: el confinamiento magnético y el confinamiento inercial.

El *confinamiento magnético* se basa en la creación una cavidad inmaterial cuyas paredes son las líneas del campo magnético. Dada su naturaleza eléctrica, el plasma se ve confinado en su interior,

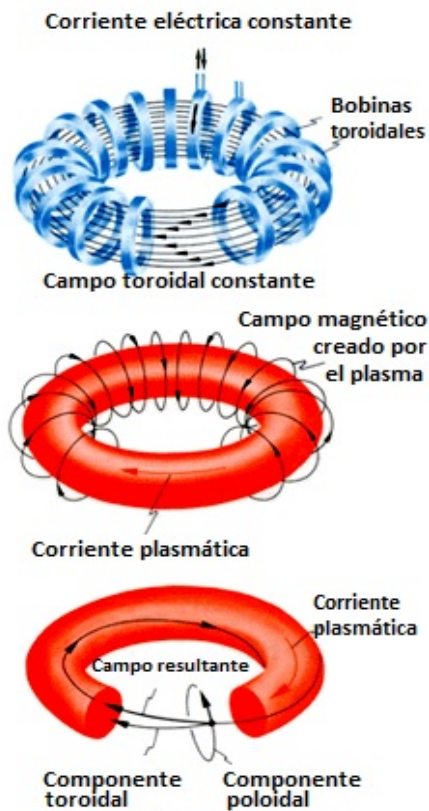


Figura 115 Esquema del dispositivo Tokamak de un reactor de fusión.

obligado a circular por los “senderos” previamente establecidos y sin tener contacto alguno con paredes materiales²²⁷. El dispositivo práctico se conoce como *Tokamak*, fue ideado en 1950 por los físicos rusos Igor Tam y Andrei Sajarov. Consiste en un conjunto de bobinas anulares que crean un campo magnético toroidal. En su interior se encuentra confinado el plasma, circulando a gran velocidad. Dada su naturaleza eléctrica, este crea por su parte un campo magnético cuyas líneas de fuerza son perpendiculares a las del campo toroidal. La combinación de ambas acciones propicia los choques entre los núcleos de deuterio y tritio y su fusión con generación de energía.

El *confinamiento inercial* se basa en someter una masa de deuterio y tritio en proporción 1/1 a una fuerte compresión, utilizando para ello un conjunto de láseres de disparo sincronizado (Figura 116), el impacto de los láseres calienta rápidamente la superficie del combustible generando plasma (1) al expandirse violentamente este plasma superficial comprime aún más la parte central de la mezcla de deuterio y tritio (2) llegando a alcanzar una densidad 20 veces la del plomo y temperatura de cien millones

de grados (3), finalmente, se produce la fusión nuclear y la liberación de su energía (4).

El *Proyecto ITER*²²⁸ es un experimento científico a gran escala que intenta producir un plasma de fusión que tenga diez veces más potencia térmica que la potencia necesaria para calentarlo. Su temperatura debe llegar hasta un nivel que le haga capaz de iniciar la reacción de fusión. El laboratorio, ubicado en el sur de Francia, dispondrá de un reactor experimental tipo Tokamak, estando actualmente en construcción. En el proyecto intervienen varios países europeos (entre ellos España), EEUU, Rusia y Japón. Se espera que en 2025 se consiga plasma a temperaturas superiores a los 150 millones de

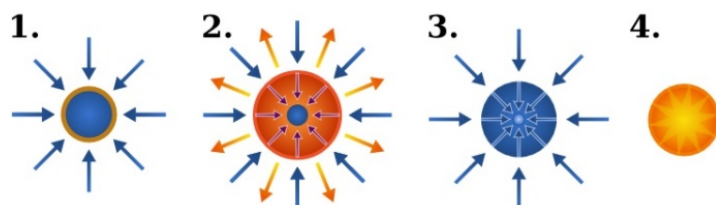


Figura 116 Fases de la generación de energía de fusión por confinamiento inercial.

²²⁷ Téngase en cuenta que el plasma se encuentra a temperaturas elevadísimas, muy por encima del punto de fusión de cualquier material.

²²⁸ International Thermonuclear Experimental Reactor.

grados y que se pueda mantener y controlar la energía de la fusión nuclear para provecho de la humanidad.

Desde que se inició la Revolución Industrial, la quema de combustibles fósiles ha ido creciendo incesantemente con grave deterioro de las condiciones medioambientales. Hoy la humanidad tiene ante sí problemas muy graves que resolver que no admiten demora, siendo el cambio climático el mayor y el más trascendente de todos. Como remedio, la búsqueda de nuevas formas de energía alternativas a la quema de carbón y petróleo es la tarea en la que se afanan buena parte de las sociedades. En la segunda mitad del siglo pasado hubo un proceso de sustitución de centrales térmicas por nucleares de fisión, ello contribuyó a aliviar los efectos negativos de la quema masiva de combustibles fósiles, pero generó una fuerte inseguridad a causa de los peligros potenciales derivados de la contaminación radioactiva y de los posibles accidentes en este tipo de instalaciones²²⁹. Hoy por hoy, puede que sea la energía termonuclear la respuesta definitiva a la demanda de una energía abundante y limpia ya que, a diferencia de las reacciones de fisión, la fusión de núcleos ligeros no produce radioisótopos y no tiene el peligro de salirse de control, provocando desastres de proporciones incalculables.

Además del aprovechamiento de la energía de fusión nuclear, los avances en la física de los plasmas están rindiendo otros beneficios, uno de los cuales trataremos a continuación.

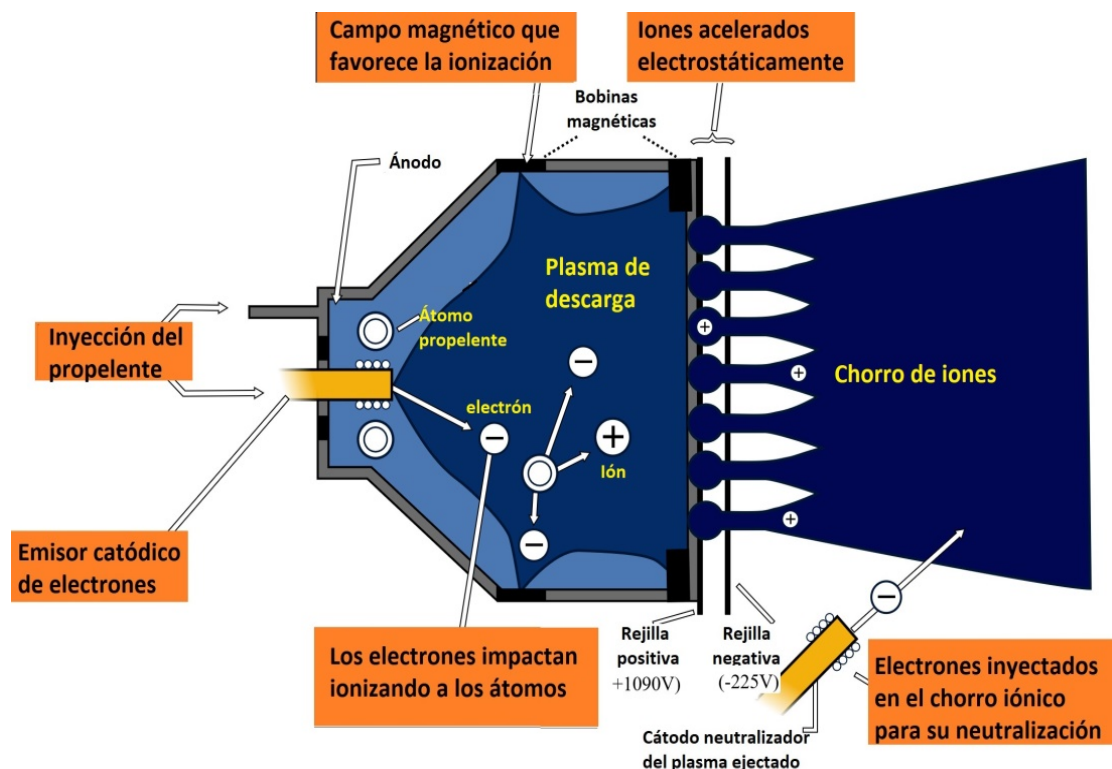


Figura 117 Esquema de la estructura y funcionamiento de un propulsor iónico.

²²⁹ Recordemos los desastres de Chernobil (1986) y Fukushima (2011).

Se trata de la utilización de las propiedades del plasma para impulsar vehículos por retropropulsión sin recurrir a la combustión tradicional. El dispositivo en cuestión se denomina *motor iónico* y encuentra su aplicación idónea en la impulsión de vehículos espaciales. Pensemos que fuera de la troposfera, y no digamos en el espacio exterior, el oxígeno es muy escaso o inexistente. Pretender impulsar una nave en un medio sin oxígeno con motores de combustión obliga a disponer en sendos depósitos tanto el combustible como el comburente, y eso supone un incremento importante del peso, crucial en los primeros momentos del viaje, cuando es preciso escapar de la gravedad terrestre.

Un *motor iónico* utiliza un haz de iones para la propulsión. Estos iones suelen ser de gases nobles, preferentemente argón y xenón. El funcionamiento se esquematiza en la figura 117 y consiste fundamentalmente en inyectar átomos de gas noble en la cámara de ionización donde son bombardeados por electrones procedentes de un cátodo que colisionan contra los electrones corticales externos provocando su separación del átomo y por tanto su ionización. El método necesario para acelerar los iones puede variar, si bien todos los diseños usan la ventaja de la relación carga-masa de dichos iones para acelerarlos a velocidades muy altas, utilizando un intenso campo eléctrico. Gracias a esto, los propulsores iónicos pueden proporcionar un gran empuje, reduciendo la cantidad de masa necesaria, si bien requieren una potencia previa para la aceleración de los iones que no necesitan los cohetes convencionales. Pero no todo han de ser ventajas; la fuerza que ejerce un propulsor iónico es la equivalente al peso de una hoja de papel, lo que proporciona al vehículo una aceleración del orden de una cienmilésima de la gravedad terrestre, ahora bien, dado que en el espacio no hay fricciones se pueden alcanzar velocidades considerables tras un tiempo prolongado de empuje del motor. Actualmente, estos motores se usan para mantener los satélites artificiales en su órbita.

En mis estudios de astronomía y filosofía sostengo esta opinión sobre el universo, que el Sol permanece fijo en el centro del círculo de cuerpos celestes, sin cambiar su lugar; y la Tierra, girándose sobre sí misma, se mueve alrededor del sol.

Galileo Galilei

IV.1 LA CONQUISTA DEL CONCEPTO DE ENERGÍA. UN LARGO Y TORTUOSO CAMINO

Cuando se trata una cuestión científica abordándola desde sus orígenes, lo habitual es partir del pensamiento griego clásico como punto de arranque, que no en vano la antigua Grecia fue la cuna del pensamiento filosófico, madre de todas las ciencias. Pero este no es el caso del concepto de *energía*, ya que este no se acuñó hasta los primeros años del siglo XIX, si bien ya era intuido desde mediados del S. XVII. La mente de los pensadores griegos estuvo más atenta a elucubrar sobre “cómo es y de qué se compone la materia” que sobre la cuestión de “a qué se deben los cambios de esta”. Así, Thales de Mileto (S. VI a.C.) consideraba al agua como el principio de todas las cosas²³⁰ en tanto que Anaxímedes de Mileto, discípulo del anterior, le atribuye esta propiedad al aire. Pensaba que el aire le da vida al fuego, la tierra esta sostenida por el aire, a su vez, el aire transporta el agua y forma las nubes de lluvia, del aire de las nubes surge el fuego (rayos) y el aire le da la vida a los seres humanos a través del “soplo de la vida” (el alma). Cien años después, Heráclito de Éfeso atribuía ese mismo carácter al fuego, al que atribuía vida y movimiento propio, siendo por ambos motivos lo que nos da vida a los seres vivos²³¹. Por su parte, Anaxágoras, contemporáneo del anterior, fue el primero en plantear la idea de la conservación de la materia (que muchos siglos después perfeccionó Antoine Lavoisier). Según él, ninguna cosa se produce o desaparece, sino que se compone por mezcla de otras existentes. Finalmente, ya muy avanzado el S. IV a.C., Demócrito de Abdera y Leucipo proponen la teoría atomística a la que nos referimos en el capítulo III.1 y, finalmente, en los primeros años del S. III a.C., Aristóteles propone la teoría de las cinco esencias de la materia. Como vemos, la idea de la existencia de una magnitud

²³⁰ Hemos de admitir que Thales no andaba descaminado al pensar así tras lo que hemos visto sobre el agua en el capítulo III.10

²³¹ Tampoco Heráclito estaba desacertado. Hoy sabemos que la actividad de los seres vivos es posible gracias a la “quema” metabólica de los principios inmediatos de los que se nutren y por otro lado, desde tiempo inmemorial, el fuego ha estado presente en todos los hogares dando luz, calor, posibilidad de cocinar los alimentos, protección contra las fieras, forja de los metales, etc. así que no es raro que la mente recurra al fuego como el principio creador por antonomasia.

relacionada con la posibilidad de cambios en los sistemas naturales, nunca fue considerada por los filósofos griegos.

Hay que llegar hasta el s. XVII para encontrarnos con los primeros atisbos del concepto de energía. En los primeros años de este siglo Galileo estudia científicamente los movimientos, estableciendo las leyes de los más simples. Por otro lado, el pisano se planteaba la siguiente cuestión: “Si se intenta detener con la mano un cuerpo que desliza por un plano horizontal, se observa que este ejerce una fuerza sobre la mano” y se preguntaba: “¿Es este algún tipo de fuerza nueva que aún no hemos considerado? ¿Debe un cuerpo ejercer una fuerza sobre un obstáculo *por el hecho de estar en movimiento* de igual manera como un resorte ejerce una fuerza por razón de su elasticidad? Como vemos, Galileo razonaba sobre las fuerzas y los movimientos sin llegar a concebir lo que hoy, para nosotros, es la energía cinética.

Con objeto de que el lector perciba hasta qué punto el ingenio de Galileo intentó llegar al concepto de energía sin conseguirlo, se transcribe a continuación un párrafo traducido de su libro *Dos Nuevas Ciencias*, Tercer día:

“Está claro que si se eleva este cuerpo un cúbito o dos y se le deja caer sobre el mismo material, podrá, con ese impulso, ejercer una nueva y mayor presión que la causada por su propio peso; y este efecto es debido al [peso del] cuerpo que cae junto con la velocidad adquirida durante la caída, efecto que irá creciendo con la altura de la caída, es decir, crece con la velocidad del cuerpo que cae. De la calidad e intensidad del golpe podemos estimar con bastante exactitud la velocidad del cuerpo que cae. Pero decidme, caballeros: ¿no es cierto que si un bloque cae sobre una estaca desde una altura de cuatro cúbitos y la hunde en la tierra, por ejemplo cuatro dedos, si procediera de una altura de dos cúbitos, hundiría la estaca mucho menos, y si procediera de un cúbito todavía menos...?”

Es evidente que Galileo intuía que hay algo asociado a un cuerpo por el mero hecho de estar a una cierta altura que le faculta para clavar una estaca en el suelo. Este es hoy, para nosotros, un sencillo problema que se resuelve por aplicación del principio de conservación de la energía, pero en pleno siglo XVII la cosa no estaba nada clara.

Ya en la segunda mitad del siglo, Newton estudia las fuerzas como las causas de los movimientos y establece sus tres *Principios de la Dinámica* en los que vincula las fuerzas con las aceleraciones y deja claro que, en ausencia de fuerzas, el movimiento es siempre rectilíneo y uniforme. Casi al mismo tiempo, Ch. Huygens deduce de los principios de Newton una expresión que relaciona una fuerza y su tiempo de aplicación con la variación del movimiento del cuerpo afectado:

$$f \cdot t = mv_2 - mv_1$$

El propio Huygens da el nombre de *cantidad de movimiento* al producto de la masa de un cuerpo por la velocidad con que se mueve y llama *impulso mecánico* al producto de una fuerza constante por su tiempo de actuación. De esta forma, propone que “el impulso (mecánico) que ejerce una fuerza es igual a la variación de su cantidad de movimiento”. Pero esto no es todo; el genio matemático de Huygens logró extraer de la combinación de la ley del movimiento acelerado de Galileo y la ley de la dinámica de Newton una nueva expresión para el caso de que una fuerza constante actúe sobre un cuerpo a lo largo de un trecho rectilíneo:

$$f \cdot s = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

En su obra *Motu Corporum ex Percussione* (1703), Huygens denomina *vis viva* al producto mv^2 . En esta expresión reconocemos el Principio de la Conservación de la Energía para el caso de una fuerza constante que acelera a un cuerpo. En muchos libros aparece esta expresión con el nombre de “Teorema de las fuerzas vivas”, en recuerdo de la denominación de Huygens.

Durante todo el S. XVIII el término “fuerza” se emplea de forma ambigua, lo mismo para designar la causa que altera la velocidad de los cuerpos que para referirse a las causas del desarrollo de trabajo por estos²³², lo que evidencia que en esta época, el concepto de energía estaba aún por definirse. En este siglo se perfila aún más el concepto de fuerza como causa de cambios, lo cual puede resumirse en cuatro postulados:

- Las fuerzas vencen la fricción.
- Las fuerzas modifican la velocidad de los cuerpos.
- Las fuerzas modifican el nivel (altura sobre el suelo) de los cuerpos.
- Las fuerzas deforman a los cuerpos elásticos.

Como vemos, aún no se habla de energías, si bien nosotros reconocemos en cada uno de los postulados un caso particular del cumplimiento del *Principio de la Conservación de la Energía*. Nos es fácil reconocer en el primero que el trabajo realizado por el desplazamiento de la fuerza se convierte en calor de fricción, en el segundo diríamos que el trabajo realizado por la fuerza impelente se acumula en el cuerpo como energía cinética. En el caso tercero diríamos que el trabajo realizado por la fuerza se acumuló en forma de energía potencial gravitatoria y en el cuarto postulado diríamos que el trabajo de la fuerza se acumuló como energía potencial elástica del cuerpo. En resumidas cuentas, los científicos del S. XVIII asumieron la conservación de la energía en los procesos mecánicos, si bien no la llamaban así.

El siglo XIX es el período en que se configura el concepto de energía. Fue Thomas Young²³³ el primero en utilizar el término "energía" en su sentido moderno, en lugar de *vis viva*. Lo hizo en una conferencia que pronunció en la Royal Society en 1802 La innovación semántica de Young era un nuevo término construido con tres raíces griegas: *en* (contenido, dentro), *hergon* (actividad, acción, trabajo), *eia* (cualidad). Años más tarde, en 1829, Gustave G. Coriolis se refirió por escrito a la *energía cinética* en su sentido moderno, y en 1853, William Rankine acuñó el término *energía potencial*.

En 1804, B. Thompson escribe que “*el calórico (calor) es el resultado de la fricción de los cuerpos*”, lo que supone relacionar por primera vez una forma de energía (el calor) con un trabajo. Esto significa un gran paso hacia la conquista del concepto de energía. Veinticinco años antes, un ingeniero escocés llamado James Watt había patentado un invento que cambiaría el curso de la historia, se trataba de una máquina capaz de convertir el calor de una combustión en trabajo motriz. Estamos hablando de la máquina de vapor. Vemos que en esta época ya era evidente que si el trabajo puede convertirse en calor en las fricciones, el calor puede convertirse en trabajo en

²³² Aún hoy, persiste la costumbre de llamar “fuerza electromotriz” a la energía que un generador eléctrico aplica a cada unidad de carga que pasa por él, cuando en realidad, debe llamarse “energía electromotriz”.

²³³ Young es célebre por su experimento de la doble rendija que mostraba la naturaleza ondulatoria de la luz y por haber ayudado a descifrar los jeroglíficos egipcios a partir de la piedra Rosetta.

la máquina de vapor recién inventada. Por entonces, el pensamiento se regía por la *Teoría del calórico*, según la cual el *calórico* sería un fluido hipotético que impregnaría la materia y sería responsable del calor de los cuerpos. Para Lavoisier, las moléculas de todos los cuerpos de la naturaleza estarían en un estado de equilibrio entre la atracción que tiende a aproximarlas y la acción del calórico, que tiende a separarlas. Según su mayor o menor cantidad de calórico, los cuerpos son gas, líquido o sólido. La teoría del calórico era entonces ampliamente aceptada, ya que incluso explicaba los experimentos de Joule, realizados en 1843, sobre la equivalencia entre calor y trabajo, interpretando que al frotar un cuerpo, se romperían las vesículas microscópicas que contienen el calórico, liberando calor.

Los años de 1842 y 1843 son cruciales; en 1842 Julius Von Mayer (1814-1878) realizó un histórico experimento que se ha hecho célebre por la importancia de su resultado y al año siguiente, independientemente del anterior, James Prescott Joule, publicaba los resultados de su trabajo, los cuales coincidían notablemente con los del anterior. El experimento en cuestión consiste en un recipiente térmicamente aislado, equipado con una hélice de paletas que se mueven merced al descenso de un cuerpo de masa conocida, por su propio peso. Ambos observaban que, al descender el cuerpo, se elevaba ligeramente la temperatura del agua contenida en el recipiente. Como hemos visto, por entonces se sabía que las fricciones producen calor. Tanto el calor como la posición de un cuerpo respecto del suelo, eran magnitudes que a comienzos del S. XIX se reconocían como energías (aunque aún no se las llamara así) y además se sabía cómo medirlas, por ello no les resultó difícil comprobar una y otra vez que la pérdida de energía potencial del cuerpo es igual que la energía calorífica que acumula el agua. La coincidencia entre los valores $m_{\text{pesa}}g \cdot h$ y $m_{\text{agua}} \cdot C_{\text{esp}} \cdot \Delta T$ les permitió llegar a la conclusión de que, en sus experimentos, la energía potencial del cuerpo se convierte en energía calorífica del agua, y les permitió establecer que 1 caloría equivale a 4,18 Julios (equivalente mecánico del calor). Vemos pues, que la primera mitad del S. XIX es la época en la que los científicos reconocen la conservación de la energía en los procesos termodinámicos.

Así pues, a mediados del S. XIX ya se perfilaba la idea consensuada de que existe una magnitud asociada a los cambios, que se conserva. El centro de gravedad de esta línea de pensamiento se centraba geográficamente en el norte del Reino Unido, donde acababa de iniciarse la revolución industrial. Allí ingenieros y físicos se afanaban en mejorar las prestaciones de las máquinas que convertían el calor en movimiento y elucubraban sobre la energía y sus transformaciones. Algunos expresaron las ideas vagamente y otros con toda claridad, algunos llegaron al convencimiento principalmente a través de la filosofía, otros a partir de consideraciones prácticas en el uso de motores y máquinas o a partir de experimentos de laboratorio y otros más por una combinación de factores. Pero si hay que poner fecha al *Principio de la Conservación de la Energía* tendríamos que situarnos en 1842, año en el que J.R. Mayer publicó un ensayo titulado "*Observaciones sobre las energías²³⁴ de la naturaleza inorgánica*". En él se reunían las diversas ideas básicas sobre la interconversión de calor en trabajo, y lo que es más importante, la equivalencia y conservación general de todas las formas de energía, de la que, la equivalencia calor-trabajo es tan solo un caso particular. En uno de sus razonamientos, Mayer afirmaba:

²³⁴ En el original alemán, Mayer utilizaba el término *kraft* (fuerza, brío, fortaleza, vigor)

“Esta capacidad de asumir distintas formas es la segunda propiedad esencial de todas las causas. Considerando en conjunto ambas propiedades, podemos decir que las causas son

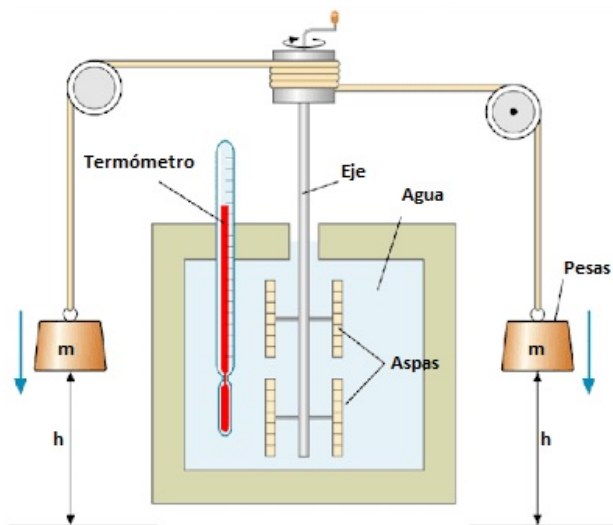


Figura 118 Esquema del experimento de Mayer y Joule. Al descender las pesas, la fricción de las paletas contra el agua provoca un aumento de su temperatura.

cuantitativamente *indestructibles* y cualitativamente *convertibles*... Las energías son, por tanto, entidades indestructibles y convertibles”.

Los planteamientos y generalizaciones que Mayer hacía en él eran fantásticas para la época y tan audaces que una de las grandes revistas científicas de la época rehusó a publicarlo.

Si bien Mayer y Joule establecieron la existencia de la energía como magnitud que se mantiene constante en los procesos, ninguno de los dos llegó a formular matemáticamente el principio. Fue Hermann von Helmholtz quien publicó una memoria titulada “*Sobre la conservación de la fuerza*”, usando el

término “fuerza” (en alemán *kraft*) para referirse a lo que hoy llamamos “energía”, en el que afirmaba que “*es imposible crear una fuerza motriz a partir de la nada*”.

En 1853, el ingeniero escocés William Rankine propone que “la energía es la capacidad de un sistema para realizar un trabajo” y distingue entre una “energía latente” (potencial) y una “energía actual” (cinética) y afirma que “*la suma de las energías latente y actual del universo permanece constante*”.

La segunda mitad del S. XIX tiene como hito importante la *Teoría Electromagnética* que publicara J.C. Maxwell en 1865 y tiene una importancia suma en la historia de la evolución de las ideas hacia el concepto de energía. Treinta años antes M. Faraday y H. Lenz, por separado, habían observado y descrito que al mover un imán en las inmediaciones de un conductor se genera en este una corriente eléctrica y que el campo magnético creado por esta se opone al campo magnético inductor del imán, de forma que es preciso vencer una resistencia mecánica para moverlo. Este hecho constituía una de las premisas de partida en las deducciones de Maxwell cuando elaboraba su teoría, y en su forma matemática, constituye la tercera de las ecuaciones, también llamada *Ley de la inducción* o *Ley de Faraday-Lenz*, que ya se trató en el capítulo 1.19.

Las ideas de Maxwell fueron rápidamente aceptadas por la comunidad científica de la época y así, en las tres últimas décadas del siglo ya se consideraba la luz como una forma de propagación de la energía e igualmente, cuando en 1885 Heinrich Rudolf Hertz descubrió las ondas electromagnéticas no hubo reticencias para considerarlas igualmente que la luz. Todo ello supuso un nuevo avance hacia el concepto de energía, de forma que al finalizar el siglo, ya estaba asumido que la energía es una magnitud que adopta muchas y variadas formas, que se encuentra acumulada en los sistemas físicos, que cambia sus formas en los acontecimientos y fenómenos y que en esos procesos puede desarrollarse un trabajo por desplazamiento de fuerzas y calor.

Los dos últimos episodios de esta larga y tortuosa historia corren a cargo de los físicos alemanes Max Planck y Albert Einstein. El primero propone en 1887 una teoría por la que se acepta que la energía radiante²³⁵ es emitida y absorbida por los cuerpos no de forma continua, sino cuantizada, esto es, en forma de dosis cuyo valor es $E=h \cdot \nu$ (h es una constante²³⁶ de proporcionalidad que lleva el nombre de su creador y ν es la frecuencia de la onda electromagnética). Se recomienda al lector que revise el capítulo 1.12 donde se tratan las ideas de la cuantización de la energía.

Por su parte, Einstein propone en su *Teoría de la Relatividad* (1905) que la masa es una forma de energía, cuya equivalencia sigue la ley:

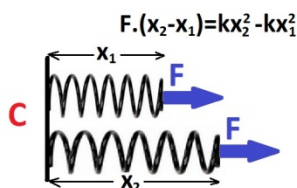
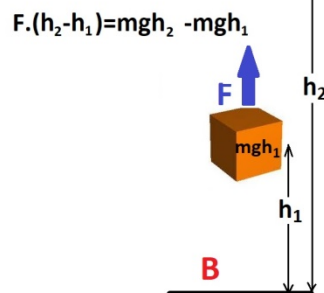
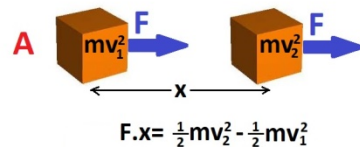
$$E = m \cdot c^2$$

En el capítulo III.3 ya se trató la equivalencia masa-energía, de particular importancia en los procesos nucleares.

De esta manera, asumidos ya el Principio de la Conservación de la Masa y el Principio de la Conservación de la Energía, en el S. XX quedan unificados bajo un enunciado más general del *Principio de la Conservación de la Masa-Energía*.

IV.2 TRABAJO Y CALOR: “ENERGÍAS EN TRÁNSITO”

Cuando en los primeros años del S. XVII Ch. Huygens estudiaba los choques elásticos llegó a la convicción de que, cuando una fuerza constante impulsa a un cuerpo, en ausencia de rozamientos, varía la velocidad de este, cumpliéndose la expresión que aparece en la figura 119-A. A mediados



del siglo siguiente era ya comúnmente aceptado que el producto del valor de una fuerza por el desplazamiento de su punto de aplicación es una magnitud energética que llamamos *trabajo*. La figura 119 muestra tres casos clásicos en los que el trabajo de una fuerza incrementa la energía cinética, la energía potencial gravitatoria o la energía potencial elástica del cuerpo afectado.

Figura 119 El trabajo que desarrolla la fuerza constante en su desplazamiento se invierte en incrementar la energía: Cinética (A), Potencial gravitatoria (B) o Potencial elástica (C).

En los libros de texto para los estudiantes suele definirse la energía como *la facultad que posee un sistema físico para realizar un trabajo, en función de su naturaleza o circunstancias*. Un cuerpo que está situado a una cierta altura respecto del suelo tiene energía potencial gravitatoria ya que,

²³⁵ Este término se refiere a la luz, los rayos infrarrojos, ultravioletas, radiación X, radiación γ y en general, todas las ondas electromagnéticas.

²³⁶ El valor de la constante de Planck actualmente aceptado es: $h=6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

gracias a su posición, está facultado para producir un trabajo²³⁷. De igual forma, un cuerpo que posee una velocidad está facultado para realizar un trabajo, merced a su movimiento²³⁸. Análogamente, un cuerpo elástico deformado puede realizar un trabajo gracias a su deformación²³⁹.

En los fenómenos en los que una energía se transforma en otra, se realiza un trabajo. Veamos varios ejemplos:

Ejemplo 1: Caída de un cuerpo. Cuando un cuerpo se encuentra a una cierta altura respecto del suelo y se le deja caer libremente, la fuerza que actúa sobre él es su peso (la fuerza con la que le atrae la Tierra). Antes de la caída, el cuerpo tiene una cierta energía potencial que, a su llegada al suelo, se ha convertido en energía cinética. En el transcurso de la caída, la fuerza peso ha realizado un trabajo cuya cuantía ha de ser el valor del peso multiplicado por la altura desde la que cayó.

Ejemplo 2: Cuerpo lanzado pendiente arriba por un plano inclinado. Cuando se lanza un cuerpo desde la base de un plano inclinado con una cierta velocidad, este asciende por el plano hasta detenerse a una cierta altura. La energía cinética que poseía al principio se convierte en energía potencial y durante el trayecto, la componente de su peso paralela al plano ha realizado un trabajo que sería igual al producto de su valor por el desplazamiento realizado.

Ejemplo 3: Un arquero dispara una flecha con su arco. Cuando el arquero suelta la cuerda del arco tensado y este propulsa la flecha hacia su objetivo, la energía potencial elástica del arco llega a convertirse en energía cinética de la flecha. En su recuperación, la cuerda del arco ejerce una fuerza sobre la parte trasera de la flecha de forma que, a lo largo del proceso de disparo, esa fuerza ha realizado un trabajo.

Ejemplo 4: Un adelantamiento de tráfico. Un coche circula a 50 Km/h detrás de un vehículo lento, en un momento dado, el conductor decide adelantarlo. Pisa el acelerador y el coche alcanza la velocidad de 120 Km/h a expensas del empuje del motor. En ese proceso la energía cinética del coche se ha incrementado, y mientras tanto, el motor ha realizado un trabajo ejerciendo una fuerza impulsora sobre el coche durante el trecho que necesitó para adelantar.

Vemos que en los cuatro ejemplos se cumple lo mismo: El sistema físico²⁴⁰ pasó de un estado a otro, en el primer estado tenía una forma de energía, la cual se fue transformando a medida que se desarrollaba el proceso. Durante el proceso, la fuerza involucrada realizó un trabajo y al final la energía se transformó por completo (o se incrementó). En los cuatro casos se cumple que la energía inicial es igual al trabajo realizado durante el proceso y que este es igual a la energía final.

²³⁷ El agua embalsada tras la presa de un pantano tiene una energía potencial que se utiliza para producir energía eléctrica.

²³⁸ El inolvidable humorista español Miguel Gila en sus celeberrimas actuaciones, armado de teléfono, interpretaba hilarantes monólogos sobre una supuesta guerra en la que él era combatiente, y provocaba la risa del público cuando decía: "A mí no me dan miedo las balas, lo que me asusta de ellas es la velocidad con que vienen". Pasados ya veinte años de su fallecimiento, su popularidad es tal que decir "esto parece la guerra de Gila" es una frase que todos entienden para referirse a una situación absolutamente rocambolesca. La frase de este genial humorista encierra una gran verdad científica, toda vez que la energía cinética de un cuerpo depende mucho más de su velocidad que de su masa.

²³⁹ Desde la más remota antigüedad, el hombre ha utilizado el arco y las flechas como armas, aprovechando la energía elástica para propulsar el proyectil.

²⁴⁰ Se supone que el sistema es ideal, esto es, no hay rozamientos.

Además, nos es posible afirmar que en todo momento intermedio del proceso, la energía inicial menos el trabajo realizado hasta ese preciso momento tiene que ser igual a la energía final en ese momento.

Concluimos por tanto que *el trabajo que realizan las fuerzas es “energía en tránsito”* ya que solo tiene existencia mientras se desarrollan los procesos, en tanto que las distintas formas de energía están acumuladas en los cuerpos. Sacamos la conclusión también de que la existencia de la energía en sus variadas formas es la causa de los cambios en los sistemas y que estos experimentan transformaciones -están vivos- gracias a la existencia de la energía en sus variadas formas y sus posibilidades de transformación. No es, en fin, desacertado afirmar que la energía es la “savia vital” de la Naturaleza. Un mundo sin energías sería un mundo muerto, sin actividad ni cambio alguno. Hemos de asumir por ello que no hay acontecimiento en el que no haya alguna transformación energética, así, desde los grandes acontecimientos cósmicos como la explosión de una supernova o el nacimiento de una nueva estrella, pasando por grandes fenómenos en nuestro planeta como un seísmo tectónico o la evaporación del agua de los mares, o acontecimientos de nuestro orden de magnitud como hacer hervir un litro de agua o incluso acontecimientos ínfimos como el calentamiento que experimenta nuestro cerebro cuando un pensamiento fugaz se nos pasa por la mente, en todos ellos siempre se produce la transformación de una forma de energía en otra.

Ahora bien, falta por considerar el papel que juega el calor en los procesos naturales. En el capítulo III.8 nos referíamos a los procesos estelares responsables de la formación de los elementos como *exoenergéticos*, es decir, que transcurren con liberación de calor. En la naturaleza, los acontecimientos transcurren con desprendimiento o con absorción de calor, es decir, pueden ser *exotérmicos* o *endotérmicos*. En los cuatro ejemplos anteriores se produce calor a lo largo del proceso, un calor generado por la fricción entre las partes materiales. En el primer ejemplo es la fricción del cuerpo deslizante contra el aire la causa del desprendimiento de calor²⁴¹ en el segundo



Figura 120 Esquema resumen de las ideas acerca del trabajo y el calor como energías en tránsito en los procesos mecánicos.

lo es la fricción del cuerpo deslizante contra el plano. En el tercero es de nuevo la fricción contra el aire la responsable del minúsculo calor generado en el lanzamiento y en el cuarto ejemplo las fricciones entre las piezas móviles del motor, de las ruedas contra el pavimento y de

la carrocería contra el aire son las causas del desprendimiento calorífico. En resumidas cuentas, en los procesos mecánicos siempre hay un desprendimiento de calor, generalmente, por causa de los rozamientos. Esta circunstancia afecta a muchos otros procesos que no son mecánicos, como por ejemplo, el calentamiento que se produce en los aparatos eléctricos o electrónicos en su funcionamiento o el calor adicional que se genera en nuestro cuerpo cuando realizamos un esfuerzo físico.

Por todo ello, el calor ha de ser considerado como un subproducto de la actividad de los sistemas, según se esquematiza en la figura 120. Por ello hemos de revisar lo afirmado en un párrafo

²⁴¹ Este calor no es fácilmente detectable y mucho menos, medible, Por esta razón tendemos a ignorarlo.

anterior, cuando nos referíamos a un sistema ideal en el que no hay rozamientos, y asumir que *en todo proceso natural la energía inicial es igual a la suma de la energía final y la energía calorífica perdida en el proceso*.

Genéricamente, llamamos *máquina* a todo sistema natural o artificial que transforma una energía en otra, así, un motor transforma la energía química de la gasolina en energía cinética, el arco del arquero transforma energía elástica en cinética, nuestro cuerpo transforma la energía química de la glucosa y otros principios inmediatos en calor, trabajo motriz y mil cosas más, un alternador transforma energía mecánica en energía eléctrica, una linterna transforma energía química en electromagnética, etc. Todas las máquinas tienen en común que se calientan mientras funcionan, de forma que la energía que entregan siempre es menor que la energía que tienen o reciben. Dado que las máquinas son sistemas transformadores de la energía, lo deseable de ellas es que la transformación energética fuera del cien por cien, o dicho de otra forma, que no hubiera pérdidas. Por ello, un parámetro interesante de una máquina es su *rendimiento*, esto es el tanto por ciento de “energía entregada” que la máquina convierte en “energía útil”.

$$\text{Rendimiento} = 100 \cdot \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía entregada}}$$

Si bien las primeras máquinas de vapor apenas alcanzaban un 20% de rendimiento, las máquinas actuales se construyen intentando optimizar al máximo su eficiencia energética. En el campo de los electrodomésticos se utiliza una clasificación de eficiencia que aparece en la figura 121.



Figura 121 Escalado de eficiencias energéticas de máquinas domésticas, vigente en la U.E.

Puesto que el calor es un subproducto de la actividad de los sistemas, este se genera mientras dura esa actividad, de la misma forma que el trabajo se desarrolla durante la actividad. He aquí el motivo por el que tanto el trabajo como el calor se consideran *energías en tránsito*, ya que no tienen existencia propia si no es durante el transcurso de los acontecimientos. Debemos entender pues, que ni el calor ni el trabajo se encuentran acumulados como tales en los sistemas. Los sistemas acumulan energía potencial o cinética o másica y pueden emitir o absorber energía electromagnética, eso sí, a costa de perder o ganar, respectivamente, contenido energético global.

Llegados a este punto, el lector ya debe tener claro que el trabajo es una magnitud en tránsito que tiene entidad

mientras se desarrolla un proceso, y con toda probabilidad ya pensará que el valor del trabajo desarrollado en un proceso queda almacenado en una determinada forma de energía al final del mismo. En cuanto al calor, lo hemos concebido como un subproducto de la actividad física, el cual tiene entidad mientras dura el proceso. Pero queda una cuestión por resolver, si el trabajo se acumula bajo una determinada forma de energía al final de un proceso ¿qué pensar del calor? La cuestión que nos planteamos ahora es: El calor, una forma reconocida de energía ¿se acumula como tal en los sistemas?

Veamos: En el capítulo III.11 consideramos los postulados de la *Teoría Cinética de la Materia* y adquirimos la idea de que las partículas que conforman los materiales están en permanente movimiento. Se trasladan si el material es plasma o gas y vibran con mayor o menor intensidad si el material está en estado líquido o sólido. Esto equivale a aceptar que las partículas constituyentes de la materia poseen energía cinética (traslacional o vibracional). La Teoría Cinética presenta la temperatura de los cuerpos como una magnitud proporcional a la energía cinética media de sus partículas, esto es:

$$T(K) \sim E_c$$

Así pues, cuando decimos que “una plancha está caliente” no estamos hablando correctamente, ya que nos estamos refiriendo a que su temperatura es alta y deberíamos decir que “la energía cinética media de los átomos de hierro es elevada”²⁴². En consecuencia, cuando un cuerpo a temperatura elevada se pone en contacto térmico con otro frío, el calor fluye del cuerpo caliente al segundo. Ese calor fluye a costa de la disminución de la energía cinética media de las partículas del cuerpo caliente y al llegar al frío se reparte en forma de energía cinética entre todas sus partículas, elevándose así su temperatura. Por tanto, concluimos en que el calor, como tal, no se acumula en los cuerpos sino que la energía térmica acumulada en los cuerpos es realmente, energía cinética.

Con todas estas consideraciones ya tenemos un esquema conceptual del trabajo y del calor como magnitudes energéticas en tránsito que goza de simetría para ambos.

IV.3 CARÁCTER CONSERVATIVO Y OTRAS PROPIEDADES DE LA ENERGÍA

El Principio de la Conservación de la Energía es una verdad que hoy se acepta como obvia y tan sólo cabe comprobar su cumplimiento en todos y cada uno de los casos concretos que se consideren. Vimos en el capítulo I.3 que toda aquella información almacenada en la memoria, adquirida a través de la experiencia o la educación es *Conocimiento ordinario* y tenemos la tendencia engañosa de considerar como obvio lo que realmente no lo es. Hemos visto un esbozo de la evolución de tres siglos sobre las ideas que condujeron a la conquista del concepto de energía, una carrera de relevos por un tortuoso camino en el que mentes brillantes transmitieron a otros sus experiencias y saberes en un esfuerzo titánico en el que hubo héroes y mártires. No podemos por tanto, caer en la ingenuidad de que todo lo que hoy sabemos nos ha sido legado por generación espontánea.

Aceptamos pues, que *la energía no se crea ni se aniquila en los procesos naturales, únicamente se convierte de una forma en otra*. Así pues, todo proceso natural en el que un sistema pase de un estado 1 a otro estado 2, cumple con lo expresado en el esquema de la figura 120. Pero ahora pensemos ¿cuánta energía hay acumulada en un cuerpo? Para responder a esa pregunta deberíamos conocer todas las formas de energía que posiblemente pudiera contener. Conocemos la energía potencial gravitatoria, la elástica, la cinética, la química, la electromagnética, la másica y poco más, pero, ¿no habrá algún otro tipo de energía que desconocemos? Es sensato pensar que sí. ¿Acaso Mayer o Joule hubieran pensado en la energía electromagnética? ¿Hubiera pensado

²⁴² Se aconseja al lector que no hable así en la vida ordinaria si no quiere que le llamen cursi o pedante.

Maxwell en la energía másica? Pues bien, a falta de conocer todas las posibles formas de energía presentes en la naturaleza, hemos de asumir con prudencia que el saldo energético total de un cuerpo no lo podemos conocer, tan solo podremos determinar sus variaciones. A ese saldo energético se le denomina *Energía Interna*, de forma que el *Principio de la Conservación de la Energía* puede ser expresado en notación matemática así:

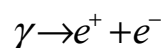
$$\sum E_1 = \sum E_2 + \sum \text{pérdidas}$$

Dicho en palabras, *La energía interna del sistema antes de la transformación es igual a la suma de su energía interna al término de la misma y las pérdidas.*

Por regla general, las pérdidas son de tipo calorífico y sucede que este calor se difunde en el entorno, dando la sensación de que no existe (por la misma razón que al verter un tintero en el mar, nos parece que la tinta desaparece en él, debido a su enorme tamaño en comparación al volumen de tinta). Este hecho propicia la tendencia a ignorar la existencia de las pérdidas en los procesos físicos, aunque tenemos muy asumida de forma inconsciente esa existencia. Así, nos resulta chocante pensar en una pelota que botara eternamente, o un péndulo que oscilara sin detenerse jamás, o un coche que no gastara gasolina, etc.²⁴³

Otra característica de la energía es que se transforma y se transfiere en los procesos físicos. La experiencia demuestra una y otra vez que, en todo proceso natural, tiene lugar alguna transformación de una forma de energía en otra. Así, por ejemplo, en la oscilación de un péndulo, la energía potencial de la masa pendular en un extremo de la trayectoria, se convierte en cinética cuando el péndulo pasa por su posición de equilibrio; en la fotosíntesis de las plantas, la energía electromagnética solar se convierte en energía bioquímica; en una central eólica, la energía cinética del viento se convierte en energía eléctrica, etc.

La conversión de la masa en energía y viceversa, prevista en la ecuación de Einstein, sólo tiene lugar en los procesos nucleares (por esta razón no nos resulta familiar). Así, por ejemplo, en el proceso en el que un fotón se convierte en un par electrón-positrón:



La masa del par electrón-positrón aparece a expensas de la aniquilación de la energía del *quanto* o *fotón* de radiación γ .

En la reacción de fusión del hidrógeno pesado se da el proceso contrario:



²⁴³ Al quimérico ingenio que es capaz de evolucionar sin pérdidas de ningún género, se le denomina "móvil perpetuo de segunda especie". Desde siempre, los científicos han intentado diseñar dispositivos que fueran capaces de transformar una forma de energía en otra, sin pérdida alguna, entre ellos citamos a Arquímedes, Galileo, Leonardo de Vinci, etc. Todos ellos fracasaron en su intento.

En este caso, la suma de las masas de los dos núcleos de Hidrógeno pesado es ligeramente superior a la masa del núcleo de Helio, es decir, ha habido una aparición de energía a expensas de la desaparición de parte de la masa del sistema. Pues bien, en uno y otro caso se cumple que $E=\Delta m.c^2$

Los procesos nucleares no cumplen el Principio de conservación de la masa y tampoco el de la Energía, pero cumplen un principio de conservación más general, que podríamos llamar de la “masa-energía”.

Otro aspecto destacable de la energía es que se transfiere, así por ejemplo, el calor producido en las pérdidas de cualquier máquina, se transfiere al entorno; el calor producido por el metabolismo en nuestro propio cuerpo (que sirve para mantener nuestro cuerpo a 36,5 C) es irradiado también al ambiente; la energía nuclear de fusión producida por el Sol llega hasta la tierra en forma de radiación electromagnética; el calor de una placa vitrocerámica se transfiere hasta la cazuela en forma de radiación infrarroja, etc.

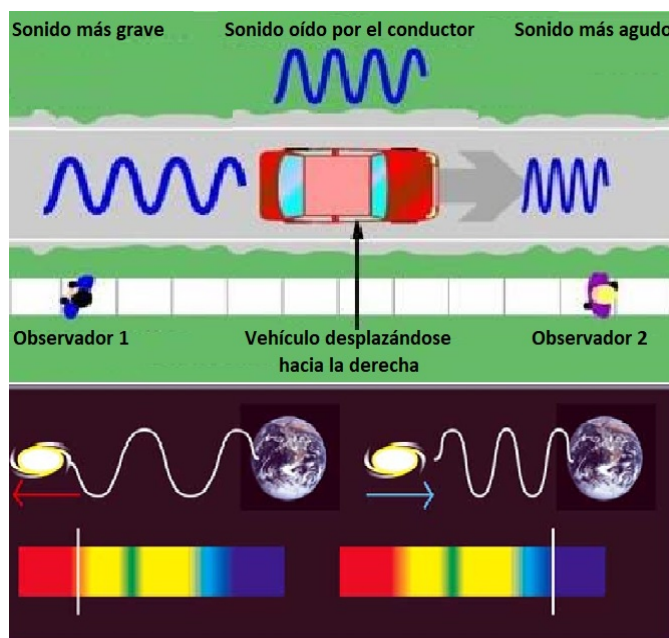


Figura 122 Esquema comparativo del efecto Doppler acústico y astronómico. En ambos casos es el foco el que se mueve respecto del observador.

Por cuanto a las conversiones de energía concierne, nuestro mundo es un mundo asimétrico. Estamos acostumbrados a frotar nuestras manos para calentarlas, a ver que los ríos fluyen de las montañas hacia el mar, que la lluvia cae de las nubes al suelo, que al circular la corriente eléctrica por un hilo de hierro, éste se calienta, etc., y todo ello nos parece lo más natural. Sin embargo, ¿quién mínimamente sensato piensa que al meter las manos unidas en agua caliente, estas se van a mover espontáneamente? ¿Quién imagina un mundo en el que los ríos fluyeran del mar hacia las montañas y que la lluvia ascendiera del suelo hacia las nubes? ¿Cabe pensar que al meter un pedazo de hierro en un

horno caliente, generará corriente como si de una pila se tratara? Estas reflexiones nos llevan a aceptar que las transformaciones energéticas de los procesos naturales son como carreteras de un solo sentido.

No obstante, esto último es parcialmente cierto. Es verdad que los acontecimientos naturales tienden a desarrollarse en un sentido, pero ello no quiere decir que no puedan (en condiciones especiales) desarrollarse en sentido contrario. Así, por ejemplo, lo normal es que el trabajo se convierta en calor de forma espontánea (esto sucede en todos los casos de fricción), pero no menos cierto es que, en una máquina de vapor, puede convertirse el calor en trabajo. Igualmente, nos parece normal que la energía eléctrica se convierta en luz (en una lámpara) pero también la luz puede convertirse en energía eléctrica en una célula fotovoltaica, etc.

En resumen, la tercera característica de la energía es que, en los procesos naturales esta magnitud se transforma, perdiendo paulatinamente capacidad para convertirse en trabajo. Se dice por ello que, *en los procesos espontáneos, la energía tiende a degradarse*, de forma que las energías más degradadas son las que con más dificultad pueden convertirse en trabajo. Por ello, el calor de pérdidas, que es el subproducto energético más común de los procesos físicos, se considera como la forma de energía más degradada²⁴⁴.

Para perfilar por completo el concepto de energía nos falta hacer una última consideración teórica: ¿Qué le pasa a un sistema cuando desde el exterior, se le aporta energía? Ese aporte puede hacerse en una de las tres siguientes formas:

- Aportando trabajo, por acción de una fuerza (por ejemplo, la compresión de un gas, la elevación en la gravedad o deformando un cuerpo elástico).
- Aportando calor, merced a una diferencia de temperaturas (por ejemplo, calentar agua en una placa vitrocerámica).
- Por irradiación electromagnética (por ejemplo, calentar agua en un horno microondas o el proceso de la fotosíntesis en el que un vegetal acumula energía solar sintetizando moléculas ricas en energía a partir de otras menos energéticas como el agua y el CO₂)

Pues bien, en todos los casos se cumple el Principio de la Conservación de la Energía:

$$\text{Energía Interna final} - \text{Energía Interna inicial} = \text{Energía recibida}$$

Expresión que, para aquellos sistemas que sólo pueden intercambiar calor y trabajo con el entorno, se denomina *Primer Principio de la Termodinámica*.

Para finalizar, hemos de recordar que en el capítulo IV.2 nos referíamos a la existencia de muchas y muy variadas formas de energía. De hecho, se considera a la energía como la magnitud de “las mil y una caras”. Incluso, en este mismo capítulo hemos aceptado la posibilidad de que existan nuevas formas de energía que ni siquiera conocemos. La ciencia siempre ha tratado de poner orden en el caos y de reducir a simples reglas lo que a primera vista parecen comportamientos complejos. En este orden de las cosas, la física propone la existencia de tan sólo cuatro formas de energía: *Potencial, cinética, electromagnética y másica*. Todas las demás formas: química, térmica, eólica, hidráulica, solar, etc., pueden ser agrupadas en uno de estos cuatro conceptos. Efectivamente, la energía térmica, propia de un cuerpo a alta temperatura, no es sino energía cinética de sus partículas. La Energía química almacenada en una molécula de glucosa no es sino energía potencial electrostática almacenada en la estructura de esa molécula. La energía eólica no es sino energía cinética del aire en movimiento. La energía hidráulica no es sino energía potencial del agua embalsada. La energía nuclear es energía másica y la energía solar no es sino energía electromagnética.

²⁴⁴ A pesar de darle al calor esta consideración, conviene saber que la diferencia de temperaturas entre las partes de un sistema, es motivo de producción de trabajo. Este es el caso de las corrientes marinas y de la circulación de los vientos en la atmósfera. Por ello se acepta que, mientras haya otras formas de energía en el universo que no sean calor, el universo seguirá vivo. Incluso, cuando en el universo solo quede calor, habiendo diferencias de temperatura, aún puede haber actividad, el flujo de calor de las partes calientes a las frías tiende a igualar las temperaturas. Cuando eso suceda, cesará toda actividad y se habrá llegado a la “muerte térmica del universo” (parece bastante probable que ninguno de nosotros lo verá con sus propios ojos).

IV.4 UN UNIVERSO EN EXPANSIÓN: TEORÍA DEL BIG-BANG

Corría el año 1842 cuando un físico austriaco, Christian Andreas Doppler (1803-1853) describió un fenómeno acústico que todos hemos percibido en numerosas ocasiones. Supongamos que nos hallamos en el medio de un viaducto peatonal que atraviesa por alto una importante autopista, en ese momento no pasa ningún vehículo y, a lo lejos, vemos un coche que se aproxima a gran velocidad; el sonido de su motor nos parece muy agudo, y por ello tenemos conciencia de que el vehículo se aproxima a gran velocidad. Tras rebasar el viaducto, el coche se aleja rápidamente al tiempo que percibimos cómo el sonido de su motor se ha hecho más grave. Este efecto nos es tan familiar, y lo tenemos tan asumido, que incluso un ciego sería capaz de apreciar el paso del vehículo y la velocidad con que lo hace, tan sólo por la audición del sonido.

En la primera mitad del S. XIX estaban bien establecidas las leyes de propagación de las ondas materiales, así pues, Doppler combinó las ecuaciones de propagación de las ondas acústicas tanto para el caso en el que el foco se moviera respecto del observador como para el caso en el que fuera el observador el que se moviera respecto del foco emisor. El resultado fue la ecuación:

$$f = f_0 \frac{(v \pm v_r)}{(v \mp v_s)}$$

Donde f es la frecuencia del sonido percibido, f_0 es la frecuencia que tendría el sonido si, tanto el foco emisor como el receptor, estuvieran en reposo, v es la velocidad del sonido en el aire, v_r es la velocidad del receptor y v_s es la velocidad del foco. Los dobles signos que aparecen en la ecuación se refieren a los casos en los que el receptor, el foco o ambos se aproximen (signos superiores) o que el receptor, el foco o ambos se alejen (signos inferiores). Si el foco y el receptor no se movieran, la fracción valdría la unidad y entonces $f=f_0$

Así pues, en nuestro ejemplo, la velocidad del vehículo debe restarse a la velocidad del sonido en tanto que $v_r=0$; El resultado será una disminución del denominador, un aumento del valor de la fracción por encima de la unidad y $f>f_0$.

En 1929, cuando el mundo se debatía bajo los efectos de una de las crisis económicas más graves de la historia, un astrónomo estadounidense se afanaba en interpretar los espectros de las luces captadas por el telescopio del observatorio de Mont Wilson. Se había percatado de que, cualitativamente, los espectros de las luces estelares son prácticamente iguales a la luz solar, que no en vano, la composición química y las condiciones físicas de las estrellas, entre ellas el Sol, son muy parecidas. Edwin P. Hubble (1889-1953) conocía los trabajos de W. Huggins (1824-1910) y sabía que el espectro de la luz de Sirio es cualitativamente igual que el del Sol, pero todo él está desplazado hacia el color rojo. Hubble se dedicó a estudiar los espectros de muchas estrellas comprobando que la mayoría presentan sus espectros desplazados igualmente hacia el rojo. Pensando que ello podía deberse a un efecto de Doppler como el esquematizado en la figura 122, concluyó que la única explicación consistente con los corrimientos hacia el rojo registrados, sería que todas las nebulosas extragalácticas se estarían alejando y que cuanto más lejos se encontrasen más rápidamente se alejaban. Esto solo tenía sentido si el propio universo, incluido el espacio

entre galaxias, se estuviera expandiendo. Esto llevó al astrónomo a elaborar junto a Milton Humason el postulado de la ley de Hubble²⁴⁵ acerca de la expansión del universo.

Para hacer justicia histórica, y en honor a la verdad, hemos de señalar que la publicación de la *Teoría de la Expansión del Universo*, publicada por Hubble en 1929 no es original, ya que en 1927 Georges Lemaître, sacerdote, astrónomo y matemático belga, había elaborado la trascendental demostración²⁴⁶. Por ello, creemos que debe restituirse a este último el honor del descubrimiento, sin perjuicio de los méritos de Hubble.

Desde que Georges Lemaître observó por primera vez, en 1927, que un universo en permanente expansión debería remontarse en el tiempo hasta un único punto de origen, los científicos se han basado en su idea de la expansión cósmica. Si bien la comunidad científica una vez estuvo dividida en partidarios de dos teorías diferentes sobre el universo en expansión, el *Big-Bang*²⁴⁷ y la *Teoría del Estado Estacionario*²⁴⁸, la acumulación de evidencia observacional proporciona un fuerte apoyo para la primera²⁴⁹.

La teoría del *Big-Bang* es el modelo cosmológico sobre el origen y evolución del universo universalmente aceptado. Como proposición científica tiene muchas fortalezas: armoniza con las grandes teorías científicas del momento (Mecánica Cuántica, Relatividad, Modelo de Partículas, Teoría Atómica...), concuerda con la filosofía evolucionista imperante en todas las áreas de la ciencia desde los tiempos de Darwin y es aceptada, eso sí, con matizaciones, por las principales religiones (hinduista, budista, musulmana y católica).

La figura 123 puede ayudar al lector en la captación de las principales ideas que contiene el modelo cosmológico *Big-Bang*. Las estimaciones más recientes de la edad del universo apuntan a que su inicio tuvo lugar hace 13.800 millones de años²⁵⁰. Pasados tan solo 10^{-35} segundos²⁵¹ de la Gran Explosión todo lo que había era, *quarks*, *leptones* (*electrones*, *muones*, *neutrinos*, *fotones*) y *bosones*, todas ellas partículas sin estructura interna. Por este motivo, a este brevísimo período inicial se le conoce como *era leptónica*. En este tiempo ultracorto, el universo se expandió exponencialmente motivando un gran descenso de temperatura desde 10^{28} K hasta 10^{15} K y debido a un cambio aún desconocido denominado bariogénesis, los *quarks* y los *gluones* se combinaron en *bariones* tales como el *protón* y el *neutrón*, produciendo de alguna manera la asimetría observada actualmente entre la materia y la antimateria.

²⁴⁵ Establece que el corrimiento al rojo de una galaxia es proporcional a la distancia a la que está, lo que es lo mismo que, cuanto más lejos se encuentra una galaxia de otra, más rápidamente aparenta alejarse con respecto a ella.

²⁴⁶ Lemaître coincidió con Hubble en un congreso de astronomía en Holanda, a finales de 1928 y le dio a conocer allí sus ideas.

²⁴⁷ La primera vez que se utilizó esta denominación fue en un artículo publicado por S. Hawking y R. Tayler en la revista *Nature*, en 1966.

²⁴⁸ La disminución de la densidad que produce el universo al expandirse se compensaría con una creación continua de materia.

²⁴⁹ La principal prueba de la validez de la Teoría del *Big-Bang* es la *radiación de fondo de microondas*, una forma de radiación electromagnética descubierta en 1965 que llena el universo por completo. Tiene características de radiación de *cuero negro* a una temperatura de 2,725 K y su frecuencia pertenece al rango de las microondas con una frecuencia de 160,2 GHz, correspondiéndose con una longitud de onda de 1,9 mm.

²⁵⁰ Hasta hace dos décadas se pensaba que la antigüedad del universo se remonta a 15.000 millones de años.

²⁵¹ Se estima que es el tiempo más pequeño en el que las leyes de la Física tienen validez, se denomina "tiempo de Planck".

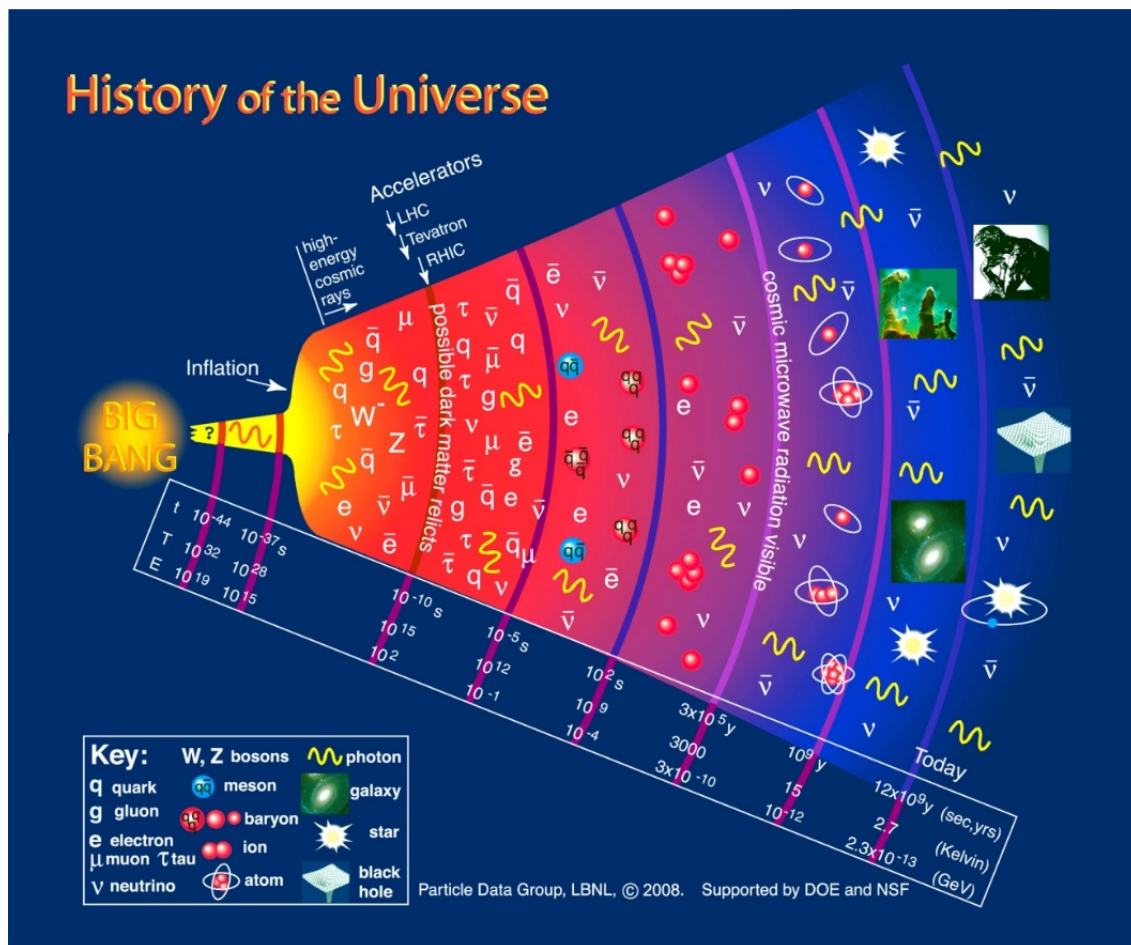


Figura 123 Esquema de la Historia del Universo desde la perspectiva teórica del *Big-Bang*. La imagen muestra un universo en expansión; de izquierda a derecha se representan las eras cósmicas y en las escalas inferiores se consignan tiempos, temperaturas y densidad de energía. http://spacetheology.blogspot.com/2012_04_01_archive.html

El universo, en sus primeros momentos, estaba llena homogénea e isotrópamente de una energía muy densa y tenía una temperatura y presión elevadísimas. Se expandió y se enfrió, experimentando cambios de fase análogos a la condensación del vapor o a la congelación del agua, pero relacionados con las partículas elementales.

Más tarde, *protones* y *neutrones* se combinaron para formar los núcleos de deuterio y de helio, en un proceso llamado *nucleosíntesis primordial*. Al enfriarse el universo, la materia gradualmente dejó de moverse de forma relativista y su densidad de energía comenzó a permitir el dominio de la gravedad sobre la radiación. Pasados 300.000 años, los electrones y los núcleos se combinaron para formar los átomos (mayoritariamente de hidrógeno). Las grandes nubes de hidrógeno no eran homogéneas, más bien se comportaban como una descomunal sopa cósmica en la que había grumos, acumulaciones de hidrógeno más densas que el resto que actuaban como centros atractivos gravitacionales y serían los gérmenes de la futuras estrellas. Las primeras estrellas debieron aparecer pasados unos mil millones de años del *Big-Bang*. Lo que sucedió después lo veremos en el capítulo IV.6.

IV.5 LA ENERGÍA DE LAS ESTRELLAS

En el capítulo III.2 vimos (figura 87) que el universo está compuesto por un 70 % de energía no detectable que llamamos *energía oscura*, un 25 % de materia no visible que llamamos *materia oscura*, un 4 % de hidrógeno y helio, y un escueto 1 % de masa estelar (polvo, planetas, asteroides, neutrinos, etc.). Si bien el concepto más amplio que hoy tenemos de la energía engloba a la masa, aquí nos referiremos a las energías cinética, potencial y electromagnética que detectamos en el universo (energía visible).

Si aceptáramos que el universo es un sistema termodinámico aislado del que ninguna de sus formas de energía puede salir y tampoco puede recibir energía alguna del exterior, habrá que suponer que su energía interna global ha de permanecer constante desde el *Big-Bang* hasta su extinción. Eso significa que el balance de toda la energía y la materia visible así como la energía y la materia oscura, permanece constante y esa cantidad fue ni más ni menos, la energía desplegada en el momento del *Big-Bang*.

Las estrellas emiten energía merced a las reacciones nucleares de fusión. En ellas, el hidrógeno se fusiona originando helio. Recordemos que en el capítulo III.7 (Figura 95) habíamos visto que la energía de enlace nucleón-nucleón es mayor para el helio que para el hidrógeno, es decir, formar un núcleo de helio uniendo dos protones y dos neutrones supone un importante desprendimiento de energía. Esta es, en su inmensa mayoría, la causa de la energía de las estrellas. Así pues, a lo largo de su vida, las estrellas van “quemando” su combustible de hidrógeno a costa producir más y más helio.

La consecuencia de esta actividad es que las estrellas emiten energía de diferentes maneras (revisar el capítulo III.4):

- Radiación electromagnética. Las estrellas emiten fotones de todas las clases, desde los ultraenergéticos, rayos γ y rayos X, los energéticos ultravioleta, visible e infrarrojo y los más pobres en energía, las microondas y ondas radioeléctricas.
- Radiación leptónica: Partículas sin casi masa, mayoritariamente, neutrinos y electrones.
- Radiación bariónica: Partículas másicas con carga y alta energía, fundamentalmente protones, partículas alfa y cantidades menores de núcleos de átomos ligeros.

Toda esta emisión es estable en el espacio interestelar y sobrevive como tal hasta que choca con algún cuerpo. La radiación electromagnética es en parte reflejada y en parte absorbida por los átomos de la materia “fría” con diversos efectos.

La interacción de la radiación con los átomos de la materia fría existente en el universo (polvo, planetas, asteroides, etc.) es como se esquematiza en la figura 125. Para que un fotón interactúe con

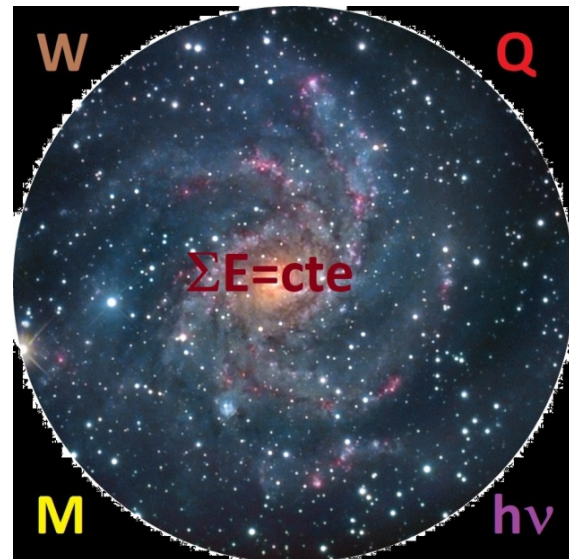


Figura 124 Si el universo estuviera aislado, de forma que no pudiera intercambiar energía alguna con el exterior, su energía interna global permanecería constante en el tiempo.

un átomo se requiere que su valor energético $h\nu$ coincida con alguna transición electrónica posible, es decir, un átomo sólo interactúa con fotones de frecuencias tales que se cumpla la identidad:

$$h\nu = E_i - E_j$$

Siendo E_i y E_j las energías correspondientes a dos órbitas²⁵² cualquiera de la corteza del átomo.

Ya vimos en el capítulo I.15 que la correspondencia que existe entre la estructura cortical de los átomos y las radiaciones que estos pueden emitir o absorber es la clave de las técnicas espectroscópicas que han posibilitado el estudio y conocimiento de la disposición de los electrones en el campo nuclear. Podría decirse que las rayas del espectro de emisión de un átomo son como el código de barras identificativo de ese átomo, su carnet de identidad. Esto tiene una gran importancia en astronomía ya que, si logramos analizar las luces que llegan desde las estrellas, la descomposición espectral de esas luces nos permitirá saber de qué están hechas.

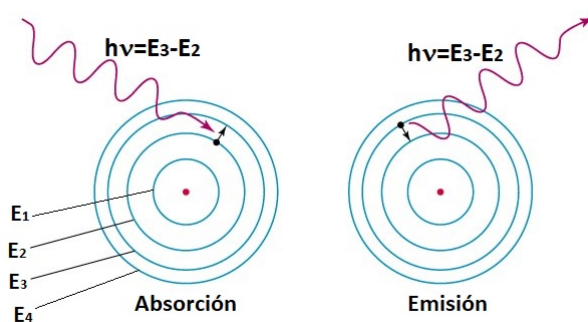


Figura 125 Proceso de reflexión simple de una radiación. La energía del fotón ha de coincidir con la cuantía de la transición electrónica.

Los neutrinos son partículas casi sin masa, no poseen carga y viajan a la velocidad muy próxima a la de la luz. Por ello, los neutrinos atraviesan sin dificultad la materia sin interactuar con ella²⁵³. Es tal su capacidad de penetración que atraviesan nuestro planeta sin ningún problema (piensa que tú y yo, querido lector, estamos siendo atravesados en este momento por miles de ellos sin que nos pase nada). Pero las partículas másicas son otro cantar. La carga positiva de los

protones y núcleos ligeros y su masa miles de veces superior a la de los electrones y neutrinos es motivo de que tengan mucho menor poder de penetración y de que interactúen con la materia. Afortunadamente, el intenso campo magnético terrestre desvía la fuerte emanación de partículas cargadas provenientes del Sol y evita su letal acción sobre los organismos vivos (ver la figura 112 del capítulo III.11).

Sabemos que la composición química de las estrellas es muy similar entre todas ellas. Las más jóvenes contienen un 75% de hidrógeno, un 23% de helio y el 2% restante se reparte entre diversos elementos más pesados, aportados por estrellas que finalizaron su ciclo antes que ellas.

En cuanto al Sol, su composición es 73,46% de hidrógeno, 24,87 de helio, 0,77% de oxígeno, 0,29% de carbono y el resto, un 0,61% que se reparte entre neón, azufre, nitrógeno, silicio y magnesio. Puesto que a lo largo de su vida, las estrellas van incrementando su proporción de helio y otros

²⁵² Órbitas o niveles energéticos, según sea el modelo atómico utilizado.

²⁵³ Por este motivo, los neutrinos son extremadamente difíciles de detectar. Su existencia fue prevista teóricamente en 1930 por Wolfgang Pauli, premio Nobel de Física en 1945. Actualmente, existe un detector de neutrinos en Japón denominado *Super-Kamiokande*. Se encuentra a 1000 m por debajo del nivel del suelo. Es una enorme cavidad que contiene 50.000 m³ de agua destilada cuyas paredes están tapizadas por 11.000 tubos fotomultiplicadores. La interacción de los neutrinos con los átomos del agua produce una emanación llamada *radiación de Cherenkov* que es recibida y ampliada por los fototubos.

elementos más pesados a expensas del hidrógeno, podemos decir que el Sol es una estrella relativamente joven.

Basándonos en la similitud de la composición química de las estrellas, incluido el Sol, es posible determinar la potencia emisiva de cada una de ellas por comparación con el Sol. La potencia emisiva del Sol puede conocerse por varios métodos. Uno de ellos se basa en el hecho de que el Sol y las estrellas se comportan como *cuerpos negros* (revisar el capítulo I.12). En 1879 el físico austriaco Josef Stefan descubrió por vía experimental que la potencia emisiva de un cuerpo negro es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta:

$$P_e = \sigma \cdot T^4$$

Cinco años más tarde, Ludwig Boltzmann llegó a esa misma ley por vía deductiva, razón por la cual se la llama *Ley de Stefan-Boltzmann*. Pues bien, teniendo en cuenta que la temperatura de la superficie solar es 5.800 K y dado que el valor de la constante σ para el cuerpo negro es igual a $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K}^{-4}$ un simple cálculo nos lleva a la conclusión de que la potencia emisiva solar es $64 \text{ Mw} \cdot \text{m}^{-2}$.

Para conocer la potencia del Sol habrá que multiplicar esta última cantidad por la superficie solar. Conocemos el radio del Sol, $9,96 \cdot 10^8 \text{ m}$, así pues, la potencia solar será:

$$P_{\text{Sol}} = 6,4 \cdot 10^7 \text{ w} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \pi (9,96 \cdot 10^8)^2 \text{ m}^2 = 6,35 \cdot 10^{25} \text{ w}$$

Ciertamente, una cifra mareante e imposible de imaginar.

Al igual que el Sol, las estrellas irradian su energía y así, cuando en una noche clara y sin luna contemplamos las estrellas, la tenue y plateada luz que llega a nuestros ojos es una ínfima parte de la descomunal energía que ellas emiten. Además esta luz trae consigo valiosa información acerca de su tamaño, su edad, su composición química y su destino; todo lo que hay que hacer es saber leer esa información.

Puesto que la emanación energética estelar: radiación electromagnética, radiación leptónica y radiación bariónica se encuentra en una proporción bastante uniforme entre todas las estrellas, la determinación de la intensidad de su luz permite estimar su poder emisivo total.

La *luminosidad* de una estrella se define como la *cantidad de energía electromagnética (visible) emitida por la estrella en la unidad de tiempo*. Se mide por tanto en unidades de potencia. La luminosidad depende no solo de la *potencia emisiva*²⁵⁴ de la estrella sino también de la distancia a la que se encuentra. De hecho, hay estrellas como *Vega*, perteneciente a la constelación Lira, que es la quinta en el ranking de luminosidad, estando a 25 años-luz de nosotros, mientras que *Canopo*, perteneciente a la constelación Carina (visible en el hemisferio sur) es la segunda en el ranking de intensidad, después de Sirio, pese a encontrarse a 309 años-luz.

Todas las magnitudes que se reparten por igual en el espacio tridimensional se atenúan proporcionalmente con el cuadrado de la distancia. Las leyes de la gravitación y de la electrostática, que se refieren a las fuerzas gravitacionales y eléctricas respectivamente, siguen este axioma. De la

²⁵⁴ La potencia emisiva de una estrella es la energía que el astro emite en todas las direcciones del espacio, en la unidad de tiempo.

misma manera, el flujo energético irradiado por una estrella se atenúa según el inverso del cuadrado de la distancia. Por tanto, si una vez medido el brillo de una estrella se conoce la distancia a la que se encuentra, es posible calcular su potencia emisiva.

Cuando a simple vista o con ayuda de un telescopio observamos el universo, la luz que llega a la retina de nuestro ojo se convierte en un impulso nervioso que el cerebro procesa, obteniendo así la impresión visual. En general, nuestros sentidos nos proporcionan sensaciones que no son linealmente proporcionales a los estímulos. Así, por ejemplo, un sonido de intensidad 1000 veces superior a otro dado no proporciona una sensación mil veces superior sino una sensación triple, y si el sonido fuera un millón de veces más intenso, la sensación de la misma sería seis veces superior. Este hecho ya fue advertido por el psicofísico E.H. Weber (1795-1879) y años después G.T. Fechner (1801-1887) le dio forma matemática. La *Ley de Weber-Fechner* establece que *cuando un estímulo crece en progresión geométrica la sensación de la misma crece en progresión aritmética*.

Veamos un ejemplo: Sea I la intensidad de un sonido y sea I_0 la intensidad más débil que nuestro oído puede escuchar (intensidad umbral), en ese caso, la sensación acústica S que proporcionaría el sonido de intensidad I sería:

$$S = \ln \frac{I}{I_0}$$

En consecuencia, un sonido que diera sensación 3 tendría una intensidad 1000 veces superior a la intensidad umbral.

Volviendo ahora al problema de la energía de las estrellas, empezaremos por precisar que la sensación visual producida por su luz la llamamos *magnitud estelar*²⁵⁵ y que, según la ley de Weber-Fechner, esta sensación visual varía aritméticamente mientras que la *luminosidad* lo hace geoméricamente:

$$M = k \cdot \ln \frac{I}{I_0}$$

En esta expresión M sería la magnitud, I sería la luminosidad, I_0 sería la luminosidad umbral²⁵⁶ y k una constante dependiente del medio de observación empleado (ojo desnudo, telescopio...). La ley de Weber-Fechner no resulta particularmente útil en astronomía, debido a los valores atribuibles a I_0 y a k , y ese es el motivo por el que la escala que relaciona magnitudes con luminosidades se rige por una norma que fue enunciada en 1856 por el astrónomo británico Norman Pogson (1829-1891), consistente en comparar el brillo de un astro de una magnitud dada con respecto a una de siguiente valor según la escala de Hiparco, es decir, se refiere a la relación:

$$\frac{M}{M + 1}$$

Pogson encontró que la relación de la luminosidad entre dos magnitudes consecutivas es sensiblemente igual a $\sqrt[5]{100} = 2,512$

²⁵⁵ Vimos en el capítulo II.12 que Hiparco de Nicea hizo en el S. II a.C. la primera clasificación de estrellas por sus magnitudes.

²⁵⁶ La mínima intensidad luminosa que fuéramos capaces de detectar.

Diferencia en magnitud	1	2	3	4	5	6
Relación de luminosidades	2,512	2,512 ² =6,31	2,512 ³ =15	2,512 ⁴ =39,8	2,512 ⁵ =100	2,512 ⁶ =251

Por igual razón, la relación de luminosidades entre dos estrellas de magnitudes M_1 y M_2 es:

$$\sqrt[5]{100^{(M_2 - M_1)}}$$

Otro concepto bastante común en astronomía es el de *magnitud absoluta* M , que se define como *la magnitud con que se vería una estrella de magnitud m si se observase desde una distancia de 10 parsecs²⁵⁷*. Para determinar la magnitud absoluta de una estrella, de la que se conoce su magnitud y la distancia a la que se encuentra (medida en parsecs), basta aplicar la ecuación:

$$M = 5(1 + \log r) + m$$

La utilidad de esta ecuación, en la que r es la distancia a la estrella en pc, brinda la posibilidad de comparar las magnitudes absolutas de las estrellas y por tanto, el poder emisor de las mismas. En la tabla siguiente se relacionan las veinte estrellas más brillantes.

Ranking de las veinte estrellas más brillantes

	Magnitud V	Denominación de Bayer	Nombre propio	Distancia (años luz)
0	-26.73		Sol	0.000 016
1	-1,47	α Canis Majoris	Sirio	8,6
2	-0.72	α Carinae	Canopus	310
3	-0.27	α_1 Centauri	Rigil Kentaurus A	4.4
4	-0.04 <i>var</i>	α Bootis	Arturo	37
5	0.03	α Lyrae	Vega	25
6	0.12	β Orionis	Rigel	770
7	0.34	α Canis Minoris	Procyon	11
8	0.50	α Eridani	Achernar	140
9	0.58 <i>var</i>	α Orionis	Betelgeuse	630
10	0.60	β Centauri	Hadar o Agena	530
11	0.71	α_1 Aurigae	Capella A	42
12	0.77	α Aquilae	Altair	17
13	0.85 <i>var</i>	α Tauri	Aldebarán	65
14	0.96	α_2 Aurigae	Capella B	42
15	1.04	α Virginis	Espiga	260
16	1.09	α Scorpii	Antares	600
17	1.15	β Geminorum	Pólux	34
18	1.16	α Piscis Austrini	Fomalhaut	25
19	1.25	α Cygni	Deneb	3200
20	1.30	β Crucis Australis	Becrux o Mimosa	350

²⁵⁷ Se recuerda al lector que el *parsec* es una unidad de longitud astronómica que equivale a 3,2616 años-luz, siendo la distancia a la que se vería el radio de la órbita terrestre bajo un ángulo de 1" de arco (ver el capítulo II.11, Figura 65).

Otro parámetro importante a la hora de estimar la energía de las estrellas es su temperatura externa. Ya sabemos que las reacciones nucleares que tienen lugar en el interior, combinadas con la enorme presión gravitatoria, determinan que la masa interna de las estrellas se encuentre a muchos millones de grados. Esta temperatura decrece a medida que nos alejamos del centro, de forma que, en la superficie, la temperatura está entre los 3.000 K en las estrellas más frías hasta los 30.000 K en las más calientes. Vimos en el capítulo II.12 que la luz procedente de las estrellas es tanto más azul cuanto más calientes son y viceversa, las más frías son las más rojizas y vimos también que el análisis espectral de las luces estelares permite hacer una clasificación de estrellas por sus temperaturas, que se conoce como *clasificación de Morgan-Keenan*. Por otro lado, en el capítulo I.12 (figura 28) vimos que el pico de la radiación espectral de un cuerpo negro incandescente se desplaza hacia el violeta a medida que su temperatura se eleva, siguiendo la ley empírica descubierta por W. Wien:

$$\lambda_{\text{máx}} = \frac{0,0028976 \text{ m} \cdot \text{K}}{T}$$

Así pues, el análisis espectral de la luz de una estrella permite estimar su temperatura y, puesto que la temperatura es proporcional a la potencia emisiva, vemos en todo ello una posibilidad de distinguir entre las estrellas más energéticas y las que lo son menos.

Finalmente, hemos de recordar el diagrama de Hertzsprung-Russell (capítulo II.12) en el que se relacionan las temperaturas de las diversas estrellas con las luminosidades de las mismas. Este diagrama, el “Sistema Periódico” de los astrofísicos, facilita mucho el estudio de las propiedades energéticas de las estrellas.

IV.6 LA VIDA DE LAS ESTRELLAS

Cuando hablamos de *vida*, nos referimos normalmente a aquello que distingue a los reinos animal, vegetal, hongos, protistas²⁵⁸, arqueas²⁵⁹ y bacterias del resto de las realidades naturales, es decir, cumplen la secuencia natural de nacer, crecer, reproducirse y morir. Pero esa no es la acepción del término “vida” que manejamos en una obra cosmológica como esta.

En este libro, el autor se ha planteado desde un principio hacer un estudio del conocimiento científico en general y del conocimiento que tenemos sobre el Cosmos. Este estudio se está vertebrando en torno a cuatro ejes nucleadores, a saber: la *ciencia* como el mejor medio de que disponemos para acceder al conocimiento sobre el universo, *espacio y tiempo* como los marcos en los que se inscriben todos los fenómenos y hechos que suceden en la naturaleza, incluidos nosotros mismos, *materia*, la esencia de que están formados todos los cuerpos que conforman el cosmos y *energía y cambios*, en la que se estudian los procesos y las causas que determinan que la naturaleza sea algo vivo, en continua evolución.

En 1182 nació en la pequeña localidad de Asís, perteneciente entonces a la región Umbría del Sacro Imperio Romano Germánico el pequeño Giovanni en el seno de una familia acomodada. Siendo

²⁵⁸ Organismos unicelulares eucariontes (con núcleo), que no pueden ser clasificados ni como animales ni como vegetales ni como hongos.

²⁵⁹ Organismos unicelulares procariotas (no tienen núcleo y su ADN se encuentra libre en el citoplasma).

joven llevó una vida despreocupada y alegre, propia de quien no tiene carencias básicas. Se enroló en las revueltas en las que el pueblo reclamaba la autonomía respecto del Sacro Imperio y posteriormente, en 1201 participó en la guerra contra Perugia, siendo hecho prisionero. Pasado un año, fue puesto en libertad y entonces, contra todo pronóstico, abandonó el ejército volviendo a su localidad natal. Desde entonces mostraba un desapego hacia lo terrenal, hasta el punto de que un día, a requerimiento de sus amigos, él manifestó: *“pienso casarme, y la mujer con la que pienso comprometerme es tan noble, tan rica, tan buena, que ninguno de vosotros visteis otra igual”*. Él se refería a la pobreza, pero sus amigos no llegaron a entenderle. De nada sirvieron los consejos de amigos, las reprensiones y castigos de su padre ni las lágrimas de su madre. Tras adoptar el nuevo nombre de Francisco, vendió todos sus bienes y con el importe de la venta reconstruyó iglesias y ermitas fundando en 1208 la Orden Franciscana.

Pero lo que aquí más nos interesa de Francisco de Asís es el amor que durante su vida monacal dedicó a todos los seres de la creación; en su ideario, la luna, las estrellas, las aves, las montañas, los ríos y los lobos eran tan hermanos como los demás hombres y mujeres. Su amor a todo lo creado, a la naturaleza, ha sido mitificado a lo largo de los siglos, siendo considerado hoy como el primer ecologista de la historia.

Pues bien, con un talante franciscano, en esta obra miramos a la naturaleza como algo cambiante y vivo. La ciencia nos muestra el *Cosmos* como algo organizado, como una gigantesca maquinaria de relojería de la cual el planeta Tierra es una diminuta pieza extremadamente compleja, de la cual la atmósfera, las rocas, los mares, las plantas, los animales y nosotros mismos, formamos parte.

IV.6.1 EL UNIVERSO ES CAMBIANTE

Desde nuestro punto de vista, la vida tal como la conocemos, no es sino una fase reciente de la historia del Universo. Comienza con el nacimiento de las primeras estrellas, que crean los elementos químicos necesarios para la vida y enriquecen el espacio lanzándolos al exterior en las grandes explosiones que marcan su muerte. La muerte explosiva de una estrella desencadena el nacimiento de otras muchas, en un ambiente ya rico en elementos pesados. Alrededor de las nuevas estrellas se formarán planetas, algunos gigantes como Júpiter, otros pequeños y rocosos como la Tierra. En estos últimos aparecerá la vida.

Cuando miramos al cielo nocturno lo vemos siempre igual, inmutable. Sólo algunos cambios lo alteran, como el movimiento de la Luna y de los planetas, o la aparición esporádica de estrellas fugaces, y en casos excepcionales, de algún gran cometa. Pero las estrellas siempre son las mismas, fijas en su posición, delimitan las figuras de las constelaciones. Cuesta creer que viajamos por la inmensidad del espacio a bordo de un planeta que se desplaza a razón de 107.227 Km/h alrededor del Sol, que este se desplaza a la fantástica velocidad de 800.000 Km/h en torno al centro de la Vía Láctea y que esta se mueve a unos 2,1 millones de kilómetros por hora, medidos con referencia a la radiación de fondo de microondas, más o menos en dirección a Leo y Virgo. Pero, si ello es así ¿por qué no percibimos el movimiento de las estrellas?

Con cierta frecuencia viajo en el tren desde Valladolid hasta Madrid para pasar unos días con mi familia. La vuelta a Valladolid la hago en torno a las 21 h y en invierno ya es de noche cerrada. Poco después de rebasar Medina del Campo, la llanura castellana se muestra en toda su grandeza, el tren se desliza por la vía a 280 km/h y se divisan en la noche las luces de las pequeñas localidades de la

provincia de Valladolid: Pozaldez, Matapozuelos, Valdestillas, Viana de Cega, todos ellos distantes varios kilómetros de la vía. Esas luces pasan con una cierta lentitud en sentido contrario a la marcha del tren, a una velocidad aparente mucho menor a cómo pasan las luces de las infraestructuras de la vía. También se divisan las luces de la histórica población de Portillo, situada en el borde del lejano páramo, a unos treinta kilómetros de la ruta, las cuales apenas se mueven. Han de pasar algunos minutos para que esas luces se desplacen en el mismo sentido que las demás. Sabemos muy bien que eso es debido a la distancia a la que se encuentran respecto del tren.

Las enormes distancias a las que se están las estrellas son la causa de su aparente inmovilidad. Pensemos que la estrella más cercana, α -Centaurio, se encuentra a 4,365 años-luz, es decir, a ¡41,3

billones de kilómetros! Por otro lado, la vida humana es demasiado efímera en comparación al tiempo sideral. Los cambios visuales que se producen en las constelaciones que pululan por el cielo nocturno, son demasiado lentos como para que en nuestra corta existencia podamos apreciarlos.

Gracias al cálculo computacional, conocidas las direcciones y velocidades de diversas estrellas respecto de nosotros, es posible recrear la forma geométrica que esas constelaciones tuvieron en tiempos pretéritos. La figura 126 muestra una recreación del cambio de aspecto que debió tener la constelación de la Osa Mayor en el último millón de años.

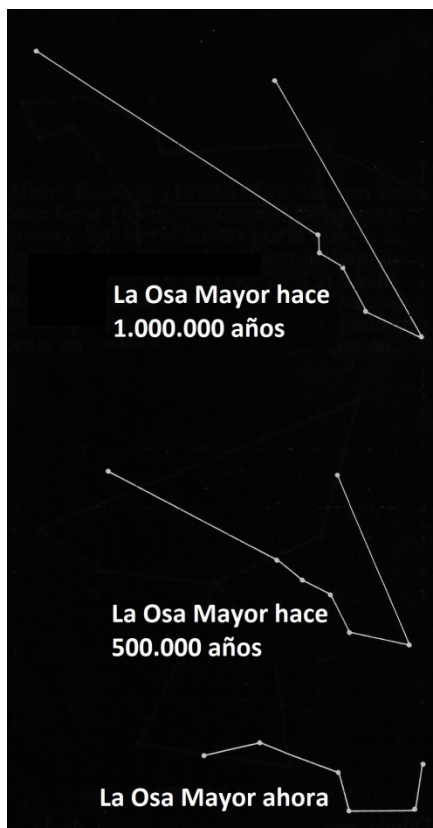


Figura 126 Recreación por ordenador de la evolución de la Osa Mayor en el último millón de años.

Desde siempre, el ser humano ha mirado al cielo y en él ha creído ver deidades, mitos y demonios. Muy probablemente, la Osa Mayor es una de las más observadas y conocidas de cuantas constelaciones conforman el cielo nocturno en el hemisferio norte. Si alguna vez el ser humano ha sido ignorante del cielo, esa vez es ahora, y de ello tiene la culpa la iluminación eléctrica. Vivimos en ciudades donde la contaminación lumínica es tal que apenas podemos ver las estrellas.

Si pudiéramos traer al presente a un cazador *Heidelbergensis* de hace quinientos mil años veríamos su cara de asombro al no reconocer ninguna de las constelaciones, incluida la Osa Mayor, y por mayor motivo, un *Antecesor* de la Sierra de Atapuerca de hace un millón de años reconocería mucho menos la disposición de las estrellas de hoy. Ciertamente, el cielo no ha sido siempre igual. Las estrellas no son siempre las mismas. En el intervalo de tiempo de la vida humana apenas podemos apreciar cambios, pero en escalas temporales mucho más largas, las estrellas siguen un proceso vital, lo que llamamos la *evolución estelar*.

IV.6.2 NUBES DE GAS Y POLVO

Las estrellas nacen en gigantescas nubes de gas que pueblan las galaxias jóvenes. Tienen una vida más o menos violenta según su masa, que determina también su muerte. Las estrellas pequeñas se apagan plácidamente, mientras que las más grandes finalizan su existencia a través de una

explosión devastadora, pero que puede desencadenar el nacimiento de nuevas estrellas en su entorno. Las nubes de gas (hidrógeno molecular y helio) y polvo se alojan preferentemente en los brazos en espiral de las galaxias jóvenes. La Vía Láctea es una galaxia joven y las grandes masas de gas se distribuyen por sus brazos espirales. Estas masas frías reflejan la luz de las estrellas cercanas y también emiten radiación propia, debido a la interacción de las radiaciones de alta energía de las estrellas circundantes con la materia de que están compuestas. Por ello son vistas como *nebulosas*, esto es, zonas del espacio interestelar sin bordes definidos y con apariencia de nube. En nuestra galaxia tenemos muchos ejemplos de grandes nebulosas en las cuales están naciendo estrellas, como es el caso de la nebulosa de Orión o de la nebulosa Trífida en Sagitario. En la figura 127 del capítulo III.10 se muestra la fotografía de la nube de polvo cósmico en la constelación del Águila, que hiciera el telescopio espacial Hubble en 1995.

En el capítulo III.4 vimos que, de los cuatro tipos de fuerzas existentes en el Cosmos, la gravitacional es la más débil de todas. Veremos más adelante que las distintas fuerzas actúan en competencia, unas veces prevalecen las fuerzas nucleares (interacciones fuertes en el interior de



Figura 127 La nebulosa Trífida, en la constelación de Sagitario, distante 5.500 años-luz, es un enorme centro de formación de estrellas. (Fotografía del telescopio espacial Hubble)

los núcleos) otras veces son las interacciones débiles las que prosperan (como es el caso de las transformaciones partícula-partícula) pero en el equilibrio de fuerzas universal, las fuerzas de la gravedad cuentan con una importante baza: la masa. Cuanto más grande sea la masa afectada tanto mayor será la fuerza gravitacional. Sucede que las masas de gas y polvo son enormes y en ellas siempre hay alguna zona de mayor concentración másica que actúa como centro de convergencia de las gravitaciones. Entonces se da un proceso de aglutinamiento en torno a los puntos de

mayor densidad; cuanto mayor es la masa acumulada en un punto del espacio, mayor es el campo gravitatorio que genera en su entorno, atrayendo hacia sí más y más masas de gases, y así sucesivamente.

Nuestra experiencia con gases en los laboratorios terrestres parece indicar que lo que ocurre es lo contrario: los gases libres tienden a expandirse, por efecto de su presión interna. Pero en el espacio la situación es distinta. La densidad de las nebulosas es tan baja que en la Tierra podría considerarse que constituyen un vacío casi perfecto. En efecto, la densidad típica de una nube molecular galáctica es de un millón de átomos por centímetro cúbico en tanto que un gas a presión atmosférica tiene más de un millón de billones (10^{18}) de átomos, es más de un billón de veces más denso. Con una densidad tan baja, la atracción gravitatoria entre átomos y moléculas, que hace

que la nube tienda a contraerse, es comparable a la presión térmica²⁶⁰ producida por el movimiento de esas partículas, que hace que tienda a expandirse. En consecuencia, el que una nube de gas interestelar se contraiga o se expanda depende del equilibrio entre las fuerzas térmicas expansivas y gravitatorias compresivas.

Una vez que se da el desequilibrio, la nube inicia su contracción aumentando su densidad. Diríase que en esa fase, la nube es como un descomunal puré en el que hay muchos grumos. Estos puntos de mayor densidad actúan como centros atractivos de más y más masa de gas. Poco a poco la nube se fragmenta aglutinando la masa gaseosa en torno a puntos cada vez más definidos y densos. Al final, de lo que empezó como la contracción de una nube gigantesca, nos quedan miles de pequeños fragmentos de masa estelar, siguiendo un colapso individual que llevará a cada uno de ellos a convertirse en una estrella.

Sabemos que todos los gases que se comprimen se calientan. En un principio, cuando la gran nube inicia su contracción, es ligera y transparente y el calor generado se irradia al exterior sin dificultad.



Figura 128 Detalle de la nebulosa de Orión M42

En estas condiciones, nada se opone a la gravedad, pero al progresar el colapso, la nube se hace densa y el calor ya no escapa, se queda en su interior en forma de energía interna. Por tanto, la nube se hace cada vez más caliente y su temperatura se eleva hasta varios miles de grados, con lo que se convierte en una nube brillante, como las que vemos en el interior de la nebulosa de Orión.

Si la nube no brillara, todo el calor de compresión se quedaría en ella con lo cual se establecería un equilibrio entre las fuerzas gravitacionales y las térmicas. Pero las nubes brillantes, como esta última, emiten energía electromagnética hacia el exterior a costa de perder energía térmica, ello es motivo de que la compresión gravitacional prosiga.

²⁶⁰ Recordemos que en el capítulo III.11 vimos que las moléculas gaseosas se mueven caóticamente en todas las direcciones y que el empuje de sus choques se manifiesta como presión. Por motivos obvios, la bajísima densidad de los gases interestelares determina que su presión es ínfima y que por tanto, prevelcen las fuerzas gravitacionales.

IV.6.3 ENERGÍA GRAVITATORIA VS ENERGÍA NUCLEAR, UN DRAMÁTICO EQUILIBRIO

Hemos dicho que los puntos de máxima densidad actúan como centros atractivos de más masa, lo que provoca la desmembración de la nube en numerosos fragmentos que se colapsan más y más. Llega un momento en el que las acumulaciones adoptan forma esférica. Puede suceder que la acumulación de masa gaseosa no sea demasiado grande, en cuyo caso la compresión gravitacional no llegue a desencadenar las reacciones nucleares de fusión. En ese caso, la *protoestrella* nunca alcanzará la temperatura requerida para los procesos nucleares. Estos astros serán *protoestrellas* toda su vida. En su juventud, mientras obtienen energía a partir del colapso gravitatorio, serán astros calientes y brillantes. Posteriormente, cuando su materia ya no se pueda seguir comprimiendo, el colapso se detendrá y la *protoestrella* se irá enfriando y apagando progresivamente. Este tipo de astros se ve con un color rojizo oscuro y se les llama *enanas marrones*. El valor crítico de la masa para que una *protoestrella* se convierta en estrella es 0,075 veces la masa del Sol, o lo que es lo mismo, 75 veces la masa de Júpiter.

Si la masa de la *protoestrella* supera el valor crítico, la intensidad del campo gravitatorio será capaz de poner en marcha los procesos de fusión del hidrógeno. La gravedad sigue actuando y el colapso de la *protoestrella* continúa aumentando la temperatura de su interior, incrementando la intensidad de las reacciones nucleares, y llega un momento en el que las fuerzas térmicas expansivas se compensan con las fuerzas gravitatorias compresivas. Para entonces, el núcleo ha alcanzado los diez millones de grados. Ha nacido una nueva estrella.

A partir de este momento, la evolución que describiremos es la de una inmensa mayoría de estrellas, entre ellas nuestro Sol.

El equilibrio entre las fuerzas compresivas y expansivas se mantendrá durante millones de años. Mientras tanto, una pequeña parte de la materia circundante al núcleo gravitacional primitivo que no fue engullido por la *protoestrella* ha quedado orbitando en torno al nuevo astro, conformando un *disco protoplanetario*. La evolución que convertirá al disco protoplanetario en un sistema de planetas, es un asunto que abordaremos en el próximo capítulo. Por el momento, centraremos nuestra atención en la estrella recién nacida.

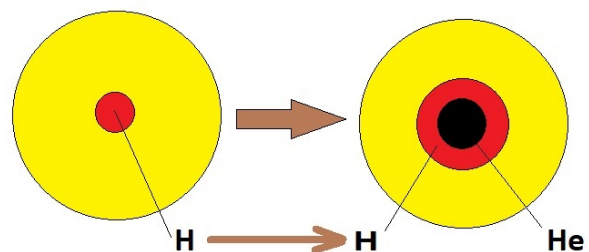


Figura 129 Estructura de una estrella joven (izquierda) y evolución de su núcleo (derecha).

La nueva estrella tiene una estructura muy sencilla, en su núcleo central tienen lugar las reacciones de fusión que van transformando el hidrógeno en helio, según procesos que, de forma simple, vimos en el capítulo III.8. Fuera del núcleo se halla la zona inerte²⁶¹, en la cual no hay producción de energía. La energía generada en el núcleo mantiene caliente toda la estrella, propagándose desde el núcleo hasta la superficie. Esta estructura se mantiene durante el 90% de su vida. Es una fase muy estable, donde apenas ocurren cambios. La emisión de energía es constante, lo cual

²⁶¹ El término “inerte” debe ser matizado. Ciertamente, el helio es un gas noble, químicamente inerte en las condiciones de presión y temperatura habituales. Ahora bien, a temperaturas por encima de los 100 millones de grados y altísimas presiones, deja de ser inerte para convertirse en un potente “combustible” termonuclear, según veremos en el apartado IV.6.4

supone un importante beneficio para los planetas posiblemente habitados que la estrella pueda tener en su entorno. Nuestro Sol está en esta fase; lleva casi cinco mil millones de años de vida estable y le quedan otros tantos para que su vida empiece a declinar.

A lo largo de su dilatado tiempo de vida, la estrella consume hidrógeno e incrementa la cantidad de helio de su núcleo. Poco a poco, la concentración de hidrógeno desciende a medida que la de helio se incrementa. La mayor densidad del helio determina que este se concentra en el centro alejando al hidrógeno del mismo. Puesto que el helio es inerte, la fusión nuclear se ha desplazado hacia afuera, como se esquematiza en la figura 129.

La gravedad sigue actuando, como siempre, y al núcleo de Helio le sucede lo mismo que a la protoestrella del inicio de esta historia: empieza a contraerse. Al hacerlo, se hace más denso y más caliente. La gravedad aumenta, y como consecuencia, la capa de producción de energía también se hace más densa y caliente, debido al peso de lo que tiene por encima y la presión térmica que le empuja desde abajo. Las reacciones nucleares se producen ahora a un ritmo más vivo, más rápido. La producción de energía de la estrella aumenta, y en consecuencia aumenta la presión térmica y la presión de radiación que, ahora, ganan la partida a la gravedad.

El resultado es una expansión de la estrella, sus capas exteriores quedan ahora muy lejos del núcleo, se enfrían y la estrella se enrojece. Se ha convertido en una *gigante roja* que probablemente ha engullido a los planetas que tenía más cercanos.

Puede suceder que la expansión sea tan grande que las capas más exteriores de la estrella se pierdan en el espacio, formando estructuras en forma de anillo que llamamos nebulosas planetarias. En su interior queda el núcleo desnudo, formado por el Helio inerte y la capa de producción de energía. El Sol es una de estas estrellas, en el futuro creará una nebulosa planetaria mucho mayor que nuestro Sistema Solar actual.

Pero la historia continúa. El núcleo de Helio inerte va aumentando más y más, la capa de producción de energía se ve empujada hacia zonas cada vez más externas, más frías. El Hidrógeno sigue escaseando y llega un momento en que las reacciones nucleares se detienen. Y al final, siempre es la gravedad la que gana la batalla: sobreviene el colapso final de la estrella. La enorme masa de helio inerte ocupa ahora un volumen miles de veces menor que en los buenos tiempos. La estrella es ahora una *enana blanca*, llamada así porque aún conserva mucho calor de su pasado y brilla. Con el paso del tiempo se irá enfriando hasta convertirse en una *enana negra*.

IV.6.4 ESTRELLAS GIGANTES Y NUCLEOGÉNESIS

En el caso de las *estrellas gigantes* y *supergigantes* cuya masa, como mínimo, 2,5 veces la del sol, las últimas fases de su vida son más complejas y dramáticas. Tal es el caso de *Deneb*, situada en la constelación del cisne a 1.424 años-luz, cuyo radio es 210 veces superior al del Sol y su potencia emisiva es 5.400 veces más grande. Otras estrellas gigantes de similares características son *Rigel* en la constelación de Orión a 860 años-luz y *Canopus* en la constelación Carina, visible solo en el hemisferio sur. Hay también otras estrellas *gigantes rojas* que lo son por hallarse en las postrimerías de su vida. Tal es el caso de *Antares* en la constelación de Scorpio y *Betelgeuse* en la constelación de Orión. Esta última, próxima ya a su final, se encuentra a unos 600 años-luz y generará la mayor supernova jamás vista.

En las estrellas masivas, la contracción final del núcleo de Helio llega a alcanzar temperaturas superiores a los cien millones de grados en su centro. A esa temperatura se inician nuevas cadenas de reacciones nucleares: Los núcleos de Helio se unen para dar lugar a elementos más pesados; Tres núcleos de Helio originan uno de Carbono, y cuatro uno Oxígeno. De nuevo hay una pérdida de masa que se convierte en energía, las reacciones se extienden, la presión se equilibra con la gravedad, y el núcleo de Helio inerte detiene su colapso. Podría decirse que la estrella gigante goza de una nueva juventud. Todas las fusiones nucleares que generan núcleos más pesados que el helio (carbono, oxígeno, nitrógeno, silicio, hierro...) solo son posibles a las altísimas presiones y temperaturas existentes en las estrellas masivas.

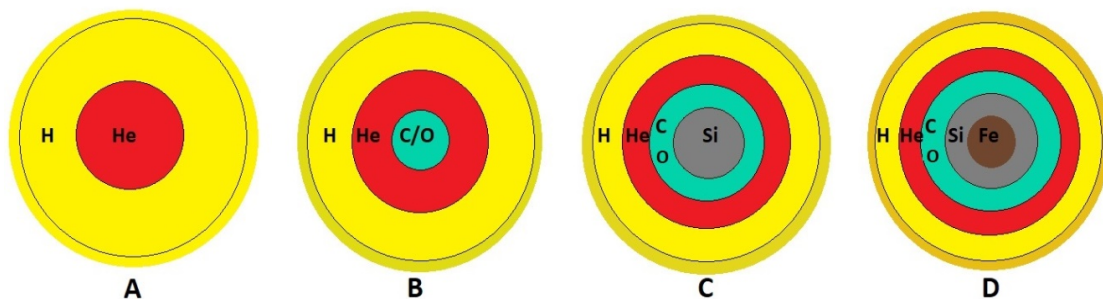


Figura 130 Estructura de una estrella masiva y evolución de su núcleo: Fase adulta (A), Nucleogénesis C/O (B) Nucleogénesis Si/Fe (C) Final (D).

La energía de la *nucleogénesis* se equilibra con la gravedad en esta segunda juventud de la gran estrella. En su centro ha crecido un núcleo de Carbono y Oxígeno inertes, mientras que el Helio y el Hidrógeno comienzan a escasear. El núcleo inerte va creciendo, empuja las zonas de combustión nuclear hacia el exterior de la estrella, que finalmente se apaga. De nuevo la gravedad marca el camino inexorable del colapso, pero todavía queda una posibilidad para escapar a este destino. En las estrellas más masivas, de más de ocho masas solares, esta vez, la temperatura del núcleo inerte de Carbono y Oxígeno se eleva tanto que nuevas reacciones nucleares aparecen en escena. A partir del Carbono y del Oxígeno se crea Silicio. La estructura de la estrella se complica. Además, la temperatura y la presión son tan grandes que las reacciones van muy deprisa.

Dentro del núcleo de Silicio inerte nuevas reacciones de fusión producen Hierro, un elemento más para una estructura de muchas capas que recuerdan a las de una cebolla. El núcleo de Hierro inerte se desarrolla rápidamente. A la gran estrella le queda ya muy poco tiempo de vida. Recordemos lo visto en los capítulos III.7 y III.8; el hierro es el núcleo más estable de entre todos los elementos y ya no es capaz de generar núcleos más pesados por fusión. Así pues, la producción de energía cesa y llega entonces la hora definitiva de la gravitación. Como no tiene ninguna fuente de energía, la estrella colapsa bajo su descomunal peso y su temperatura crece desmesuradamente sin que aparezca ninguna reacción que pueda oponerse al tremendo empuje de la gravedad. Cuando la temperatura alcanza el billón de grados, se produce un nuevo y colosal fenómeno que en pocos segundos rompe por completo la estrella, se llama *fotodisociación* del Hierro.

Vimos en el capítulo I.12 que un *cuerpo negro* emite radiación, tanto más abundante en el violeta cuanto mayor es su temperatura. Esta regla se cumple también en las estrellas que, ya lo hemos dicho, se comportan como cuerpos negros. Ahora bien, su temperatura es altísima; el núcleo de una estrella joven emite radiaciones X y γ . Cuando una estrella masiva se encuentra en el final de

su vida, el núcleo de hierro se encuentra a temperaturas próximas al billón de grados. En estas condiciones, el núcleo de Hierro emite rayos gamma de una energía devastadora, tan grande que un sólo fotón es capaz de romper un núcleo de Hierro al colisionar con él. Y esto es precisamente lo que sucede; a esa temperatura extrema, la radiación térmica rompe los núcleos de Hierro, y convierte cada uno de ellos en 13 núcleos de Helio. Recordemos de nuevo lo visto en el capítulo III.7, más en concreto, en la figura 95 y comprenderemos que esa disociación es endotérmica, es decir, absorbe energía. Así pues, el núcleo de hierro es rápidamente sustituido por un núcleo de Helio frío, sin propiedades estructurales, que no es capaz de compensar la gravedad.

Y ahora describiremos los momentos finales de la estrella: Esta colapsa violentamente, se desploma sobre sí misma en una rápida implosión. Las capas exteriores, en caída libre, se derrumban sobre el interior de la estrella. En su centro, la caída de materia produce una presión tan enorme que ni siquiera la repulsión entre los electrones es capaz de soportar. Los electrones son empujados contra los protones, formando neutrones y el resultado es la rápida aparición de un núcleo estelar de neutrones a expensas de la desaparición del núcleo de Hierro. De esta forma, la gran estrella moribunda se ha convertido en una *estrella de neutrones*.

La *estrella de neutrones* recién aparecida es un astro de características realmente extraordinarias, está formada por un cúmulo de neutrones extraordinariamente denso. Es una esfera de tan solo unos diez kilómetros de radio (imaginemos la masa de dos o tres soles confinada en ese espacio). Semejante acumulación de masa en tan exiguo volumen tiene una densidad miles de millones de veces superior a la del hierro, por tanto, la intensidad del campo gravitatorio en sus proximidades es descomunal. Las capas de silicio, oxígeno, carbono, helio e hidrógeno caen violentamente sobre el compacto núcleo de neutrones, esta materia rebota sobre su superficie y sale despedida en dirección contraria. Es como si una gigantesca onda de choque saliera rebotada en dirección contraria. A la implosión le ha sucedido una gran explosión que dispersará en el espacio los materiales que se fueron formando en el horno estelar. A este fenómeno se le llama *explosión supernova*.

Durante la explosión, la supernova brilla tanto como una galaxia entera durante dos o tres meses. En su interior, la colisión entre la onda de choque y la materia en caída eleva tanto la temperatura que se producen reacciones nucleares a un ritmo muy intenso. Las reacciones producen todo tipo de elementos, muchos de ellos radioactivos en un proceso que se conoce como *nucleogénesis explosiva*, que ya vimos en el capítulo III.8. Es la emisión de los elementos radioactivos lo que calienta por dentro la supernova en explosión, y mantiene su brillo durante unos pocos meses. Después, la supernova sigue su expansión y toda la materia que hasta entonces formaba la estrella se esparce y se difumina por el espacio y como residuo de lo que fue una estrella de gran masa, sólo queda la pequeña *estrella de neutrones*.

IV.6.5 AGUJEROS NEGROS

El colapso final de la estrella gigante puede tener una variante: Si la onda de choque no es capaz de frenar toda la materia que cae durante la implosión, esta se acumula sobre la estrella de neutrones, y la desestabiliza. La presión del gas de neutrones sólo puede aguantar el peso de una vez y media la masa del Sol. Si la caída de materia hace que este límite se supere, la estrella de neutrones se colapsa y toda la materia, la que cae y la masa neutrónica, se comprimen hasta casi el infinito y la estrella desaparece; se ha formado un *agujero negro*.

Para comprender qué es un *agujero negro* hemos de tener claro previamente qué es la *velocidad de escape* de un astro. Si en la superficie terrestre lanzamos un objeto hacia arriba, este sube a una cierta altura para luego caer. Si se lanza a más velocidad subirá más alto y terminará cayendo de nuevo. Pero si se lanza a la velocidad de $11 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ el cuerpo subirá tan alto que escapará de la gravedad terrestre y se perderá en el espacio para ya no volver. La aceleración de la gravedad terrestre en su superficie vale $9,806 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Si pretendiéramos hacer lo mismo en un planeta de mayor masa, como Júpiter, tendríamos que luchar contra una gravedad de $24,79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. En cuanto al Sol, la velocidad de escape desde su superficie asciende a más de seiscientos kilómetros por segundo.

El campo gravitatorio en las proximidades de un agujero negro es de tal intensidad que la velocidad de escape supera la de la luz, de modo que ni siquiera la luz es capaz de salir de él. Este es el motivo por el que resulta difícil su detección y observación y es también la causa de su denominación.

Un agujero negro es una *singularidad*²⁶² que afecta a una región finita del espacio. La deformación del espacio-tiempo es casi infinita, de manera que adopta la forma representada en la figura 131. En torno a la singularidad orbita una gran masa de gas y polvo sobrecalentado que se llama *disco de acreción*, generado en la explosión supernova que la provocó. Su velocidad de giro es inmensa; solo así le es posible permanecer en las inmediaciones del agujero negro sin ser engullido por él. La brutal rotación del disco de acreción es motivo de choques e interacciones entre los materiales que lo conforman, provocando en ellos un fuerte calentamiento y la emisión de radiaciones.



Figura 131 Recreación de un agujero negro mostrando sus partes esenciales

²⁶² Una singularidad gravitacional o espaciotemporal, puede definirse como una zona del espacio-tiempo donde no se puede definir alguna magnitud física relacionada con los campos gravitatorios, tales como la curvatura, u otras.

Ya sabemos qué es la velocidad de escape y sabemos que esta es tanto más elevada cuanto mayor es la masa del astro. Ahora bien, a medida de que nos alejamos de él la velocidad de escape disminuye. Si es cierto que la velocidad de escape en la singularidad de un agujero negro supera a la de la luz, debe haber una distancia a la que dicha velocidad de escape llega a ser igual a c , a esa distancia se le llama *horizonte de sucesos*. El horizonte de sucesos es circular. Se le llama así porque todo aquello que acontezca en su interior no puede ser observado, toda vez que la luz no puede emerger de él.

La materia que gira en las inmediaciones del horizonte de sucesos lo hace a tal velocidad que emite energía en forma de radiación X, denominada *radiación de Hawking*. A la zona donde se produce esta radiación se le llama *esfera de fotones*. Dicha radiación se concentra en una dirección perpendicular al disco de acreción y es proyectada al espacio en las dos direcciones opuestas. Se ha especulado con la naturaleza y las causas de esos chorros de plasma y radiación y la explicación más sencilla e intuitiva pasa por pensar que la materia de la esfera de fotones está tan fuertemente comprimida por la hipergravedad que sale disparada de la misma forma que la pulpa de una fruta muy madura sale proyectada al comprimirla con violencia en el interior de la mano.

Y en pleno ejercicio del “todavía más”, hemos de referirnos ahora a los *agujeros negros supermasivos*, cuyas masas son del orden de millones o decenas de miles de millones de masas solares. Existen diversas opiniones acerca de su formación, la más aceptada e intuitiva sostiene que su origen es el crecimiento continuo de la masa de un agujero negro inicial por acreción de la materia de su entorno, es decir, el agujero negro traga cuanto materia de su entorno llega a rebasar su *horizonte de sucesos*, su masa crece y crece aumentando el radio de dicho horizonte, en un proceso de continuo crecimiento.

Los estudios más recientes demuestran que la Vía Láctea tiene en su centro un monstruo de esta clase y que, en general, las galaxias tienen en su centro un gran agujero negro. El agujero negro supermasivo de nuestra galaxia se encuentra a 26.000 años luz del Sistema Solar, en una región llamada Sagitario A*⁸, observable en la constelación de Sagitario²⁶³. Su masa es la equivalente a cuatro millones de soles y toda ella se encuentra confinada en un volumen esférico de 44 millones de km de diámetro.

El mayor agujero negro supermasivo en los alrededores de la Vía Láctea parece ser la de M87, con una masa equivalente a 6400 millones de masas solares y se encuentra a una distancia de 53,5 millones de años luz.

La cercana galaxia de Andrómeda, a 2,5 millones de años-luz de distancia, contiene un agujero negro central con una masa de entre 110 y 230 millones de masas solares, significativamente mayor que el de la Vía Láctea.

²⁶³ Es una fuente de radio muy compacta y brillante en el centro de la Vía Láctea que forma parte de una estructura mayor llamada Sagitario A.

IV.5.6 RESUMEN

Para finalizar este capítulo, a modo de resumen, diremos que el origen de las estrellas se encuentra en las grandes nubes de hidrógeno, helio y polvo interestelar generado tras el *big-bang* en el caso de las estrellas de primera generación o bien tras las explosiones supernovas. Las fuerzas gravitatorias no tienen la intensidad que otras fuerzas fundamentales pero actúan sobre enormes

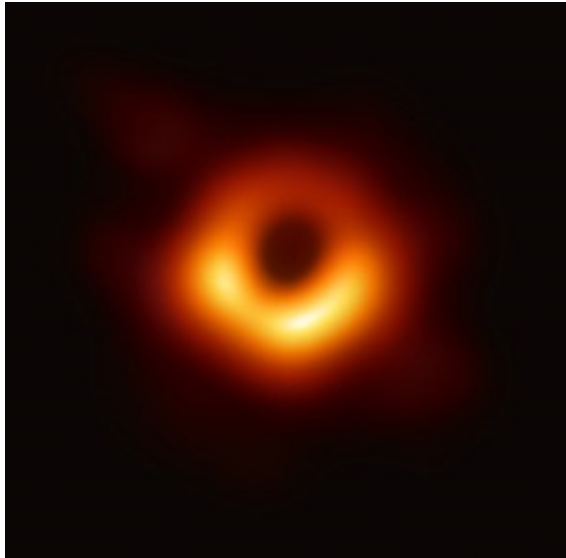


Figura 132 Primera imagen real de un agujero negro supermasivo en la galaxia M87, tomada el 10/04/2019.

acúmulos de masa a grandes distancias y sus efectos llegan a ser poderosísimos.

Los puntos en los que la nube es más densa actúan como centros de convergencia de las masas colindantes. Poco a poco se van formando acumulaciones de gas y la presión gravitatoria en sus centros va elevando la temperatura. Llega un momento en el que el tamaño de la acumulación de gas tiene un tamaño del orden de 75 veces la masa del planeta Júpiter. Para entonces la compresión gravitatoria en el núcleo de la *protoestrella* ha elevado la temperatura lo suficiente como para que en su interior se encienda el horno estelar, es decir, se inicia la fusión del hidrógeno. A partir de ese momento puede decirse que ha nacido una nueva estrella. El

equilibrio entre la presión gravitatoria y la presión hacia el exterior que ejercen las reacciones nucleares se mantiene durante toda la vida de la estrella, que se prolonga durante varios miles de millones de años. La estrella brilla con luz blancoazulada que pone de evidencia su alta temperatura. A lo largo de su vida, la estrella va consumiendo el hidrógeno e incrementando la cantidad de helio, que se deposita en su centro. En su senectud, la capa reactiva del hidrógeno ha sido empujada hacia afuera por la expansión térmica del núcleo, al escasear el hidrógeno, la estrella ha disminuido su temperatura externa y brilla con luz rojiza; se ha convertido en una *gigante roja*.

La muerte de una estrella depende de su tamaño. Las estrellas de tamaño medio, como el Sol, al agotar el hidrógeno se enfrían y se contraen bajo su propio peso convirtiéndose primero en una *enana blanca*, llamada así porque brilla gracias a la alta temperatura que aún conserva de su pasado. Finalmente, se convierte en una *enana negra* cuando se enfría por completo y deja de emitir radiación.

En el caso de las estrellas de gran tamaño la cosa es más complicada. La presión gravitatoria es en estos casos mucho mayor de forma que, al tiempo que el hidrógeno escasea, se inician en el núcleo de helio reacciones de fusión conducentes a la formación de carbono y oxígeno en un proceso llamado *nucleogénesis estelar*. La energía desprendida vuelve a equilibrar el empuje gravitatorio que detiene el colapso de la estrella proporcionándole una segunda juventud. Más adelante se producen reacciones de fusión en las que se forman átomos de silicio y de hierro. Todas estas reacciones son fuertemente exotérmicas, pero solo son posibles en las durísimas condiciones de presión y temperatura del núcleo de una estrella masiva. Cuando ya no queda posibilidad alguna

de generación de energía nuclear que compense a la gravedad, la estrella se colapsa definitivamente, pudiendo pasar una de estas dos cosas: se convierte en una *estrella de neutrones* o bien se comprime hasta casi el infinito, originando un *agujero negro*.

IV.7 HISTORIA DEL SISTEMA SOLAR

El gas interestelar se encuentra por todo el espacio en una bajísima concentración de unas pocas partículas por cada metro cúbico, algo que en la práctica es para nosotros un vacío casi perfecto. Hay también zonas de concentración de este gas en la mayoría de las galaxias, dichas zonas están afectadas por la radiación de las estrellas cercanas y brillan, pudiéndose ver en forma de *nebulosas*. La materia gaseosa de las nebulosas procede en parte del *Big-Bang* y también como residuo de la actividad estelar y de las explosiones supernovas de grandes estrellas ya desaparecidas. El gas interestelar está constituido en un 99% en masa por partículas de gas y un 1% por polvo, la composición elemental del gas, de acuerdo a la *nucleosíntesis primordial*²⁶⁴, es de un 90.8% en número (70.4% en masa) de hidrógeno, un 9.1% (28.1%) de helio y un 0.12% (1.5%) de elementos más pesados, comúnmente llamados metales²⁶⁵ en la jerga astrofísica. Una fracción significativa de estos elementos condensan en forma de granos de polvo en las regiones más densas y frías del medio interestelar. Los elementos formados en la *nucleogénesis estelar* (silicio e hierro fundamentalmente) y los elementos más pesados formados en la *nucleogénesis explosiva* de las grandes estrellas, se encuentran en proporción mucho menor. Todos estos materiales se aglutinan y compactan en las zonas frías de las nubes conformando sólidos de tamaño variable que vagan por el espacio.

En el punto IV.5.3 vimos que los centros de máxima densidad de las nubes actúan como centros gravitacionales que atraen a las masas de gas próximas. Se inicia así un proceso de fragmentación de la nube en el que la masa de gas y polvo se aglutina en los nuevos centros de atracción gravitacional a costa de desconcentrar la nube en el espacio circundante. Este planteamiento teórico fue formulado inicialmente en 1775 el astrónomo sueco Emanuel Swedenborg y el filósofo alemán Immanuel Kant. Posteriormente, en 1796, la idea fue expuesta por Pierre Simon Laplace en su obra *Exposición del sistema del mundo*. Si bien las ideas de Swedenborg, Kant y Laplace, conocidas como *Teoría Nebular*, dominaron durante el S. XIX, ya en el XX fueron revisadas, debido a que no explicaban satisfactoriamente la conservación del momento angular total del sistema. Hoy sabemos que los planetas del Sistema Solar poseen el 99% del momento angular pese a que su masa es tan solo un 1% del total, hecho que entonces no podía ser explicado.

La teoría aceptada hoy por la comunidad científica se debe al astrónomo soviético Victor Safronov, quien la publicó en su libro "Evolución de la nube protoplanetaria y la formación de la Tierra y los planetas" (1972)

según propone esta teoría, hace unos cuatro mil seiscientos millones de años se dio un proceso de este tipo en una gran nube interestelar de la Vía Láctea. En uno de los brazos espirales de nuestra galaxia se formó una acumulación de gas interestelar que incrementaba su rotación a medida de que

²⁶⁴ Se llama así al proceso de formación de átomos de hidrógeno y helio a consecuencia del *Big-Bang*.

²⁶⁵ El término "metales" de los astrofísicos se refiere elementos como el carbono, nitrógeno, oxígeno, etc, que los químicos consideran "no metales".

se colapsaba²⁶⁶. El material que compone el gas es principalmente Hidrógeno molecular y Helio, que son los elementos más abundantes del Universo. Si el proceso de formación está teniendo lugar en una galaxia algo evolucionada como la nuestra, en ese disco hay también Carbono y Oxígeno, vapor de agua, dióxido de carbono, Silicio, Hierro, Níquel, y muchos otros elementos en cantidades menores. También hay granos de polvo, de diversos tamaños, compuesto principalmente por silicatos.

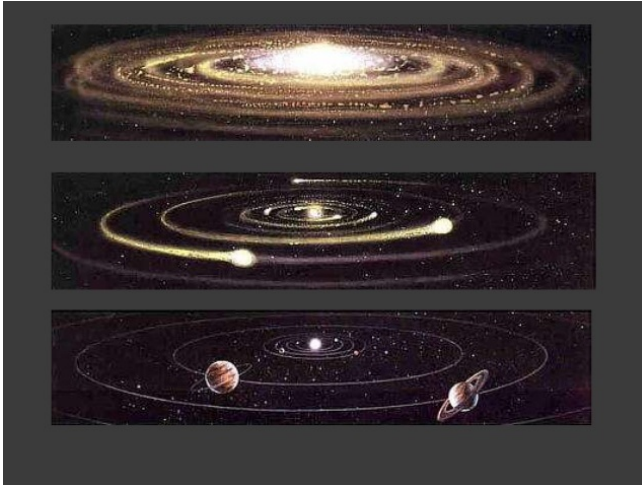


Figura 133 Fases de la formación del Sistema Solar: Disco protoplanetario, formación de los planetesimales y estado definitivo del sistema. (La imagen superior es una representación de HL Tauri, un sistema planetario en formación a 450 años luz. La estrella en formación, de tan solo 100.000 años de edad, se ve rodeada por franjas oscuras que evidencian la presencia de planetas en gestación). (Imagen tomada por el radiotelescopio ALMA).

Todo esto sucedía hace unos cinco mil millones de años. La teoría moderna no explica satisfactoriamente cómo es posible la acreción de partículas de no más de un centímetro para terminar originando *planetesimales* del tamaño de un campo de fútbol (como es el caso de los numerosos cuerpos rocosos existentes en el *cinturón de asteroides* situado entre las órbitas de Marte y Júpiter). Mucho menos explica cómo los asteroides rocosos pueden aglutinarse originando cuerpos como la Luna. Hoy sabemos que este proceso se desarrolla dentro de cualquier disco en donde la densidad planetesimal sea suficientemente alta, y procede de una manera descontrolada, y también sabemos que el resultado final es la formación de embriones planetarios de diferentes tamaños, que dependen de la distancia a la estrella central.

El proceso de formación de un planeta es diferente según tenga lugar cerca o lejos de su estrella. Uno de los componentes más abundantes del disco protoplanetario es el vapor de agua. Si se encuentra lejos de la estrella, el agua puede formar cristallitos de hielo, que también pueden unirse

El centro gravitatorio que allí se formó atrajo a más masa gaseosa la cual, al tiempo que incrementaba la masa central, creaba en su entorno un disco cuya rotación iba en aumento a medida de que la masa del centro crecía, en un equilibrio de fuerzas gravitatoria y centrífuga. El proceso que siguió la masa central hasta convertirse en una nueva estrella, el Sol, ya lo hemos visto en el anterior capítulo. Ahora centraremos nuestra atención en el *disco protoplanetario*, origen de los planetas, entre ellos, la Tierra.

Mientras el Sol no era sino una *protoestrella*, los granos de polvo que se movían caóticamente dentro del disco crecieron en tamaño en un tiempo relativamente corto (miles de años), produciendo partículas de tamaño de un

²⁶⁶ Este fenómeno es bien conocido, incluso por los profanos en Física. Todos hemos contemplado cómo un patinador acaba su número con una pirueta espectacular que inicia con los dos brazos y la pierna que le queda libres lo más separados posible del tronco. Tras iniciar la rotación el artista aproxima los brazos y la pierna al eje de giro con lo que la velocidad de rotación aumenta de forma espectacular. A ese fenómeno los físicos le llaman “conservación del momento cinético”.

entre sí y con los granos de polvo, facilitando los procesos de agregación y permitiendo la formación de planetas más grandes. Cerca de la estrella el agua no forma hielo, y por tanto sólo el polvo y los silicatos participan en los procesos de agregación que conducirán a la formación de planetas rocosos más pequeños.

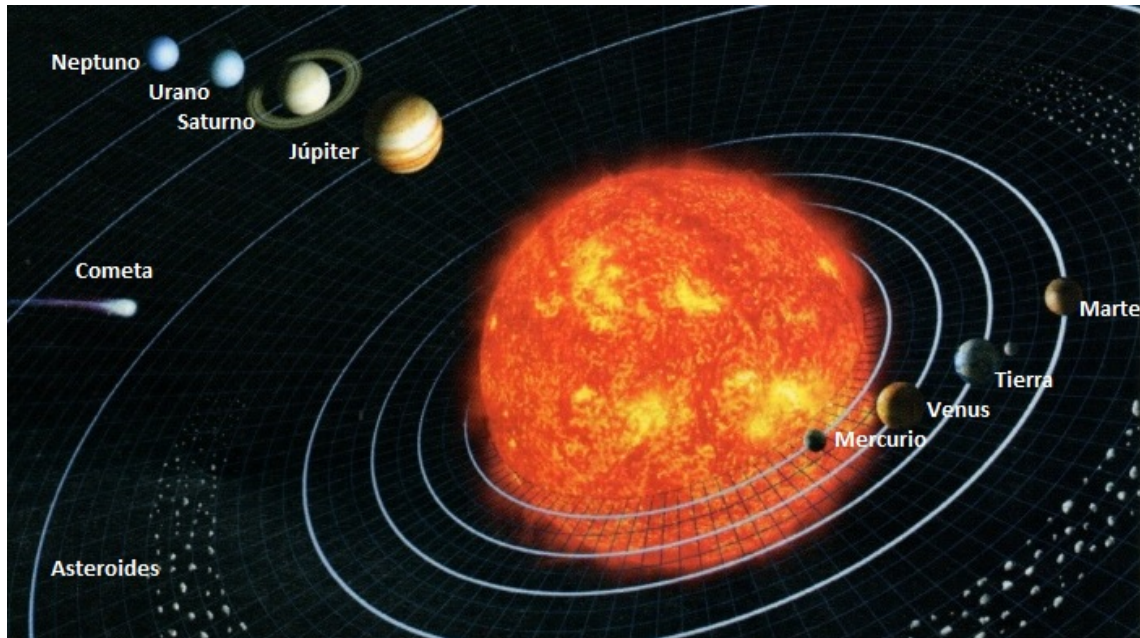


Figura 134 Representación del Sistema Solar. Los planetas interiores son rocosos y se hallan separados de los exteriores por una ancha franja de asteroides, residuo de la planetogénesis. Los planetas exteriores son mucho mayores, formados por hidrógeno y helio los dos primeros y agua sólida los dos más externos.

Otro factor importante que incide en la formación de un planeta es su campo magnético. La joven estrella que ocupa el centro del disco protoplanetario emite radiación y partículas cargadas, básicamente protones y partículas alfa, que conforman lo que llamamos *viento estelar*. Ese viento es tanto más intenso cuanto más cerca se esté de la estrella, y empuja o arrastra consigo a la materia gaseosa llamada a formar parte de la atmósfera del planeta en ciernes. Ciertamente, la gravedad del protoplaneta tiende a retener los gases, pero el efecto del viento estelar gana la partida. Si el protoplaneta tiene un campo magnético intenso, como es el caso de la Tierra, las partículas cargadas son desviadas y no pueden ejercer su efecto. Todo ello fue considerado en el capítulo III.11 (ver de nuevo la figura 112).

El sistema solar interior era demasiado caliente para que se condensaran moléculas volátiles como las del agua y metano, así que los planetesimales que se formaron en la zona que ocupan Mercurio, Venus, Tierra y Marte, fueron relativamente pequeños (abarcando solo 0,6 % de la masa del disco) y compuestos principalmente por componentes con altos puntos de fusión, como los silicatos y metales. Estos cuerpos rocosos finalmente se convirtieron en planetas sólidos. Más lejos, los efectos gravitacionales de Júpiter hicieron imposible que se unieran los objetos protoplanetarios presentes, dejando detrás el cinturón de asteroides que se halla entre las órbitas de Marte y Júpiter. Y más lejos aún, ya en las órbitas de Júpiter y Saturno, fue posible la acumulación de grandes masas de materiales ligeros que dieron como resultado la aparición de los dos gigantes planetarios y más allá, fue posible la acreción de moléculas ligeras, como el agua, en una zona

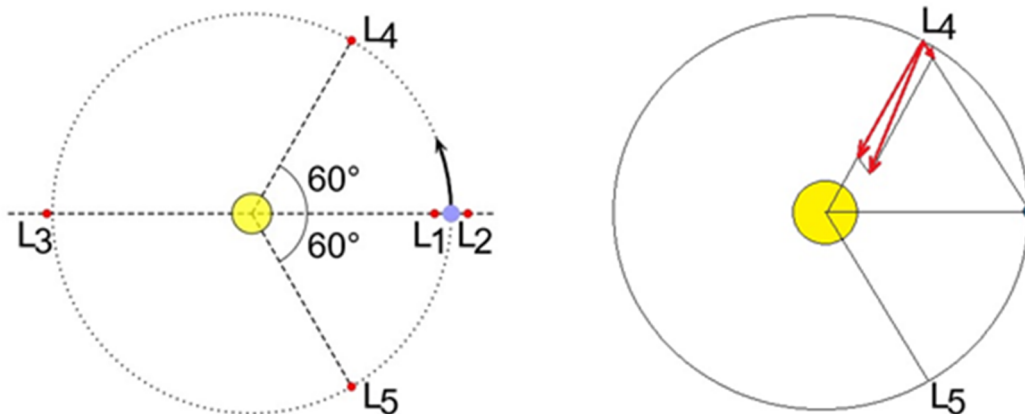
donde había poco material rocoso; he aquí por qué Urano y Neptuno son considerados como gigantes de hielo, en la creencia de que sus núcleos están hechos principalmente por agua sólida.



Figura 135 Sentidos de rotación de los planetas e inclinaciones de los ejes respecto del plano de su eclíptica.

MECÁNICA LAGRANGIANA: EL SISTEMA SOL-TIERRA-THEIA

Newton elaboró su Teoría de la Gravitación Universal para un sistema de dos cuerpos másicos. El lector puede encontrar su deducción en el cuadro de texto del capítulo I.17.1. Pasados 87 años de su publicación, el matemático francés Joseph Louis Lagrange (1736-1813) aplicó la Ley de la Gravitación a un sistema formado por tres cuerpos másicos como, por ejemplo, el Sol, la Tierra y un tercer cuerpo de mucha menor masa que los anteriores.



En la órbita terrestre o en sus proximidades, hay cinco puntos singulares: L_1 situado entre la Tierra y el Sol, donde las fuerzas gravitacionales solar y terrestre son iguales y opuestas. L_2 y L_3 son puntos donde las gravitaciones solar y terrestre se suman. Los puntos L_4 y L_5 son los que interesan aquí.

En el punto L_4 la fuerza gravitacional solar F_G y la fuerza gravitacional terrestre F_g son muy distintas, realmente $F_G \gg F_g$ pero están dirigidas sobre los lados de un triángulo equilátero cuya base es la recta que media entre el Sol y la Tierra. Los puntos L_4 y L_5 ofrecen una cierta estabilidad, de forma que un cuerpo que compartiera la misma órbita con la Tierra tendería a girar en torno al Sol con igual velocidad que la Tierra, manteniéndose a una distancia angular de 60° .

La *Teoría del disco protoplanetario* explica aceptablemente el origen del Sistema Solar y está avalada por varias evidencias. Una de ellas es el hecho de que las órbitas de todos los planetas se encuentran prácticamente en un mismo plano, a excepción de Plutón²⁶⁷. Otra razón en favor de esta teoría es que, a excepción de Venus y Urano, todos los planetas rotan sobre sí mismos en el mismo sentido. Venus lo hace en sentido contrario y Urano tiene su eje de rotación casi coincidiendo con el plano de su eclíptica. Cabe pensar que fuera a causa de un choque con un gran asteroide la causa de que el primero invirtiera su sentido de rotación y el segundo modificara casi 90° la dirección de su eje.

IV.7.1 FORMACIÓN DE LA LUNA

En cuanto a nuestro satélite, la Luna, la explicación más plausible sobre su formación y existencia de que disponemos se llama *Teoría del Gran Impacto*²⁶⁸, esta teoría se sostiene en la *Mecánica Lagrangiana* y sostiene que hace unos 4.600 millones de años, siendo entonces la Tierra un protoplaneta muy evolucionado, a punto ya de convertirse en planeta, compartía la misma órbita un segundo protoplaneta, de dimensiones parecidas a Marte, que los científicos llaman *Tea* o *Theia*²⁶⁹. Este protoplaneta giraba junto con la Tierra en torno al joven Sol, retrasado o adelantado unos 60° (esto supone una distancia orbital de unos 150 millones de kilómetros) la distancia angular de 60° es un punto de la órbita particularmente estable según la Mecánica Lagrangiana y bien pudo ser el lugar que ocupara el supuesto planeta Theia. Pasados entre 20 y 30 millones de años desde su formación, Theia había crecido por acreción²⁷⁰ hasta alcanzar un tamaño similar al que hoy tiene Marte. Por entonces, la Tierra se encontraba en su primer período geológico: el *eón Hadeico*²⁷¹.

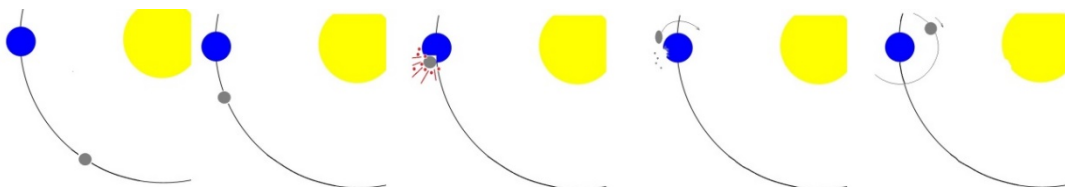


Figura 136 Esquema de la formación de la Luna según la Teoría del Gran Impacto. El protoplaneta Tea compartía órbita con la Tierra y llegó a chocar con ella. Parte de su masa se incorporó a la Tierra y la otra parte se compactó y originó la Luna.

Cuando Tea creció lo suficiente entró en una órbita caótica y la colisión de ambos planetas se hizo inevitable, dado que ambos planetas ocupaban la misma órbita. Se piensa que el impacto pudo haber acontecido unos cientos de años después del inicio del caos orbital. Se ha calculado que esto

²⁶⁷ En la Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional celebrada en Praga el 24 de agosto de 2006 se creó una nueva categoría llamada *plutoide*, en la que se incluye a Plutón. Ello se debe a su pequeño tamaño y a las singulares características de su órbita.

²⁶⁸ Fue publicada en 1975 por W.K. Hartman y D.R. Davis en la revista científica *Icarus*.

²⁶⁹ Nombre tomado de la mitología griega. Theia era la titánide madre de la diosa lunar Selene.

²⁷⁰ Aglutinamiento de materiales por efecto gravitacional.

²⁷¹ El *eón Hádico*, *Hadeico* o *Hadeano*, es la primera división del *Precámbrico*. Comienza en el momento en que se formó la Tierra hace unos 4.567 millones de años y termina hace 4.000 millones de años, durando unos 567 millones de años, cuando comienza el *eón Arcaico*. Etimológicamente, la palabra Hádico proviene de la palabra griega Hades que denominaba al inframundo, probablemente porque se lo relaciona con una etapa de calor y confusión.

ocurrió hace 4.533 millones de años; se cree que *Theia* impactó la Tierra con un ángulo oblicuo a una velocidad de 40.000 km/h, destruyendo *Theia* y expulsando la mayor parte de su manto así como una fracción significativa del manto terrestre hacia el espacio, mientras que el núcleo de *Theia* se hundió dentro del núcleo terrestre. Ciertos modelos muestran que la colisión entre ambos cuerpos fue rasante y que *Theia* quedó en una órbita baja, estando unida con la Tierra por un puente de materia; posteriormente se alejó hasta varios diámetros terrestres para volver a chocar con la Tierra y acabar destruido por completo. Las condiciones existentes en el entorno terrestre tras el impacto fueron muy extremas, con el planeta fundido en su totalidad y rodeado por una atmósfera de roca vaporizada a 4000 °C que se extendía hasta una distancia de ocho radios terrestres.

El tremendo impacto entre los dos planetas originaría una masa de escombros, aproximadamente un 2% de la masa de *Theia* (el resto se unió a la Tierra aumentando su tamaño) que posteriormente se aglutinarían por acreción dando lugar así a nuestro satélite.

IV.7.2 FORMACIÓN DE LA TIERRA

Según vimos en el punto IV.6, Lo que terminaría siendo el sistema solar, existió inicialmente como una extensa mezcla de nubes de gas, rocas y polvo en rotación. Estaba compuesta por hidrógeno y helio surgidos en el *Big Bang*, así como por elementos más pesados producidos por supernovas. Hace unos 5.000 millones de años la explosión de una supernova cercana envió una onda de choque que aportó más materiales e incrementó la rotación del disco protoplanetario que giraba en torno a la estrella central, el Sol. Al tiempo que la mayoría de la materia se acumulaba en el centro e incrementaba más y más la temperatura, la materia del disco se iba aglutinando en anillos concéntricos como indica la figura 133. La materia acumulada en los anillos se ordenaba por densidades y así, los anillos más cercanos a la joven estrella eran más rocosos y densos en tanto que los gases (hidrógeno y helio) y compuestos molecularmente ligeros (agua, dióxido de carbono, amoníaco, etc) se situaban en los anillos más exteriores.

La acreción en los anillos determinó la aparición de protoplanetas rocosos y densos en órbitas próximas a la estrella y protoplanetas de hidrógeno, helio y vapor de agua en las órbitas lejanas. La Tierra tiene este origen y por su situación y composición, es un planeta interior, rocoso, con un núcleo de hierro rodeado de magma y recubierto por una costra pétreo.

Si las cosas son como las teorías científicas describen, puede decirse que los planetas tienen un origen realmente violento y dramático. El anillo de acreción en el que se estaba formando la Tierra estaba lleno de cuerpos pétreos de unos pocos centímetros. No está claro cómo esos pequeños fragmentos llegaron a aglutinarse en rocas más grandes, como pone de evidencia el cinturón de asteroides que se halla entre las órbitas de Marte y Júpiter, pero lo cierto es que de alguna manera, el anillo de acreción era cada vez más abundante en asteroides del tamaño de un gran edificio. En su movimiento caótico en torno al Sol, los cuerpos chocaban incesantemente y los de mayor masa atraían a los más próximos incorporándolos y aumentando así su capacidad atractiva. Fue así como el anillo en el que se originaría la Tierra llegó a convertirse en unos cuantos cuerpos de tamaño suficientemente grande como para crecer a expensas de clarificar másicamente el anillo en el que habían nacido.

Hace unos 4.600 millones de años, casi toda la masa del anillo protoplanetario se había concentrado en varios cuerpos. El mayor de todos, la recién nacida Tierra, orbitaba en torno al Sol

compartiendo su órbita con otros cuerpos; uno de ellos ocupaba un lugar distante unos 60° de arco, ese otro cuerpo se le llama *Tea* o *Theia* y, según vimos en el punto anterior, colisionó con la Tierra incrementando la masa de esta última y dando origen a la Luna.

A partir de aquí, la historia de la Tierra se aleja del campo de la Astrofísica para adentrarse en el mundo de la Geología. En este momento, el tiempo deja de ser sideral o cosmológico para convertirse en tiempo geológico, donde las escalas son más reducidas, pese a que siguen siendo enormes si se las compara con nuestro orden de magnitudes. La unidad más grande de tiempo cronogeológico es el *eón*²⁷², que se corresponde con su equivalente cronoestratigráfico llamado *eonotema*²⁷³. La historia de la Tierra se fragmenta en cuatro eones:

- *Eón Hadeano* o *Hádico* que comprende desde que se formó la Tierra hace 4.600 millones de años hasta hace 3.800 millones de años. En este período primitivo la Tierra era una bola de magma con una costra pétreo. Estaba incesantemente bombardeada por meteoritos y asteroides en un fuerte proceso de acreción. La atmósfera tenía un cierto parecido con la atmósfera actual de Venus. Aún no había aparecido la vida. En este episodio se formó la Luna según se describió en el punto IV.6.1
- *Eón Arcaico* o *Arqueano*, que se extiende desde hace 3.800 millones de años hasta hace 2.500 millones de años. En este período la actividad sísmica es muy intensa, las placas tectónicas²⁷⁴ se mueven intensamente originando numerosos plegamientos y seísmos. En la atmósfera, carente de oxígeno, son continuas las tormentas con fuertes vientos y aparato eléctrico. En este período surge la vida en forma de organismos unicelulares. Como vestigios de estas primitivas formas de vida, tenemos hoy los *estromatolitos*, considerados los indicios más antiguos de la vida en la Tierra.
- *Eón Proterozoico* que abarca desde hace 2.500 millones de años hasta hace 542 millones de años. Su principal característica es la aparición de la clorofila en los seres vivos (algas y plantas) que con su fotosíntesis fueron cambiando la atmósfera primitiva por la atmósfera actual.
- *Eón Fanerozoico*²⁷⁵, que se extiende desde hace 542 millones de años hasta el momento actual, siendo el período donde aparecen secuencialmente todos los seres vivos, actuales o extinguidos.

Por ser el cuarto el más variado, estudiado y conocido, pese a ser el más breve, los tres primeros eones se agrupan en un *supereón* llamado *Precámbrico*. Este supereón ocupa más del 88% de la vida de la Tierra y su estudio resulta difícil por la casi total ausencia de fósiles y porque las rocas, fundamentalmente *ígneas* y *metamórficas*, están muy transformadas por los ciclos orogénicos.

²⁷² El término *eón* significa en griego clásico “eternidad”

²⁷³ En Geología, los estratos de las rocas sedimentarias son utilizados como medidores del tiempo geológico, estando por lo general los más antiguos debajo de los más modernos.

²⁷⁴ En un próximo capítulo tendremos ocasión de conocer la Teoría Tectónica de Placas que explica la dinámica de la corteza terrestre.

²⁷⁵ El término deriva de la voz griega “phaneros”=visible y “zoos”=vida, es decir, se refiere al período en que la Tierra es poblado por seres vivos evidentes y visibles.

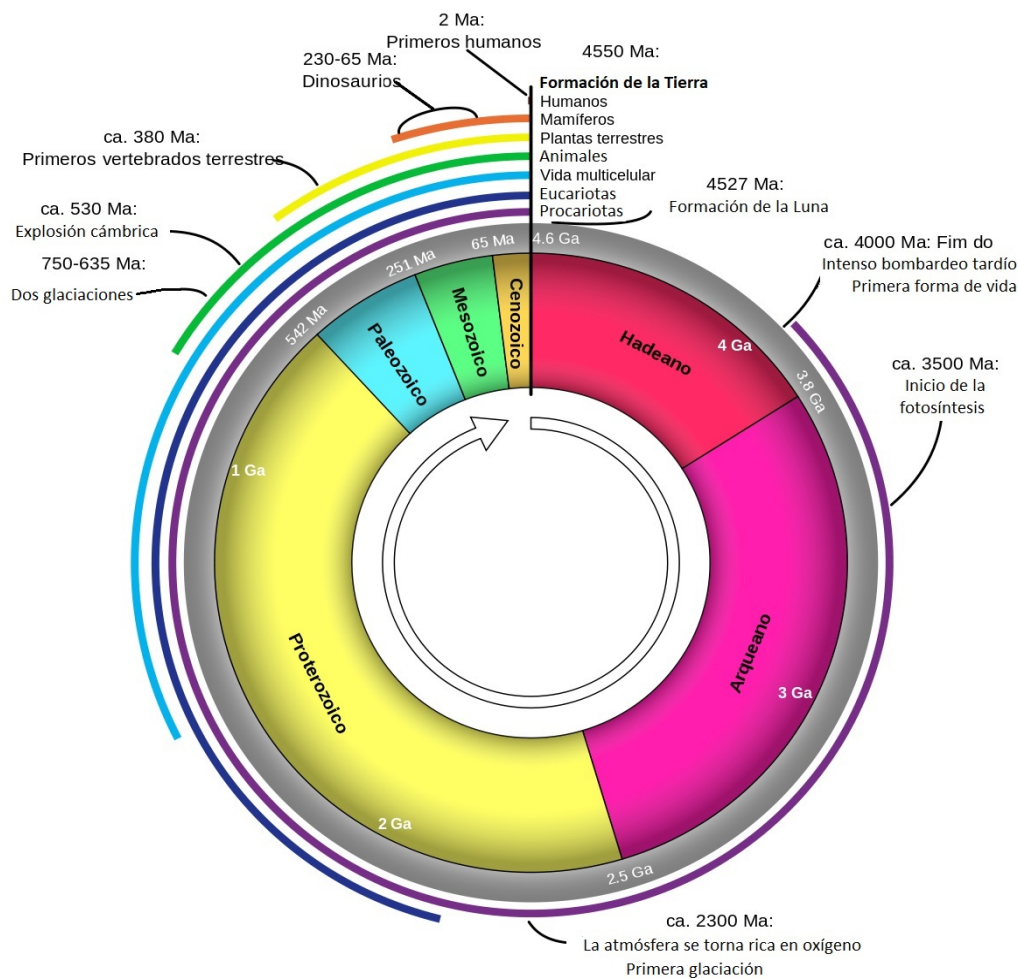


Figura 137 Esquema cronológico de la historia de la Tierra con expresión de los eones y las eras.

Finalmente, queda un asunto por considerar en este punto, dedicado a la formación de la Tierra. Nos referimos a la existencia del agua. En el capítulo III.10.1 ya se hizo un intento de explicación de la existencia del agua en la Tierra, algo realmente singular, toda vez que de los cuatro planetas interiores se originaron en condiciones físicas bastante parecidas. Ya vimos en el capítulo IV.6 que hace 4.600 millones de años los protoplanetas interiores (Mercurio, Venus, Tierra y Marte) eran bolas de magma con una costra rocosa aún muy caliente. Por otro lado, su proximidad al joven Sol les hacía muy vulnerables al viento solar que empujaba a los gases más ligeros, entre ellos el vapor de agua, impidiendo que permanecieran en las primitivas atmósferas.

Sabemos que, excepto la Tierra, ninguno de los planetas interiores tiene agua abundante; hay indicios de que Venus la tuvo, pero la perdió por causa de su débil campo magnético²⁷⁶, consecuencia directa de su lenta velocidad de rotación. En cuanto a Marte, su también escaso campo magnético y la baja presión atmosférica en su superficie, determinan la inexistencia de mares de agua líquida. Así pues, el caso de la Tierra es realmente singular, ya que el 71% de su

²⁷⁶ En el capítulo III.11 (fig. 112) ya vimos la importancia que tiene el campo magnético de un planeta para desviar el viento estelar.

superficie está cubierta por agua líquida y su atmósfera es rica en vapor. Ciertamente, es un caso singular que no está explicado satisfactoriamente.

La idea de que a lo largo del *eón hádico* el enfriamiento tuviera lugar bajo una atmósfera lo suficientemente densa como para que su presión en la superficie hubiera permitido la deposición y retención de agua, puede explicar la existencia de una pequeña cantidad de agua líquida pero no la de mares y océanos.

Otra posibilidad a barajar es que durante la época del *bombardeo intenso tardío*, que se extiende desde hace 4.100 millones de años hasta 3.800 millones de años (último cuarto del eón hádico) la Tierra (y los demás planetas) sufrieron un intenso bombardeo²⁷⁷ de objetos transneptunianos, asteroides, cometas, etc, dotados todos ellos de abundante agua en forma de hielo que, al tiempo que incrementaron la masa planetaria, dotaron a esta de agua. Sólo la Tierra la retuvo en cantidad suficiente gracias a sus características atmosféricas y a su intenso campo magnético, que evitó la acción demoledora del viento solar.

Otra posible explicación de la presencia de agua en la Tierra es que, ocasionalmente, Júpiter pudo haber irrumpido en el espacio de los planetas interiores, desestabilizando las órbitas de los asteroides que hoy se encuentran entre su órbita y la de Marte. Ello provocaría que muchos de estos cuerpos, en su mayoría *condritas carbonáceas*²⁷⁸, se precipitaran en gran número sobre los planetas interiores. De esta manera, la Tierra podría haber recibido una buena “ración” del agua que hoy posee.

Finalmente, cabe pensar que la actividad volcánica terrestre ha sido otra fuente de aprovisionamiento de agua. Las erupciones expulsan importantes cantidades de vapor que, tras condensarse, se incorporan al ciclo del agua.

IV.8 LA TIERRA, UN PLANETA EN PERMANENTE CONSTRUCCIÓN

En la segunda mitad del S. XVII el médico y anatomista danés Niels Steno (1638-1686) se dedicó preferentemente al estudio de la Tierra y estableció por primera vez la *Ley de Superposición de los Estratos*, fundamento de la Geología moderna. Ya en el S. XVIII el escocés James Hutton (1726-1797) fue el primer formulador de las ideas que conducirían a la corriente científica llamada uniformista²⁷⁹ y del plutonismo²⁸⁰, en las que incluyó sus teorías de la Geología y del tiempo geológico y su escala. Más tarde, ya en pleno S. XIX, Charles Lyell (1797-185) desarrolló y consolidó la *Teoría Uniformista*, frontalmente opuesta a la del *catastrofismo*, muy popular entre los científicos de la época de Lyell. Esta última postulaba que sólo las grandes catástrofes podrían cambiar la formación básica de la Tierra, y que ésta tenía 6.000 años de antigüedad. También

²⁷⁷ La prueba de este proceso se halla en los numerosos cráteres presentes en la superficie de Mercurio, Venus y Marte, y también en la Luna.

²⁷⁸ Meteoritos no metálicos (rocosos) que no han sufrido procesos de fusión o de diferenciación en los asteroides de los que proceden. Representan el 85,7 % de los meteoritos que caen a la Tierra. Su conocimiento aporta claves importantes para comprender el origen y la edad del sistema solar, la síntesis de compuestos orgánicos, el origen de la vida o la presencia de agua en la Tierra.

²⁷⁹ Suposición de que las mismas leyes y procesos naturales que operan en las observaciones científicas actuales siempre han operado en el universo en el pasado y se aplican en todo el universo.

²⁸⁰ Supone la generación de rocas como resultado de procesos volcánicos.

elaboró un método para clasificar los estratos, o capas, mediante el estudio de los antiguos estratos marinos de Europa occidental. Todo ello lo publicó en su libro “Principios de Geología”, obra que influyó en la ciencia del S. XIX, muy en particular en su amigo Charles Darwin. Ciertamente, algunos aspectos de la teoría darwiniana de la *Evolución de las Especies* contradicen la *Teoría Uniformista*. No obstante, Lyell siempre fue un gran defensor de las ideas de su amigo.

En los primeros años del S. XX un meteorólogo y geofísico alemán, Alfred Wegener (1880-1930) volvía de Groenlandia tras participar en una expedición científica por la costa noreste de la gran isla. Ya en su puesto de profesor en la universidad de Marburgo incluía en sus clases sus ideas acerca de la deriva continental. Viajó de nuevo entre 1912 y 1913 pero tuvo que dejar sus investigaciones al ser enrolado en el ejército alemán durante la Primera Guerra Mundial. Herido en combate, fue licenciado y reanudó su trabajo. Pero la mente de Wegener no descansaba e intentaba imaginar y explicar cómo la Tierra habría llegado a ser lo que hoy es. Sus elucubraciones fueron publicadas en su obra maestra *El origen de los continentes y océanos*²⁸¹. Finalmente, Wegener hizo un tercer viaje a Groenlandia para encontrar más evidencias de su teoría, y fue allí donde encontró la muerte en 1930²⁸².

La *Teoría de Placas Tectónicas*, también llamada *Teoría de la Deriva Continental*, explica la forma en que está estructurada la litosfera (porción externa más fría y rígida de la Tierra) considerada esta como un conjunto de placas tectónicas que forman parte de la superficie de la Tierra y los deslizamientos que se observan entre ellas en su movimiento sobre el manto terrestre fluido, sus direcciones e interacciones. También explica la formación de las cadenas montañosas (orogénesis). Así mismo, da una explicación satisfactoria al hecho de que los terremotos y los volcanes se concentran en regiones concretas del planeta (como el Cinturón de Fuego del Pacífico) o a la ubicación de las grandes fosas submarinas junto a islas y continentes y no en el centro del océano.

En la antigua Grecia se designaba con el término “tektonicós” a quien construía casas, murallas o puentes, es decir, un arquitecto o constructor. He aquí el motivo por el que este término aparece en el nombre de la teoría de Wegener, en la que se considera a la Tierra como un ente vivo, cambiante y en continua construcción. El influjo de la teoría ha llegado a ser tal que los términos “tectonismo” o “tectónico” aluden directamente a los procesos geológicos con exclusividad.

En los capítulos IV.5.4 y IV.6 se expusieron las explicaciones científicas de la existencia de elementos constituyentes de los materiales que mayoritariamente conforman la Tierra (hierro níquel, silicio, carbono, calcio, etc.) y se expusieron los motivos por los que nuestro planeta está formado por un núcleo de hierro y algo de níquel, al que rodea un manto magmático fluido recubierto por una coraza pétreo.

²⁸¹ En el título que Wegener dio a su libro se aprecia la fuerte influencia que la figura de Darwin ejercía no solo sobre él sino sobre la comunidad científica en general. Téngase en cuenta que la obra más importante de Darwin se titulaba *El origen de las especies por medio de la selección natural*.

²⁸² Como cualquier otra epopeya, la historia de la ciencia abunda en héroes y mártires. Si Galileo, Copérnico y Giordano Bruno fueron mártires, María Curie y Alfred Wegener fueron héroes que se dejaron la vida en el empeño de sus investigaciones.

El interior de la Tierra está caliente, es decir contiene una ingente cantidad de energía térmica y ante esa evidencia, uno se pregunta ¿de dónde procede esa energía? Sabemos que en el universo, solo las estrellas actúan como fuentes de energía merced a las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en su seno y sabemos también que no son fuentes inagotables de energía ya que, tras una prolongada vida de miles de millones de años, su combustible nuclear termina por agotarse y la estrella muere y se enfría. Todo ello ha sido descrito en el capítulo IV.5.

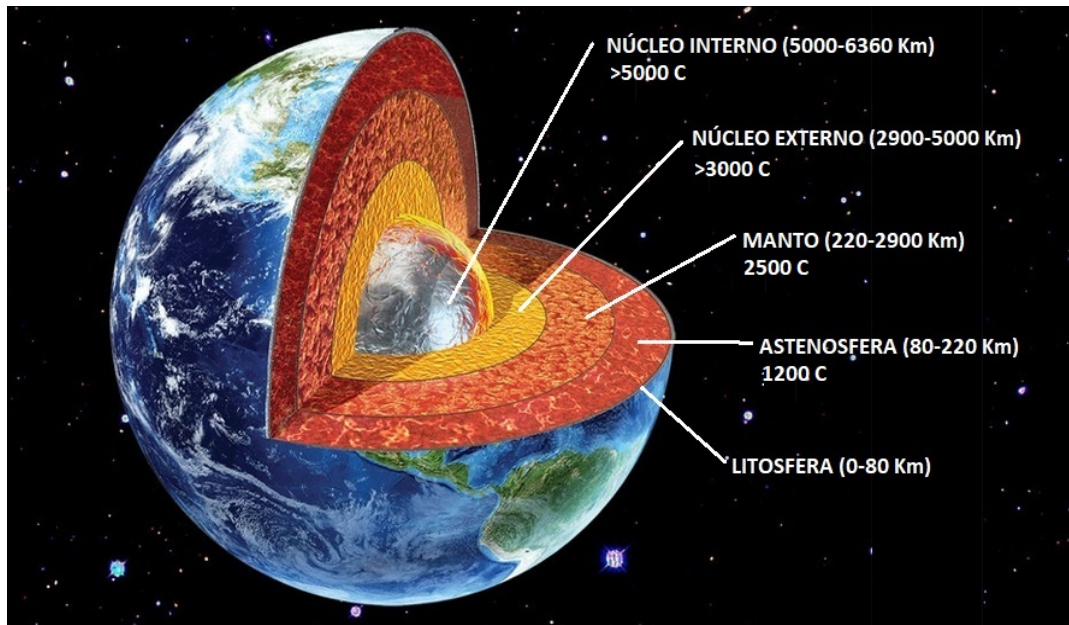


Figura 138 Estructura interna de la Tierra con las temperaturas medias en las capas.

En cuanto al resto de los cuerpos celestes, entre ellos la Tierra, no son fuentes de energía sino, a lo sumo, reservorios de ella. Cuando asistimos a una gran manifestación telúrica, ya sea un sismo o un tsunami o una erupción volcánica, se nos antoja pensar que la energía del interior de la Tierra es poco menos que inconmensurable y que esa energía ha estado siempre ahí y que perdurará para siempre. Ese es nuestro pensamiento espontáneo, el del sentido común, pero como ya vimos en el capítulo I.3, el pensamiento científico va por otro lado. No debemos olvidar que nuestra percepción del universo es pobre y aldeana debido a lo pequeño que es nuestro orden de magnitud en comparación al del Cosmos.

La energía que alberga la Tierra en su interior es básicamente térmica y su procedencia ha de ser mayoritariamente la que tenía en el momento de su formación. Así pues, hemos de aceptar que la inmensa mayoría del calor interno de nuestro planeta no es sino calor remanente de su formación: Se trata pues del calor, aún presente, producto de las colisiones entre los residuos estelares del disco protoplanetario que dio origen a la Tierra. Este calor está mantenido por otras circunstancias y procesos:

- *Gravitación*. El peso de las capas comprime el interior magmático y la fricción inherente al movimiento de sus partes provoca un calentamiento adicional.
- *Fuerzas de marea*. Se llama así a los movimientos relativos entre el núcleo y el manto terrestres por causa de las atracciones gravitacionales combinadas de la Luna y el Sol.

Dichos movimientos generan calor de fricción. El nombre del efecto se debe a que las causas son las mismas que provocan las mareas oceánicas.

- *Calor latente de cristalización.* Pese a que el núcleo interno está más caliente que el externo, el primero se encuentra en fase sólida, siendo el hierro su componente casi exclusivo. Ello es debido a la enorme presión que gravita sobre él. En el límite entre el núcleo interno y externo se dan procesos de paso de fase líquida a fase sólida (cristalización o solidificación) que son exotérmicos (revisar el capítulo III.11).
- *Procesos radioactivos.* Es un proceso que se da entre la *litosfera* y la *astenosfera*; en la primera existen radioisótopos tales como U^{235} , U^{238} , Th^{232} y K^{40} que sufren descomposición espontánea y exotérmica. Este es el proceso que aporta más calor a la superficie de la Tierra.
- *Reacciones fisicoquímicas exotérmicas.* Estos procesos se dan en el manto terrestre donde, a temperaturas del orden de los 2500 C y a las elevadas presiones a las que está sometido, muchos minerales son inestables y sufren transformaciones químicas muchas de las cuales son exotérmicas.

El hecho de existir en el centro de la Tierra un núcleo de hierro que gira con velocidad distinta a como lo hace el resto del planeta es el motivo por el que el campo geomagnético es particularmente intenso, algo que no sucede en nuestros planetas vecinos Venus y Marte. El núcleo interno es, pues, la “dinamo magnética” que propicia que el viento solar no desnude a la Tierra de su atmósfera y del preciado agua que posibilita la vida sobre ella.

Por otro lado, las diferencias de temperatura entre los núcleos interno y externo así como entre el manto y la astenosfera, son la causa de la existencia de corrientes convectivas en el magma, según muestra la figura 139. Las corrientes convectivas en el núcleo interno combinadas con las del manto y con los *movimientos de marea* ya mencionados, ocasionan los calentamientos por fricción a los que antes nos referimos.

La *litosfera* es la capa externa y sólida de la Tierra. Su grosor medio es de unos 80 Km en el subsuelo de los continentes y mucho más delgado, unos 20 Km, en los fondos oceánicos. Lejos de ser continua y uniforme, la litosfera está fragmentada en *placas tectónicas* que “flotan” sobre el magma. Su gran viscosidad ocasiona que las placas se vean continua e intensamente empujadas por las corrientes convectivas.

En unas zonas, preferentemente fondos oceánicos, las placas se separan dejando aflorar el magma que inmediatamente se solidifica, tal es el caso de la *Dorsal Atlántica*, que recorre el planeta desde el polo sur hasta el norte por el fondo del océano Atlántico. Igualmente sucede en los océanos Pacífico e Índico.

En otros lugares del planeta, las placas tectónicas chocan entre sí originando pliegues (elevaciones orogénicas), actividad volcánica, frecuentes seísmos y grandes fosas de *subducción* (figura 140). Puesto que la litosfera es más delgada en los fondos oceánicos que en el subsuelo continental, en la zona de encuentro de dos placas, el fondo oceánico subduce por debajo del borde de la placa continental, ocasionando en la zona de encuentro pliegues (*orogénesis*), vulcanismo y seísmos.

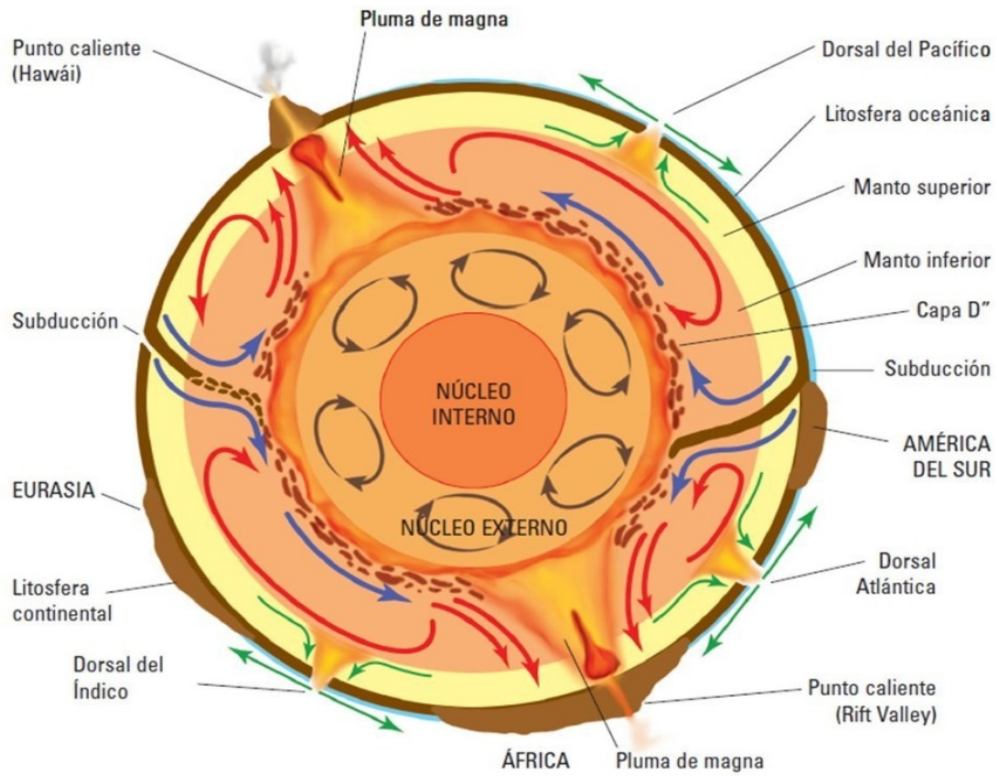


Figura 139 Principales corrientes convectivas del magma, causantes del movimiento de las placas litosféricas y sus consecuencias. (Vista desde el polo Sur)

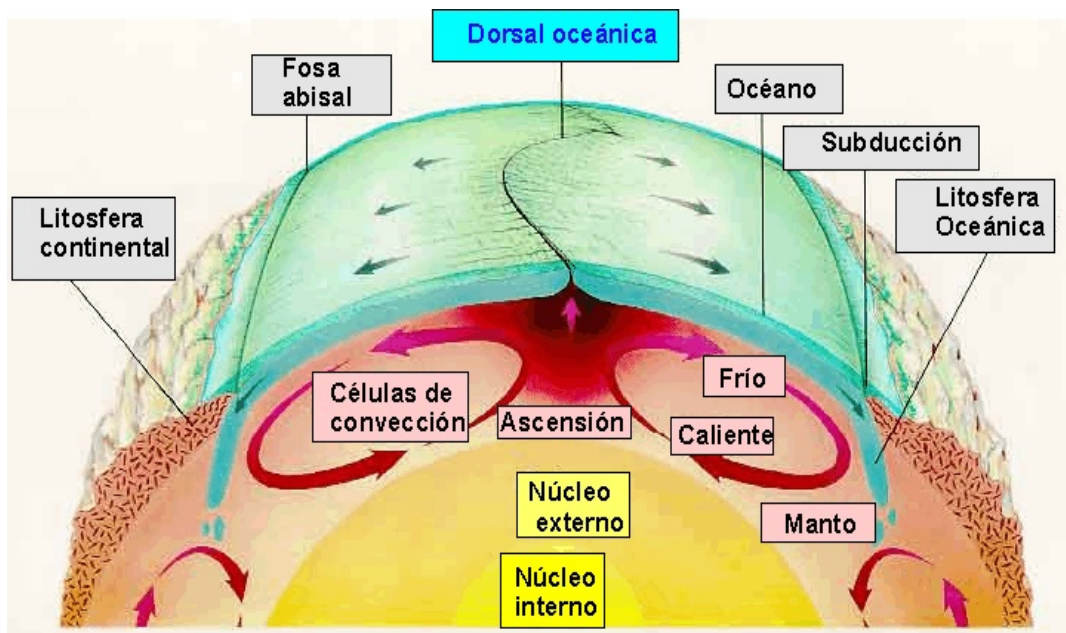


Figura 140 Esquema del movimiento de las placas tectónicas

El proceso tectónico interviene a su vez en el *ciclo de las rocas* que componen la litosfera. Así, tanto las lavas que afloran en las dorsales oceánicas, generando placa, como los materiales expulsados en las erupciones volcánicas y las bolsas de magma que, no llegando a aflorar, se

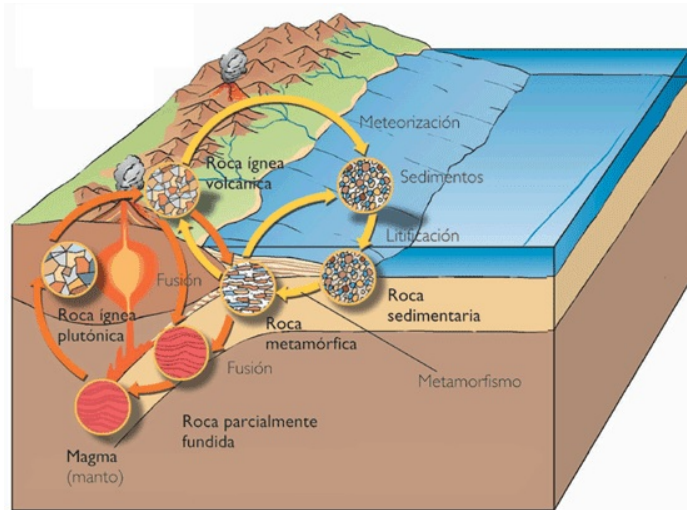


Figura 141 Esquema simplificado del ciclo de las rocas asociado al movimiento de las placas litosféricas.

enfían originando *batolitos*, todos ellos dan lugar a las *rocas magmáticas* o *ígneas*²⁸³. Estas rocas son posteriormente afectadas por la erosión, son fragmentadas, disueltas y transportadas hasta zonas donde se depositan, cementan y petrifican originando así las *rocas sedimentarias*, cuya principal característica es su estructura estratiforme. En las zonas de encuentro de dos placas o bien en las inmediaciones de las bolsas de magma, los materiales que conforman la placa se ven sometidos a unas duras condiciones

de presión y temperatura que alteran su estructura íntima; el resultado es la aparición de *rocas metamórficas*²⁸⁴.

Finalmente, hemos de advertir que la placa que subduce se mete hacia la astenosfera donde las rocas que la forman se funden, incorporando-se al magma. Así pues, los materiales que conforman la litosfera proceden del enfriamiento del magma, durante su existencia en fase sólida sufren transformaciones por efecto de la erosión y del metamorfismo para, finalmente, incorporarse de nuevo al magma, cerrándose así el ciclo.

Actualmente, la idea que tenemos de nuestro planeta es que se trata de un ente vivo y cambiante, una gigantesca y sofisticada maquinaria que recibe energía electromagnética procedente del Sol, parte de la cual es directamente reflejada y otra parte es absorbida para mantener en marcha sus “engranajes” y “piezas móviles”. Por otro lado, esta gran maquinaria posee una energía remanente de su pasado estelar que mantiene en su interior. Esta energía es la responsable de la fragmentación y movimiento de las placas de que consta su costra pétreo externa. Estas eran las ideas que, sobre poco más o menos, bullían en la cabeza de Alfred Wegener cuando redactaba en 1912 la publicación que daría a conocer su *Teoría de la Deriva Continental*.

Pero ¿qué es lo que le indujo a Wegener a pensar en la idea de que “la Tierra se mueve”? Desde la más remota antigüedad han existido mitos y leyendas sobre la Tierra y sus manifestaciones dinámicas. En la cultura griega, los fenómenos telúricos eran gobernados por la diosa madre *Gea* o *Gaia* y la cultura latina veneraba a *Vulcano*, dios del fuego, nombres de los que derivan los términos Geología, Geodinámica, volcán, vulcanismo, etc. A finales del S. XIX eran bien conocidas las costas de uno y otro lado del océano Atlántico y llamaba la atención la correspondencia que

²⁸³ También llamadas *rocas plutónicas*, son rocas del tipo de los granitos, basaltos, riolitas, brechas, etc.

²⁸⁴ De este tipo son los esquistos, los mármoles y las cuarcitas.

existe entre la una y la otra. En la figura 142 se aprecia cómo las costas de Groenlandia, comparadas con las costas norteamericana y escandinava, parecen proceder de un todo que en algún momento formó una unidad que luego se separó. Otro tanto sucede con las costas europeas y la costa oriental americana. Pero donde más evidente resulta este efecto es en las costas africana y brasileña, donde el golfo de Guinea parece ser un recorte de la costa de Brasil.



Figura 142 Delimitación de las placas tectónicas más importantes de la corteza terrestre.

En el capítulo I.8 se trató la *observación científica* como un camino seguido por la ciencia en multitud de ocasiones para su avance, en el capítulo I.9 vimos cómo esta observación científica, llevada con rigor, rindió el preciado fruto de la *Teoría de la Evolución de las Especies* y en el capítulo I.11 vimos con detalle la importancia que tiene la elaboración de una buena hipótesis en orden a la elaboración de una gran teoría.

Pues bien, el desarrollo intelectual que hizo Wegener para elaborar su teoría responde plenamente a la secuencia “observación / emisión de hipótesis / experimentación / análisis de resultados / elaboración teórica”. Él se basó en las observaciones que los naturalistas del S. XIX habían hecho en sus numerosos viajes por el Atlántico y también en sus observaciones hechas en su primer viaje por Groenlandia. También tuvo en cuenta la distribución de ciertas formaciones geológicas y del registro fósil de los continentes septentrionales (África y América), que manifestaba que podían haber compartido floras y faunas en tiempos geológicos anteriores. Con esos datos, Wegener calculó que el conjunto de los continentes actuales estuvieron unidos en un pasado remoto de la Tierra²⁸⁵, formando un supercontinente, que él llamó *Pangea*, que significa «todo tierra» en griego.

²⁸⁵ Estas pruebas geográficas son más evidentes si en lugar de las costas, se comparan los bordes de las plataformas continentales.

Tras elaborar su hipótesis de un primitivo supercontinente que por desmembración habría originado los actuales, Wegener encontró la forma de encajar varias de las piezas del rompecabezas: Pudo así explicar la existencia de cordilleras con la misma edad y misma clase de rocas en distintos continentes que, según él, habrían estado unidas en tiempos pretéritos.

Otra de las pruebas de su teoría residía en la existencia de fósiles de las mismas especies que habitaron ambos lugares durante el periodo de su existencia. Y es más, entre estos organismos se encontraban algunos terrestres, como reptiles o plantas, incapaces de haber atravesado océanos, por lo que dedujo que durante el periodo de vida de estas especies, *Pangea* habría existido.

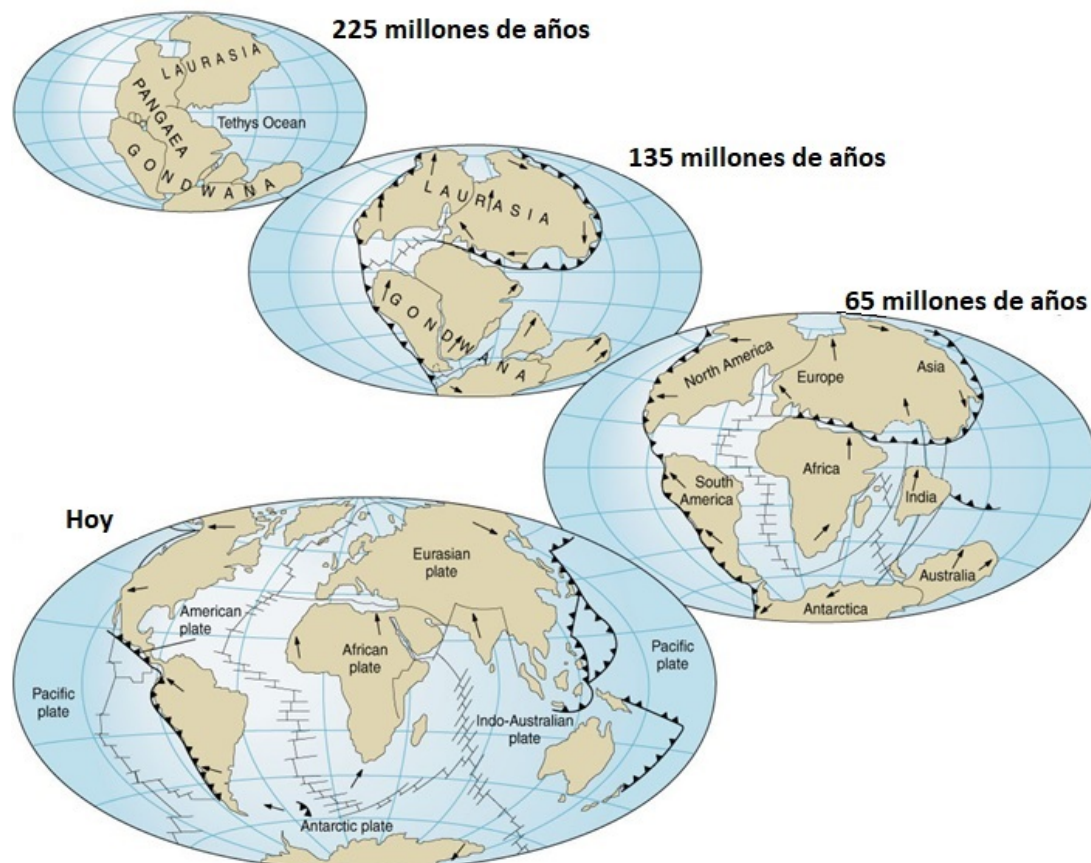


Figura 143 Evolución del primitivo supercontinente *Pangea* a lo largo de los últimos 300 millones de años.

Otra prueba la encontró en ciertas rocas sedimentarias como indicadores de los climas en los que se originan, dibujó un mapa de estos climas antiguos y concluyó que su distribución resultaría inexplicable si los continentes hubieran permanecido en sus posiciones actuales. A causa de antiguas glaciaciones se han encontrado *tillitas*²⁸⁶ en zonas muy separadas geológicamente.

Finalmente, Wegener encontró nuevas evidencias de la deriva continental al estudiar las magnetitas presentes en las rocas magmáticas de uno y otro lado del océano. Mientras el magma está fundido, la lenta cristalización permite que los cristales de materiales ferromagnéticos solidifiquen en la dirección impuesta por el campo geomagnético del momento. Ciertamente, el

²⁸⁶ Sedimentos muy heterogéneos debidos al arrastre glaciar.

campo magnético terrestre ha variado muchas veces en dirección e intensidad a lo largo de los millones de años. La existencia de magnetitas de la misma época con orientaciones distintas a ambos lados del océano sugiere que en algún momento esas tierras estuvieron unidas y que los movimientos tectónicos provocaron la pérdida de su paralelismo.

Actualmente, las ideas de Wegener están tan aceptadas y son consideradas tan referentes como lo es la Teoría de Darwin. Actualmente se prefiere el nombre de *Teoría Tectónica de Placas* y está plenamente confirmada por las observaciones realizadas en los fondos oceánicos por procedimientos de sonar e inmersión de batiscafos robotizados que evidencian la existencia de las dorsales, donde el magma aflora bajo el mar, así como la observación y medida de las profundas fosas abisales de las costas chilenas, donde queda evidenciada la subducción de la placa pacífica de Nazca bajo la placa suramericana (ver la figura 142). Igualmente se explica la existencia de grandes cordilleras como la de los Andes o el Himalaya, esta última causada por el choque de la placa indo-australiana con la euroasiática.

La zona oriental del continente africano situada al sur de la península arábiga tiene una importancia geológica extrema. Se trata de una extensa depresión tectónica llamada *Valle del Rift* que se extiende hacia el sur a lo largo de más de 4.800 Km. Comenzó a formarse en el sureste de África (donde es más ancho) hace unos 30 millones de años y sigue creciendo en la actualidad, tanto en anchura como en longitud, expansión que con el tiempo se convertirá en una cuenca oceánica (de hecho, ya lo es en la zona del mar Rojo gracias a su comunicación con el océano Índico). Los constantes temblores de tierra y emersiones de lava contribuyen a este crecimiento y, de seguir a este ritmo, el fondo del valle quedará inundado por las aguas marinas de forma total dentro de 10 millones de años. Con ello, la placa somalí se habrá desgajado de la placa africana formando un subcontinente distinto que procederá a separarse más aún de África, formando el valle un nuevo mar (ver la figura 142). Esta zona, declarada Patrimonio de la Humanidad, es la cuna del género humano; en ella se encuentran los restos fósiles de las especies de homínidos que por evolución determinaron nuestra especie. En cualquier caso, querido lector, ni tú ni yo lo veremos inundado por las aguas del mar.

IV.9 Y DIJO DIOS: “CRECED Y MULTIPLICAOS”

La pregunta ¿Quién soy y de dónde vengo? ha sido desde siempre una constante en la mente del ser humano. La necesidad de respuestas a las inquietudes que emanan de la conciencia del propio yo, ha sido motivo de todo tipo de especulaciones, muchas de las cuales se han plasmado en mitos y cosmogonías a lo largo de los siglos. De entre todas, la que más nos afecta es la judeocristiana, descrita en la Biblia. Así, el problema científico del origen del Cosmos y de la vida encontraba fácil respuesta en el texto del Génesis, en el que el Dios Creador formó de la nada la luz, las estrellas, el cielo y la tierra, las plantas, los animales y el hombre en tan solo seis días... y el séptimo descansó. Este mito simplista fue considerado durante siglos una cuestión de fe que se aceptaba sin más, e incluso, fue impuesta a sangre y fuego.

La pugna entre las dos posturas irreconciliables, la fe religiosa y el razonamiento científico, ha estado presente a lo largo de toda la historia de la ciencia. Hasta el advenimiento de la Revolución Científica, la fe prevaleció sobre la razón, pero a partir del S. XVII, tanto desde la filosofía como desde la ciencia misma, se ponían cada vez más en entredicho las viejas creencias. Las pruebas

experimentales aportadas por la ciencia y los razonamientos filosóficos eran cada vez más contundentes. Así, cuando el anciano Galileo agonizaba en el lecho de muerte, ya nadie creía en la Tierra como el centro del universo y hacía ya más de un siglo que los marinos españoles, al mando del Juan S. Elcano, habían circunnavegado el globo, desterrando para siempre la idea de una Tierra plana. En el S. XVIII el naturalista francés Georges Courvier (1769-1832) promovía la anatomía comparada y la paleontología al tiempo que su compatriota Jean Baptiste Lamarck

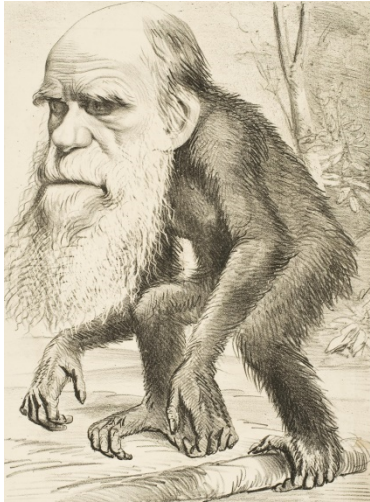


Figura 144 Representación satírica de Darwin en la revista *Hornet* (izquierda) y etiqueta de las botellas de una conocida y popular bebida alcohólica española. El letrero que sostiene la mano derecha del personaje dice: “Es el mejor. La ciencia lo dijo y yo no miento”.

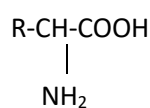
(1744-1829) establecía las bases de la nueva ciencia de la Biología y proponía nuevas y revolucionarias ideas acerca de la evolución de las distintas especies de seres vivos. Estas ideas serían elevadas a la categoría de teoría científica pocos años más tarde por Charles Darwin y Alfred Wallace.

Desde que en 1858 Darwin diera a conocer su *Teoría de la Evolución de las Especies* por medio de la selección natural, las nuevas ideas cayeron como una bomba,

sobre todo en los medios eclesiásticos, férreamente anclados en la historia bíblica. Darwin fue criticado por ciertos sectores reaccionarios de la comunidad científica, condenado por la Iglesia, venerado en los ámbitos progresistas del pensamiento e incluso, ridiculizado en no pocos medios sociales. Sin duda, las ideas evolucionistas no dejaron indiferente a nadie y el impacto de las nuevas ideas pervivió hasta bien entrado el S. XX.

IV.9.1 EL EXPERIMENTO DE UREY Y MILLER

Así estaban las cosas cuando en 1953, un joven licenciado en bioquímica, Stanley Miller (1930-2007), trabajaba en el laboratorio del afamado profesor Harold C. Urey, premio Nobel de Química en 1930. Por entonces se conocía bastante bien la estructura de las proteínas y se las identificaba como las sustancias componentes esenciales de los seres vivos. También se sabía que las macromoléculas proteínicas están formadas por agregación de innumerables moléculas sencillas, llamadas aminoácidos, por responder todas ellas a la fórmula genérica:



Siendo R una cadena hidrocarbonada.

La idea de que la vida pudo surgir espontáneamente en nuestro planeta a partir de los componentes sencillos de la atmósfera primigenia terrestre, a saber, agua, metano, amoníaco e hidrógeno, era sumamente atractiva para quienes deseaban demostrar que la evolución

darwiniana trascendía más allá de la existencia de los seres vivos para arrancar mucho antes, en el mundo de las moléculas inorgánicas. Por entonces, la Paleontología poseía pruebas evidentes de que, pasados unos mil millones de años de la condensación del protoplaneta que originó la Tierra, esta era una bola de magma recubierta de una costra pétreo y una envoltura gaseosa irrespirable, formada por vapor de agua, metano, amoníaco e hidrógeno. Nuestro planeta estaba sometido entonces a un intenso efecto invernadero y las tormentas eléctricas así como las radiaciones solares de alta energía eran la moneda de curso legal.

Las moléculas simples que conformaban la atmósfera primigenia son moléculas bastante estables, como revela *la entalpía de formación* de cada una de ellas. Se llama así a la energía puesta en juego (absorbida o desprendida) al sintetizar un *mol* de dicho compuesto a partir de sus elementos constituyentes, a la temperatura constante de 298K y presión de 1 atmósfera. Los compuestos molecularmente estables tienen entalpías de formación negativas, debido a que se desprende energía en su formación.

Urey y Miller especulaban con la posibilidad de que las moléculas específicas de los seres vivos pudieran haberse originado de forma espontánea a partir de las moléculas existentes en la atmósfera cuando la Tierra se encontraba en el final del *eón Hadeano*, hace unos 4.000 millones de años (ver la figura 137). La hipótesis que barajaban era que la elevada concentración de radiaciones fuertemente energéticas (UV, RX y R γ) unido a las incesantes descargas eléctricas de las fuertes tormentas, podrían haber provocado todo tipo de reacciones entre las moléculas de CO₂, H₂O, NH₃, CH₄, etc. conducentes a la formación de compuestos molecularmente más complejos, del tipo aminoácidos.



H _f metano=	-74,81 KJ/mol
H _f amoníaco=	-46,11 KJ/mol
H _f agua=	-241,8 KJ/mol
H _f dióxido de carbono=	-393,5 KJ/mol
H _f glicina=	-528,6 KJ/mol

Figura 145 La formación de aminoácidos a partir de las moléculas de la atmósfera terrestre primitiva solo sería posible con la intervención de fuertes dosis de radiación que aportan la energía de activación necesaria.

En condiciones normales, estas reacciones no se producen debido a que las moléculas CO₂, H₂O, NH₃, CH₄ etc. no son capaces de reaccionar tal como son, y han de ser previamente “rotas” o si se prefiere decir, “activadas” para que puedan combinarse entre sí. Urey y Miller pensaban que esa *energía de activación* podía ser provista por la fuerte radiación y las descargas eléctricas que en aquella época pretérita existían en la atmósfera terrestre.

Así pues, ambos investigadores se pusieron manos a la obra y diseñaron uno de los experimentos más bellos que ha conocido la historia de la ciencia. El de Urey y Miller merece figurar en la panoplia de los experimentos más famosos y trascendentes, junto con el de Eratóstenes de Cirene

(capítulo II.4), el de Lavoisier (capítulo I.13.2) el de Charles Foucault (capítulo I.17.2), el de Michelson-Morley (capítulo II.2) y el de Rutherford (capítulo III.6), entre otros.

El experimento pretendía emular las condiciones de la atmósfera terrestre primitiva, para comprobar si era posible la aparición espontánea de moléculas propias de los seres vivos. Consistió, básicamente, en someter una mezcla de metano, amoníaco, hidrógeno, dióxido de carbono, nitrógeno y agua a descargas eléctricas de 60.000 voltios a temperaturas muy altas. Como resultado, se observó la formación de una serie de moléculas orgánicas, entre la que destacan ácido acético, glucosa, y los aminoácidos glicina, alanina, ácido glutámico, ácido aspártico, usados por las células como los pilares básicos para sintetizar sus proteínas y lo que es más importante, también aparecieron adenina y guanina, componentes básicos de los ácidos nucleicos.

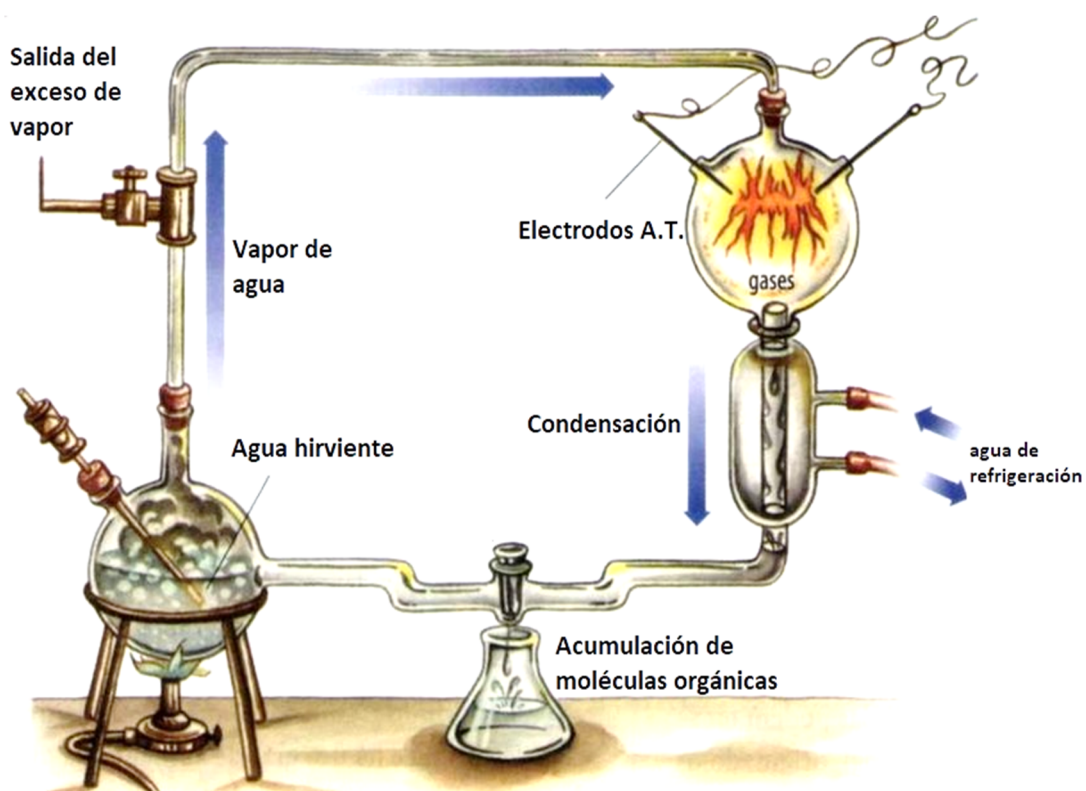


Figura 146 Esquema del experimento de Urey y Miller

IV.9.2 TEORÍAS SOBRE EL ORIGEN DE LA VIDA EN LA TIERRA

La trascendencia del experimento de Urey y Miller radica en que prueba experimentalmente que es posible la aparición espontánea de moléculas orgánicas complejas por recombinación de moléculas simples existentes, tanto en la atmósfera terrestre primitiva como también en el universo, bajo las drásticas condiciones físicas que no solo se dieron en los primeros millones de años de nuestro planeta sino en muchas otras partes del universo. Por todo ello, actualmente hay diversas corrientes de opinión respecto del inicio de la vida en la Tierra, he aquí algunas:

- *Teoría de la Panspermia*²⁸⁷ que ya propuso el químico sueco Svante A. Arrhenius (1859-1927) y que sostiene que las moléculas de la vida vinieron del espacio exterior adheridas a los asteroides y meteoritos. De hecho, en 1975 ya se había encontrado aminoácidos en los meteoritos.
- *Teoría de la Abiogénesis*²⁸⁸ *Hadeica* que supone que los océanos y la litosfera existieron dentro de los 150 primeros millones de años tras la formación de la Tierra. Pasados 500 millones de años de su nacimiento, la Tierra fue bombardeada durante otros cien millones de años por meteoritos y asteroides de gran tamaño; la energía liberada en esos choques evaporaba grandes cantidades de agua oceánica junto con polvo, formando espesas nubes. Cien millones de años después, el polvo se habría depositado en la superficie y el agua se habría condensado de nuevo, clarificándose la atmósfera. Se estima que hace unos 4.000 millones de años la atmósfera de la Tierra era parecida a la de Venus hoy. Estaba compuesta fundamentalmente por metano, amoníaco, dióxido de carbono y vapor de agua. Las incesantes descargas eléctricas y la fuerte irradiación provocaron la aparición de moléculas orgánicas sencillas como aminoácidos, glucosa y bases nitrogenadas²⁸⁹. Todas estas moléculas son solubles en agua, de forma que en esta época geológica, los océanos disolvían las moléculas producidas en la actividad atmosférica. Llegó un momento en el que las aguas de los mares se habían convertido en una enorme “sopa prebiótica”.
- *Teoría hidrotermal*. Experimentalmente se sabe que las células contienen concentraciones de potasio, fósforo y metales de transición mucho más altas que las existentes en océanos, lagos o ríos, ya sean estos actuales o primitivos. Cabe pues pensar que las primeras células se originaron en ambientes con concentraciones químicas similares a las halladas en los citoplasmas, y esas concentraciones se dan precisamente en las fumarolas que alimentan a las lagunas hidrotermales. Como apoyo experimental a esta teoría, existen numerosas pruebas de acumulación de vida primitiva, tanto fósil como actual, en las surgencias termales.

Sea como fuere, tanto si las moléculas prebióticas llegaron del espacio exterior como si se formaron in situ, no está claro cómo estas moléculas pudieron llegar a organizarse en estructuras moleculares autoreplicantes. Los trabajos de W. Gilbert en 1980 sugieren que las moléculas relativamente cortas de ARN²⁹⁰ se podrían haber formado espontáneamente, de modo que fueran capaces de catalizar su propia replicación continua. Así, la vida en la Tierra pudo aparecer a partir de la versátil actividad de las moléculas de ARN, desarrollando posteriormente una membrana celular a su alrededor y convirtiéndose así en la primera célula *procariota*²⁹¹, estas moléculas de

²⁸⁷ Término griego que significa “semillas por todas partes”, refiriéndose así al hecho de que los gérmenes de la vida se encuentran dispersos por el universo.

²⁸⁸ El término *Abiogénesis* significa “no-vida-origen” y se refiere al proceso natural del surgimiento u origen de la vida a partir de la no existencia de esta.

²⁸⁹ Las bases nitrogenadas adenina, timina, citosina y guanina son los componentes esenciales del ácido desoxiribonucleico (ADN). Hay una quinta base, el uracilo, que está presente en el ácido ribonucleico (ARN).

²⁹⁰ ARN, iniciales de **Ácido Ribo-Nucleico**. Son macromoléculas resultantes de la unión de muchos *nucleótidos*, cada uno de ellos formado por *ribosa*, un ión *fosfato* y una de las cuatro *bases nitrogenadas*: *adenina*, *citosina*, *guanina* y *uracilo*.

²⁹¹ Son células *procariotas* aquellas que no tienen su ADN alojado en un núcleo. Se consideran las formas de vida más primitivas.

ARN no solo pudieron ser el origen de los organismos celulares, sino también de los virus que por su parte no desarrollaron una estructura celular.

Al comenzar el *eón Arqueano (o Arcaico)*, hace unos 3.800 millones de años, los océanos eran una descomunal disolución de nutrientes en la que las moléculas autoreplicantes encontraban toda clase de moléculas prebióticas con las que construían copias de sí mismas. Las duras condiciones del exterior de los mares hacían imposible la existencia de vida fuera del agua ya que la fuerte radiación destruía la compleja estructura de las moléculas autoreproductoras. Así pues, parece seguro que la vida prosperó en las aguas; allí, las moléculas autoreproductoras proliferaban nutriéndose de moléculas prebióticas. Aquello era un paraíso en el que el “maná” se encontraba por doquier y todo apuntaba a reproducirse más y más.

Las moléculas autoreproductoras²⁹² de ARN eran capaces de catalizar su propia replicación y también construir proteínas, uniendo aminoácidos presentes en el medio acuoso según una determinada secuencia. Una serie de experimentos realizados en 1997 sugiere que la formación de proteínas a partir de materiales inorgánicos como el monóxido de carbono y sulfuro de hidrógeno puede lograrse mediante el uso de sulfuro de hierro y sulfuro de níquel como catalizadores. La mayoría de los pasos requieren temperaturas de 100°C y presiones moderadas, aunque requiere una etapa de 250°C y una presión equivalente a la que se encuentra en el interior de la litosfera, al menos a 7.000 m de profundidad. Por lo tanto, se sugirió que la síntesis de proteínas auto-sostenible pudo haber ocurrido cerca de las fuentes hidrotermales.

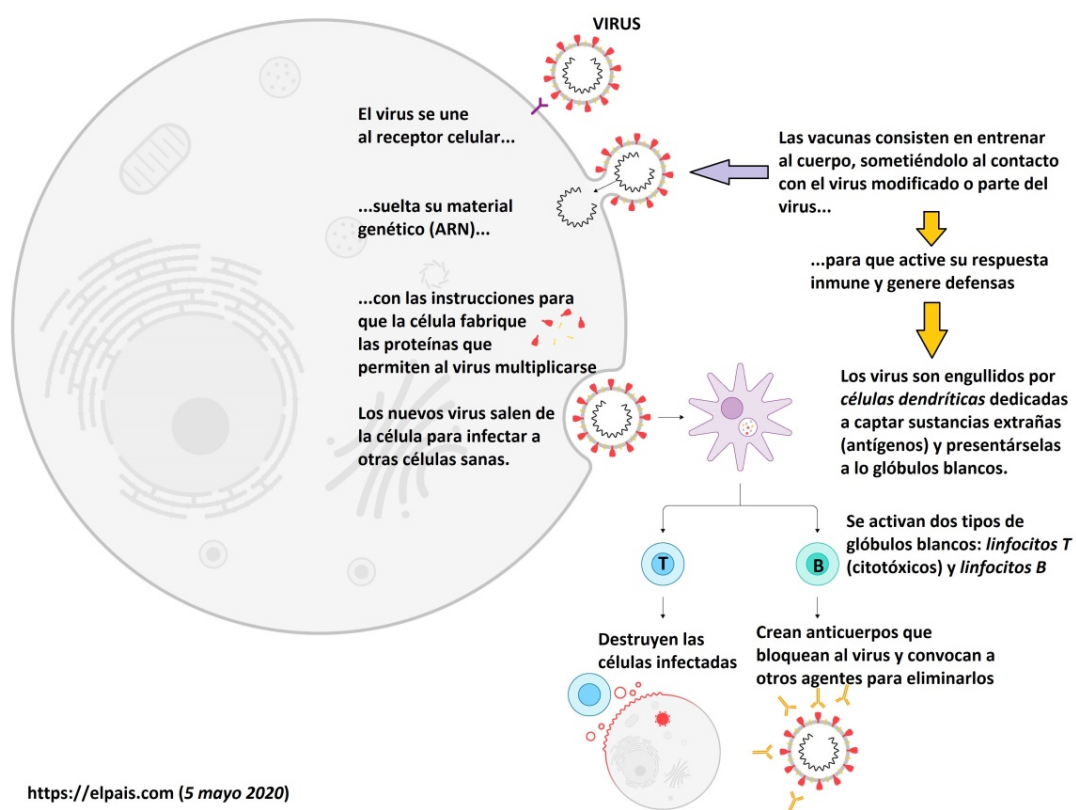


Figura 147 Esquema del ataque del COVID-19 a una célula humana y de la vacunación.

²⁹² Los virus actuales responden a estos planteamientos.

La cosa siguió así por millones de años en los que el número de moléculas de ARN aumentaba sin cesar a costa de disminuir la concentración de los nutrientes y llegó un momento en el que estos empezaron a escasear. Por proceso evolutivo, muchas de las moléculas de ARN se encontraban ya entonces rodeadas por una cubierta proteica que las protegía de las radiaciones y otros agentes adversos, mejorando así su longevidad y eficacia. Es probable que este momento de la "Historia de la vida en la Tierra" coincida con la aparición de los primeros *virus*²⁹³, las formas de vida más primitiva. Actualmente se sabe que los *virus* parasitan a las células; al infectar una célula, estos genes "obligan" a la célula anfitriona a sintetizar los nucleótidos y otras biomoléculas específicas del intruso, para poder llegar a formar nuevos virus (figura 147).

IV.9.3 LAS MOLÉCULAS DE LA VIDA: ARN Y ADN

Las moléculas de ARN son muy eficaces y versátiles para almacenar la codificación que permite la autoreplicación y la construcción de determinadas proteínas, pero en aquellas pretéritas condiciones, las moléculas de ARN estaban muy expuestas a todo tipo de agresiones, lo que motivaba un frenesí de mutaciones y cambios que impedía la aparición de individuos de iguales características. En algún momento aparecieron estructuras vivas en las que el ARN había sido sustituido por otra molécula muy parecida, eso sí, más estable, y desde luego, más apta para conservar indemne la codificación. Estamos hablando del ADN²⁹⁴.

La evolución, siempre tendente a favorecer a los organismos más eficientes y adaptables, determinó que llegara un momento en el que ciertas células *procariotas* tenían en su protoplasma moléculas de ADN, cuya finalidad era conservar la codificación de su estructura y sus funciones y moléculas de ARN cuyo fin era "copiar" la información codificada del ADN y construir las proteínas específicas según la codificación escrita en el ADN.

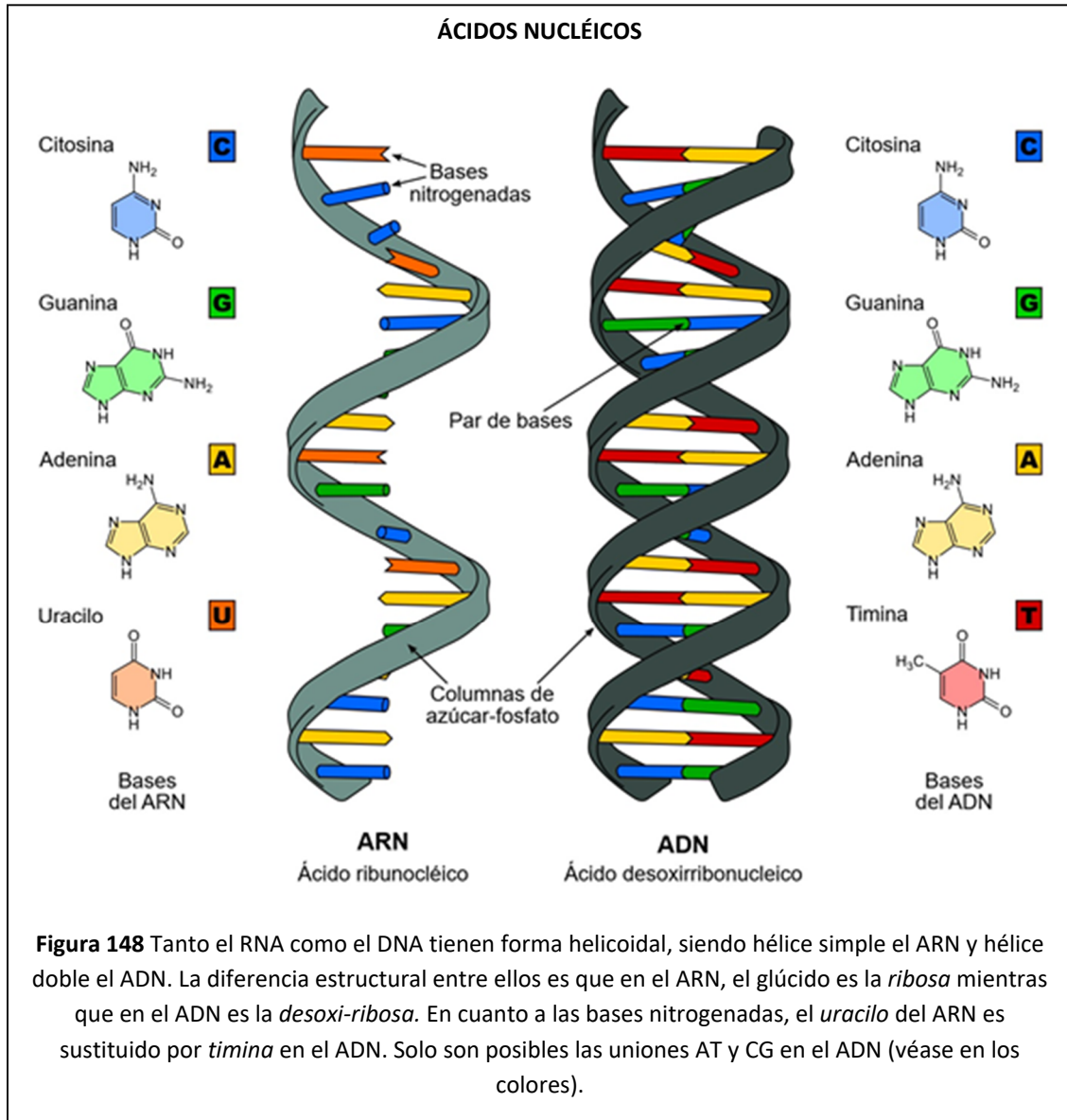
El siguiente paso evolutivo incidió en la protección del ADN, preciado depositario del código morfológico y funcional de aquellos primitivos seres y así, surgieron nuevas estructuras que encerraban el valioso ADN en un núcleo protector. El ARN presente en el protoplasma traspasaba la membrana nuclear entrando en el núcleo para copiar el código que se halla "escrito" en la molécula de ADN, para luego salir de él y fabricar las proteínas específicas de conformidad con el código genético. Piense el lector en la necesidad de este paso evolutivo; las *células eucariotas* son más evolucionadas que las *procariotas*, al tener su ADN encerrado y protegido por la membrana nuclear, están menos sujetas a mutaciones, de forma que al reproducirse pueden originar generaciones de individuos iguales. En cierto modo puede decirse que la aparición del núcleo celular propició la aparición de las especies de seres vivos.

Llegados a este punto, puede que el lector piense que los mecanismos de la vida que estamos describiendo son tan primitivos y simples como los seres que habitaban la Tierra en el eón Arqueano. Nada de eso; la sofisticación de los procesos de crecimiento y reproducción de estos primitivos seres es realmente espectacular, y aún hoy, todas y cada una de nuestras células

²⁹³ El término *virus* se refiere a un agente infeccioso microscópico acelular que solo puede reproducirse dentro de las células de otros organismos. Los virus están constituidos por genes que contienen ácidos nucleicos que forman moléculas largas de ADN o ARN, rodeadas de proteínas.

²⁹⁴ ADN, iniciales de **Ácido Desoxi-ribo-Nucléico**. Son macromoléculas resultantes de la unión de muchos nucleótidos, cada uno de ellos formado por desoxi-ribosa, un ión fosfato y una de las cuatro bases nitrogenadas: adenina, citosina, guanina y timina.

funcionan de igual manera. A continuación se hace una somera descripción de la estructura y funcionalidades de las moléculas de RNA y DNA encerrada en cuadros de texto. Aquellos lectores que prefieran pasar por alto la comprensión de los mecanismos íntimos de la vida, pueden ignorarlos.



La estructura helicoidal de los ácidos nucleicos se debe a la concatenación de moléculas del glúcido (ribosa o desoxirribosa) e iones fosfato. Las bases nitrogenadas A, T o U, C y G se unen a la cadena a intervalos regulares con una estricta ordenación que responde exactamente a las características del gen correspondiente. Las uniones AT y CG en el ADN son de análoga naturaleza a las que se dan entre moléculas de agua (Ver el capítulo III.10.2).

La estructura de los seres vivos está hecha fundamentalmente de proteínas de forma que, durante su vida, sus células están permanentemente recomponiéndose. Las proteínas son macromoléculas muy complicadas, formadas por agregación de aminoácidos y la naturaleza es compleja y variada en extremo, hasta el punto de que no solo las proteínas de las distintas especies de seres son diferentes sino que las de los individuos de una misma especie también lo son. Esta fantástica

multiplicidad es posible debido a la variedad de aminoácidos disponibles y el astronómico número de ordenaciones diferentes que son posibles.

Los mecanismos bioquímicos, resumidos en la figura 149, permiten que cada célula de un ser vivo pueda sintetizar sus propias proteínas, distintas a las de cualquier otro individuo de su misma especie, con casi absoluta precisión. Para ello, el ARN copia el código almacenado en el ADN para después dirigir la secuencia de aminoácidos que se irán uniendo para conformar la proteína específica de ese individuo.

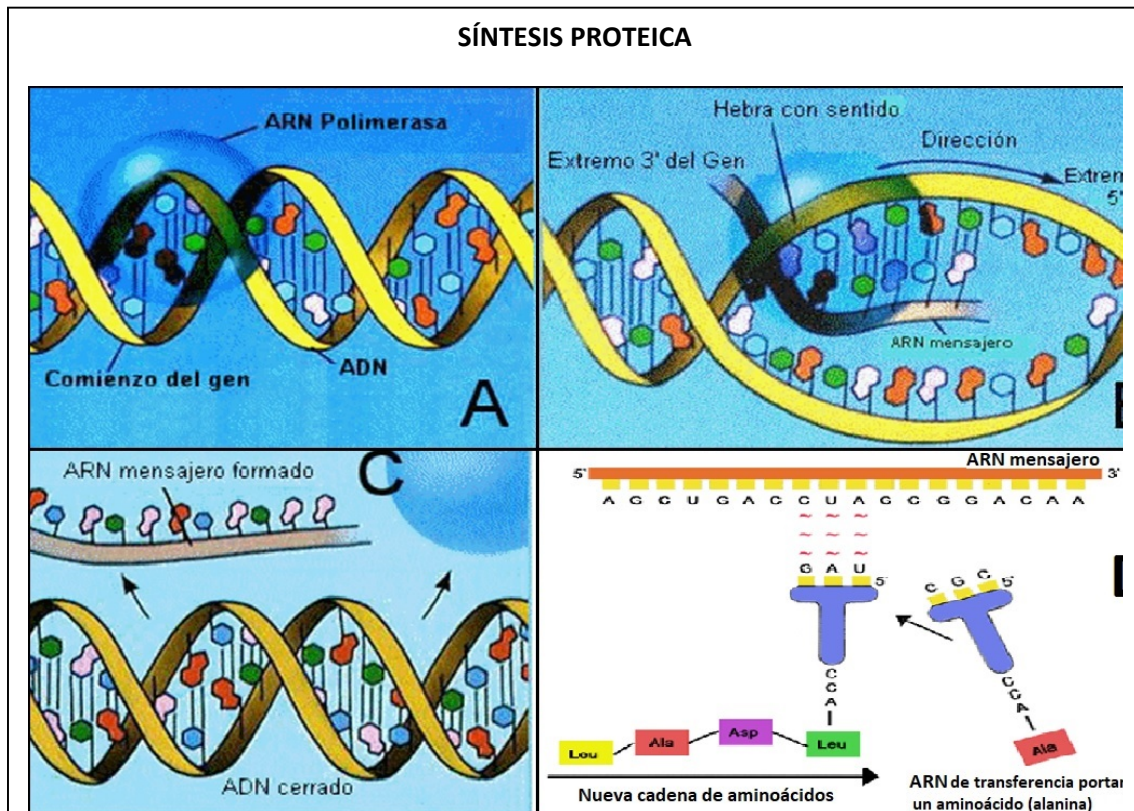
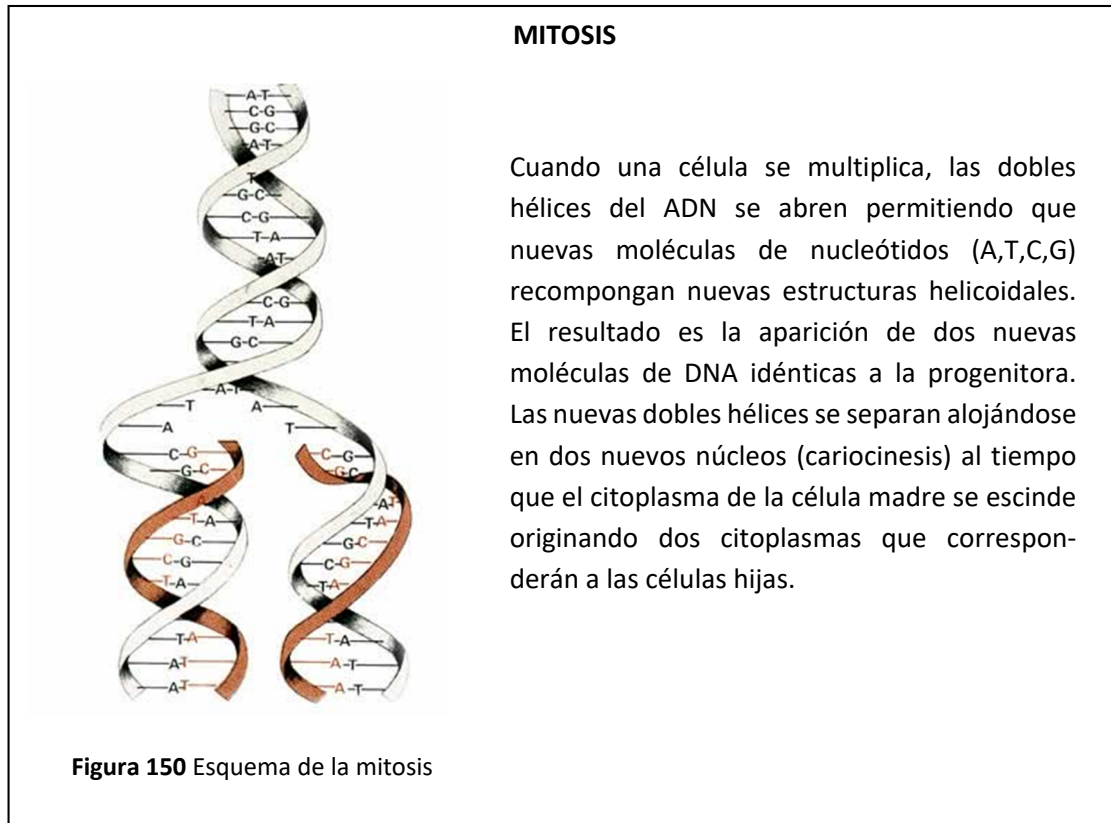


Figura 149 Esquema de la síntesis de proteínas

La doble hélice del ADN contiene el código genético codificado en forma de secuencia de *genes* (A). Un *ARN polimerasa* provoca la separación de las helicoides, permitiendo que el *ARN mensajero* se meta entre ellas y “copia” la información (B). Ese *ARN mensajero* sale del núcleo celular transportando la información (C). El *ARN mensajero* entra en un orgánulo de la célula llamado *ribosoma*, donde se sintetiza la proteína específica, ordenando los aminoácidos conforme al código genético imprimido en el *ARN mensajero* (D). Para ello se requiere la intervención de un *ARN de transferencia* que selecciona los aminoácidos según la combinación de bases nitrogenadas que posea.



Cuando una célula se multiplica, las dobles hélices del ADN se abren permitiendo que nuevas moléculas de nucleótidos (A,T,C,G) recompongan nuevas estructuras helicoidales. El resultado es la aparición de dos nuevas moléculas de DNA idénticas a la progenitora. Las nuevas dobles hélices se separan alojándose en dos nuevos núcleos (cariocinesis) al tiempo que el citoplasma de la célula madre se escinde originando dos citoplasmas que corresponderán a las células hijas.

IV.9.4 LA BIBLIOTECA DE LA VIDA

En los puntos precedentes estamos viendo que el código genético es el *sancta sanctorum* de los seres vivos. En ese código están especificados con minuciosidad todos y cada uno de sus caracteres: el orden al que pertenece, la especie, su morfología, dimensiones, su conducta e incluso cómo será su desarrollo. Podría decirse que en la naturaleza, todos y cada uno de los seres vienen “de fábrica” con un complejo y detallado libro de instrucciones impreso en su ADN, instrucciones que se cumplirán fielmente durante toda la existencia del ser y que determinarán toda su vida. Hemos de admitir que, en el ámbito de la genética, la naturaleza es conductista en extremo y las instrucciones escritas en el ADN son copiadas fielmente por el ARN y ejecutadas con precisión casi absoluta... ¿casi? Así es, amable lector.

De vez en cuando, los sutiles mecanismos descritos en las figuras 149 y 150 cometen errores, unas veces fortuitos y otras veces forzados, que se traducen en pequeños cambios o *mutaciones*. Estas mutaciones son el medio del que se vale la naturaleza para que la vida se diversifique y evolucione. Nos ocuparemos más adelante de este asunto.

El núcleo de todas y cada una de las células de los seres vivos, ya sean protozoos o metazoos, contiene una compleja y extensa información, codificada en forma de secuencia de bases nitrogenadas, en su ADN. Vimos en el punto IV.9.3 (figura 148) que las asociaciones de *ribosa* o la *desoxirribosa* (según se trate del ARN o el ADN) con una de las cinco bases nitrogenadas: adenina, uracilo o timina (según se trate de ARN o ADN), citosina y guanina, constituyen la estructura fundamental de un ácido nucleico, a la cual se le llama *nucleósido*. Los nucleósidos se unen unos a otros mediante iones fosfato, de forma que a cada triada “base nitrogenada-azúcar-fosfato” se le

llama *nucleótido*, siendo esta la unidad estructural que, al repetirse cientos y cientos de veces, proporciona la estructura del ARN o ADN.

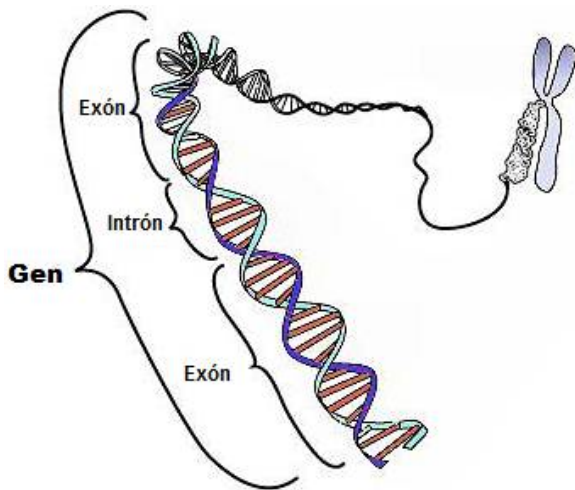


Figura 151 Esquema de un *gen* y sus partes.

La información relativa a cada una de las características de un ser vivo se encuentra en una determinada zona de las largas cadenas helicoidales del ADN. Estas agrupaciones de nucleótidos que determinan una característica concreta se llaman *genes*, de forma que, por ejemplo, hay un gen que determina la simetría corporal, otro definitorio del tamaño y así, una infinidad de genes que determinan cómo será y cómo se comportará el individuo. Al conjunto de los genes de los individuos de una determinada especie, se le llama *genoma*.

En los genes hay dos zonas diferenciadas, unas, los *exones*, toman parte activa en la síntesis de proteínas en la forma en que se describió en la figura 151 en tanto que otras partes, los *intrones*, tienen un papel pasivo.

Los genes se agrupan en unidades superiores llamadas *cromosomas*, estructuras altamente organizadas formadas por ADN y proteínas. En ellos el ADN se encuentra altamente compactado. Cuando una célula está en fase de división (mitosis), se observa con ayuda de microscopio que cada uno de los cromosomas presenta una forma y tamaño característicos. Además se observa otro hecho fundamental: la práctica totalidad de las células tiene el juego de cromosomas duplicado. En la especie humana, cada célula posee 23 pares de cromosomas, 22 de ellos contienen toda la información relativa al individuo, desde la más básica hasta caracteres tan secundarios y sutiles como el color de los ojos, el tipo de pelo, etc. El par número 23 es el relativo al sexo; en las mujeres consta de dos cromosomas idénticos X y en los varones consta de un cromosoma X y un cromosoma Y

El genoma del ser humano agrupa a unos 25.000 genes, número igual al del chimpancé, con el que compartimos el 98% del genoma. Insectos como las moscas, tienen un genoma de unos 12.000 genes y compartimos con ellas un 60%. Los genomas de los hongos, mucho más simples, tienen unos 6.000 genes, los de las bacterias oscilan entre 600 y 6.000 genes y los virus tienen entre 10 y 300 genes.

El hecho de que todos los individuos humanos compartan el 99,8% de su genoma es la prueba de que las razas y etnias humanas tienen un origen cultural y no genético y que, realmente, el género humano está formado por una sola especie. Por otro lado, el hecho de compartir un 98% de nuestro genoma con los chimpancés, un 70% con los ratones, un 60% con las moscas y un 23% con las lombrices es una de las pruebas de que todos los seres vivos que poblamos el planeta procedemos de un ancestro común.

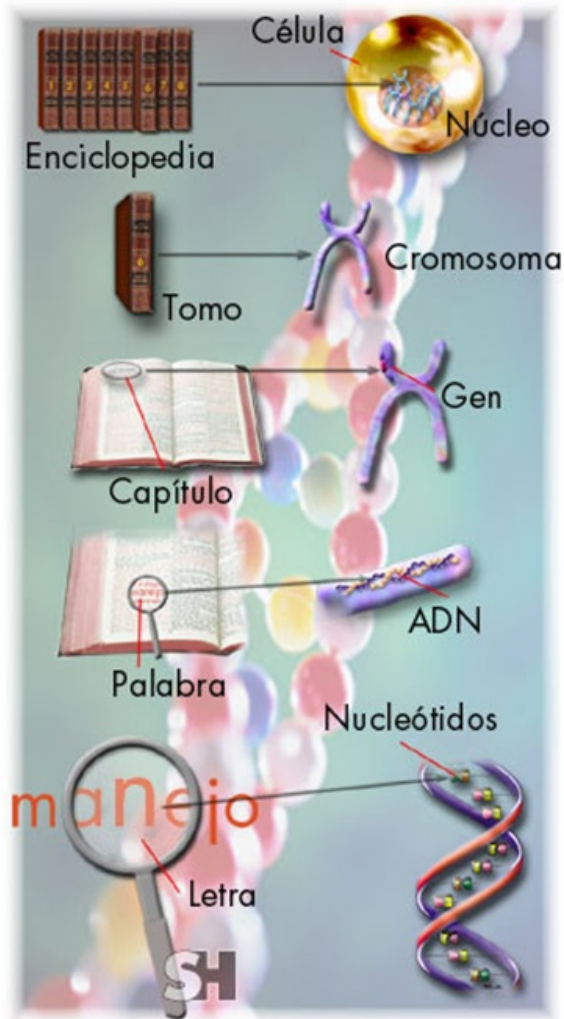


Figura 152 Cada célula de un ser vivo contiene en su núcleo una compleja y extensa información codificada acerca de cómo es y cómo ha de comportarse en el contexto en el que la toca vivir.

Llegados a este punto, el lector se habrá hecho ya una idea de la extraordinaria complejidad y sofisticación con que la naturaleza ha diseñado la vida. Hemos de pensar en la complicada trama de acontecimientos bioquímicos que tienen lugar en cada momento de la vida de una célula, desde la síntesis continua de proteínas pasando por los procesos metabólicos de su actividad normal y terminando por el complicado proceso de su reproducción. Ahora, pensemos que nuestro cuerpo está formado por billones de células de formas y características muy distintas, que continuamente se están reproduciendo; unas mueren y otras nacen y, pasado un año de nuestra existencia, ni una sola de las células que nos conformaban el día 1 de enero (a excepción de las nerviosas y alguna otra), está presente el 31 de diciembre. Esta fascinante realidad contribuye a que seamos conscientes de que, cada día que amanece, debería parecernos un milagro.

Pues bien, una vez descrito someramente cómo es el soporte de la información codificada sobre todos y cada uno de los seres vivos, ya sea un humilde virus o una descomunal ballena azul, podríamos comparar todo lo visto con una enciclopedia, según muestra la figura 153, que sería el *núcleo* de cada célula. En esa enciclopedia, cada tomo sería un *cromosoma*

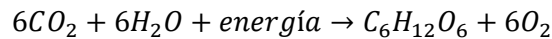
en el que cada capítulo correspondería con un *gen* en el que cada molécula de *ácido nucléico* sería una palabra cuyas letras se corresponderían con los *nucleótidos*. He aquí pues, el “libro de instrucciones” que acompaña a todos y cada uno de los seres vivos que en la Tierra somos.

IV.10 “LLENAD LA TIERRA Y ENSEÑOREAROS DE ELLA” (Génesis, 1, 28)

En el punto IV.8.2 vimos que, tras la aparición de la vida, durante todo el *período Arqueano* o *Arcaico* las moléculas autorreproductoras encontraban en el medio toda clase de moléculas prebióticas con las que construir sus réplicas pero, al tiempo que estos primitivos seres proliferaban, la “sopa de nutrientes” se iba desconcentrando. Ante la escasez de nutrientes sucedieron dos cosas, por un lado apareció el fenómeno de la depredación, esto es, la obtención de moléculas prebióticas (nutrientes) que forman parte de otras estructuras autoreplicantes y por otro, sucedió que por vía evolutiva aparecieron algunas estructuras que eran capaces de construir sus propios nutrientes a partir de las moléculas simples que aún existían en aquel medio

primigenio. El “invento” evolutivo que permitía a ciertos seres fabricar su propio alimento tuvo lugar en el *Período Arqueano*, hace unos 3.500 millones de años.

Los nuevos seres disponían de unos orgánulos, los *cloroplastos*, en los que por mediación de un pigmento verde, la *clorofila*, eran capaces de convertir la energía electromagnética de la luz en energía química y almacenarla en unas moléculas específicamente diseñadas para ello: NADPH y ATP²⁹⁵. Con esa energía y el concurso de la clorofila, estos nuevos seres eran capaces de convertir el dióxido de carbono en moléculas orgánicas carbonadas, fundamentalmente, *glucosa*.



Como subproducto de su actividad, los seres fotosintéticos generaban oxígeno. Así, durante un larguísimo período de unos 1.200 millones de años, los seres *autótrofos* proliferaron en el agua, primero como *cianobacterias*²⁹⁶ y *bacterias rojas* hace unos 1.200 millones de años, después como algas unicelulares y más adelante como algas pluricelulares.

El advenimiento de los seres fotosintéticos supuso la primera gran crisis del planeta ya que la vida, que desde su inicio se había desarrollado y adaptado al medio anaerobio²⁹⁷, se vio amenazada por la presencia de un fuerte oxidante, el oxígeno, letal para los seres que por entonces poblaban la Tierra. Así pues, mientras los seres fotosintéticos proliferaban más y más, los protozoos anaerobios tuvieron que adaptarse a las nuevas y drásticas condiciones, confinándose en aquellos lugares o ambientes en los que pudieran verse libres de la amenaza del oxígeno.

A partir de entonces, y hasta ahora, los seres vivos quedaron divididos en dos grandes grupos: los seres *autótrofos*, capaces de fabricar sus propias moléculas orgánicas por medio de la fotosíntesis y los seres *heterótrofos*, obligados a conseguir sus moléculas orgánicas mediante la depredación sobre otros seres. Este hecho puede ser considerado como el mayor y más importante salto evolutivo experimentado por la vida en nuestro planeta, tanto por su extensión como por sus repercusiones.

Toda la historia de la vida puede contemplarse bajo el prisma de la *evolución biológica*, entendiéndose por tal los cambios en los caracteres genéticos de poblaciones biológicas a través de generaciones. La *evolución* es el mecanismo del que se sirve el cosmos para cambiar y progresar; en el caso de los seres vivos, tal progreso se fundamenta en el juego de la vida y la muerte, un juego sencillo e implacable en el que los seres han de sobrevivir para generar otros seres iguales a ellos. La consigna de la supervivencia es concisa y clara: “Comer y no ser comido”. En los seres autótrofos la consigna se concreta en potenciar al máximo su capacidad de generar moléculas orgánicas y evitar ser depredados por los heterótrofos, mientras que en estos últimos la consigna se traduce en depredar más y mejor y evitar ser depredado.

La supervivencia de los seres vivos está auxiliada por un valor biológico que llamaremos *adaptabilidad*, esto es, la adecuación de la estructura y comportamiento del ser vivo a las circunstancias del medio en el que vive y puesto que esas circunstancias son cambiantes, está claro

²⁹⁵ Nicotín adenín dinucleótido fosfato y Adenosín trifosfato, respectivamente.

²⁹⁶ Células procariotas fotosintéticas de color verde-azulado (de ahí su nombre).

²⁹⁷ Sinónimo de “ausencia de oxígeno”.

que la morfología y el comportamiento del ser vivo tienen que cambiar, y eso se consigue a través de las *mutaciones*.

En el punto IV.8.4 vimos que “las instrucciones escritas en el ADN son copiadas fielmente por el ARN y ejecutadas con precisión casi absoluta”, y en el adverbio “casi” está la clave de la *evolución*. Por regla general, la morfología y funcionalidades de los seres vivos están adaptadas a las características del medio en el que viven. Esta adaptación está siempre encaminada a lograr el mayor éxito en la dura competencia por la vida. Así, basta comparar un cactus con una orquídea para comprender que el primero está perfectamente diseñado para sobrevivir en un medio desértico y la segunda en un medio selvático; permutar a estos seres en sus ambientes sería condenarlos a una muerte segura. De igual manera, salta a la vista que la morfología de un guepardo está selectivamente dirigida a la caza basada en la carrera de velocidad mientras que la de un oso hormiguero es la adaptación perfecta para nutrirse de hormigas.



Figura 153 Variedades clara y oscura de la mariposa del abedul, evidenciando las ventajas de una y otra pigmentación según el medio.

Ahora bien, las características del medio son cambiantes, en ocasiones los cambios son muy lentos, prolongándose durante eras geológicas, otras veces, esos cambios son de menor duración, como es el caso de las glaciaciones o períodos de sequía o de humedad, que pueden prolongarse durante decenas de miles de años. Estos cambios son testigos de la aparición de nuevas especies y de la extinción de otras. Aún más, tenemos evidencias fehacientes de que a lo largo de la historia de nuestro planeta ha habido grandes eclosiones de vida y también extinciones masivas. Incluso, pequeños cambios en un ámbito local, pueden ocasionar efectos evolutivos palpables. De esto último tenemos un bonito ejemplo en un insecto, la *biston betularia* o “mariposa del abedul”.

Se trata de un insecto frecuente en los grandes abedulares del norte de Europa. En su fase de mariposa pasa largos ratos sobre la corteza de los abedules, su hábitat natural. Su pigmentación clara y moteada le proporciona un buen camuflaje que le protege del ataque de los pájaros insectívoros, sus depredadores naturales. Desde mediados del S. XIX se apreciaba en las colecciones de insectos de los aficionados al naturalismo²⁹⁸ la presencia de ejemplares de mariposa del abedul cuya pigmentación era más oscura. Los entomólogos pronto se dieron cuenta de que las mariposas capturadas en las inmediaciones de las ciudades inglesas presentaban un porcentaje de ejemplares oscuros que iba en aumento hasta que en 1895, el porcentaje de ejemplares oscuros se había elevado hasta el 98% mientras que en los bosques de abedul del resto del norte de Europa, esos insectos seguían teniendo la pigmentación clara original. ¿Qué había pasado?

²⁹⁸ Una afición muy inglesa en la época victoriana que siempre ha estado vinculada a los ambientes sociales selectos y cultos.

La explicación hubo que encontrarla en el rápido cambio que habían experimentado las masas de abedules circundantes a las ciudades inglesas. La revolución industrial había cambiado el hábitat de las polillas: el hollín del carbón se impuso en todas partes y los troncos empezaron a tener un color más oscuro. De hecho todo era más oscuro debido al “smog”, una palabra inglesa que viene a significar una mezcla entre humo y niebla. En ese momento las polillas gris claro no tuvieron muchas posibilidades de sobrevivir, eran formas claras sobre troncos oscuros y fueron una presa fácil para las aves. En algún momento, alguno de los huevos del insecto contenía una pequeña mutación que dotaba al nuevo individuo de una pigmentación más oscura. Esto le permitía camuflarse mejor que sus hermanos claros sobre los troncos de los abedules, repletos de hollín. Ese individuo sobrevivió, se reprodujo y sus descendientes oscuros prevalecieron sobre los claros en los entornos de las ciudades.

La vida evoluciona y se diversifica por medio del “ensayo-acierto/error”. Cada individuo de una especie es un “experimento” que hace la naturaleza, de forma que ese ser nace portando un patrimonio genético que determinará su morfología y funcionalidades durante toda su vida. Si ese ser se reprodujera clónicamente y con absoluta precisión, todos sus descendientes serían idénticos. Puesto que las condiciones del hábitat son cambiantes, llegaría un momento en el que los seres no estarían adaptados al medio, no sobrevivirían y las especies se extinguirían. Dicho de otro modo, las *mutaciones* son necesarias para la vida. La *mutación* se define como el *cambio al azar en la secuencia de nucleótidos o en la organización del ADN de un ser vivo, que produce una variación en las características de este y que no necesariamente se transmite a la descendencia*. Se presenta de manera espontánea y súbita o por la acción de ciertos agentes llamados *mutágenos*; la unidad genética capaz de mutar es el *gen*, la unidad de información hereditaria que forma parte del ADN.

Durante la mayor parte de la existencia de vida en nuestro planeta, la evolución fue posible gracias a las mutaciones que se daban en los procesos de reproducción de los primitivos seres, pero llegó un momento, hace unos 550 millones de años, en el que surgió una nueva y poderosa herramienta: el *sexo*. En aquella dura y competitiva carrera por la supervivencia, la procreación con intervención de dos individuos ofrecía mejores posibilidades de adaptación que la simple reproducción asexual, por escisión, de un solo individuo. Pensemos que si cada ser de una especie es un experimento que se confía a una posible mutación, a sabiendas de que ese experimento puede salir bien o mal, es preferible que sean dos los individuos que participan en la reproducción. De esta manera, las variantes del experimento se duplican y las posibilidades aumentan.

La *reproducción asexual* tiene la doble ventaja de su simplicidad y de que todos y cada uno de los individuos son capaces de procrear por sí mismos, con lo que el crecimiento de la población es muy acelerado (ese es el caso del crecimiento de las poblaciones de virus y bacterias), pero tiene la desventaja de que las posibilidades evolutivas se cifran únicamente en las mutaciones.

IV.10.1 EL SEXO

La *reproducción sexual* tiene la evidente ventaja de que el nuevo ser es depositario de un doble patrimonio genético heredado de la madre y del padre, con lo que las posibilidades adaptativas aumentan. Hay ocasiones en las que los caracteres paternos y maternos se suman en favor del éxito biológico, en cuyo caso el nuevo individuo sobrevivirá más y mejor y transmitirá sus características a sus descendientes. Por el contrario, puede que los dos patrimonios genéticos

heredados actúen negativamente, lo que se traducirá en una drástica eliminación del individuo, que no podrá transmitir sus caracteres a descendiente alguno. Por otro lado, la reproducción sexual tiene unos “costes”, el primero es que sólo uno de los dos sexos, la hembra, es capaz de engendrar prole. Otro es que para reproducirse, los dos sexos han de buscarse entre ellos y aparearse, y la selección sexual suele favorecer caracteres que reducen la aptitud de los individuos²⁹⁹, cosa que no sucede en la reproducción asexual.

En el punto IV.8.4 vimos que cada célula de un ser vivo tiene el juego de cromosomas duplicado, dicho juego consta en la especie humana de 23 pares y ante ello surge un enigma: si en la procreación sexual intervienen dos individuos cuyas células son *diploides* (dotadas con juego de cromosomas duplicado) y la transmisión de los caracteres se hiciera de padres a hijos por simple adición, los hijos deberían tener células tetraploides, los nietos las deberían tener octaploides, ... Pero lo cierto es que el doble juego de cromosomas se mantiene generación tras generación. La pregunta a plantear es: ¿Cómo es posible mantener el doble juego de cromosomas pese a que la procreación sexual tiene lugar por adición de los patrimonios genéticos paterno y materno?

La respuesta está en una realidad: los seres que se reproducen sexualmente tienen unos *órganos sexuales* que producen unas células *aploides* (con un único juego de cromosomas) llamadas *gametos*, en el caso de las hembras se denominan *óvulos* y en los machos se llaman *polen* si se trata de vegetales o *espermatozoides* en el caso de los animales. La forma en que se originan los gametos (*gametogénesis*) en los órganos sexuales es una forma de división celular especial denominada *meiosis*.

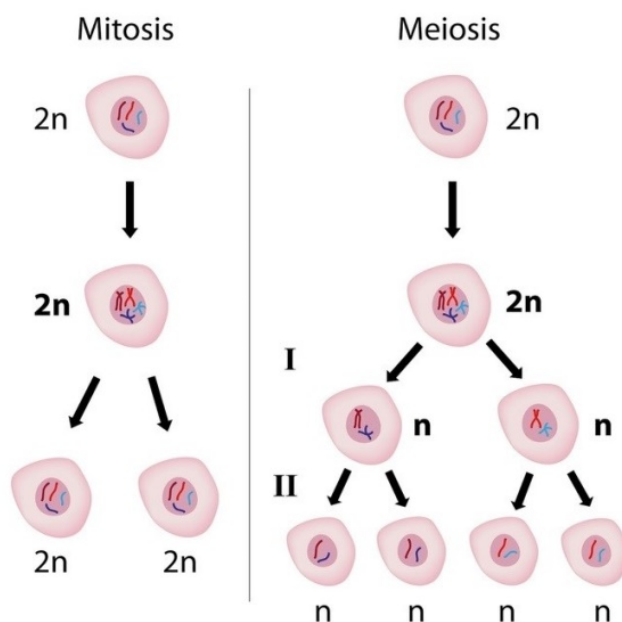


Figura 154 Esquema comparativo de la mitosis y la meiosis.

La figura 154 compara la reproducción habitual de las células por el procedimiento de la *mitosis* y la de las células sexuales (gametos) por medio de la *meiosis*. En el primer caso la célula diploide que se reproduce origina dos hijas diploides idénticas a ella. Cuando se trata de una meiosis, la célula diploide recombina sus cromosomas homólogos y luego origina dos hijas que se llevan un juego de cromosomas cada una siendo, por tanto, aploides. Estas de nuevo se escinden originando cuatro células aploides, cada una con la mitad del material genético (eso significa que el patrimonio genético del progenitor está distribuido aleatoriamente en sus gametos, aunque ninguno de ellos lo tiene completo).

²⁹⁹ Ejemplos claros los encontramos en las cornamentas de los ciervos o los vivos colores de los machos de muchas especies de aves. Ambos caracteres suponen una dificultad a la supervivencia en los períodos de celo.

Al procrear sexualmente, los gametos macho y hembra se unen al azar para formar un nuevo ser. Cada uno de ellos es portador de parte del patrimonio genético del padre y parte de la madre. La unión de ambos originará un nuevo ser de células diploides cuyos caracteres genéticos serán la adición de la aportación materna y paterna. De esta forma, la reproducción sexual se revela como una estrategia muy poderosa en orden a generar individuos de caracteres diversos, heredados de los progenitores, que potenciarán sobremanera las posibilidades evolutivas.

La herencia genética por vía sexual se rige por tres leyes simples que fueron descubiertas en 1865 por el monje agustino Gregor Mendel (1822-1884), coincidiendo con los años en los que Wallace y Darwin alumbraban la *Teoría Evolucionista*. Para comprender el alcance y significado de las leyes de Mendel es preciso tener claro previamente los conceptos de *genotipo*, *alelo* y *fenotipo*.

Por *genotipo* se entiende *el conjunto de la secuencia de nucleótidos contenida en el ADN de un ser vivo*, es decir, se refiere al patrimonio genético completo. Un determinado *gen* tiene con frecuencia dos alternativas llamadas *alelos* que se diferencian en pequeñas variaciones en la ordenación de algunos nucleótidos. Así, por ejemplo, el gen del pelo en la especie humana tiene dos alelos: rizado y liso. Otro ejemplo de nuestra especie es el color de los ojos: oscuros o claros. Con frecuencia, uno de los dos alelos es *dominante* y el otro *recesivo* (por ejemplo, en la especie humana, el alelo “ojos claros” es recesivo frente al “ojos oscuros”, de la misma forma que el alelo del grupo sanguíneo Rh+ es dominante frente al Rh-).

Por *fenotipo* se entiende todo aquel conjunto de genes de un individuo que se manifiesta externamente y es observable. La diferencia entre *genotipo* y *fenotipo* es que el genotipo se puede distinguir observando el ADN, y el fenotipo puede conocerse por medio de la observación de la apariencia externa de un organismo. Puede decirse por tanto que el fenotipo es una parte, la visible u observable, del genotipo.

Las tres *Leyes de Mendel* rigen la forma en que los *alelos* de un determinado *gen* se distribuyen en las dos generaciones que siguen a una pareja macho-hembra:

- Principio de la uniformidad de los híbridos de la primera generación filial: *Al cruzar dos razas puras la descendencia será híbrida, manifestándose el carácter dominante*. Los descendientes de la primera generación serán todos iguales entre sí, fenotípica y genotípicamente, e iguales fenotípicamente a uno de los progenitores (el de fenotipo dominante).
- Principios de la segregación: *Al cruzar dos razas híbridas, la descendencia será genéticamente pura e híbrida al 50%*. Los alelos de un determinado gen son segregados durante la formación de los *gametos*³⁰⁰ en la segunda división meiótica. Esto significa que cada gameto va a contener un solo alelo para cada gen, lo cual permite que los alelos materno y paterno se combinen en la descendencia, asegurando la variación.
- Principio de la transmisión independiente o de la independencia de los caracteres: *Al cruzar varios caracteres, cada uno de ellos se transmite de forma independiente*. Los alelos se distribuyen independientemente unos de otros, lo que contribuye poderosamente a la diversificación.

³⁰⁰ Células sexuales (óvulos y espermatozoides o polen).

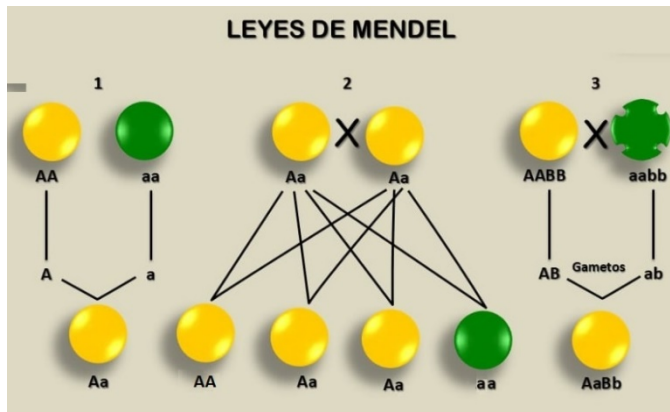


Figura 155 Esquema de las tres leyes de Mendel para dos genes. **A** y **a** son los alelos dominante y recesivo del primer gen y **B** y **b** son los correspondientes alelos, dominante y recesivo, del segundo.

En la figura 155 se esquematizan las tres leyes. En el primer caso los dos progenitores (amarillo y verde) son razas puras, el primero es portador *homocigótico* (AA) del alelo dominante **A** y el otro progenitor es portador *homocigótico* (aa) del alelo recesivo **a**. Al cruzarse ambos, la descendencia es *heterocigótica* (híbrida Aa) por igual entre todos los descendientes. Al ser portadores de los dos alelos (genotipo) se manifiesta solamente el dominante, razón por la cual todos los individuos son amarillos.

En una segunda generación, al cruzarse los híbridos (heterocigóticos), los genes se mezclan al azar, de forma que la descendencia es pura (homocigótica AA o aa) e híbrida (heterocigótica Aa) al 50%. Puesto que A es el alelo dominante, el 75% de los individuos serán amarillos y solo un 25% serán verdes.

Pongamos un ejemplo: Marina, natural de Gandía, tiene ojos oscuros y desde muchas generaciones atrás, todos sus ancestros tuvieron ojos oscuros por lo que es bastante seguro que Marina es homocigótica de ojos oscuros (AA). Björn es sueco, nacido en Gotemburgo, tiene ojos azules y también sus padres y abuelos los tenían azules, lo que asegura que Björn es homocigótico de ojos azules (aa). Björn y Marina son pareja y tienen tres hijos cuyos ojos son oscuros. Es obvio que los tres hermanos son heterocigóticos (Aa) y, puesto que el alelo dominante es el de ojos oscuros, los tres hermanos tienen los ojos oscuros, eso sí, los tres son portadores del gen de ojos claros. Si pasados los años, uno de estos tres hermanos se emparejara con un cónyuge que también fuera heterocigótico (ojos oscuros y portador del gen de ojos claros), en su prole habría un 25% de niños de ojos claros (aa) y un 75% de niños con ojos oscuros (AA y Aa)

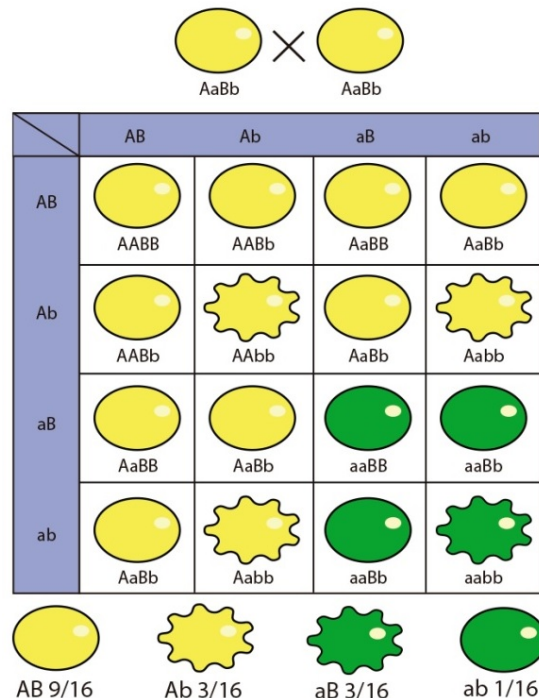


Figura 156 Variaciones para dos genes en segunda generación (experimento de los guisantes).

Cuando los dos progenitores son portadores puros (homocigóticos) de dos caracteres (genes) con sus alelos dominante y recesivo A,a y B,b producen una primera generación de híbridos AaBb (ver la figura 155-3). Al cruzarse estos híbridos para dar una segunda generación, los caracteres se

mezclan independientemente (Figura 156), las posibles variantes genéticas se multiplican potencialmente, pasando de 4 a 16. En dicha figura se representan los experimentos que hizo Mendel con guisantes. Los caracteres representados son: A=amarillo (dominante); a=verde (recesivo); B=liso (dominante); b=rugoso (recesivo).

En resumen, la reproducción de los seres vivos comenzó siendo asexual por ser más sencilla. Aún hoy, los seres unicelulares se reproducen por escisión. En esta forma de reproducción las variaciones genéticas que permiten la evolución de estas especies se relegan a simples mutaciones. A medida de que la vida se ha ido perfeccionando y diversificando, la competencia entre especies se hizo más dura y exigente, y llegó un momento en el que algunos seres vivos llegaron a elaborar estrategias reproductivas que permitieran nuevas y más numerosas variantes genéticas que las puramente derivadas de las mutaciones. Esas estrategias están basadas en la intervención de dos individuos en la procreación, aportando cada uno de ellos su carga genética. De esta manera, la descendencia es más diversa genéticamente. Lejos de ser clones de un solo progenitor, los hermanos de una misma generación son diferentes, de forma que los más adaptados sobreviven y procrean transmitiendo sus genes, en tanto que los menos adaptados mueren y se extinguen.

IV.11 GEA, LA GRAN MAQUINARIA

En su *Teogonía*, Hesíodo (S.S.VIII-VII a.C.) detalla la genealogía de los dioses de la mitología griega al tiempo que relata en sus versos la más antigua cosmogonía relacionada con nuestra cultura. Ciertamente, ha habido otros relatos cosmogónicos en otras culturas pretéritas, pero la



Figura 157 Gea, diosa madre, portando en sus brazos a Urano, dios del cielo y Ponto, dios de las aguas.

grecolatina es la que más nos interesa porque nuestra cultura de hoy procede en buena parte de ella. Hesíodo relata en sus versos cómo *Caos*, la única divinidad existente antes de que nada existiera, engendró a *Gaia*³⁰¹ “la de amplio pecho”, la diosa madre Tierra. Esta, por sus propios medios y “sin mediar el grato comercio”, engendró a *Urano*, dios del cielo y también a *Ponto*, dios de las profundidades. En su relato, Hesíodo prosigue:

*“Acostada con Urano, alumbró a Océano de profundas corrientes, a Ceo, a Crío, a Hiperión, a Jápeto, a Tea, a Rea, a Temis, a Mnemósine, a Febe de áurea corona y a la amable Tetis*³⁰². *Después de ellos nació el más joven, Crono, de mente retorcida, el más terrible de los hijos y se llenó de un intenso odio hacia su padre.”*

El lector ya ha podido comprobar que el Modelo Evolucionista del Universo, que subyace en toda la trama de este libro, está inspirado en los mitos grecolatinos, eso sí, avalado por el conocimiento

³⁰¹ En latín se decía *Gea*, denominación que usamos aquí.

³⁰² Diosa del mar.

científico que hoy poseemos, así pues, en este capítulo se trata de abordar el tema del planeta Tierra desde un punto de vista cercano (que no igual) a la Cosmogonía de Hesíodo, dejando por un momento aparte el origen de nuestro planeta, que ya fue descrito en los capítulos IV.6 y IV.7. Contemplaremos por tanto a Gea, la madre Tierra, como el origen, sustento y fin de cuanto somos y tenemos, en el más extenso sentido de ambos términos.

Como cualquier otro planeta, la Tierra es un sistema físico susceptible de intercambiar materia y energía con el entorno. Vimos en el capítulo IV.6 que, hace unos 4,500 millones de años, siendo un protoplaneta que orbitaba en torno a un jovencísimo Sol, se movía en el *anillo protoplanetario* en medio de un marasmo de gases, polvo, rocas y asteroides, engullendo gravitacionalmente cuantos materiales se encontraban en sus proximidades. Durante este período de *acreción*³⁰³, la masa de la Tierra crecía a costa de desconcentrar la materia que se encontraba en su órbita. Hace unos 4.000 millones de años la Tierra fue sometida a un intenso bombardeo de meteoritos y asteroides procedentes de otras zonas del sistema solar que incrementaron aún más su masa. Fue por entonces cuando un gran asteroide de tamaño algo inferior a Marte conocido como *Tea*, que compartía órbita con la Tierra, llegó a impactar con ella (ver la figura 157 en el punto IV.6.1). Buena parte de su masa se incorporó a la Tierra y otra parte salió despedida, quedando en órbita en torno a ella y originando la Luna. Más adelante, ya en el período geológico *Pérmico*, otro gran asteroide se precipitó, causando una de las mayores extinciones masivas que ha conocido la vida en nuestro planeta. Finalmente, hace unos 65 millones de años, en el período *Cretácico*, se produjo de nuevo un drama biológico cuyo coste fue la desaparición de los grandes dinosaurios.

Todos estos hechos nos invitan a pensar que, en el pasado, la Tierra fue un sistema físico másicamente abierto, por cuanto incorporó masa en grandes cantidades. En cuanto al presente, podemos tener la tentación de asumir que la Tierra es un sistema físico másicamente cerrado, toda vez que el bombardeo de meteoritos y asteroides nos parecen cosas del pasado. Ahora bien, hemos de admitir que, cada vez que en una noche diáfana vemos una estrella fugaz, la masa de la Tierra se incrementa, eso sí, ligeramente, pero no se nos oculta que son muchos miles de ellas en cada año. Y, aún más, ¿qué certeza tenemos de que no llegue un día en el que un gran asteroide se cruce en el camino de nuestro planeta? Ciertamente, el tiempo geológico es inconmensurablemente mayor que el tiempo humano, y no digamos el tiempo cosmológico. Forzoso es aceptar que todo ello puede pasar, pero es casi seguro que ni tú ni yo, amable lector, lo veamos y bastante seguro que la especie humana se habrá extinguido para cuando eso suceda.

En resumidas cuentas, podemos afirmar que la Tierra es un sistema másicamente abierto que incorpora masa del medio exterior por efecto gravitacional.

En cuanto a la energía, resulta mucho más evidente que la Tierra es un sistema abierto que recibe energía electromagnética procedente del Sol y posteriormente la refleja en igual cantidad. Desde el punto de vista energético, la Tierra es un *sistema estacionario* en el que la cantidad global de energía que recibe es igual a la suma de todas las energías que devuelve al espacio. Ahora bien, hasta aquí nos estamos refiriendo a la energía que llega del Sol y que luego es reflejada, pero ¿y la energía interna, la energía acumulada que mantiene caliente y fluido el magma interno, cuyas corrientes convectivas mueven las placas litosféricas? En el capítulo IV.7 vimos que mientras se formaba el sistema solar, los planetas se iban formando por un proceso de *acreción*. Vimos que la

³⁰³ Proceso de crecimiento de un cuerpo por acción de las fuerzas gravitatorias a costa de los materiales que le rodean.

Tierra acrecentó su masa y su energía a costa de aglutinar cuantos materiales había en su anillo protoplanetario, de forma que, cuando la Tierra ya estaba formada, había recibido su “ración” de energía, la cual quedó confinada en su interior bajo la costra pétreo litosférica. Por otro lado, vimos que la energía interna de la Tierra se ve mantenida, e incluso incrementada, por efecto gravitatorio, ya que el peso de las capas superiores motiva un calor de compresión en el manto y el núcleo terrestre. También hemos de considerar los procesos radiactivos y reacciones de transformación mineral, todos ellos exotérmicos, que ayudan a mantener el calor interno. Por tanto, hemos de considerar la Tierra como un sistema energéticamente abierto.

Considerada la Tierra como un sistema másica y energéticamente abierto, podemos contemplarla como un ente vivo que tuvo su origen en el disco protoplanetario que rodeaba al naciente Sol, que ha evolucionado desde hace cuatro mil quinientos millones de años hasta convertirse en lo que hoy es, que su estructura pétreo cambia sin cesar, convirtiendo antiguos fondos marinos en escarpadas cordilleras, creando islas donde solo había océano y cobijando en sus aguas y continentes la intrincada trama de la vida. Toda esta compleja dinámica está sujeta a leyes inexorables que mantienen una espléndida armonía en todo cuanto en ella acontece, desde los sucesos más extensos como los seísmos, las grandes corrientes marinas o la circulación general de los vientos, hasta el más humilde e insignificante, como la bipartición de una bacteria, la evaporación de una gota de rocío o el golpe de un grano de arena arrastrado por el viento contra una roca.

Podríamos imaginar la Tierra, girando año tras año en torno al Sol y rotando sobre sí misma día tras día con absoluta precisión, como una enorme y compleja maquinaria de relojería que con paso regular va desgranado los días y los años mientras en su seno, las ruedas dentadas de sus engranajes, los ciclos naturales, giran coordinadas unas con otras sin posibilidad alguna de independencia. Ante ello, el alma humana ha sentido la necesidad de buscar y reconocer al Relojero que construyó esta maravillosa maquinaria y así, desde la más remota antigüedad, no ha existido cultura que no haya elaborado su mitología de la creación del mundo. Nuestra mitología de ahora es la ciencia, la más objetiva de todas. Hoy, la filosofía evolucionista impregna el pensamiento científico que niega al Dios Creador y busca explicaciones lógicas a la existencia del mundo que nos llevan hasta el *Big-Bang*, y lejos de ser esta una explicación satisfactoria, se suscitan nuevas preguntas: Antes del *Big-Bang* ¿qué pasó? Nuestra mente siente un “horror vacui” al no ser y se resiste a aceptar que hubo un momento en que la nada era el todo.

Volviendo al terreno de lo objetivo, centraremos ahora nuestra atención en los más importantes ciclos naturales que, a modo de ruedas dentadas, determinan la marcha de *Gea, la gran maquinaria*.

IV.11.1 EL CICLO DE LA ENERGÍA

En el universo, solo las estrellas son productoras de energía³⁰⁴, y lo hacen gracias a las reacciones de fusión nuclear que tienen lugar en su seno. Según vimos en el capítulo IV.5, el resto de los cuerpos (nubes de gas y polvo, planetas o asteroides) no poseen esa facultad y tan solo pueden recibir y reflejar la energía de las primeras. A la hora de hacer un balance de la energía en un

³⁰⁴ El término “productoras de energía” debe ser matizado. Realmente, las estrellas convierten masa en energía por medio de las reacciones termonucleares (Ver el capítulo III.6).

planeta como el nuestro, hemos de distinguir previamente entre su *energía interna* y la *energía externa*. La primera puede ser considerada como la “dote energética” que recibió en su nacimiento, que a lo largo de su vida ha ido manteniendo, e incluso acrecentando, por *acreción* y por procesos endógenos de naturaleza gravitacional, nuclear y química. Esta energía está asociada a la dinámica interna de la Tierra, que ya fue tratada en el capítulo IV.8 e ilustrada en las figuras 138, 139, 140 y 141. En conjunto, puede decirse que el ciclo de la energía interna de la Tierra es cerrado, si se exceptúan las pérdidas caloríficas por enfriamiento de los magmas expulsados en las erupciones volcánicas.

En cuanto a la energía externa, la Tierra se comporta como un sistema en régimen estacionario, es decir, la energía total recibida del Sol es expulsada bajo diversas formas. Es, por tanto, un ciclo abierto.

La energía que recibe la Tierra por unidad de superficie y tiempo se llama *constante solar* y se define como *la energía electromagnética que incide sobre la unidad de superficie, perpendicularmente dispuesta a la dirección de los rayos luminosos, en la unidad de tiempo*. Su valor ha sido medido por muy diversos procedimientos, siendo su valor más reconocido actualmente 1.371 w/m^2

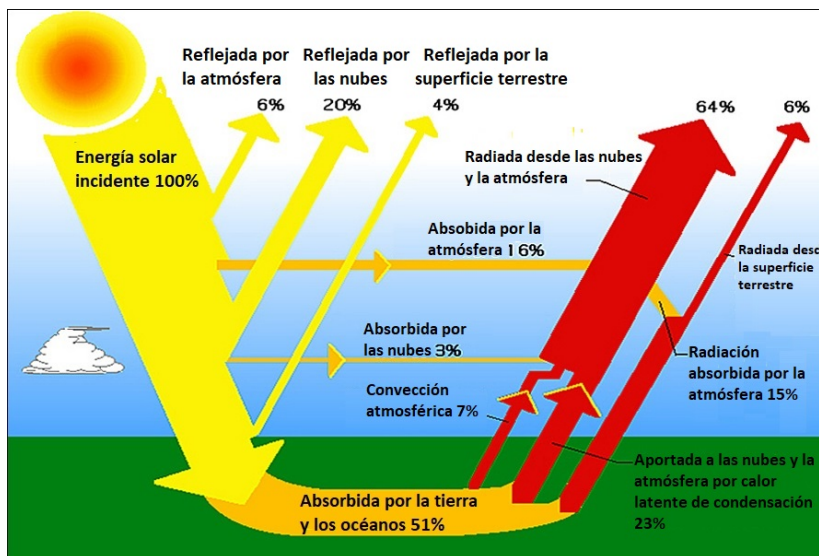


Figura 158 Esquema del ciclo abierto de la energía en la Tierra.

Se estima que esa es la energía solar que pasa por un tubo imaginario cuya sección fuera la sección transversal de la Tierra. Por consiguiente,

la energía que recibe la Tierra en 1 segundo es el producto de la constante solar por la sección diametral terrestre:

$$1.371 \text{ J/s.m}^2 \cdot \pi \cdot (6,37 \cdot 10^6)^2 \text{ m}^2 = 1,75 \cdot 10^{17} \text{ J/s}$$

Para que el lector se haga una idea de la magnitud de la cifra anterior, basta con que piense que una central nuclear, como la de Vandellós, genera una potencia máxima de 20.000 Mw ($2 \cdot 10^{10}$ w). Puesto que la potencia energética recibida por la Tierra es $1,75 \cdot 10^{17}$ w, esta última es 8,74 millones de veces más grande que la de la central. Es decir, ¡Se necesitarían más de ocho millones de centrales nucleares para igualar a la potencia que la Tierra recibe del Sol!

La figura 158 muestra el reparto de reflexiones y absorciones energéticas que tienen lugar en las distintas partes del planeta. Vemos pues, que la energía solar incidente es en parte reflejada por la atmósfera y en parte absorbida por ella. Las capas altas de la atmósfera reflejan un 6% las nubes, de color blanco, reflejan más, un 20% y la superficie terrestre refleja un exiguo 4%. Por otro lado, la atmósfera absorbe un 16% y las propias nubes absorben un 3%. Esta energía,

fundamentalmente infrarroja, provoca calentamientos más intensos en regiones ecuatoriales que en las próximas a los polos y es el motivo de la aparición de grandes corrientes convectivas (vientos) propios de la circulación general atmosférica.

De toda la energía incidente, un 51% es absorbido por la superficie continental y oceánica, provocando en ambos casos la consabida elevación de temperatura. Vimos en el capítulo I.12 (figura 17) que la *longitud de onda* de la energía electromagnética radiada por un cuerpo a la temperatura T es tanto más larga cuanto menor sea T . Esto significa que la energía que devuelve la Tierra al espacio es necesariamente de onda muy larga, en una zona del espectro conocida como “infrarrojo lejano” (ver la figura 41). Con arreglo a esto último, en la figura 158 se representa en color amarillo la energía solar incidente, formada fundamentalmente por luz infrarroja, visible, ultravioleta y otras radiaciones aún más energéticas, en tanto que la energía devuelta por la Tierra al espacio se representa en color rojo, en alusión a su baja frecuencia.

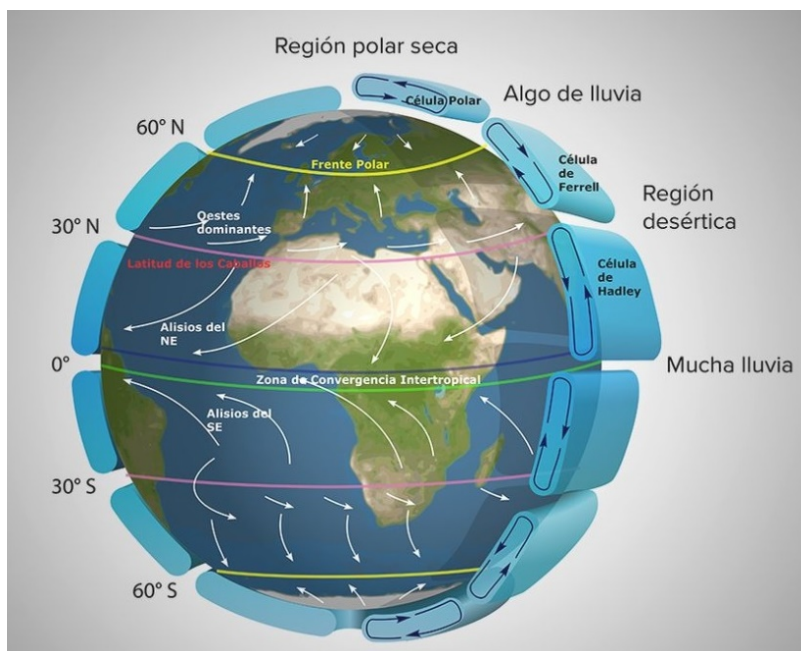


Figura 159 Esquema de la circulación general de la atmósfera. Las diferencias de irradiación debido a la esfericidad de la Tierra ocasionan la existencia de tres células convectivas.

El calentamiento de la tierra y los océanos por causa de la absorción de energía solar, un 7%, sumado al *calor latente de condensación*³⁰⁵ que se libera en la formación de las nubes, un 23%, es motivo de que ambos emitan radiación infrarroja de larga longitud de onda la cual, unida a la que emiten la propia atmósfera y las nubes, suma un total del 64% de la energía irradiada al espacio. A ello se ha de añadir un 6% de energía radiada directamente por los continentes y océanos.

Como sabemos, la irradiación solar es más intensa en la faja ecuatorial situada entre los trópicos que en latitudes mayores, ya sean norte o sur. El resultado global es la existencia de grandes corrientes convectivas, conformadas en cada hemisferio en tres grandes regiones (Figura 159): La *célula de Hadley* se extiende desde el ecuador hasta los 30° de latitud norte o sur. Debido al intenso calentamiento ecuatorial, el aire caliente asciende creando una faja de bajas presiones en todo el ecuador, zona donde son frecuentes los huracanes y tifones. El aire caliente circula en altura hacia la latitud 30°. Para entonces el aire se ha enfriado y cae, provocando en esa zona una persistente área de altas presiones (un ejemplo es el famoso anticiclón de las Azores, que tanto afecta al clima

³⁰⁵ Revisar el punto III.10.2.

en España). El aire, ya fresco, continúa su ciclo originando un viento persistente de dirección NE-SO, denominado *alisio*³⁰⁶. En el hemisferio sur, el *alisio* tiene dirección SE-NO.

Un proceso parecido se da en la faja de latitud 30^o-60^o denominada *célula de Ferrell*. La circulación del aire en esta faja está inducida por el movimiento de la célula tropical y la polar. El resultado es una circulación de aire en altura desde los 60^o hasta los 30^o de latitud y una circulación de dirección contraria en superficie³⁰⁷. Como consecuencia, la zona a 60^o de latitud es propensa a las bajas presiones y generación de borrascas (que en nuestro país entran por Galicia y Portugal).

Hay una tercera célula atmosférica llamada *polar*. En este caso la región a 60^o de latitud actúa como zona cálida en la que el aire, más caliente, asciende dirigiéndose en altura hacia los polos. Una vez frío cae con violencia, circulando en superficie en dirección contraria NE-SO. Esta es la causa del fuerte, persistente, gélido e inmisericorde viento polar.

En resumen, hemos visto cómo se reparte la energía que la Tierra recibe del Sol y hemos visto cómo el Sol actúa como motor de esa gran maquinaria que es la atmósfera y hemos visto cómo son y cómo se mueven sus engranajes.

En 1998 el huracán Mitch, el más devastador del siglo XX, se cobró la vida de 18.000 personas y en 2005 el mundo asistía sobrecogido a los destrozos que el huracán Katrina ocasionó en el SE de Estados Unidos, segando la vida de 1.830 personas. En ocasiones, la enorme energía que la Tierra recibe del Sol se concentra en un punto, generalmente en la franja ecuatorial, siendo particularmente dañino en zonas pobladas, como lo es el golfo de Florida y el Caribe.

IV.11.2 CICLO DEL AGUA

Partiendo de la teoría de la procedencia sideral del agua en la Tierra, que vimos en el punto III.10.1 hemos de aceptar que la cantidad total de agua que hay en nuestro planeta se mantiene estable, a excepción de los pequeños incrementos por las aportaciones de los asteroides y meteoritos que “caen” sobre él.

El balance hídrico global se muestra en la parte inferior de la figura 160. Vemos que la casi totalidad, un 97%, corresponde al agua salada de mares y océanos, siendo el agua dulce un escaso 3%, esta pequeña porción está congelada en los polos y los glaciares en un 68,7%, en aguas subterráneas hay un 30,1% y sólo un 0,6% corresponde a aguas superficiales diversas, y de estas últimas, tan solo un 0,3% corresponde al agua superficial a la que los seres vivos tenemos acceso. De este exiguo 0,3 por ciento un 87% se encuentra en los lagos y en ríos un 13%.

Estas cifras dan que pensar y deben mover a la concienciación de que el agua dulce, tan necesario para los seres vivos, entre ellos nosotros lo humanos, es un bien tan necesario como limitado, que hemos de gestionar con cordura.

³⁰⁶ Este viento es el que impulsó a las tres naves colombinas hacia el Nuevo Mundo.

³⁰⁷ Los vientos en esta franja tienen dirección SO-NE, se llaman *contralisos* y fueron los que impulsaron a las naves de Colón para volver a España tras culminar su gesta.

La irradiación solar que llega a la superficie terrestre provoca la evaporación del agua en océanos, mares y continentes. A ello se ha de sumar el agua que por transpiración y por metabolismo, exhalamos los seres vivos, tanto vegetales como animales. En el punto III.10.2 consideramos las propiedades físicas y químicas del agua que hacen de ella la sustancia esencial de la vida por antonomasia. Destacaremos ahora el elevado *calor específico*, $4,18 \text{ J.K}^{-1}.\text{g}^{-1}$, y sus anormalmente elevados *calor latente de fusión* 334 J.g^{-1} y su *calor latente de vaporización* 2.261 J.g^{-1} . Estos tres valores son determinantes en el ciclo el agua, ya que la evaporación de esta en océanos, mares y continentes se lleva la importante cantidad de 2,261 KJ por cada gramo de agua líquida que se convierte en vapor. El resultado es que los mares y océanos se comportan como importantes sumideros de energía solar que impiden el excesivo calentamiento del planeta³⁰⁸. El vapor de agua asciende hasta llegar a regiones de la atmósfera lo suficientemente frías como para que se

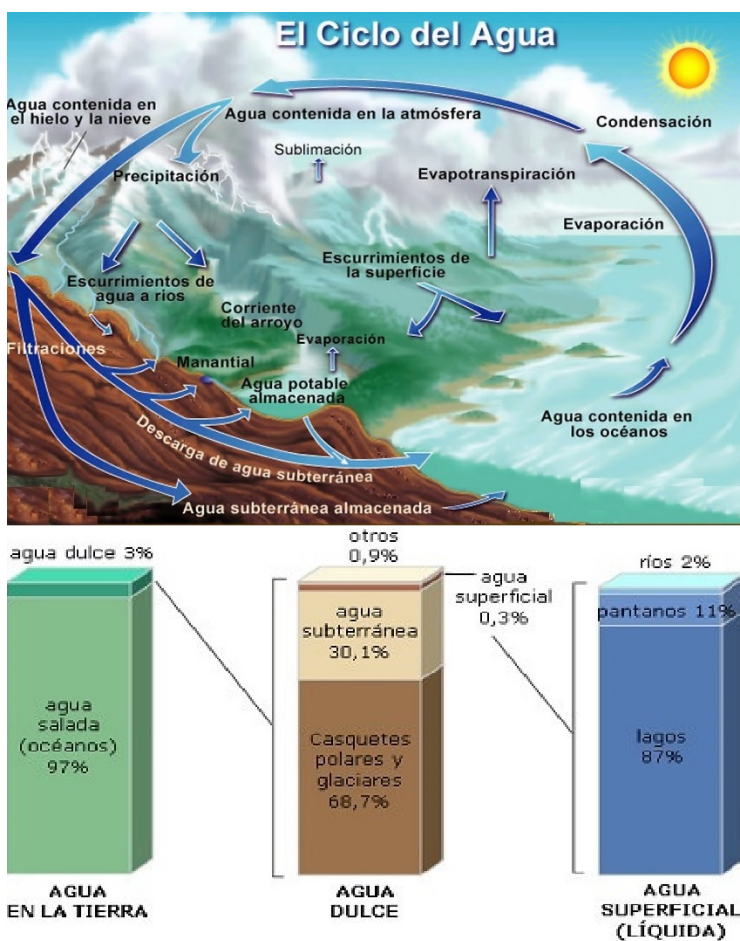


Figura 160 Esquema simplificado del ciclo del agua en la Tierra.

produzca la condensación en forma de nubes. Al condensar el vapor, este vuelve a ceder el calor latente de vaporización al entorno atmosférico. En definitiva, todo funciona como una gran máquina bombeara de calor de la superficie terrestre hacia la atmósfera.

De forma análoga, la irradiación solar provoca la fusión de los hielos en los polos y las cumbres. En este proceso, cada gramo de agua que se funde, absorbe 334 J, cantidad nada desdeñable que se añade al efecto termostático de la evaporación. El agua fundida, así como la de la lluvia, cae a tierra, buena parte pasa al subsuelo para alimento de los acuíferos subterráneos y el resto circula en superficie por escorrentías, arroyos y ríos para volver finalmente al mar. De esta forma se cierra el ciclo.

De la misma manera que la energía solar bombea los gases atmosféricos moviendo la atmósfera entera, esa misma energía mantiene en movimiento el ciclo del agua que acabamos de ver. Y aún más, la energía solar calienta desigualmente los océanos y los mares provocando la aparición de corrientes marinas convectivas. Algunas de estas corrientes son determinantes en el clima de extensas regiones terrestres. Así, por ejemplo, la *corriente del Golfo* es una corriente cálida del

³⁰⁸ He aquí el motivo por el que los territorios desérticos padecen climas extremados, con variaciones térmicas muy fuertes entre el día y la noche. Esto no ocurre en los territorios adyacentes a los mares.

océano Atlántico que se inicia en el golfo de México (de ahí su nombre), recorre la costa americana hasta Terranova y cruza el Atlántico Norte para llegar a las costas europeas, propiciando en el viejo continente un clima benigno que no le corresponde por su latitud norte. Tiene una anchura de unos 1000 Km, se mueve a 1,8 m/s con un caudal de 80 millones de m³ por segundo.

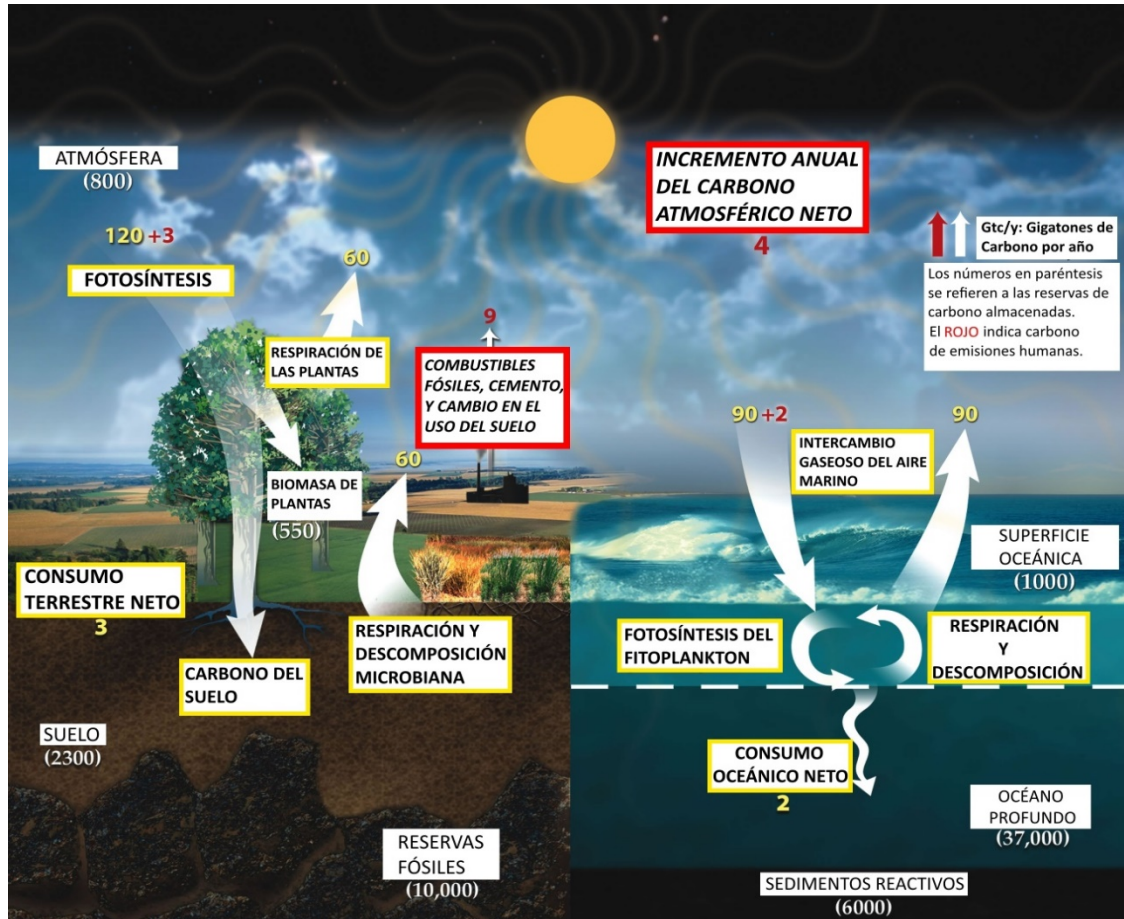


Figura 161 Esquema del ciclo del carbono orgánico. Los números entre paréntesis expresan las reservas planetarias, los números amarillos representan flujos naturales y los números en rojo se refieren a las aportaciones por actividad humana.

IV.11.3 CICLO DEL CARBONO

Dado que el carbono es el elemento base de la vida, el ciclo del carbono en nuestro planeta es de naturaleza biogeoquímica por cuanto el carbono fluye y se intercambia entre la atmósfera, la biosfera, la hidrosfera, la litosfera y el manto.

Vimos en el punto IV.5.4 que el carbono se originó por procesos de fusión de núcleos más ligeros, básicamente helio, en una etapa intermedia del proceso de *nucleogénesis* que se desarrolla en el interior de las estrellas de gran tamaño (Figura 130). Cuando estas llegan al final de su vida, suelen colapsar violentamente, para después explotar como *supernovas*. Los elementos formados en su interior son dispersados en forma de grandes nubes de polvo y gas que en el caso que nos ocupa, se concentraron gravitacionalmente en torno al naciente Sol. La Tierra se formó por *acreción gravitacional*, encerrando en su interior todos los elementos que hoy componen nuestro planeta.

El carbono se distribuye en nuestro planeta de la siguiente manera: En la atmósfera se encuentra en forma de dióxido de carbono CO_2 y metano CH_4 con un total estimado de 800 Gigatonnes³⁰⁹. En los océanos se encuentra como *carbono inorgánico* (dióxido de carbono disuelto y roca caliza), en total, 37.000 Gt y *carbono orgánico* (peces y animales marinos, zooplancton, fitoplancton, residuos orgánicos en los limos oceánicos, conchas de bivalvos, arrecifes coralinos, etc.) que comportan un total de 7.000 Gt. En cuanto a la litosfera, las reservas de carbono se distribuyen en *reservas fósiles* (carbón y petróleo) 10.000 Gt acumulado en los suelos como material orgánico 2.300 Gt y *biomasa* (vegetales y animales) 550 Gt. A todo ello se ha de añadir el carbono inorgánico acumulado en forma de rocas calizas y minerales carbonatados, en total, más de 60.000.000 Gt y en sustancias querogénicas (bitúmenes y gas natural) otros 15.000.000 Gt.

La figura 161 representa el *ciclo del carbono orgánico*, vinculado directa o indirectamente a la actividad de los seres vivos. En la hidrosfera el dióxido de carbono se disuelve en el agua, tanto más cuanto menor es la temperatura³¹⁰, el fitoplancton convierte esta sustancia en materia orgánica y oxígeno por medio de la fotosíntesis en tanto que muchos seres, entre ellos los corales y los moluscos bivalvos, convierten el CO_2 en caliza (conchas y arrecifes). De esta manera, los mares y océanos son los principales sumideros de dióxido de carbono al tiempo que son los principales agentes productores del oxígeno atmosférico.

En tierra firme, el carbono atmosférico es fijado por las plantas fotosintéticas para ser convertido en sustancias orgánicas y oxígeno, sumando su acción a la de mares y océanos. Tanto las plantas como los animales devuelven a la atmósfera parte de ese carbono como consecuencia de su metabolismo (respiración) y sus detritos se incorporan al suelo donde, en parte son fermentados y convertidos en metano y parte quedan incorporados al suelo como carbono fósil.

Hay otro *ciclo del carbono inorgánico* vinculado a la génesis de las rocas sedimentarias de tipo calizo, formadas fundamentalmente por carbonato de calcio. Todo ello forma parte de procesos de carbonatación más generales que afectan a otros minerales (por ejemplo, siderita, calcita, magnesita, malaquita, etc). Estos, bajo forma de rocas sedimentarias, forman parte de las placas litosféricas y siguen el ciclo de las rocas que ya esbozamos con las figuras 140 y 141 así como los textos anejos. En las zonas de encuentro de dos placas litosféricas, una de ellas subduce por debajo de la otra internándose en el manto terrestre. Allí, las altas temperaturas descomponen los minerales carbonatados convirtiéndolos en óxidos y dióxido de carbono. Este último escapa a la atmósfera por los volcanes y las fumarolas³¹¹.

En resumen, cabe distinguir dos ciclos para el carbono que están relacionados entre sí. El ciclo del carbono inorgánico está asociado a la dinámica tectónica y el ciclo de las rocas. En cuanto al ciclo del carbono orgánico, el carbono atmosférico es el que mayor convertibilidad presenta, siendo el que más se mueve en ambos ciclos. Por otro lado hay una considerable reserva de carbono fósil procedente de los seres vivos que en épocas pretéritas poblaban la Tierra, un largo período en el que, según vimos en el punto IV.6.2, la atmósfera terrestre contenía ingentes cantidades de CO_2 provocando un fortísimo efecto invernadero que imposibilitaba la vida, tal como hoy la

³⁰⁹ El Gigaton (Gt) es una unidad de masa que equivale a mil millones de toneladas (o mil Megatonnes).

³¹⁰ Este es el motivo por el que las aguas frías son ricas en vida, debido a que tienen mayor concentración de gases: oxígeno y dióxido de carbono.

³¹¹ Surgencias de gases calientes del interior de la tierra, asociadas a la actividad volcánica.

conocemos. A lo largo de centenares de millones de años, los seres autótrofos fueron incorporando, con su fotosíntesis, el carbono a la Tierra al tiempo que enriquecían la atmósfera en oxígeno. Hace poco tiempo, los seres humanos inventaron máquinas que sustituían ventajosamente a la fuerza animal y se lanzaron a construir más y más máquinas que quemaban el carbono que, durante millones de años, la naturaleza había depositado en los suelos. De esta manera, en una loca carrera, los humanos estaban deshaciendo en siglo y medio lo que la naturaleza había hecho en cientos de millones de años. El resto de la historia, querido lector, es cosa tuya.

IV.11.4 CICLO DEL OXÍGENO

En nuestro planeta se encuentran presentes los 83 elementos químicos estables, eso sí, con una dispar abundancia. De todos ellos, el más abundante (en masa) es el oxígeno con un 46,71% del total. Le siguen en abundancia el silicio con un 27,69%, aluminio 8,07% y hierro 5,05%, al que siguen en este ranking calcio, sodio, potasio, magnesio, titanio y a continuación el hidrógeno con un 0,14% de abundancia másica. A él le siguen fósforo, carbono, manganeso y azufre, este último con un escueto 0,052%.

En los seres vivos hay presentes unos 60 elementos, si bien seis de ellos, llamados *elementos primarios*, suponen un 96,2% de su masa corporal; dichos elementos son: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y azufre.

Como vemos, el oxígeno no solo es el tercer elemento en abundancia en el universo, tras el hidrógeno y el helio sino que en nuestro planeta es el más abundante y además es uno de los tres elementos principales en los seres vivos. En la litosfera, el oxígeno se encuentra formando parte del agua y de las rocas, combinado con el silicio en los silicatos y rocas silíceas, combinado con el carbono en los carbonatos que constituyen buena parte de las rocas sedimentarias y, en general, asociado a muchos otros elementos en forma de óxidos; supone un 99,5% del total. Este oxígeno se encuentra fijado y apenas interviene en el ciclo que consideramos aquí. Del resto, un 0,49% corresponde al oxígeno atmosférico y un 0,01% al oxígeno presente en los seres vivos.

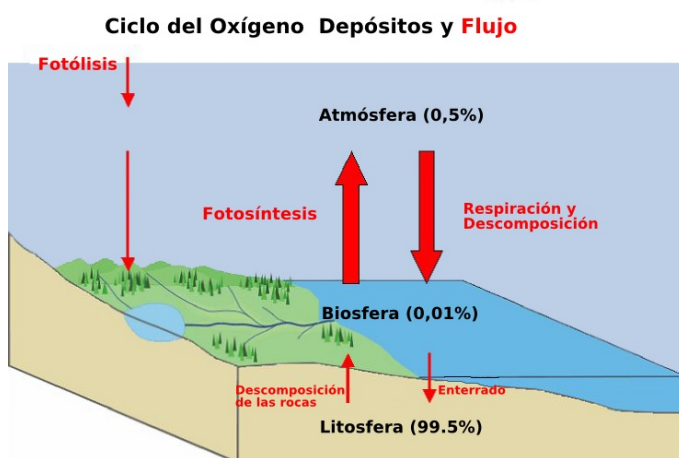
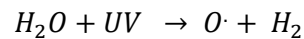


Figura 162 Esquema simplificado del ciclo del oxígeno.

Por otro lado, el oxígeno presente en el agua, en los seres vivos y en la atmósfera, es un elemento activo que interviene en multitud de transformaciones y procesos. Básicamente, existe un equilibrio entre los seres *fotosintéticos o autótrofos* y los seres heterótrofos. Los primeros captan el dióxido de carbono atmosférico y, merced a la fotosíntesis, fijan el carbono en moléculas orgánicas, liberando oxígeno como subproducto de su actividad. A su vez, los seres heterótrofos se nutren de las

moléculas orgánicas y aspiran oxígeno atmosférico. En su metabolismo, “queman” las moléculas orgánicas generando dióxido de carbono que espiran de nuevo a la atmósfera. Este sencillo ciclo se

inauguró hace unos 4.000 millones de años, cuando los primeros seres autótrofos empezaron a conquistar la Tierra. Se completa con un proceso de fotólisis que se produce en la estratosfera. Allí llega el vapor de agua procedente de la evaporación y se ve sometido a la fuerte irradiación ultravioleta. La gran energía que poseen los fotones UV provoca la ruptura de las moléculas de agua:



Los átomos libres generados, muy reactivos, o bien se recombinan entre sí produciendo oxígeno molecular que se incorpora a la atmósfera o bien intervienen en el ciclo del ozono, que veremos a continuación.

En esa misma zona de la atmósfera tiene lugar un proceso crucial para vida en el planeta. Se trata de la interconversión del oxígeno en ozono³¹².

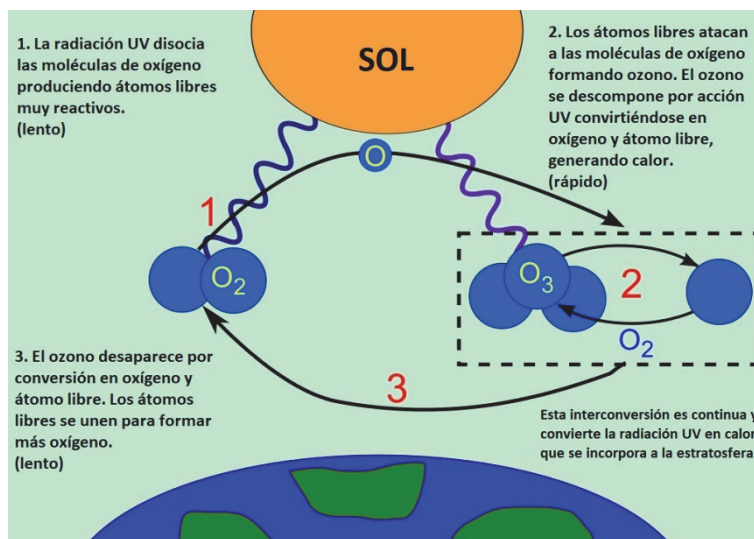


Figura 163 Ciclo del ozono atmosférico.

La radiación UV, muy abundante en la estratosfera, provoca la disociación de las moléculas de oxígeno atmosférico generando átomos libres de oxígeno. Estos atacan a nuevas moléculas O_2 produciendo ozono con una cierta liberación de calor. La radiación UV rompe las moléculas de ozono generando de nuevo átomos libres de oxígeno que vuelven a atacar de nuevo al oxígeno molecular para producir de nuevo ozono, y así

sucesivamente. El resultado neto de todo ello es la presencia en la estratosfera de una capa de ozono que absorbe la radiación UV y la convierte en calor. De esta manera, el planeta se ve libre, a nivel del suelo, de esta perniciosa radiación permitiendo que los seres vivos puedan habitarlo.

En resumen, la gran mayoría del oxígeno se encuentra formando parte de las rocas en la litosfera y solo una pequeña parte de las reservas de oxígeno interviene en el ciclo que posibilita la vida. En él están implicados: la hidrosfera, la atmósfera y la biosfera (conjunto de los seres vivos). Por otro lado, el ciclo del oxígeno engrana con el ciclo del agua a nivel estratosférico, donde el agua genera oxígeno por fotólisis y también se conecta con el ciclo del ozono, tan minoritario en términos másicos como importante para la vida.

³¹² El ozono es una molécula formada por tres átomos de oxígeno. Por ser más inestable que el O_2 , el O_3 es un fuerte oxidante no apto para la respiración. Su presencia como contaminante urbano por las emanaciones del tráfico, constituye un serio problema medioambiental.

IV.11.5 CICLO DEL NITRÓGENO

Pese a ocupar un honroso séptimo puesto en el ranking de abundancia de los elementos en el universo, el nitrógeno es relativamente escaso en la litosfera. Tan solo 20 mg por cada Kg de masa terrestre son de nitrógeno, ocupando así el puesto 27 en el ranking de abundancia que lidera el oxígeno, según vimos en el punto anterior. Sin embargo, es el elemento más abundante en la atmósfera, suponiendo un 78% de la misma.

Puesto que el nitrógeno es esencial en los seres vivos, siendo en ellos el cuarto elemento en abundancia tras el carbono, el hidrógeno y el oxígeno, es forzoso asumir que el ciclo de este elemento en la Tierra involucra, casi exclusivamente, a la atmósfera, la biosfera, los suelos³¹³ y las masas de agua. Es por tanto, un importante ciclo biogeoquímico del que depende el equilibrio entre la biosfera y la atmósfera.

Empecemos, pues, por el nitrógeno atmosférico. La molécula N_2 es muy estable y su inercia química es notable, de forma que difícilmente puede, como tal, entrar en reacción para conformar los aminoácidos, cuya fórmula genérica es $R-CHNH_2-COOH$. Recordemos que los aminoácidos son los constituyentes elementales de las proteínas, presentes en todos los seres vivos.

El proceso por el que el nitrógeno atmosférico es convertido en sustancias nitrogenadas solubles y asimilables por los seres vivos se conoce como *fijación del nitrógeno*. Hay una *fijación abiótica* que corre de cuenta de las descargas eléctricas que se producen en las tormentas. En este caso, la descarga de los rayos es capaz de romper moléculas de nitrógeno y de oxígeno que luego se unen formando moléculas de NO y NO_2 , estos gases se disuelven en las gotas de lluvia y pasan a tierra como nitritos y nitratos.

Por otro lado está la *fijación biótica*, a cargo de ciertos seres llamados *diazótrofos*³¹⁴, unos son bacterias que viven libremente en el suelo, otros son *bacterias simbióticas* de las plantas leguminosas y otros son *cianobacterias*, muy abundantes en el plancton marino. Todos estos seres³¹⁵ segregan un enzima llamado *nitrogenasa* que facilita la asociación entre el nitrógeno y el hidrógeno para convertirlo en amoníaco NH_3 en un proceso

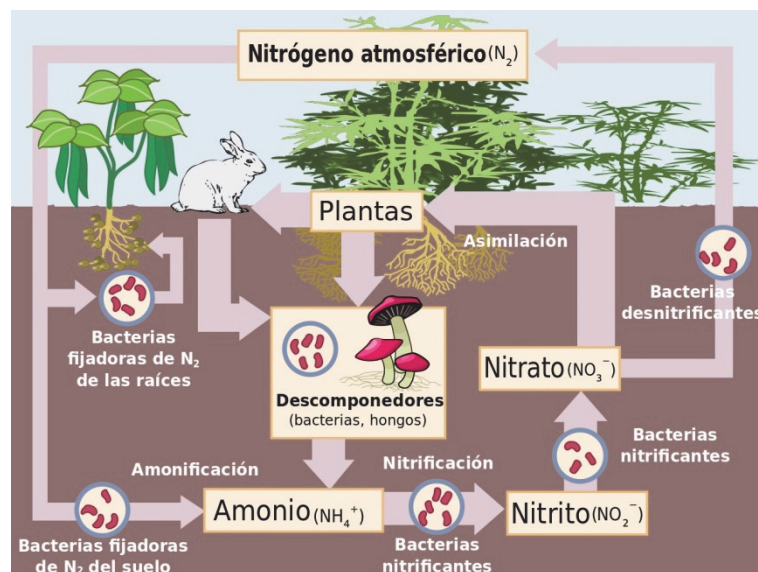


Figura 164 Ciclo simplificado del nitrógeno

³¹³ Con este término nos referimos a la delgada y delicada capa superficial en la que tienen lugar los más importantes procesos biológicos, un ecosistema de cuyo estudio se ocupa la *Edafología*.

³¹⁴ También se les llama *nitrificantes*.

³¹⁵ Todos ellos son seres unicelulares anaerobios (viven en ausencia de oxígeno), presentes en nuestro planeta incluso antes de que aparecieran los fotosintéticos.

biótico que se conoce como *amonificación*. El amoníaco es muy soluble en agua, adoptando la forma de ion amonio NH_4^+ .

En un siguiente paso de este ciclo intervienen unas bacterias aerobias que necesitan el oxígeno atmosférico y cuya actividad consiste en oxidar los iones amonio para convertirlos en iones nitrito NO_2^- (como es el caso de las *nitrosomas*) o bien en iones nitrato NO_3^- (como es el caso de las *nitrobacter*). La cuestión es que estos microorganismos convierten el nitrógeno en forma de ion amonio, no asimilable por las plantas, en iones nitrito y nitrato que sí son asimilables por estas. Las plantas absorben estos nutrientes por vía de sus raíces, sintetizando aminoácidos y proteínas que luego pasan como tales a los restantes seres vivos por medio de las *cadena tróficas* que veremos más adelante.

Las deposiciones de los seres vivos y sus cadáveres son degradados por bacterias y hongos que por vía anaerobia, descomponen las proteínas y aminoácidos, convirtiéndolos de nuevo en iones amonio, lo cual cierra el ciclo en el suelo.

Este ciclo se cierra también en la atmósfera merced a la actividad de unas bacterias anaerobias llamadas *desnitrificantes* que obtienen el oxígeno necesario para su metabolismo de los iones nitrito y nitrato, convirtiendo a ambos en nitrógeno molecular que emana del suelo y se incorpora a la atmósfera.

IV.11.6 CICLO DEL FÓSFORO

El fósforo es un elemento relativamente escaso en el universo y en nuestro planeta. En la Tierra tan solo 1 mg por cada Kg de masa terrestre corresponde al fósforo, esto es, se encuentra en la proporción másica 1/1000.000. En la litosfera se encuentra formando parte de las rocas, como fosfato de calcio, conformando un mineral llamado *apatito*. Sin embargo es un elemento muy importante en los seres vivos, no por su cantidad sino por su necesidad biológica. En el cuerpo humano, el fósforo está presente en un 1,2% de la masa corporal, formando parte de los ácidos nucleicos, huesos y dientes. Otra de sus importantes funciones es formar parte esencial de la trama metabólica bajo la forma de *adenosín-trifosfato (ATP)*, un nucleótido fundamental en la obtención de energía celular.

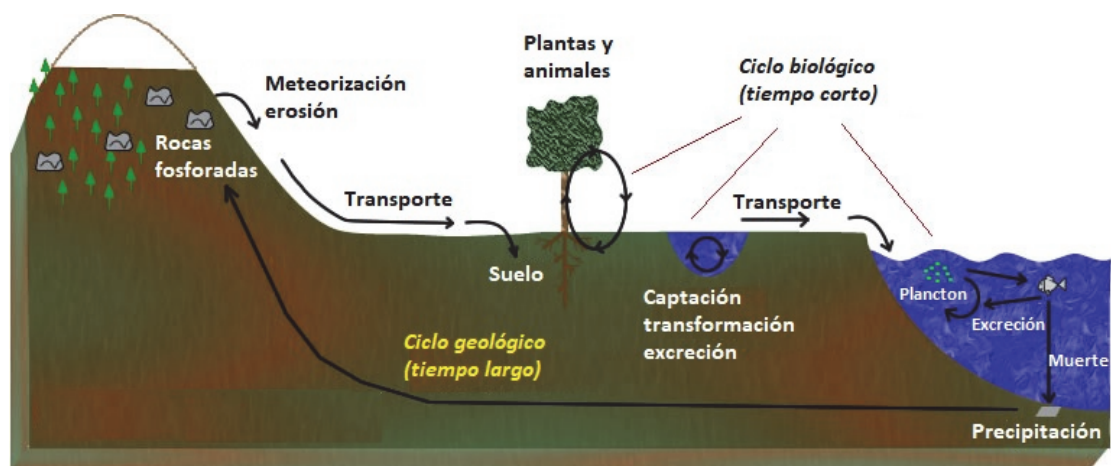


Figura 165 Esquema simplificado del ciclo natural del fósforo

El ciclo natural del fósforo presenta un doble bucle, el *ciclo geológico* comporta la presencia de minerales fosforados, principalmente apatito (fosfato de calcio), en las rocas sedimentarias. Estas sufren los procesos geodinámicos habituales: *meteorización*³¹⁶, *erosión*³¹⁷ y *transporte* por las corrientes de agua para depositarse en tierra o en el mar como fosfatos solubles. Estas sustancias ingresan en el *ciclo biológico*, siendo absorbidas por las plantas, vía raíces, o por el plancton en ríos y mares. Una vez que el fósforo ha ingresado en el ciclo biológico, este interviene en el metabolismo de animales y plantas así como formando parte de las estructuras vivas. Tanto los seres terrestres como los acuáticos intercambian cíclicamente el fósforo, entregando este al suelo en forma de deposiciones, detritos y cadáveres. Las plantas y el plancton retoman el fósforo, el cual, a través de la cadena trófica, se distribuye entre todos los seres vivos.

Finalmente, las acumulaciones de fósforo orgánico en los fondos marinos se compactan y mineralizan convirtiéndose de nuevo en rocas sedimentarias fosforadas que, tras mucho tiempo, vuelven a formar parte de la litosfera, cerrándose así el ciclo.

IV.11.7 LAS CADENAS TRÓFICAS

Por *cadena trófica*³¹⁸ (del griego “trophos”=alimentar, nutrir) se entiende el proceso de transferencia de sustancias nutritivas a través de las diferentes especies de una comunidad biológica, en la que cada una se alimenta de la precedente y es, a su vez, alimento de la siguiente.

En una cadena trófica, cada eslabón (*nivel trófico*) obtiene la energía necesaria para la vida del nivel inmediatamente anterior; el *productor* la obtiene a través del proceso de fotosíntesis mediante el cual transforma la energía electromagnética en energía química, gracias al sol, agua y sales minerales. De este modo, la energía fluye a través de la cadena, de forma lineal y ascendente.

En este flujo de energía se produce una gran pérdida de la misma en cada traspaso de un eslabón a otro, por lo cual un nivel de consumidor alto (ejemplo: consumidor terciario) recibirá menos energía que uno bajo (ejemplo: consumidor primario). Dada esta condición de flujo de energía, la longitud de una cadena no va más allá de consumidor terciario o cuaternario.

El ámbito de aplicación del concepto puede ceñirse a un pequeño ecosistema, como por ejemplo, un conjunto de lavajos y charcas o a ecosistemas mayores, como cuencas fluviales, penillanuras, bosques, o muy grandes, como mares, océanos, grandes islas, etc., e incluso cabe hablar de la cadena trófica a nivel planetario, lo cual vamos a hacer aquí.

La figura 166 esquematiza el flujo de energía a través de las cadenas tróficas a nivel global. En ella aparece a la derecha la energía total que la Tierra recibe del Sol por unidad de tiempo, expresada como potencia por unidad de superficie: 1,366 Kw/m². Ya vimos en el punto IV.10.1 que prácticamente un 50% de esa energía es reflejada por la atmósfera, las nubes, el suelo y la superficie de los mares, de forma que tan sólo 1,28 w/m² es la energía que ingresa en las redes tróficas a través de los *organismos productores* (plantas, algas, protistas, cianobacterias, etc.) los cuales capturan la luz y transforman las sustancias pro bióticas (agua, dióxido de carbono, compuestos inorgánicos de nitrógeno, de azufre, etc.) en moléculas orgánicas que aquí

³¹⁶ Transformación química por acción de la atmósfera.

³¹⁷ Fragmentación física.

³¹⁸ También se llama *cadena alimenticia*.

denominaremos genéricamente *nutrientes*. Este primer eslabón de la cadena trófica global transforma tan solo un 50% de la energía que recibe: $0,65 \text{ w/m}^2$.

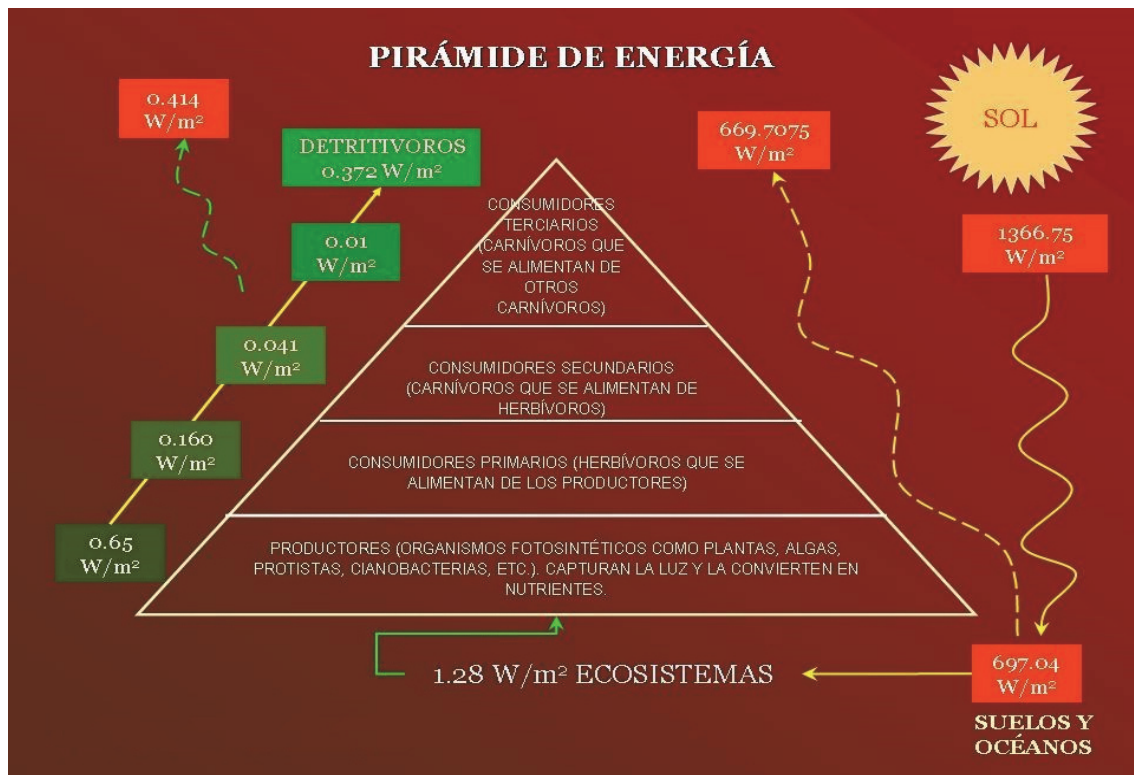


Figura 166 La Pirámide trófica es un ciclo de materia y energía que afecta exclusivamente a los seres vivos. En la imagen se especifica cómo la energía procedente del sol fluye entre las diversas categorías de seres vivos.

Los organismos productores son depredados por una amplia gama de organismos *consumidores primarios*. En el medio terrestre estos seres son los *herbívoros* o *fitófagos* y en los medios acuáticos se cuentan ciertos moluscos, algunos crustáceos, equinodermos y una larga y variada lista de tipos y clases. Este segundo eslabón de la cadena recibe en total $0,16 \text{ w/m}^2$.

El tercer eslabón es el de los *consumidores secundarios* o *carnívoros*, seres que se alimentan de herbívoros. En los medios terrestres son muy variados los tipos y clases pertenecientes a este grupo (felinos, cánidos, rapaces, ofidios, arácnidos, etc.) y en los medios acuáticos hay de todo: moluscos cefalópodos, peces, mamíferos, algunos de gran tamaño como las ballenas y los cachalotes. A estos seres les llega en conjunto $0,041 \text{ w/m}^2$.

Hay un cuarto eslabón en el que se encuentran los *consumidores terciarios* o *superdepredadores*, seres que depredan tanto sobre fitófagos como sobre otros carnívoros. En este grupo situaremos especies como tiburones, leones, lobos, águilas, etc. a los que les llega tan solo $0,01 \text{ w/m}^2$.

Hay un quinto eslabón formado por los seres *detritívoros*, de los cuales distinguiremos entre un escaso número de especies de *necrófagos* (por ejemplo, buitres, hienas, peces abisales, etc.) que se alimentan exclusivamente de despojos de otros seres vivos y los *descomponedores*, mucho más numerosos que los anteriores (hongos y bacterias) que se nutren a expensas de la descomposición de las deposiciones y cadáveres de los restantes seres vivos. Todos ellos procesan $0,372 \text{ w/m}^2$.

Como producto de su actividad, todos los seres vivos devuelven en forma de calor una potencia global de $0,414 \text{ w/m}^2$ que se difunde en el entorno.

IV.10.8 RESUMEN

Cerraremos este largo capítulo retomando de nuevo la idea de considerar a nuestro planeta como una maquinaria compleja y grande que no solo gira sobre sí misma y se traslada en torno al astro rey sino que todas y cada una de sus partes evolucionan armoniosamente en un fascinante equilibrio en el que nada sobra y nada falta.

A lo largo de miles de millones de años, la Tierra ha pasado de ser una bola ígnea rodeada de una asfixiante atmósfera para convertirse en un planeta azulado por el oxígeno de su atmósfera, abundante en agua y con temperaturas moderadas que han posibilitado el desarrollo de una intrincada red de seres vivos, interdependientes entre ellos y con el entorno en el que viven. A lo largo de su existencia, la Tierra ha circundado al Sol 4.500 millones de veces y ha descrito 1,643 billones de vueltas sobre sí misma, ha conocido interminables épocas, extremadamente calurosas y secas, en las que nada vivo podía prosperar, ha recibido el impacto de una infinidad de cuerpos procedentes del espacio, algunos de los cuales tenían enorme tamaño y provocaron grandes hecatombes. Ha conocido períodos benignos en los que la explosión de vida se extendió a la totalidad del planeta, ha visto varias veces la inversión de sus polos magnéticos y ha visto cómo las poderosas fuerzas de su interior levantaban grandes cordilleras que después ella misma desgastaba y deshacía como hizo Penélope con su manto. Y todo ello lo ha hecho lenta y pacientemente, buscando en todo momento equilibrios que, en ocasiones, se antojaban imposibles.

Como si de una gran maquinaria de relojería se tratara, sus ruedas y engranajes –los *ciclos naturales*– se mueven interconectados unos con otros, involucrando dinámicamente a la litosfera, la hidrosfera, la atmósfera y a los seres vivos, orquestando así una sinfonía en la que todo acontece con precisión y nada se produce por azar. La dinámica terrestre no es única, muy al contrario, está subordinada a la dinámica del *Cosmos*, y todo ello está regido por un conjunto de leyes físico-químicas, tan simples como estrictas.

Hace muy poco tiempo, una especie zoológica de características singulares, poseedora de una habilidad sin precedentes para transformar el medio en provecho propio, empezó a modificar la conducta de otros seres vivos para su propio beneficio y posteriormente se lanzó a disponer de los medios y recursos, todos ellos limitados, que la Tierra había atesorado durante millones de años. Los cambios que estos nuevos seres provocaban en el medio, en un tiempo extremadamente breve, difícilmente podría asumirlos el planeta. Esos seres se dicen a sí mismos "inteligentes" y parece que empiezan a ser conscientes de la cruda realidad: por el camino que van se acercan fatalmente a su destrucción. ¿Serán capaces estos seres de tomar conciencia de su condición y situación? Si hay algo cierto en este drama, ello es la coordinación entre todos los seres vivos y la subordinación de todos ellos, como piezas que son, a la gran estructura planetaria de la que forman parte: **Gea, la gran maquinaria.**

IV.12 COSMOLOGÍA, UNA CIENCIA DE CIENCIAS

Desde los más remotos tiempos, el ser humano ha intentado dar explicación a cuanto acontece a su alrededor y en este contexto han surgido las mitologías, como intentos de explicar el universo y el origen de la existencia. La *cosmogonía* es la parte de las narraciones mitológicas y legendarias que se ocupa de explicar la creación del mundo. En tanto que los mitos eran la descripción simbólica de aquellos fenómenos para los cuales las civilizaciones no tenían una respuesta, explicar el misterio de cómo se crearon el universo y la tierra se convirtió en una de las principales tareas de la mitología.

De todas las cosmogonías, la que nos resulta más familiar es la judeocristiana, plasmada en el Génesis. Hay otras narraciones mitológicas, una de las cuales, la griega, ya esbozamos en el capítulo IV.11. En general, todas las cosmogonías comparten un mismo planteamiento: Parten de la nada y la oscuridad para explicar, de diferentes formas, la creación del cielo, los mares, la tierra, y aquello que los habita.

De igual manera, la ciencia intenta dar explicación a los fenómenos que suceden en el universo, pero lo hace de la forma más objetiva posible, utilizando una metodología muy específica, la científica, en la que están ausentes valores y actitudes como la fe, la tradición o la emotividad.

Desde que Charles Darwin y Alfred R. Wallace consagraron la idea evolutiva para el conjunto de los seres vivos, la ciencia en general ha seguido esa línea de pensamiento, seguramente a causa del “horror infiniti” de la mente humana, que se niega a aceptar que el universo no haya tenido un principio y que no tenga un final. Ya en el S. XX aparece la Teoría de la Deriva Continental que resultó ser a la Tierra lo que la Teoría de la Evolución de las Especies es a los seres vivos. En la segunda mitad del pasado siglo, la Física de Partículas experimenta un fuerte auge, explicando la estructura íntima de la materia y sus posibles conversiones. La Astronomía, la más antigua de las ciencias y origen de todas las demás, escudriña desde hace más de veintisiete siglos el universo intentando comprender más y mejor sus evoluciones. Desde que a finales del S. XVII Kepler y Newton establecieron las leyes que rigen la mecánica celeste, se inició una fecunda simbiosis entre la vieja Astronomía y la Física. De esta alianza surgió una nueva ciencia, la Astrofísica que aborda el conocimiento del Universo desde un punto de vista global, estudia las estrellas, los planetas, las galaxias, los agujeros negros y demás objetos astronómicos como cuerpos de la física, incluyendo su composición, estructura y evolución.

La astrofísica emplea la física para explicar las propiedades y fenómenos de los cuerpos estelares a través de sus leyes, fórmulas y magnitudes. El gran auge de la Astrofísica llega en el siglo XIX cuando, gracias al desarrollo de la espectroscopía, fue posible averiguar la composición de las estrellas. Una vez que se comprendió que los cuerpos celestes están compuestos de las mismas sustancias que conforman la Tierra y que las mismas leyes de la física y de la química, elaboradas en el entorno terrestre, son aplicables también a ellos, nace la astrofísica como una aplicación de la física a los fenómenos observados por la astronomía. La astrofísica se basa, pues, en la asunción de que las leyes de la física y la química son universales, es decir, que son las mismas en todo el universo. Dada su naturaleza y objetivos, la astrofísica es una ciencia multidisciplinar que engloba a la geometría (ver los capítulos II.10 y II.11), la física nuclear (capítulo IV.6), la física relativista (véanse los capítulos II.17 y II.18), la mecánica clásica (capítulo I.17), el electromagnetismo (capítulo I.19), la fotometría (capítulo II.12), la física estadística, la termodinámica (capítulos IV.1,

IV.2 y IV.3), la mecánica cuántica (capítulo I.12), la física de partículas (capítulos III.4 y III.5)), la física atómica y molecular (capítulos III.7, III.8, III.9, III.11, III.12 y III.13), todo lo cual se ha tratado en capítulos precedentes.

Como resultado de todo ello surgió en el pasado siglo una nueva disciplina, la *Cosmología* (“cosmos”=orden y “logia”=tratado, estudio) que puede definirse como *rama del conocimiento que se ocupa del estudio del Universo*. Dada su naturaleza y objetivos, la *Cosmología* es eminentemente interdisciplinar, involucrando a la astronomía, la Física, la Química, la filosofía y marginalmente otras áreas del saber no científicas como el esoterismo y la religión.

Como ya se dijo antes, el pensamiento evolucionista que inaugurara Darwin, se extendió durante el siglo XX a otras ciencias, como la Geología (véase el capítulo IV.9). La *Cosmología* siguió igual camino, de la mano de los descubrimientos de Georges Édouard Lemaître, Milton Humason y Edwin Hubble, acrisolando la filosofía evolucionista bajo la forma de la *Teoría del Big-Bang* que ya se trató en el capítulo IV.4.

Además de esta teoría, que explica cómo el universo surgió a resultas de una *Gran Explosión* que se produjo en una *singularidad*³¹⁹ del *espacio-tiempo*, el corpus teórico de la *Cosmología* moderna se sustenta en otras muchas teorías procedentes de las diversas ciencias intervinientes. El resultado es un cuerpo de conocimiento, impregnado de la filosofía evolucionista, que describe y explica cómo evolucionó el universo desde el Big-Bang hasta hoy.

Las estimaciones, más modernas y fiables, del tiempo transcurrido desde la gran explosión primigenia hasta hoy, se cifra actualmente en unos 13.800 millones de años. Según el orden de acontecimientos en el que nos situemos, la escala del tiempo es mayor o menor, así, en el mundo de las partículas elementales y de las ondas electromagnéticas la escala de tiempo es ultrapequeña, ya que los acontecimientos tienen duraciones del orden de 10^{-25} segundos. Si nos referimos a la vida humana, los acontecimientos se enmarcan en intervalos temporales de a lo sumo varias décadas, empleando también unidades menores como días, horas, minutos y segundos. Aumentando progresivamente la escala temporal, podríamos hablar de un tiempo arqueológico, un tiempo paleontológico y un tiempo geológico, siendo la escala temporal mayor la correspondiente a un tiempo cosmológico.

De la misma forma en que, en el capítulo II.14 nos referíamos a un océano dimensional, por cuanto al tiempo concierne, podemos también considerar el tiempo como un inmenso océano en medio del cual se encuentra nuestra existencia, a gran distancia de la orilla de lo grande y de la orilla de lo pequeño. Nos es tan imposible intuir el tiempo transcurrido desde que tuvo lugar la formación del sistema solar como intuir la velocidad con la que el electrón externo de un átomo de cesio es capaz saltar entre los dos niveles energéticos que hacen de él el más preciso y exacto patrón de tiempo (véase el capítulo II.9).

³¹⁹ Término utilizado por los matemáticos para referirse a un punto del espacio de densidad infinita, donde el espacio-tiempo está infinitamente curvado y por tanto, la Teoría de la Relatividad General se viene abajo. “Todas las teorías científicas están formuladas bajo la suposición de que el espacio-tiempo es uniforme y casi plano, de manera que ellas dejan de ser aplicables en la singularidad del Big Bang” HAWKING, S. (1988) “Historia del Tiempo”, p.73, Ed. Crítica, Barcelona.

En cierto modo, las culturas de civilizaciones pretéritas dieron a luz a las diferentes mitologías y ese contexto, las explicaciones sobre el origen y destino del mundo se materializaron en las correspondientes cosmogonías. Nuestra cultura actual, heredada mayoritariamente de la cultura grecolatina, es el resultado de un largo proceso³²⁰ de más de veinte siglos que tuvo aciertos y errores, períodos de estancamiento y períodos de pujanza y que también tuvo héroes y mártires. Pero por encima de todo, es una cultura, basada en la ciencia, que prima la razón sobre la fe y la contrastación sobre la asunción acrítica. Por estas razones podemos afirmar que la Cosmogonía profesada por la inmensa mayoría de las culturas del siglo XXI es la de las grandes teorías científicas.

IV.13 LA MÁS GRANDE HISTORIA JAMÁS CONTADA

En 1997 Carl Sagan³²¹ (1934-1996) propuso la idea de insertar el tiempo transcurrido desde el *Big-Bang* hasta el presente en un año terrestre, como un procedimiento para llevar al terreno de lo intuitivo lo que, por su desmesurada magnitud, no lo es. Dicha idea la plasmó en el primer capítulo de uno de sus más celebrados libros divulgativos³²² cuyo título era “El Calendario Cósmico”.

Puesto que la edad del universo más aceptada actualmente se estima en 13.800 millones de años, trasladar los principales acontecimientos acaecidos desde su nacimiento a una fecha correspondiente a un año terrestre, obliga a utilizar un coeficiente de proporcionalidad desmesurado, solo comparable con el que utilizan los químicos para el manejo de las sustancias puras, respetando las proporciones moleculares (véase el capítulo III.10). Teniendo en cuenta el dato anterior, un año terrestre es $1/13,8 \cdot 10^9 = 7,25 \cdot 10^{-11}$ veces menor que la vida del universo. Si la más reciente estimación del valor medio de la esperanza de vida del ser humano está en 71 años, ello supone que, estadísticamente hablando, nuestra existencia supone tan solo: $71 \times 365 \times 24 \times 60 \times 60 / 13,8 \cdot 10^9 = 0,16$ segundos del *año cósmico*. Toda una lección de humildad, sin duda.

El relato que haremos a continuación se irá refiriendo sistemáticamente al año cósmico. Se recomienda al lector que mire con frecuencia la figura 167, con objeto de que pueda situar convenientemente los acontecimientos.

En un principio nada existía, tan solo una singularidad³²³ (término utilizado por los matemáticos para referirse a un punto en el que las leyes dejan de cumplirse, lo cual equivale a decir que de ello no se sabe nada). En un momento dado tuvo lugar una tremenda explosión, coincidiendo con las 0 h del 1 de enero del año cósmico. Tan sólo un instante después, 10^{-43} segundos, no había otra cosa que radiación electromagnética de altísima energía, es decir, todo era energía pura. Pasada

³²⁰ Nos referimos tácitamente a la historia de la ciencia.

³²¹ Astrónomo, astrofísico, cosmólogo, astrobiólogo, escritor y divulgador científico. Es considerado uno de los divulgadores de la ciencia más carismáticos e influyentes, gracias a su capacidad de transmitir las ideas científicas y los aspectos culturales al público no especializado con sencillez no exenta de rigor. Su gran popularidad vino a raíz de la serie documental de TV “Cosmos: Un viaje personal”, producida en 1980, de la que fue narrador y coautor.

³²² SAGAN, C. (1997) “Los Dragones del Edén: Especulaciones sobre la evolución de la inteligencia humana”. R. Andreu, Trad. Ed. Planeta Agostini (2003).

³²³ En el punto IV.6.5 se utilizó el término *singularidad* para referirnos a los agujeros negros, zonas en las que la curvatura del espacio-tiempo es tal que las leyes de la física dejan de cumplirse y la luz no puede emerger.

una billonésima de segundo, muchos *fotones* se transmutaron en *leptones*³²⁴ (quarks, neutrinos y electrones) a lo largo de un brevísimo intervalo temporal conocido por los cosmólogos como *Era de la Gran Unificación*, debido a que en ese momento las fuerzas fundamentales (fuerte, débil, electromagnética y gravitatoria) aún no se habían definido. El campo de Higgs se extendía por el incipiente universo, de forma que los leptones que se movían en su seno, adquirirían masa. Transcurrida tan solo una diezmilmillonésima de segundo tras la Gran Explosión, los quarks se agruparon de tres en tres, quedando confinados para siempre bajo la forma de *bariones* (protones y neutrones), este proceso, conocido como *era leptónica*, se prolongó hasta pasados 300 segundos. Para entonces, el universo se expandía a gran velocidad³²⁵ de forma que en este período, su temperatura debió descender desde los 10^{32} K hasta un billón de grados.

Durante los trescientos mil años siguientes, la mayoría de los protones se asociaron con los electrones en proporción 1:1 formando átomos de hidrógeno. También hubo asociaciones protón-neutrón que dieron lugar a átomos de deuterio, e incluso asociaciones de dos protones con dos neutrones rodeados por dos electrones, que conformaron átomos de helio.

Si hasta entonces el joven universo estaba dominado por las radiaciones, a partir de ese momento la materia llegó a hacerse hegemónica. Enormes nubes de gas se expandían adiabáticamente³²⁶ conformando una descomunal “sopa cósmica” de gas hidrógeno e ingentes cantidades de radiación de alta energía en la que había grumos, esto es, zonas en las que la densidad era mayor que en otras. Todo esto sucedió el día 1 de enero del año cósmico. A partir de entonces, la gravedad empezó a hacer su trabajo.

Las zonas de mayor densidad ejercían fuerzas gravitatorias que aglutinaban en torno a sí a las masas de gas adyacentes, esto las hacía más densas y aumentaba su acción atractiva, incorporando más y más masas de gases. Por entonces, la temperatura media del universo había descendido hasta poco más de 15K debido a la continua expansión. Pero la gravedad había empezado a actuar, comprimiendo el hidrógeno aglutinado y elevando así su temperatura. Llegó un momento en el que algunas de estas zonas de acumulación alcanzaron temperaturas del orden de un millón de grados, convirtiéndose así en *protoestrellas*. Esto sucedió pasados mil millones de años del Big-bang, coincidiendo con el 28 de enero del año cósmico.

A lo largo de los meses de febrero, marzo y abril fueron innumerables las ocasiones en las que la acción de la gravedad elevó la temperatura de las masas de hidrógeno comprimidas, hasta encender los hornos estelares en los que las reacciones de fusión convertían el hidrógeno en helio, al tiempo que se producía una enorme cantidad de energía. En aquel universo en expansión las estrellas y galaxias nacían y se mantenían durante unos cuantos miles de millones de años gracias a un equilibrio entre las fuerzas gravitatorias, tendentes a colapsar la estrella, y las fuerzas expansivas causadas por las reacciones termonucleares.

Pasados unos 6.000 millones de años desde el Big-Bang, en los primeros días del mes de mayo del año cósmico, se produjo la formación de una gran galaxia: la Vía Láctea. En sus brazos espirales,

³²⁴ Ya vimos en el capítulo III.4 que los leptones son partículas elementales sin estructura interna es decir, no formadas por partículas de menor tamaño.

³²⁵ Los cosmólogos denominan a este breve período inicial “de la gran inflación”.

³²⁶ En Termodinámica, se llama proceso adiabático a aquel en el que el sistema evoluciona sin intercambiar calor con el entorno.

animados de un movimiento de rotación, se encontraban innumerables estrellas así como nubes de gas y polvo y, como en las restantes galaxias, la fuerza gravitacional que provocaría su colapso se compensaba con la fuerza centrífuga inherente a la rotación. En su interior unas estrellas nacían y otras morían; de estas últimas, las más pequeñas apenas emitían luz y se apagaban sin más, convirtiéndose en materia fría, otras de tamaño mayor morían convirtiéndose en estrellas de neutrones y finalmente, algunas de gran tamaño morían dramáticamente como *supernovas* que explotaban, dispersando los materiales resultantes de la nucleogénesis.

Hace unos 4.600 millones de años, coincidiendo con el mes de septiembre del año cósmico, una enorme nube de gas y polvo que se hallaba casi en el extremo de uno de los brazos de la Vía Láctea inició su evolución para convertirse en una protoestrella. A lo largo de ese mes las fuerzas gravitatorias aglutinaban más y más la masa gaseosa central elevando su temperatura. En torno a sí giraba una gran masa de gases, polvo, cuerpos sólidos y agua en estado de vapor. Dicha masa tenía forma de disco, similar a lo que hoy son los anillos que circundan al planeta Saturno.

Mientras la protoestrella, que se encontraba en el centro del disco protoplanetario, aglutinaba masa, la compresión gravitatoria incrementaba más y más su temperatura hasta que llegó un momento en el que se iniciaron las reacciones termonucleares de fusión del hidrógeno que convertirían a la protoestrella en una estrella: el Sol.

Entre tanto, la masa que orbitaba en torno a la estrella recién nacida se aglutinaba por orden de densidades. Los materiales más densos se situaban más cerca de la estrella y los más ligeros se concentraban más lejos. De esta manera, poco a poco, el disco protoplanetario se convirtió en un sistema de anillos concéntricos. Los más próximos al Sol eran mayoritariamente sólidos (meteoritos y asteroides) en tanto que los más lejanos eran abundantes en hidrógeno, helio y vapor de agua. Posteriormente, en todos ellos se dio un proceso de *acreción*³²⁷ en el que los materiales del anillo se concentraron en un punto que tenía mayor densidad que el resto. A medida de que los “días cósmicos” se sucedían, el protoplaneta aumentaba su masa a costa de la materia existente en el anillo orbital. De esta manera fue configurándose el sistema solar. Los planetas más próximos a la estrella eran densos y rocosos en tanto que los más lejanos, de mayor tamaño, estaban constituidos por materiales más livianos, fundamentalmente gases y vapor de agua.

Hace unos 4.500 millones de años, más o menos en fecha 6 de septiembre, un punto de acreción de tamaño similar al que hoy tiene Marte, que compartía la órbita de la naciente Tierra, se hallaba separado de esta a una distancia angular de unos 60°. Probablemente, por acción de la gravedad de Júpiter, ese gran asteroide, al que los cosmólogos llaman *Theia*, se precipitó sobre la Tierra impactando con ella. A resultas del descomunal impacto, el asteroide se fragmentó, parte de su masa se incorporó a la Tierra y otra parte quedó orbitando en torno a ella y, tras aglutinarse, originó la Luna, el único satélite terrestre.

Pasados otros 500 millones de años, a mediados del mes de septiembre del año cósmico, la Tierra fue bombardeada incesantemente por miles de meteoritos y asteroides de todos los tamaños. Casi todos provenían de los confines del sistema solar y estaban cargados de agua helada. Al

³²⁷ Concentración de los materiales en los puntos de mayor densidad por efecto gravitatorio.

incrustarse en el globo terráqueo incrementaron su masa y aportaron al planeta el agua que hoy cubre las tres cuartas partes de su superficie pétreo, conformando así los mares y océanos.

En la segunda quincena del mes de septiembre, la Tierra era un planeta parecido a lo que hoy es Venus. Su corteza litosférica cubría la inmensa bola de magma interno. Buena parte de esa litosfera estaba cubierta por agua líquida y la atmósfera era una asfixiante mezcla de gases tóxicos, mayoritariamente: dióxido de carbono, metano, amoníaco, sulfuro de hidrógeno y agua en estado de vapor. En el interior del planeta, las corrientes convectivas del magma arrastraban y fragmentaban la litosfera provocando grandes seísmos y numerosas erupciones volcánicas que escupían al exterior todo tipo de materiales telúricos. En el exterior, el fuerte efecto invernadero de aquella primitiva atmósfera era causa de que la temperatura diurna alcanzara los 400K. Por otro lado, el elevado grado de humedad y la intensa radiación cósmica torturaban de forma inmisericorde los materiales de la superficie.

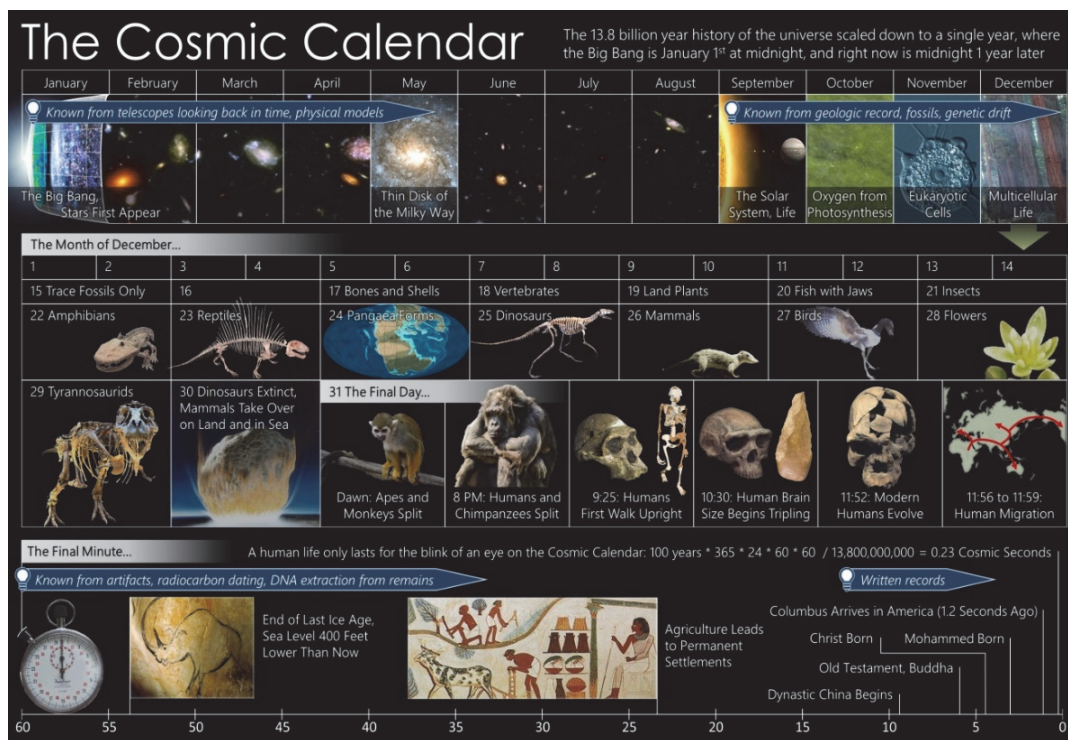


Figura 167 Recreación artística del *Calendario Cósmico* de Carl Sagan. La vida del Cosmos ha sido insertada sobre la duración de un año terrestre. Está segmentado en tres sectores horizontales, en el de arriba aparecen los doce meses. El mes de diciembre se despliega en el segundo sector, formado por 31 “días”, las seis últimas viñetas corresponden al último día del año, 31 de diciembre. El tercer sector (abajo) corresponde al desarrollo del último “minuto” del año cósmico.

En aquella atmósfera primitiva, la alta temperatura combinada con la intensa radiación, propiciaba reacciones de combinación entre las moléculas elementales atmosféricas, originando otras más complejas que contenían carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. Estas nuevas moléculas, muchas de ellas aminoácidos, se disolvían con facilidad en los primitivos océanos. Así, en los últimos diez días del mes de septiembre del año cósmico, los océanos eran ya una enorme disolución de aminoácidos y otras moléculas probióticas. La intensa radiación propiciaba nuevas combinaciones endotérmicas entre estas moléculas, las cuales se unían formando estructuras moleculares más grandes y complejas.

Así pues, hace unos 3.900 millones de años, a punto de finalizar el mes de septiembre, quiso el destino que una de estas moléculas tuviese una propiedad química extraordinaria: ser capaz de hacer copias de sí misma uniendo moléculas probióticas de su entorno. Es decir, esas moléculas eran capaces de hacer de forma programada lo que, de forma aleatoria, las había originado a ellas. Puede decirse que, en ese momento, había surgido la vida en el planeta Tierra.

A partir de entonces se pusieron en marcha los mecanismos de la vida. Las moléculas autoreproductoras se multiplicaban y proliferaban en un medio en el que, como el maná bíblico, el alimento se hallaba por doquier y nunca se agotaba. La evolución fue cincelandando la estructura de estas moléculas; uno de los primeros avances evolutivos fue el recubrimiento de las mismas con una membrana protectora. De esta forma aparecieron las primeras células procariotas.

A punto de finalizar septiembre, hace de esto unos 3.700 millones de años, la concentración de seres autoreproductores llegó a ser tal que los nutrientes empezaron a resultar escasos para tan elevada población y sucedieron dos cosas: unas células procariotas obtenían los nutrientes a expensas de “comer” otras células, inaugurando así la *depredación*. En cambio otras se especializaron en sintetizar los nutrientes a partir de los gases atmosféricos, con intervención de la radiación solar, inaugurando así la *fotosíntesis*. En un principio, estos mecanismos permitieron que la vida evolucionara y se diversificara en ausencia de oxígeno, es decir, era una vida anaerobia.

En la primera quincena del mes de octubre, el equilibrio que se estableció en la Tierra parecía perfecto y todo hacía pensar que no se modificaría nunca. Los seres autótrofos (cianobacterias y algunas arqueas) proliferaban sintetizando nutrientes a partir de las moléculas atmosféricas, con el concurso de la luz solar y por otro lado los seres procariotas heterótrofos se mantenían alimentándose de los nutrientes que habían sintetizado los primeros. Esta situación se mantuvo durante casi mil millones de años.

Ahora bien a mediados de octubre del año cósmico, es decir, hace unos 2.800 millones de años había muchos seres autótrofos que utilizaban en la fotosíntesis un pigmento verde, la clorofila, que les permitía sintetizar nutrientes con mayor eficiencia, y como subproducto de su actividad, desprendían oxígeno. El éxito de estos nuevos seres fue tal que, lenta pero inexorablemente, la composición de la atmósfera terrestre fue modificándose y evolucionando hasta convertirse en la atmósfera oxidante actual. Aquella conversión fue la catástrofe ecológica más grande que ha conocido el planeta; la atmósfera reductora de vapor de agua, CO₂, NH₃ y CH₄ que había dado cobijo durante el larguísimo *eón arqueano* a los seres unicelulares procariotas se tornó agresivo y tóxico para estos primitivos seres, que tuvieron que refugiarse en lugares muy concretos (fondos marinos, fumarolas, turberas, etc.) al abrigo del agresivo oxígeno.

Otros seres evolucionaron adaptándose a la nueva situación y “aprendieron” a obtener energía quemando sus propios nutrientes con el oxígeno que respiraban mediante procesos bioquímicos que genéricamente llamamos *metabolismo*. De esta forma, la vida en el planeta llegó a un nuevo equilibrio: los seres autótrofos seguían sintetizando nutrientes y desprendiendo oxígeno, en tanto que los heterótrofos quemaban con su metabolismo esos nutrientes, inspirando oxígeno y espirando CO₂.

Hace unos 2.200 millones de años, coincidiendo con los primeros días del mes de noviembre, se produjo otro salto evolutivo de gran trascendencia: ciertos seres procariotas (cuyo material genético no se encuentra encerrado en un núcleo) encerraron el valioso ADN en el interior de un

núcleo recubierto de una membrana protectora, el cual se encontraba inmerso en el protoplasma celular. Este “invento evolutivo” perfeccionó sobremanera la síntesis celular; estas nuevas células *eucariotas* guardaban el código genético en el ADN nuclear y la información genética era copiada por moléculas de ARN que entraban y salían del núcleo. Una vez fuera, dirigían la síntesis proteica alcanzando así unas cotas de perfección y selectividad nunca vistas antes.

En los primeros días del mes de noviembre, la vida se desarrollaba exclusivamente en el agua. En la carrera de la evolución, fuertemente competitiva, la consigna era sencilla y muy clara: comer y no ser comido. Sobrevivir significaba poder reproducirse y transmitir los genes a generaciones futuras en tanto que morir era equivalente a no transmitir el patrimonio genético y servir de alimento a otros seres. La supervivencia de las especies estaba supeditada a las ocasionales mutaciones que pudieran producirse en la reproducción. De esta manera, a través del juego de la vida y la muerte, los individuos mejor dotados sobrevivían, en tanto que los no adaptados desaparecían. Pues bien en esta maratón biológica algunos “corredores” inventaron una nueva y poderosa arma evolutiva: el sexo. Esto sucedió hacia el día 5 de noviembre.

Consta que el 12 de noviembre del año cósmico ya había algas pluricelulares, de las cuales tenemos los registros fósiles más antiguos. Hace unos 1.500 millones de años, la evolución determinó que muchos seres unicelulares, tanto autótrofos como heterótrofos, se unieran y coordinaran formando organismos pluricelulares más complejos y eficientes. Poco a poco, estos seres se dotaron de un sistema de coordinación que arbitraba el papel que las diferentes células de la comunidad desempeñaban. Con el paso del tiempo, y por vía evolutiva, este sistema de coordinación se convirtió en algunos seres en un eficientísimo sistema nervioso.

Hubo un período que se inició hace unos 720 millones de años y que terminó hace unos 635 millones de años en el que la Tierra sufrió varias superglaciaciones que cubrieron de hielo la totalidad del planeta, registrándose en todo él temperaturas de -50 grados centígrados. Parece ser que ello se debió a un descenso fortuito de los gases de efecto invernadero³²⁸ CO₂ y CH₄. Gracias a que el hielo flota en el agua, la costra helada preservó bajo sí la vida acuática. Esto sucedió entre los días 15 y 18 de diciembre.

Pasadas estas superglaciaciones, el clima terrestre se estabilizó. Por entonces ya existía en el medio acuático una variada gama de seres pluricelulares: moluscos de concha, cefalópodos, artrópodos, equinodermos, etc. Hace unos 530 millones de años, coincidiendo con el 16 de diciembre, se produjo una explosión de vida que ha dejado abundante registro fósil y que los paleontólogos denominan *Explosión Cámbrica*. No está claro cuáles fueron las causas, es probable que se combinaran efectos geológicos (cese de las superglaciaciones, aumento del oxígeno atmosférico) y efectos biológicos (la reproducción sexual, mejoras en el sistema nervioso, natación activa) que propiciarían el incremento del número de individuos por especie y su diversificación. El día 19 de diciembre las plantas empiezan la conquista de la tierra firme, un día después en los mares abundaban los peces y los tiburones, el día 21 los insectos se adaptan al medio terrestre

³²⁸ El descenso debió llegar a los valores actuales, ahora bien, la potencia del Sol era entonces un 6% menor que en la actualidad, por lo que la Tierra necesitaba retener más calor que en la actualidad para mantener temperaturas habitables.

colonizando el continente *Pangea* y un día después, hace de esto unos 334 millones de años, los anfibios se aventuraron a la conquista de la tierra firme.

Pasado un día más, hace unos 300 millones de años, aparecieron los primeros reptiles, inaugurando un período de la historia de la Tierra de nada menos que 230 millones de años. Durante este tiempo, coincidiendo con los períodos *Triásico*, *Jurásico* y *Cretácico*, los grandes reptiles dominaron el planeta. Los reptiles se adaptaron a muy variados ecosistemas, algunos tenían sangre caliente, otros disponían de dos corazones para asegurar que el riego sanguíneo llegara hasta el último extremo de su enorme cuerpo, otros eran gregarios y tenían una cierta organización social; vivieron épocas de bonanza y aguantaron períodos de escasez. Los hubo grandes, pequeños, fitófagos y carnívoros. Entre tanto, las fuerzas telúricas fragmentaban lentamente el supercontinente dejando aislados a individuos de una misma especie que evolucionaron por caminos distintos. El día de Navidad del año cósmico es la fecha en la que los grandes dinosaurios alcanzan su máxima hegemonía. El día 26, hace 185 millones de años, aparecen en escena dinosaurios con plumas que son capaces de volar, eran las primeras aves, y casi simultáneamente, hacen su aparición unos humildes seres que, en lugar de abandonar a sus descendientes a su suerte, los alimentan y cuidan durante un tiempo para poder así transmitirles ciertos aprendizajes que les permitirán sobrevivir en mejores condiciones; son los primeros mamíferos.

A las 22,30 h del día 29 de diciembre, hace 65 millones de años, un gran asteroide se precipitó sobre la Tierra provocando una colosal catástrofe ecológica que supuso la desaparición de numerosísimas especies, entre ellas los grandes dinosaurios. De nuevo las leyes de la naturaleza se imponían con contundencia. Algunos reptiles como las tortugas, pequeños saurios y algunos ofidios sobrevivieron. La oscuridad sobrevenida por el polvo que cubrió todo el planeta, determinó la desaparición de bosques y selvas con toda la comunidad de animales y vegetales que contenían. Las temperaturas descendieron dramáticamente por falta de irradiación solar y las condiciones medioambientales cambiaron drásticamente; sólo los más adaptables lograron sobrevivir.

Sobre las 22 h del 30 de diciembre, hace unos 45 millones de años, ciertos mamíferos se habían especializado a la vida arborícola. Sus ojos se situaban en la parte frontal de la cabeza para asegurar una buena visión binocular y poder saltar de rama en rama con seguridad, además, su vista era capaz de percibir una extensa gama de colores para poder así distinguir las bayas comestibles de las venenosas. Eran sociables y vivían en grupos colaborativos con jerarquías bien definidas.

Finalmente, en el día de la nochevieja cósmica, la Tierra entró en un prolongado período de sequía. Los bosques y selvas mermaron su extensión para dar paso a extensas sabanas en las que pastaban grandes manadas de herbívoros que eran acechados por astutos depredadores. Estos aguardaban ocultos en los espesos herbazales el descuido de alguna confiada presa. Siendo las 19 h y 40 m del 31 de diciembre, hace unos 7 millones de años, una clase de simios arborícolas se vio forzada a buscar el alimento en el suelo. Si bien su refugio eran los árboles, pasaban cada vez más tiempo en el suelo buscando frutos que caían de los árboles, hormigas, larvas de coleópteros e incluso la carroña que los carnívoros habían abandonado. Para sobrevivir, se veían forzados a erguirse sobre sus patas traseras para así poder otear por encima del peligroso herbazal y evitar a los depredadores. Y de nuevo, las leyes de la naturaleza volvieron a dictar sentencia: Muchos murieron como presas de los carnívoros y los que sobrevivieron procrearon y transmitieron sus

genes a futuras generaciones. Poco a poco, estos seres iban dominando la bipedestación al tiempo que su cerebro iba aumentando en tamaño y prestaciones. Al quedar libres de la locomoción, las extremidades anteriores de estos seres se convirtieron en manos prensiles.

Las características de estos seres eran realmente extraordinarias para el contexto en el que vivían. Eran capaces de transmitir una variada gama de emociones a sus congéneres, se ayudaban de rudimentarios artefactos (piedras y huesos) para escarbar el suelo y acceder al interior de los hormigueros, y lo más importante, su gran adaptabilidad les permitió colonizar áreas cada vez más extensas y variadas. Por entonces, eran las 21 h y 25 m del último día del año cósmico.

Siendo las 22 h y 30 m, estos seres habían alcanzado un desarrollo cerebral que les permitía elaborar construcciones mentales. En ese momento, la evolución cósmica estaba dando a luz al pensamiento consciente. Estos seres eran capaces de elegir una piedra de forma y textura adecuada que golpeaban hasta darle una forma que su cerebro consideraba útil para ciertas operaciones. También estos seres habían inventado un código de gruñidos y sonidos que les permitía comunicarse entre sí informaciones vitales, como por ejemplo, la presencia de un depredador, el hallazgo de comida y su emplazamiento, etc. Su éxito zoológico era tal que en poco tiempo se extendieron por Europa y Asia, colonizando así buena parte del planeta.

Si consideramos que el presente es las 0 h, 0 m y 0 s del día 1 de enero del nuevo año cósmico, hace tan sólo 5 minutos, siendo las 23 h 55 m, surgió un nuevo ser cuyo desarrollo cerebral, habilidades colaborativas y capacidades adaptativas eran tales que en tan solo unas décimas de segundo cósmico, se expandieron desplazando a sus primitivos congéneres e incluso, aprovechando la bajada del nivel del mar en la última glaciación, pasaron del continente asiático al americano, colonizando este último en un tiempo récord.

Para terminar, relataremos qué pasó en el último minuto del año cósmico: Hace 55 segundos (unos 23.000 años) la imaginación de estos seres les indujo a dibujar y pintar en las paredes y techos de las cuevas que les servían de morada, toda una variada gama de animales y escenas de caza que han pervivido hasta hoy, dándonos así una valiosa información de cómo era su vida. A las 23 h 59 m y 54 s un pueblo asentado en la ribera del Nilo tenía una cultura y organización social muy avanzadas, estaban gobernados por un individuo al que consideraban un dios y se afanaban en la construcción de un enorme mausoleo de forma piramidal para su líder.

Hace 4,65 segundos, siendo las 23 h 55 m y 26 s, uno de estos seres moría clavado en un madero, víctima del miedo y la incompreensión. Predicaba y enseñaba ideas rompedoras con lo establecido entonces, los jefes temieron perder su status y decidieron su muerte, una muerte cruel e ignominiosa. Pero sus enseñanzas cambiaron la historia. Ciertamente, no todo era bueno en estos extraordinarios seres. Hace 1,10 segundos del año cósmico, un puñado de individuos al mando de un visionario atravesó el océano atlántico a bordo de tres naves, y una centésima de segundo más tarde, otro pequeño grupo consiguió navegar alrededor del planeta.

Hace 0,2 segundos cósmicos, siendo las 23 h, 59 m y 59,82 s estos seres, se enzarzaron en una sangrienta y absurda contienda que costó más de cinco millones de víctimas. Parecía que una locura colectiva aquejaba a toda la especie, tiraron por los suelos todos los avances que evolutivamente habían logrado y se dejaron llevar por toda la carga negativa que subyace en su mente. Finalmente, se impuso el bando que poseía un arma que utilizaba la misma energía que había alumbrado el universo desde su principio. ¡Cruel ironía! Si la historia del cosmos deja bien

claro que la supervivencia o la desaparición están sujetas a las leyes inexorables de la naturaleza, estos seres se demostraron a sí mismos ser capaces de autodestruirse, algo que no hace ninguna otra especie viva.

Actualmente, a las 0,00 h del día 1 de enero del siguiente año cósmico, estos seres pueblan la Tierra entera; desde el punto de vista medioambiental, son realmente una plaga. Viven en grandes ciudades, se comunican instantáneamente entre ellos a grandes distancias, estudian la naturaleza y, como hicieron sus antepasados, sueñan con colonizar nuevos mundos, esta vez más allá de las fronteras de la Tierra. Su destino está en parte en sus manos pero, a la larga, será la naturaleza la que decida su futuro.

Este capítulo final ha pretendido presentar de forma intuitiva algo tan extenso e intrincado como la historia del Cosmos. Puede, amable lector, que te haya parecido denso y largo pero, por encima de todo, quédate con la convicción de que, lo que has leído en este libro, no es sino algunas de las cosas que los átomos de hidrógeno son capaces de hacer si se les concede 13.800 millones de años de evolución cósmica.

EPÍLOGO

UN PUNTO AZUL CLARO

La sonda Voyager 1 fue lanzada por la NASA en 1977 con el fin de explorar los planetas gigantes y las regiones más externas del sistema solar. Hace varios años que rebasó sus límites y actualmente se aleja de él, viajando a una velocidad de 61.000 kilómetros por hora. Se espera que la nave siga funcionando hasta el año 2025 aproximadamente, cuando sus generadores termoeléctricos no sean ya capaces de suministrar energía para ninguno de sus instrumentos.



Figura 168 La Tierra, vista desde los confines del sistema solar. (Fotografía tomada por la sonda Voyager 1 el 14 de febrero de 1990 (NASA)).

El 14 de febrero de 1990, siguiendo una sugerencia de Carl Sagan, la sonda espacial Voyager 1 volvió hacia atrás sus cámaras y tomó una fotografía de la Tierra desde unos 6.050 millones de kilómetros de distancia. Esa imagen, en la que nuestro planeta aparece como un pequeño punto superpuesto en un rayo de luz solar, se convirtió rápidamente en una de las imágenes más

emblemáticas e influyentes de la historia de la ciencia. La contemplación de nuestro planeta como una mota de polvo perdida en la inmensidad del cosmos, suscita sentimientos de humildad y reflexiones acerca de nuestro papel en el universo, que Carl Sagan plasmó admirablemente en los párrafos que a continuación se transcriben:

“Desde este lejano punto de vista, la Tierra puede no parecer muy interesante. Pero para nosotros es diferente. Considera de nuevo ese punto. Eso es aquí. Eso es nuestra casa. Eso somos nosotros. Todas las personas que has amado, conocido, de las que alguna vez oíste hablar, todos los seres humanos que han existido, han vivido en él. La suma de todas nuestras alegrías y sufrimientos, miles de ideologías, doctrinas económicas y religiones seguras de sí mismas, cada cazador y recolector, cada héroe y cobarde, cada creador y destructor de civilizaciones, cada rey y campesino, cada joven pareja enamorada, cada madre y padre, cada niño esperanzado, cada inventor y explorador, cada profesor de moral, cada político corrupto, cada “superestrella”, cada “líder supremo”, cada santo y pecador en la historia de nuestra especie ha vivido ahí —en una mota de polvo suspendida en un rayo de sol. La Tierra es un escenario muy pequeño en la vasta arena cósmica. Piensa en los ríos de sangre vertida por todos esos generales y emperadores, para que, en gloria y triunfo, pudieran convertirse en amos momentáneos de una fracción de un punto. Piensa en las interminables crueldades cometidas por los habitantes de una esquina de este píxel sobre los apenas distinguibles habitantes de alguna otra esquina. Cuán frecuentes sus malentendidos, cuán ávidos están de matarse los unos a los otros, cómo de fervientes son sus odios. Nuestras posturas, nuestra importancia imaginaria, la ilusión de que ocupamos una posición privilegiada en el Universo... Todo eso es desafiado por este punto de luz pálida. Nuestro planeta es un solitario grano en la gran y envolvente penumbra cósmica. En nuestra oscuridad — en toda esta vastedad—, no hay ni un indicio de que vaya a llegar ayuda desde algún otro lugar para salvarnos de nosotros mismos. La Tierra es el único mundo conocido hasta ahora que alberga vida. No hay ningún otro lugar, al menos en el futuro próximo, al cual nuestra especie pudiera migrar. Visitar, sí. Colonizar, aún no. Nos guste o no, por el momento la Tierra es donde tenemos que quedarnos. Se ha dicho que la astronomía es una experiencia de humildad, y formadora del carácter. Tal vez no hay mejor demostración de la locura de la soberbia humana que esta distante imagen de nuestro minúsculo mundo. Para mí, subraya nuestra responsabilidad de tratarnos los unos a los otros más amable y compasivamente, y de preservar y querer ese punto azul pálido, el único hogar que siempre hemos conocido.”

**Listado alfabético de todos los conceptos tratados en este libro,
que el lector encontrará por medio del buscador de su aplicación de
lectura pdf"**

A

Ácidos nucleicos
Acreción
ADN
Adams, John
Adaptabilidad
Adición de velocidades
Agua, calor específico
Agua, capilaridad
Agua, dilatación anómala
Agua, poder disolvente
Agua, molécula
Agua, tensión superficial
Agujero negro
Agujero negro supermasivo
Agustín de Hipona
Alelo
Amoniaco (molécula)
Ampère, Louis
Angstrom
Anillo protoplanetario
Anión
Año cósmico
Año-luz
Apariencias experimentales
ARN
Aristarco de Samos
Aristarco, método de
Aristóteles
Arquímedes, Principio de
Astrología
Astronomía
Atmósfera, circulación general
Átomo
Autótrofos (seres)
Avogadro, número de

B

Bacon, Francis
Barión
Bernard, Claude
Biblioteca de la vida
Big-Bang
Böhr-Sommerfeld, modelo atómico
Bombardeo intenso tardío

Bosón

Bosón de Higgs
Brahe, Tycho
Bruno, Giordano
Bunge, Mario

C

Cadena trófica
Calendario cósmico
Calor, energía en tránsito
Calor latente de fusión
Calor latente de vaporización
Calórico
Campo magnético terrestre
Cantidad de movimiento
Capas electrónicas
Caracol de relojería
Carga eléctrica
Carga de color
Catión
Cavendish, Henry
Célula aploide
Célula de Ferrell
Célula de Hadley
Célula diploide
Célula eucariota
Célula procariota
Célula polar
C.E.R.N.

Cesio

Cesio (reloj de)

Chancourtois, Alkexandre

Ciclo CON

Ciclo de la energía

Ciclo de las rocas

Ciclo del agua

Ciclo del carbono

Ciclo del carbono inorgánico

Ciclo del carbono orgánico

Ciclo del fósforo

Ciclo del nitrógeno

Ciclo del oxígeno

Ciclo del ozono

Ciencia

Ciencia ¿Cómo se hace?

Cinturón de asteroides

Clasificación espectral de estrellas

Clasificación linneana de los seres vivos

Clasificación de las ciencias

Clorofila

Colisionador de hadrones

Conceptos científicos

Condritas carbonáceas

Confinamiento inercial

Confinamiento magnético

Congreso Solvay de 1927

Conocimiento

Conocimiento científico

Conocimiento ordinario

Constante de Coulomb

Constante de Planck

Constante gravitatoria

Constante solar

Contracción de longitudes

Copérnico, Nicolás

Copérnico, procedimiento de

Corredera de barquilla

Corriente del Golfo

Corrientes convectivas del magma

Cosmología

Coulomb, Charles

Coulomb, balanza de

COVID-19

Cromosoma

Cronómetro de marina

Cuantización de la energía

Cuerpo negro, poder emisivo

Cuestionario ramificado

D

Dalton, John

Darwin, Charles

Darwin, pinzones de

De Broglie, Louis

Demócrito de Abdera

Demócrito, Postulados de

Depredación

Deriva continental

Descartes, Renato

Diagrama espacio-tiempo

Diagrama Hertzprung-Russell

Diagrama de Minkowsky

Diagrama de Moeller

Dilatación del tiempo

Dilatación térmica

Disco de acreción

Disco de oro (de la sonda Voyager)

Disco protoplanetario

Distancia navegador-satélite

Döbereiner, triadas de

Doppler, Christian A.

Dorsal Atlántica

E

Ecuaciones de Maxwell

Efecto Doppler

Efecto fotoeléctrico

Electricidad

Electrones de valencia

Elementos, abundancia en el universo

Enana blanca

Enana marrón

Enana negra

Energía, concepto

Energía de enlace nucleón-nucleón

Energía de Gibbs

Energía interna

Energía oscura

Enlace covalente

Enlace iónico

Enlace polar

Enlaces químicos

Entalpía

Entalpía de formación

Entalpía libre

Eón

Eón Hadeico

Epípiclos

Epistemología

- Equivalencia masa-energía
 Era de la Gran Unificación
 Era de la recombinación
 Era leptónica
Eratóstenes de Cirene
 Escala de Pogson
 Escala internacional de temperaturas
Escala universal de longitudes
 Espacio absoluto
 Espacio físico
 Espacio y tiempo relativos
 Espacio-tiempo
Espectro electromagnético
Estabilidad nuclear
 Estequiometría
 Estrella de neutrones
 Estrella gigante
Estrella masiva
Estrella joven
 Estrellas más brillantes
Estructura del conocimiento científico
 Éter lumínico o espacial
 Evolución (seres vivos)
 Experimentación
 Experimento científico
Experimento de Mayer-Joule
 Experimento de Michelson-Morley
Experimento de Michelson-Morley (esquema)
Experimento de Rutherford
 Experimento de Urey y Miller
 Explosión cámbrica
- F**
 Factor relativista
Faraday, Michel
 Femtómetro
 Fenotipo
 Fermat, Principio de
 Fermión
 Física de Partículas
 Flecha del tiempo
 Flujo (eléctrico o magnético)
 Foliot
 Formación del agua, calor molar
 Fotosíntesis
 Francisco de Asís
 Fusión nuclear
- G**
 Galaxia Andrómeda
- Galileo
Galileo, experimento
 Gametogénesis
Gea (mitología)
Gen
 Genoma
 Genotipo
 Geometría
 Gigante roja
 G.P.S.
 Gravitación Universal (deducción)
- H**
 Hadrón
 Halley, Edmund
 Harrison, John
 Heissenberg, Werner
 Herchel, William
 Hertz, Heinrich
 Heterótrofos (seres)
 Hiparco de Nicea
 Hipótesis científica
 Hipótesis empírica
 Hipótesis plausible
 Hipótesis convalidada
Historia de la Tierra
Historia del Universo
 Horizonte de sucesos
 Hubble, Edwin
- I**
 Impulso mecánico
 Interacción radiación-átomo
 Interacciones fundamentales
Interferómetro
 Investigación científica
 I.U.P.A.C.
- J**
 Joule, James P.
- K**
 Kekulé, August
 Kepler, Johannes
- L**
 Lamarck, Jean Baptiste
 Lamarck, Jean Baptiste,
 Leyes
 Lavoisier, Antoine

Lavoisier, experimento

Le Verrier, Urban

Lemaître, Georges

Lenz, Heinrich

Leptón

Ley de Ampère-Maxwell

Ley de Bragg

Ley de conservación de la masa

Ley de la Electroestática

Ley de Faraday-Lenz

Ley de la Gravitación

Ley de la inducción electromagnética

Ley de Planck

Ley de Snell

Ley de Stefan-Boltzmann

Ley de Weber-Fechner

Ley de Wien

Leyes científicas

Leyes de Kepler

Leyes de Mendel

Líneas de fuerza

Luminosidad

Luna, formación

M

Magnitud absoluta

Magnitud aparente

Magnitud estelar

Mariposa del abedul

Masa, variación relativista

M.A.S.E.R

Materia bariónica

Materia oscura

Maxwell, James Clerk

Mayer, Julios

Mecánica cuántica

Mecánica lagrangiana

Meiosis

Mendel, Gregor

Mendeléyev, Dimitri I.

Mesón

Metabolismo

Método científico

Método científico, pasos

Método científico

Meyer, Julius L.

Microscopio de efecto túnel

Microscopio de fuerza atómica

Microscopio óptico

Mitosis

Modelo atómico de nube de carga

Modelo atómico de capas

Modelo célula

Modelo científico

Modelo cosmológico standard

Modelo Standard de la Física de Partículas

Modelos atómicos

Mol

Monóxido de carbono, intoxicación

Moseley, Henry

Movimiento browniano

Muerte térmica del universo

Muestreo estadístico

Muestreo sistemático

Mutación

N

Nebulosa Trífida

Newlands, John

Newton, Isaac

Newton, Principios de la Dinámica

Niveles energéticos

Núcleo atómico

Núcleo atómico, composición

Nucleones

Nucleogénesis

Nucleogénesis explosiva

Nucleosíntesis del carbono

Nucleosíntesis estelar

Nucleosíntesis primigenia

Número atómico

Número cuántico principal

Número másico

Nutación, movimiento

O

Observación científica

Obstáculo epistemológico

Obstáculo intelectual

Ocurrencias

Onda electromagnética

Ondas gravitacionales

Orbitales atómicos

Orbitales híbridos

Ørsted, Hans Christian

Osa Mayor, evolución

Ósmosis

P

Pangea

- Par electrón-positrón
Paradoja de los gemelos
Paralaje
 Parsec
 Partículas elementales
Péndulo termocompensado
 Pensamiento antropocéntrico
 Pensamiento científico
 Pensamiento espontáneo
Pilares de la Creación
Pirámide trófica
Placas tectónicas (movimiento)
Placas tectónicas (delimitación)
 Planck Max
 Planetesimal
 Plasma
Plasmas naturales y artificiales
 Platón
 Potencia del Sol
 Principio de Aufbau
 Principio de Conservación de la Energía
 Principio de de Broglie
 Principio de evolución hacia el mayor caos
 Principio de exclusión
 Principio de Indeterminación
 Principio de la Calorimetría
 Principio de máxima multiplicidad
 Principio de mínima energía
 Principio Primero de la Termodinámica
 Principio Segundo de la Termodinámica
 Principios de Einstein
 Principios de la Dinámica
 Problemas científicos
 Procedimientos iterativos
 Proceso Triple Alfa
 Procesos endotérmicos
 Procesos exotérmicos
Propulsor iónico
 Protoestrella
 Protoplanetaqrio, disco
 Proyecto I.T.E.R.
 Ptolomeo, Claudio
 Punto de ebullición
- Q**
- Quark
- R**
- Radiación bariónica
Radiación cósmica de microondas
 Radiación electromagnética
 Radiación leptónica
 Rankine, William
 Reactor de fusión Tokamak
 Recurso de accesibilidad
 Reflexión de la luz
Relación protones-neutrones
 Relatividad especial
Reloj de cuarzo
Reloj de Huygens
 Relojes atómicos
 Relojes de sol
 Relojes mecánicos
 Rendimiento
 Reproducción asexual
 Reproducción sexual
 Respiración
 Richter, Benjamin
 Rocas ígneas
 Rocas metamórficas
 Rocas sedimentarias
Römer, Öle
 Rutherford, Ernest
- S**
- Sagan, Carl
Satélites GPS
 Sentido común
 Simultaneidad
 Singularidad
 Síntesis proteica
 Sistema Periódico de los elementos químicos
Sistema Solar
Sistema Solar, formación
 Snell, ley de
 Solvatación
 Spin
 Supernova
- T**
- Tabla Periódica de Mandeléyev*
Tabla Periódica Moderna
 Tablas alfonsíes
 Tácticas de la ciencia
 Técnicas científicas conceptuales
 Técnicas científicas empíricas
 Teorema de las "fuerzas vivas"
 Teoría cinética de los gases
 Teoría cinética de la materia
 Teoría de Dalton

- Teoría de la Abiogénesis
Teoría de la Expansión del Universo
Teoría de la Panspermia
Teoría de la Relatividad
Teoría de los epiciclos
Teoría de los Planetésimos
Teoría de Placas Tectónicas
Teoría del Big-Bang
Teoría del calórico
Teoría del conocimiento
Teoría del disco protoplanetario
Teoría del Estado Estacionario
Teoría del flogisto
Teoría del Gran Impacto
Teoría Electromagnética
Teoría Evolución de las Especies
Teoría General de Campos
Teoría General de la Relatividad
Teoría geocéntrica
Teoría Hidrotermal
Teoría Tectónica
Teorías
Tiempo Atómico Internacional
Tiempo cíclico
Tiempo lineal (concepto)
Tierra, estructura interna
- Tomás de Aquino
Trabajo, energía en tránsito
Triangulación
Trilateración
Tube de Newton
- U**
Unidad astronómica
Unidad de masa atómica (u.m.a.)
Universo, composición porcentual
Urano, descubrimiento
- V**
Valencia química
Variación relativista de la masa
Velocidad de escape
Velocidad de la luz
Vía Láctea
Virus
Volante termocompensado
Voyager I (sonda de la NASA)
- W**
Wallace, Alfred R.
Wallace, línea de
Wegener, Alfred

SELECCIÓN BIBLIOGRÁFICA

SECCIÓN I: LA CIENCIA

- Asimov, Isaac (1984) *Breve historia de la Química*, Madrid, Alianza Editorial
- Bernal, John (1979) *Historia social de la ciencia*, Barcelona, Ed. Península.
- Bunge, Mario (1983) *La investigación científica: Su estrategia y su filosofía*, Barcelona, Ed. Ariel
- Bunge, Mario, (1980) *Epistemología, ciencia de la ciencia*, Barcelona. Ed. Ariel
- Dewit, Richard (2013) *Cosmovisiones: Una introducción a la historia y filosofía de la ciencia*, Barcelona, Biblioteca Buridan.
- Farías, Daniel y Calvo, Juan Carlos (2018) *Las ideas que cambiaron el mundo*, Barcelona, Ed. Buridán.
- Gérardin, Lucien (1972) *La alquimia*, Barcelona, Ed. Martínez Roca.
- Grant, Edward (1983) *La ciencia física en la Edad Media*, México, DF, Ed. Fondo de Cultura Económica.
- Hall, Rupert (1985) *La Revolución Científica*, Barcelona, Ed. Crítica.
- Hawking, Stephen (ed.) (2004) *A hombros de gigantes*, Barcelona, Ed. Crítica
- Holton, Gerald (1979) *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Barcelona, Ed. Reverté.
- Hull, L.W.H. (1970) *Historia y filosofía de la ciencia*, Barcelona, Ed. Ariel.
- Jeans, James (1982) *Historia de la Física*, México DF, Ed. Fondo de Cultura Económica.
- Kuhn, Thomas (2013) *Estructura de las revoluciones científicas*, México DF, Fondo de Cultura Económica.
- Mason, Stephen (1984) *Historia de las ciencias* (Vol. I, II y III), Madrid, Alianza Editorial
- Nagel, Thomas (2014) *La mente y el cosmos*, Ed, Biblioteca Nueva
<https://www.troa.es/editorial/biblioteca-nueva/3223/>
- Popper, Karl (2011) *Teoría cuántica y el cisma de la física: Posts criptum a la lógica de la investigación científica*, Madrid, Ed. Technos.
- Popper, Karl (1962) *La lógica de la investigación científica*. Madrid, Ed. Technos.
- Taton, René (1972) *Historia general de las ciencias*, 4 vols. Barcelona, Ed. Destino.
- Tiberius, Jose (2020) *El método científico global*, Ed. Molwick.
<https://molwick.com/es/libros/z141-libros-metodos-cientificos.pdf>

SECCIÓN II: ESPACIO Y TIEMPO

- Asín Martín, Fernando (1991) *Astronomía*, Madrid, Ed. Paraninfo.
- Ferreira, Máximo y De Almeida, Guilherme (1993) *Introdução à astronomia e às observações astronómicas*, Lisboa, Plátano Ed. Técnicas

- Hacyan, Shahan (1995). *Relatividad para principiantes*. México DF. Fondo de Cultura Económica.
- Hawking, Stephen (ed.) (2004) *A hombros de gigantes*, Barcelona, Ed. Crítica
- Hawking, Stephen (1988) *Historia del tiempo*, Barcelona, Ed. Crítica.
- Hawking, Stephen; and Ellis, G. F. R. (1973). *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kaufman, William (1991) *Universe*, New York, Freeman and Co. Eds.
- Moura, Ronaldo (1987) *Diccionario enciclopédico da Astronomia*, Rio de Janeiro, Ed. Nova Fronteira.
- North, J.D. (1990) *The Measure of the Universe. A History of Modern Cosmology*. Oxford University Press.
- Ronan, Colin (1987) *História ilustrada da ciencia*, Vol. I, II, III y IV Univ. De Cambridge
- Sagan , Carl 1982) *Cosmos*, Barcelona, Ed. Planeta.
- Smith, Robert W. (1993) *El universo en expansión*. Madrid. Alianza Universidad.
- Steven Weinberg, (1972) *Gravitation and Cosmology: principles and applications of the general theory of relativity*, New York, Wiley Ed.

SECCIÓN III: MATERIA

- Ander, Paul y Sonessa, Anthony (1975) *Principios de química*, México, Ed. Limusa
- Atkins, P.W. y de Paula (2008) *Química Física*. Ed. Panamericana
- Coughlan, G.D., Dodd, J.E. and Gripaos, B.M. (2006). *The Ideas of Particle Physics: An Introduction for Scientists*. Cambridge University Press.
- Eissberg, Robert y Lerner, Lorentz (1983) *Física: Fundamentos y aplicaciones*, (Vol. I y II), Madrid, Mac Graw Hill Ed.
- Griffiths, D.J. (1987). *Introduction to Elementary Particles*. New York, John Wiley & Sons Eds.
- Halzen, Francis & Martin, Alan (1985) *Quarks And Leptons. An Introductory Course In Modern Particle Physics*, New York, Wiley and Sons, Eds.
- Kotz, John, Treichel, Paul y Harman, Patrick (2003) *Química y reactividad química*, Madrid, Ed. Paraninfo
- Levine, Ira N. (2001). *Química cuántica*. Madrid, Pearson Educación España.
- Masterton, W.L. y Hurley, C.N. (2003) *Química: Principios y reacciones*, Madrid, Ed. Paraninfo.
- Oerter, Robert (2006). *The Theory of Almost Everything: The Standard Model, the Unsung Triumph of Modern Physics*, Kindle Ed.
- Reboiras, M.D. (2008) *Química, la ciencia básica*, Madrid, Ed. Paraninfo.
- Rodríguez Mellado, José Miguel; Marín Galvín, Rafael (1999). *Fisicoquímica de aguas*. Madrid, Ediciones Díaz de Santos.
- Sánchez del Río, Carlos (2003). «Estructura de los núcleos atómicos». En C. Sánchez del Río, ed. *Física cuántica*. Madrid, Ediciones Pirámide
- Schumm, Bruce (2004). *Deep Down Things: The Breathtaking Beauty of Particle Physics*. Johns Hopkins University Press.
- Tiberius, José (2009) *Astrofísica y Cosmología Global*, Ed. Molwick
<https://es.scribd.com/document/420846541/Astrofisica-Global>
- Whitten, Kenneth y Gailei, Kenneth ((1985) *Química general*, Mexico DF, Ed. Interamericana

SECCIÓN IV: ENERGÍA Y CAMBIOS

- Aguirre, Emiliano (Coord.) (1989). *Paleontología*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Nuevas tendencias.

- Benedetto, J. L. (2018). *El Continente de Gondwana a través del tiempo*, Academia Nacional de Ciencias. Córdoba, Argentina.
- Brague, Rémi (2011) *La sabiduría del mundo: Historia de la experiencia humana del universo*, Madrid, Ediciones Encuentro, S.A.
- Cepa, Jordi (2007) *Cosmología Física*. Madrid, Ed. Akal
- Feduchi, Elena et al. (2010). *Bioquímica: Conceptos Esenciales*. Madrid: Médica Panamericana
- Hawking, Stephen (1988) *Historia del tiempo*, Barcelona, Ed. Crítica.
- Kolb, E.W. & Turner, M.S. (1990) *The Early Universe*. Boston, Addison-Wesley Eds.
- Longair Malcolm S. (1999) *La evolución de nuestro universo*. Madrid, Ediciones AKAL.
- Meléndez, B. (1990). *Paleontología*. Vol. I, II y III Madrid, Editorial Paraninfo.
- Monroe, James, Wicander, Reed y Pozo, Manuel (2008) *Geología: Dinámica y evolución de la Tierra*, Madrid, Ed. Paraninfo.
- Nelson, David L., Cox, Michael M. y Lehninger, Albert L. (2015) *Principios de Bioquímica*, Barcelona, Ed. Omega.
- Peebles, P.J. (1993) *Principles of Physical Cosmology*, Princeton UP, Princeton NJ,
- Roger, J. (1980). *Paleoecología*. Madrid, Editorial Paraninfo,
- Sagan, Carl (2003) *Un punto azul pálido*, Barcelona, Ed. Planeta.
- Sagan, Carl (1997) *Los dragones del Edén*, Barcelona, Ed. Planeta Agostini
- Sagan, Carl (1985) *La conexión cósmica*, Barcelona, Orbis: Biblioteca de Divulgación Científica.
- Voet, D., Voet, J.G. y Pratt, C.W. (2007). *Fundamentos de Bioquímica. La vida a nivel molecular*. Madrid, Editorial Médica Panamericana.
- Weinberg, Steven (2016) *Los tres primeros minutos del Universo*. Madrid, Alianza Editorial.

SERIES DOCUMENTALES SOBRE COSMOLOGÍA

- Al-Kalili, Jim (2016) *El comienzo y el final del universo*. (2 episodios).
- Base Productions (National Geographic Channels) (2009) *El Universo conocido*. (17 episodios).
- Bigger Bang Communications (2016) *Genios de Stephen Hawking*. (6 episodios).
- Blu Ant Media (2015) *Misterios de la evolución*. (6 episodios).
- BBC y A&E (1999) *Los planetas* (8 episodios).
- Essential Media. Arte France (2018) *Universo Vivo*. (4 episodios).
- Fight Science Productions. National Geographic Channels (2009) *El Universo conocido*. (17 episodios).
- Flight 33 Productions (2011) *El Universo*. (78 episodios)
- Long Wolf, Arte France. National Geographic Channel (2011) *La fábrica del Cosmos*. (4 episodios).
- Pionner Productions (2019) *Historia del Universo* (42 episodios).
- Pionner Productions. Science Channel (2012) *Cómo funciona la Tierra*. (8 episodios).
- Revelations Entertainment. Science Channel&Discovery (2013) *Secretos del Universo*. (62 episodios).
- Sagan, Carl (1985) *Cosmos: un viaje personal*, (13 episodios).
- Tyson, Neil de Grasse (2014) *Cosmos: una Odisea espaciotemporal* (13 episodios).
- Tyson, Neil de Grasse (2019) *Cosmos: Mundos posibles*. (12 episodios).
- Windfall Films (2018) *Desmontando el Cosmos*. (12 episodios).
- Workaolic Productions. Discovery Channel (2008) *Colisiones cósmicas*. (3 episodios).
- ZDF (2019) *Grandes momentos de la Evolución*. (2 episodios).

