

Lección Inaugural del Curso Académico 2007-2008

CIEN AÑOS DE FÍSICA ATÓMICA. ENSEÑANZAS Y PERSPECTIVAS

Luis Carlos Balbás Ruesgas

Catedrático de Física Atómica
y Nuclear de la Universidad de Valladolid

Valladolid, 2007



Universidad de Valladolid

Lección Inaugural del Curso Académico 2007-2008

CIEN AÑOS DE FÍSICA ATÓMICA. ENSEÑANZAS Y PERSPECTIVAS

Lección Inaugural del Curso Académico 2007-2008

CIEN AÑOS DE FÍSICA ATÓMICA. ENSEÑANZAS Y PERSPECTIVAS

Luis Carlos Balbás Ruesgas

Catedrático de Física Atómica
y Nuclear de la Universidad de Valladolid

Valladolid, 2007



Diseño cubierta: Área de Imagen Corporativa. Universidad de Valladolid.

Imprime: Gráf. A. Martín, S. L.
Paraíso, 8. Valladolid

Depósito Legal: VA. 866.-2007



Magnífico y Excelentísimo Señor Rector,
Claustro Universitario,
Excelentísimas e Ilustrísimas Autoridades,
Profesores, Personal de Administración y Servicios,
Alumnos,
Señoras y Señores:

I. INTRODUCCIÓN Y RESUMEN

Es un gran honor haber sido propuesto por mis compañeros del Área de Ciencias Experimentales para intervenir en este acto. A todos ellos agradezco su confianza y espero no defraudarles. Ciertamente es una satisfacción y una responsabilidad dirigirme a un auditorio tan cualificado como variado, en este año que ha sido declarado año de la ciencia en España. La buena obra de este año es que la ciencia sea mejor conocida y apreciada por la sociedad. Por otro lado, nuestra responsabilidad como científicos pagados por el erario público, es explicar a la sociedad los servicios que la ciencia presta y que justifiquemos nuestro salario, así como las inversiones y subvenciones para infraestructura científica que reclamamos y, a veces, obtenemos. Y esta rendición de cuentas del dinero público hemos de hacerla no en menor medida que lo deben hacer las iniciativas privadas con justo ánimo de lucro¹.

He elegido para esta lección el título «*Cien años de Física Atómica: enseñanzas y perspectivas*», con la intención de transmitir algunas ideas que he madurado en los 40 años de Físico en ejercicio, desde que en el curso 1967-68 me licencié con la primera promoción de Física de la Universidad de Valladolid. Debo recordar ahora que el primer impulso para implantar los

¹ El Consejo de Ministros aprobó el 15 de enero de 2007 un real decreto que declara el año 2007 como «Año de la Ciencia» y otro que modifica las normas para conceder deducciones fiscales a las actividades de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) tecnológicas, y amplía los órganos competentes para avalar la concesión de esas deducciones fiscales.

estudios de Física en Valladolid, fue dado por el profesor Salvador Velayos Hermida, quien, desterrado de Madrid al terminar la guerra civil, desempeñó una Cátedra de Física en esta Universidad, con muchas dificultades de medios materiales y humanos. Don Salvador dictó la lección de apertura del curso 1951-52, con el título *Las partículas elementales de la Física*, y en el curso 1952-53 regresó a Madrid. Diez años después, el profesor Don Fernando Senent inauguró los estudios de Ciencias Físicas en la Universidad de Valladolid, y el profesor Don José Casanova Colás (†)* empezó a enseñar y a levantar la sección de física desde la precariedad más clamorosa imaginable.

En esta intervención voy a retomar la lección de Don Salvador Velayos en el punto donde la dejó en 1951. En ese año, las partículas elementales censadas en la Enciclopedia Británica eran el electrón (1898), el protón (1919) y el neutrón (1932), mas el fotón (1905), que es la partícula asociada al campo electromagnético bajo el que interaccionan dichas partículas. El pión (1947) y el muón (1937) sufrieron un confuso proceso de verificación experimental, y el neutrino, cuya existencia casi todos los físicos aceptaban como real desde 1930, tuvo que esperar a 1956 para entrar en el selecto y minoritario club de las partículas elementales censadas en la Enciclopedia Británica², después de pasar por una de las mas rigurosas y difíciles comprobaciones experimentales de la Física [F. Raines and C. L. Cowan Jr, *Detection of the Free Neutrino*, Phys. Rev. 92, 830 (1953); C. L. Cowan et al, *Detection of the Free Neutrino: A confirmation*, Science, 124, 103 (1956)].

A partir de 1952, con la puesta en marcha del primer sincrotrón de protones de 2.3 giga-electrón-voltios (GeV), se inicia una etapa de crecimiento vertiginoso del número de partículas elementales descubiertas, cuyo estudio, clasificación y búsqueda de las leyes básicas subyacentes, da lugar a una

* Don José Casanova Colas falleció el 12 de julio de 2007, cuando las pruebas de imprenta de esta lección estaban terminadas. Quiero añadir en esta nota que fue un gran profesor y un entusiasta y eficiente gestor. Gracias a él la sección de físicas de esta Universidad salió de la nada, maduró y alcanzó el excelente nivel de reconocimiento que tiene en la Universidad española.

² En 1771 fue completado el trabajo para la primera edición de la *Encyclopedia Británica*, un diccionario de artes y ciencias compilado por un conjunto de caballeros de Escocia. La entrada *átomo*, escrita por William Smellie, hombre renombrado por su devoción al estudio y al whisky, dice lo que sigue: «*Átomo*: En filosofía, una partícula de materia tan pequeña que no admite división. Los átomos son la *minima naturae* y se conciben como los primeros principios o componentes de toda magnitud física». Demócrito y Epicuro habrían hallado incompleta esa definición, ya que creían que los átomos existen en una variedad infinita de tamaños y formas, siendo cada variedad incapaz de transformarse por sí misma en otra. [A. Pais, 1984].

nueva disciplina, la Física de Altas Energías. Se consolidó así el desarrollo de la Gran Ciencia, con inmensos recursos materiales y humanos, que había nacido durante la segunda guerra mundial y se había desarrollado bajo criterios industriales y militares, con los modelos del proyecto Manhattan y del proyecto del radar. También en 1952 se probó la primera bomba termonuclear (fusión nuclear), se consolidó la guerra fría, y la militarización de la ciencia ya era imparable. En el apéndice I doy una breve noticia de la llamada Gran Ciencia y en el apéndice II un comentario sobre la militarización de la ciencia. Salvo este párrafo y dichos apéndices, en esta lección hablaré únicamente del mundo de los átomos, dejando el mundo nuclear y subnuclear a otros expertos.

En el capítulo II haré unas reflexiones sobre las sinergias I+D+i, la financiación pública y privada de la ciencia y el papel de los científicos en el mundo actual. Tomando como pretexto un cuadro alegórico de Lucas Jordán, repasaré brevemente el nacimiento de la ciencia moderna y el concepto de Investigación + Desarrollo + innovación (I+D+i), que ha producido las sucesivas revoluciones industriales, e inspira los objetivos del desarrollo para el siglo XXI. En el capítulo III nos situamos a principios del siglo XX, con el triunfo de la termodinámica, el paradigma de la energía y sus transformaciones que marcan un siglo de consumo y desarrollo frenéticos. Revisaré el debate de hace 100 años entre los partidarios de los átomos, con Boltzmann y su mecánica estadística en cabeza, y sus detractores desde diferentes campos, liderados por Mach, Ostwald y Loschmidt. El debate fue resuelto a favor de Boltzmann por Jean Perrín en 1907, mediante la confirmación experimental de una relación teórica sobre el movimiento Browniano dada por Einstein en 1905. Perrín midió el número de átomos que hay en una cantidad macroscópica de materia (un mol, unos pocos gramos de cualquier sustancia), llamado número de Avogadro, confirmando la existencia de los átomos e inaugurando el siglo de la física atómica. En el capítulo IV veremos otro experimento básico (fundador) de la Física Atómica, realizado por Moseley en 1914, quien relacionó la frecuencia de los rayos X característicos de cada elemento con un número entero, llamado número atómico, y que es la carga eléctrica del núcleo atómico, según la teoría precuántica de Bohr de 1913. Este tema dará pie para algunas reflexiones sobre la contribución de la física de las radiaciones elementales, a la física fundamental por un lado, y a la biología y la medicina por otro lado.

En el capítulo V haré una breve mención a las leyes que rigen el mundo de los átomos, que fueron sistematizadas en la Mecánica Cuántica, una creación del primer tercio del siglo pasado, cuya interpretación aun no está exenta de controversias. Como he dicho, dejaremos a un lado el mundo subnuclear de las Altas Energías y las partículas elementales, para quedar-

nos en la Física Atómica, es decir, las propiedades de la materia a bajas energías (electrón-voltios), cuyo dominio de distancias es la diezmilésima de una micra, o sea, una décima de nanómetro ($1 \text{ nm} = 10^{-9}$ metros). A esa distancia, los protones y neutrones se resumen en una partícula puntual, el núcleo atómico, con casi toda la masa del átomo, con carga eléctrica $Z|e|$ ($Z =$ número atómico, $|e| =$ valor absoluto de la carga del electrón), y un momento magnético. En el dominio de la Física Atómica ocurren los fenómenos usuales de nuestra vida, todo lo que nos afecta. Los científicos atómicos, moleculares, de materia condensada, y ópticos, han desarrollado técnicas muy finas para observar y controlar átomos. Estas investigaciones han desembocado en una disciplina lógica, basada en un pequeño número de principios, los postulados de la mecánica cuántica, junto con las propiedades de las partículas relevantes a este nivel —electrones, núcleos atómicos y fotones, que están caracterizadas simplemente por su masa, carga y *spin*— y las interacciones electromagnéticas entre ellas. En el capítulo VI veremos una aplicación actual de la Física Atómica, los relojes atómicos, cuya enorme precisión es necesaria para coordinar los modernos dispositivos GPS y las comunicaciones globales, entre otras aplicaciones, como la femto-química moderna.

En el capítulo VII veremos brevemente algunas aplicaciones de la nanotecnología, basada en el diseño de la materia átomo por átomo. Aquí, la combinación de experimentos y computación permite avances y aplicaciones espectaculares en muchos campos, desde la química inorgánica a la biología. Hoy día es imaginable diseñar circuitos electrónicos manipulando la materia átomo por átomo. Mediante láseres es posible estirar una cadena individual de ADN y de otras macromoléculas para examinar sus propiedades físicas, así como manipular a nivel atómico nuevos materiales, como las nuevas fases del carbono —fullerenos y nanotubos—, los superconductores de alta temperatura, o materiales magnéticos para *spintrónica* y memoria magnética de alta densidad. Estos sistemas ofrecen por igual tanto cuestiones de física fundamental como una enorme variedad de aplicaciones y oportunidades industriales. Por ejemplo, una comprensión profunda de los efectos cuánticos, en sistemas como el condensado atómico de Bose-Einstein y otros, podría llevarnos a una nueva generación de computadores, los cuánticos. Lo cierto es que una segunda revolución está en marcha en el mundo de la nanoescala, donde convergen los científicos atómicos y moleculares con los de la materia condensada.

Finalmente, en el capítulo VIII se hará una breve reflexión sobre dos enfoques de la ciencia actual, el «reduccionista» y el «emergencia de la complejidad». El esquema reduccionista supone que todo lo que existe puede explicarse a partir de unas pocas ecuaciones (la teoría de todo), mientras que el de la complejidad explica los sistemas macroscópicos a partir de

leyes emergentes que no tienen porqué relacionarse con la teoría del todo. Es como los cuadros de los puntillistas (Seurat, Signac...) que sólo cuando uno se aleja del detalle puede ver el conjunto, o como los modernos Googleramas de Joan Fontcuberta: la imagen es como un palimpsesto o mosaico compuesto de miles de pequeñas teselas, extraídas de Google a partir de palabras clave, y cuyo comportamiento colectivo resulta en una imagen emergente nueva, cambiante mientras la búsqueda continua automáticamente en pos de una aproximación más exacta a la palabra clave introducida en el buscador. La confrontación entre reduccionismo y complejidad, que podríamos encarnar entre Gell-Man y Laughlin, por ejemplo, solo es una reedición de la vieja polémica entre Demócrito y Heráclito, entre Boltzman y Ostwald, entre Einstein y Bohr. De cada confrontación la ciencia ha salido fortalecida con un conocimiento más profundo de la naturaleza y la tecnología ha conseguido nuevos logros y bienes para la humanidad.

Lo mismo podría decirse de una gran novela, como el Quijote, compuesta de muchas historias, en este caso conscientemente enlazadas, para dar una gran historia que trasciende la anécdota. Esa es, en definitiva, mi intención en esta lección: componer, a partir de hechos y anécdotas aisladas, una aproximación cabal de la ciencia básica experimental moderna, como creación humana para uso y disfrute del hombre. En palabras de Pedro Echenique, en el acto de entrega de los premios nacionales de investigación (26 de enero de 2006, Palacio Real):

La ciencia es mucho más que sus aplicaciones prácticas. Es una aventura intelectual, una parte esencial de la cultura moderna, del humanismo moderno que, en los últimos años, ha revolucionado nuestra concepción del mundo y de nosotros mismos. A nuestro parecer, y con el debido respeto y admiración por otras contribuciones, el edificio conceptual de la Ciencia es la obra colectiva cultural más importante de la humanidad... La ciencia, para su entronque con la economía, necesita un desarrollo armónico de lo básico, lo aplicado, el desarrollo y la innovación... Sólo las sociedades que sitúan en un lugar preferente de su escala de valores la dedicación a la Ciencia y la Tecnología serán protagonistas del futuro.

II. EL NACIMIENTO DE LA CIENCIA MODERNA Y LA I+D+i

El cuadro *Minerva como Protectora de las Artes y las Ciencias* de Luca Giordano (**Lucas Jordan**), reproducido en la figura 1, es una alegoría muy actual de cómo los dioses organizan la Investigación, el Desarrollo y la Innovación (I+D+i). El papel del inspirador, Mercurio, el dios del comercio, se ha ejercido a veces por Marte, el dios de la guerra, y frecuentemente por los dos al mismo tiempo. El arquetipo de Elocuencia, que toca el violón imperturbable, ha correspondido siempre a una pléyade de políticos y gestores, que lo han interpretado con desigual fortuna, ora desconfiando de Intelecto ora presionando a Artificio y a Industria en aras de un beneficio social. Minerva bien pudiera ser, en nuestro ámbito, la ministra de Educación, la Comisión de las Comunidades Europeas, el 7.º Programa Marco, o el Plan Nacional de I+D+i. La Verdad Desnuda, que aparenta cobijarse bajo el manto de Intelecto, sigue tan elusiva hoy como siempre, como si sospechara de la llave con la que ha de ser liberada o encerrada. De hecho Intelecto cree que la verdad es la belleza. La loba espera también algo nutricional para sustentar el sueño del imperio, su cuento de la lechera. Por otro lado, Artificio recibe sus herramientas, con las que hará un trabajo bueno, tal vez bello también, mientras Industria hace cuentas a su espalda, bien despierto, fabricando otro cuento de la lechera que Elocuencia se encarga de alimentar.

El cuadro que comento, interesa sobre todo porque su autor, Lucas Jordan (1632-1705), vivió la época en que se funda y asienta la ciencia moderna. En 1632 **Galileo Galilei** publicó su defensa del sistema copernicano, donde ridiculizó a sus adversarios (*Dialogo sopra i due massimi sistema del mondo, tolemaico e copernicano*). La inquisición le llamó a Roma, y tuvo que jurar, extenuado por el interrogatorio, que la tierra estaba quieta, mientras musitaba para su embozo «y sin embargo se mueve». Galileo demolió la actitud pedante ante la ciencia y fundó la ciencia moderna, observando las cosas con sus propios ojos y basando sus deducciones en experimentos y pruebas reales. Galileo fue el primero en llegar a sus conclusiones a través del método científico moderno de combinar la observación con la lógica. Y esa lógica la expresó con las matemáticas, el claro e inconfundible

lenguaje simbólico de la ciencia. En palabras de Galileo, *la naturaleza está escrita en lenguaje matemático*. (ver figura 2)

El año que murió Lucas Jordan, 1705, la reina Ana de Inglaterra otorgó el título de caballero a **Isaac Newton**, muy respetado desde antes de publicar en 1687 su libro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Nótese la desigual fortuna de Galileo y Newton en su relación con las autoridades civiles y religiosas, que es un ejemplo tópico y típico de la actitud ante la ciencia de dos tipos de sociedad. Uno escribió en italiano y otro en latín, y ambos magistralmente. La importancia de Newton, no solo se debe a sus grandes descubrimientos sobre las leyes de la gravitación universal, la óptica, la composición de la materia, el cálculo diferencial e integral, etc., sino también a desbancar, con esas teorías grandiosas, a los antiguos filósofos griegos del pedestal donde los europeos les tenían. Aquella mente era tan portentosa como la de cualquiera de los antiguos. Sus teorías se convirtieron en modelos de lo que debía ser una teoría científica. Desde Newton, los autores y los pensadores de todas las demás ciencias, y también de la filosofía política y moral, han intentado emular su elegante sencillez, utilizando fórmulas rigurosas y un número pequeño de principios básicos. Es la expresión moderna de lo que hoy se llama en ciencias *reduccionismo*³. Desde los días de Newton la ciencia ha tenido una confianza en sí misma que nunca se ha debilitado. La gloria de Newton ha quedado recogida de forma insuperable en los versos de Alexander Pope: *La Naturaleza y sus leyes yacían ocultas en la noche. Dijo Dios: ¡Sea Newton! y todo se hizo luz*.

Al mismo tiempo que la ciencia moderna nace y se asienta en Europa durante el periodo barroco, se van desarrollando las aplicaciones de la ciencia. Los mismos Galileo y Newton crearon no pocos instrumentos e inventos. Y naturalmente, la industria y la innovación se benefician de las nuevas ideas, o bien las estimulan. El año que murió Lucas Jordan, 1705, el ingeniero Thomas Newcombe había construido una máquina de vapor para bombear el agua de las minas en Escocia. Sesenta años después **James Watt** (1736-1819) se propuso mejorar ese modelo y lo consiguió: hizo tan eficiente la máquina de vapor que ha llegado a ser el símbolo de la primera revolución industrial.

En plena revolución industrial, la pasión por la medición precisa como sustento de las teorías alcanza pronto, con **Antoine Laurent Lavoisier**

³ No confundir con la reducción fenomenológica, u operación que consiste en eliminar de una vivencia y de su objeto toda toma de posición acerca de su realidad, así como de la existencia del sujeto. En el capítulo VIII se explicará un poco más el concepto de reduccionismo en física.

(1743-1794), su máxima expresión. En su tiempo, los químicos aún pensaban en términos de los «cuatro elementos» (fuego, aire, agua y tierra), y del «flogisto», sustancia misteriosa que formaba los metales, junto con la «cal» (el óxido), conceptos que el desterró de la ciencia. Los experimentos de Lavoisier le llevaron al primer enunciado del Principio de Conservación de la Masa, es decir, la materia no puede crearse ni destruirse. El siglo siguiente, el XIX, sería el de la conservación de la energía, y el siglo XX el de la equivalencia entre masa y energía. Lavoisier publicó en 1789 su *Traité élémentaire de chimie*, que es el primer tratado moderno de química. El mismo Newton, un siglo antes, se había entregado a oscuras prácticas de alquimia, malgastando sus luces en la búsqueda de algún modo de obtener oro. Un oro que pronto aprendieron a obtener, en forma de plusvalías del conocimiento científico, los científicos aplicados a la ciencia aplicada⁴, como **William Henry Perkins**.

Después de Lavoisier, los científicos aprendieron a ser cuantitativos, y que es necesario medir y pesar con precisión. Por ese camino se pudieron crear nuevos combustibles, aleaciones, explosivos, fibras, plásticos... Un siglo después de Lavoisier, Perkins (1838-1907) había abierto el camino a las aplicaciones industriales de la química en el campo de los productos sintéticos, que hoy abarca desde los tejidos y el caucho hasta los medicamentos y aditivos y conservantes de los alimentos, pasando por la cosmética. *El químico rediseña hoy la naturaleza con toda confianza y osadía* (P. Espinet, El País 7-3-2007). Perkins murió el 14 de julio de 1907, rodeado de honores y riqueza. Lavoisier había sido decapitado 113 años antes, el 2 de mayo de 1794.

Las relaciones entre la ciencia básica y la ciencia aplicada, no siempre se han comprendido correctamente. La ciencia y tecnología básicas no son un lujo caro si se compara su coste con sus servicios. Hace 40 años, el físico atómico H. B. G. Casimir presentó en el Simposio de Tecnología y Comercio Mundial, organizado por el National Bureau of Standard y el U. S. Department of Commerce, un informe del que extraemos los siguientes párrafos [Weisskopf 1985].

El coste total de toda la ciencia básica desde Arquímedes hasta hoy día puede estimarse en unos 30 billones de dólares (de 1967), que es menos que el valor de 12 días de producción de los Estados Unidos, cuyos aparatos y máquinas son el producto, en gran parte, de logros científicos anteriores.

⁴ Por ejemplo, bastan unas decenas de átomos de oro de los $\sim 10^{23}$ que hay en un gramo de oro, para conseguir una catálisis eficiente del quemado de hidrocarburos (conversión de CO y O₂ en CO₂).

Algunos ejemplos del progreso técnico realizado por científicos que no trabajaron para un fin práctico definido son los siguientes (que he resumido):

Los circuitos básicos en los ordenadores no fueron descubiertos por gente que quería construir ordenadores, sino que se descubrieron en los años treinta por físicos que se ocupaban de contadores de partículas nucleares porque estaban interesados en la física nuclear. La energía nuclear no existe porque la gente quería nuevas fuentes de energía, ni porque la ambición de tener una nueva arma poderosa llevó al descubrimiento del núcleo. No ocurrió así, y resultó que estaban los Curie y Rutherford y Fermi entre otros cuantos. La industria electrónica no existiría hoy sin el descubrimiento previo de los electrones, realizado por gente como Thomson. Las bobinas de inducción en los motores de los coches no se hicieron por empresas que querían hacer transporte motorizado y, consecuentemente, habrían descubierto las leyes de la inducción. Esas leyes las había encontrado Faraday muchas décadas antes.

La necesidad de tener comunicaciones mejores no llevó a descubrir las ondas electromagnéticas. Las encontró Hertz, quien basó su trabajo en las consideraciones teóricas de Maxwell y subrayó la belleza de la física. Casi no hay ningún ejemplo de la innovación del siglo XX que no esté en deuda con las ideas científicas básicas. El caso más llamativo es el del invento más productivo de la historia, el transistor, que comento a continuación. Podría especularse, si el transistor podría haber sido descubierto por gente sin formación en mecánica cuántica y que no habían contribuido a la mecánica ondulatoria o la teoría de electrones en sólidos. Lo que ocurrió es que los inventores de los transistores en 1948 conocían bien la teoría cuántica de sólidos y contribuían a ella. Por cierto, Walter Houser Brattain, John Bardeen y William Bradford Shockley trabajaban entonces en los laboratorios de investigación de la Compañía Telefónica Bell⁵. Además, la Bell no

⁵ En 1948 los físicos estadounidenses Walter Houser Brattain, John Bardeen y William Bradford Shockley desarrollan el transistor, un dispositivo de estado sólido consistente en una pequeña pieza de material semiconductor en el que se practican tres o más conexiones eléctricas. El dispositivo se terminó en 1952, empleándose comercialmente en radios portátiles, audífonos y otros aparatos. Este logro les hace merecedores del Premio Nobel de Física en 1956. William Bradford Shockley (1910-1989), trabajó en los laboratorios de la Compañía Telefónica Bell desde 1936 hasta 1956, año en que fue nombrado director de la Shockley Transistor Corporation en Palo Alto, California. Dio conferencias en la Universidad Stanford desde 1958 y fue profesor de ingeniería en 1963. John Bardeen (1908-1991), trabajó como físico investigador (1945-1951) en los Laboratorios Telefónicos Bell, fue miembro del equipo que desarrolló el transistor, un diminuto aparato electrónico capaz de realizar la mayoría de las funciones de los tubos de vacío. Se incorporó en 1951 a la Universidad de Illinois. En 1972 compartió nuevamente el Premio Nobel de Física con los físicos estadounidenses Leon N. Cooper y John R. Schrieffer por el desarrollo de una teoría que explicaba la superconductividad, es decir, la desaparición de la resistencia eléctrica en

era la única industria en USA que hacía investigación fundamental puntera hace 50 años⁶.

Dos últimos ejemplos en esta dirección son los siguientes. En primer lugar, el desarrollo de Internet, que, además de la utilización académica e institucional que tuvo en sus orígenes (se desarrolló en el CERN), hoy se emplea con fines comerciales. En segundo lugar, la muy activa investigación básica en computación cuántica, cuyas expectativas comerciales son inmensas, pues se puede aplicar, por ejemplo, para encriptación de claves bancarias.

¿Se pueden conseguir los grandes descubrimientos de la ciencia mediante un plan estratégico adecuado de financiación, o se deben a un proceso difícil de controlar, tipo gran desastre, como un terremoto? Los estudios y modelos sobre esta cuestión no tienen una respuesta concluyente, y muchos apuntan en la segunda dirección. No hay duda de la correlación entre financiación global a la ciencia, en tanto por ciento del PIB de los países, y la relevancia industrial de los países a escala mundial. España intenta mejorar su posición en esa lista de excelencia científico-industrial, activando diversos mecanismos de aumento de la financiación institucional, y esperando una contribución de la iniciativa privada en el mismo sentido, que es el capítulo más urgente si queremos llegar a los puestos de cabeza. El déficit investigador de las empresas españolas implica que éstas no desarrollan conocimiento propio, y que además existe un escaso aprovechamiento del conocimiento que generan los centros públicos de investigación (El País, 29-4-2007).

Por parte de la Universidad, cuyo papel tradicional es la educación, el primer frente en ese desafío es cubrir una demanda de trabajadores bien formados para la industria del conocimiento. Pero también la Universidad debe hacer investigación, y sus relaciones con el mercado laboral y la industria es cada día más inmediato y directo. Existen oficinas de transferencia de tecnología en aquellas Universidades que hacen investigación (que son las de

ciertos metales y aleaciones a temperaturas cercanas al cero absoluto. Bardeen fue el primer científico que ganó dos premios Nobel en la misma disciplina. Walter Houser Brattain (1902-1987). Después de trabajar como físico en la división de radio del Instituto Nacional de Modelos y Tecnología, en 1929 se incorporó a los laboratorios de la Compañía Telefónica Bell, donde trabajó junto a los físicos William Shockley y John Bardeen en el desarrollo de un pequeño dispositivo electrónico llamado transistor.

⁶ Me gustaría dejar constancia de que en el año 1962, cuando yo cursaba 4.º curso de Físicas, Don Vicente Aleixandre me confió 4 transistores semiconductores, de los primeros que hubo en España, para hacer una práctica de Electrónica, y que yo fundí a la primera de cambio. D. Vicente se resignó a perder casi la mitad de su presupuesto para prácticas, y yo empecé a orientar mi vocación a la física teórica.

primera línea), pero aún no han conseguido explicar a los investigadores las posibilidades de una carrera alternativa en colaboración con la industria. En general, un investigador desconoce si un determinado descubrimiento satisface los criterios para que pueda ser patentado y con una patente valiosa. Por otra parte, científicos posgraduados y posdoctorados tienen nuevas posibilidades de trabajo en las industrias tecnológicas, colaborando en los departamentos de I+D, marketing, legal y financieros, para desarrollar, gestionar, investigar, evaluar, adquirir y proteger patentes y licencias tecnológicas u otras formas de propiedad intelectual. Es descorazonador ver que el número de alumnos de secundaria que elijen la opción de Ciencias disminuye en España año tras año, mientras aumenta significativamente en Estados Unidos (un 31% desde 2000).

Saber cómo y dónde deben usarse las tecnologías y los talentos lleva a un mejor conocimiento del potencial de unas y otros. De ello depende nuestra habilidad para conseguir rentabilizar la financiación de la enseñanza y la investigación. Por un lado, tal vez no tengamos en la Universidad demasiado conocimiento que transferir, y por otro lado las empresas deben ser receptivas y capaces de atraer el conocimiento, valorándolo adecuadamente.

¿Qué puede aportar el conocimiento científico a la sociedad? En el año 2000, 189 líderes políticos del mundo propusieron ocho Objetivos de Desarrollo del Milenio (*Millenium Development Goals* –MDG– : no confundir con A.M.D.G., del latín *Ad Maiórem Dei Glóriam*, a mayor gloria de Dios), que incluían desde reducir a la mitad la población que sufre hambre y pobreza extrema, hasta erradicar enfermedades mortales como el SIDA y la malaria, pasando por implantar la educación primaria universal. Estamos ahora a la mitad del plazo señalado (2015) para conseguir esos MDG, y no aumenta la confianza en la viabilidad de conseguir esos objetivos, sino todo lo contrario.

Por un lado, la forma de financiar los proyectos no está clara. Los líderes del G8 prometieron en 2005 que los 25.000 millones de dólares USA de ayuda a África invertidos en 2004 pasarían a ser el doble en el año 2010, pero los países africanos no saben cómo y cuándo aumentará el nivel de esa ayuda, la cual se contabiliza de una forma «creativa» en forma de reorganización de la ayuda existente o de cancelación de la deuda existente. Por otro lado, la excusa para que no se palpe el desarrollo masivo de inversiones en clínicas, escuelas, agricultura e infraestructuras necesarias, es la falta de bases de datos fiables sobre las que fundamentar las acciones. Además, no hay planes para evaluar la efectividad de las inversiones. Puede que los MDG pasen en 2015 al catálogo de los esfuerzos bien intencionados fallidos. La responsabilidad es de todos. Y el poder real de los líderes del G8 parece estar por debajo de su voluntad.

III. 1905-1908: LOS DEBATES DEL ATOMISMO. BOLTZMANN, EINSTEIN, PERRIN Y EL NÚMERO DE AVOGADRO

El cuadro «Vue de pont de Sévres», pintado en 1908 por el artista naíf Henry Rousseau, ofrece una panorámica de la influencia de la ciencia moderna en la vida europea a principios del siglo XX, después de tres siglos de desarrollos teóricos y sus aplicaciones, que hicieron triunfar la primera revolución industrial (figura 3). Plantas industriales, chimeneas, barcos a vapor, globos aerostáticos, son, en el cuadro de Rousseau, los símbolos y los frutos de la teoría elaborada a lo largo del siglo XIX, la termodinámica, que junto con la electricidad de Faraday y Maxwell, y la vieja mecánica de Newton, constituye, al comenzar el siglo XX, un bello edificio lógico basado en principios muy generales de aplicación universal. El principio cumbre del siglo XIX es el de conservación de la energía, que unificaría Einstein en 1905 con el principio de Lavoisier al relacionar masa y energía. Sin embargo, es el segundo principio de la termodinámica, referente a que las transformaciones de la energía en los sistemas físicos se realizan mediante un aumento global de la «entropía», el que se hace patente en las «máquinas» representadas en el cuadro naíf de Rousseau: el siglo XX nace con una alegre manipulación de la energía, que ha de marcar 100 años de progreso material exponencial y de luchas geopolíticas no ajenas al consumo creciente de energía y a sus transformaciones.

Los principios primero y segundo de la termodinámica, que estaban presentes implícitamente en la ciencia del siglo XIX a partir de Sadi Carnot (1796-1832), fueron reformulados por William Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907) y Rudolf Clausius (1822-1888) en un orden lógico. Lord Kelvin definió la temperatura absoluta, lo que hizo posible dar una expresión sencilla para la eficiencia de las máquinas reversibles, y Clausius introdujo el término «valor de equivalencia» o «conversión», que fue el germen del concepto de entropía: el valor de equivalencia de la conversión de trabajo en el calor Q a temperatura T es el cociente Q/T , de forma que para una máquina reversible se tiene $Q_1/T_1 + Q_2/T_2 = 0$. Más generalmente, la suma de las cantidades $\delta Q/T$ a lo largo de un ciclo reversible es cero, y en cualquier otro caso es mayor que cero. La cantidad $\delta Q/T$ fue confundida por algunos con

el viejo calórico. En 1865, Clausius demostró que la ecuación $dS = \delta Q/T$ define una función S del estado de un sistema que aumenta en un proceso adiabático espontáneo, y la dio el nombre de entropía (del griego τροπή = transformación). La entropía aparece así como un indicador de evolución, dando una expresión matemática para la «flecha del tiempo». El libro de Clausius termina con las famosas frases:

«Die Energie der Welt ist konstant. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu»⁷.

El creador de la Mecánica Estadística y la Termodinámica moderna, el gran Ludwig Boltzmann, puso fin a su vida en Duino, cerca de Trieste, en 1906, dejando pendiente una cuestión científica que le había enfrentado durante toda su vida como físico con las tendencias dominantes del pensamiento científico del siglo XIX, a saber, si los átomos existen realmente o son un mero artificio argumental. Las posiciones atomistas de Boltzmann se forjaron a través de sus intentos de dar una explicación mecánica *microscópica* del segundo principio de la termodinámica, es decir, a partir de las posibles configuraciones de las posiciones y velocidades de todos los componentes elementales del sistema, los átomos y moléculas. De ellas, la configuración microscópica *más probable* de un sistema físico se corresponde con el estado macroscópico de equilibrio térmico. Más precisamente, dicho macro-estado es a escala microscópica el de equilibrio micro-canónico, para el que todas las posibles configuraciones \mathbf{W} , compatibles con los parámetros macroscópicos, son igualmente probables.

En el mausoleo de Boltzmann, dentro del cementerio de Viena, puede verse inscrita en mármol la famosa relación⁸ $S = k \log \mathbf{W}$, donde S designa la entropía de un sistema físico macroscópico que se encuentra en equilibrio térmico con probabilidad \mathbf{W} , la cual Boltzmann identificó con el número de configuraciones microscópicas cuando todas son equiprobables⁹. La constante de proporcionalidad k , conocida como constante de Boltzmann, relaciona el mundo macroscópico (representado por la propiedad «entropía») con el mundo microscópico (dado por la probabilidad máxima \mathbf{W} del estado microscópico). El segundo principio de la Termodinámica, como hemos dicho, establece que la entropía de un sistema tiende a ser la máxima posi-

⁷ La energía del mundo es constante. La entropía del mundo tiende a un máximo.

⁸ De hecho esa forma de escribir la entropía se debe a Max Planck, el padre fundador de la Física Cuántica.

⁹ Una buena introducción histórica al concepto de entropía se da en el libro de Roger Balian, *From Microphysics to Macrophysics*, Springer, 2nd print 2007, Vol. 1, Cap. 3.4. Se explica, su relación con la teoría cinética, así como con la mecánica cuántica y la teoría de la información.

ble, lo cual marca una evolución irreversible, la llamada flecha del tiempo, y la muerte térmica del universo. Esta perspectiva desató muchas controversias¹⁰ (ver figura 4).

Los oponentes de Boltzmann fueron muchos y en muchos frentes, y los debates más destacados fueron con el físico y filósofo Ernst Mach y con el químico-físico Wilhem Ostwald. La cuestión se resolvió finalmente a favor de Boltzmann, es decir, a favor de la existencia de los átomos, gracias en parte a los experimentos de Jean Perrin de 1908, basados en una relación teórica propuesta por Einstein en 1905 para explicar el movimiento Browniano. Después de los experimentos de Perrin, Ostwald cedió en sus posiciones contra el materialismo científico¹¹, pero Mach falleció en 1916 sin estar convencido¹².

Perrin determinó experimentalmente en 1908 el número de Avogadro, que el químico Amedeo Avogadro había definido en el congreso de Karlsruhe de 1860 como el número de átomos (o moléculas) que hay en una cantidad macroscópica de materia, llamada *mol*, que es el peso atómico de una sustancia expresado en gramos. El peso atómico de una sustancia se expresa en una escala relativa al isótopo C-12 del Carbono, cuyo átomo neutro se establece que tenga un peso atómico 12. El peso atómico de los elementos varía entre ~ 1 para el Hidrógeno y ~ 238 para el elemento natural más pesado, el Uranio. Un mol de cualquiera de ellos tiene un número de

¹⁰ La paradoja que Joseph Loschmidt plantea al programa de Boltzmann, consistente en derivar las leyes de la Mecánica Estadística directamente de la Mecánica, es que las leyes de la Mecánica son las mismas cuando se invierte el sentido del tiempo, mientras que las leyes de la Termodinámica no lo son, ya que el segundo principio marca la evolución de los sistemas macroscópicos en el sentido de un aumento de la entropía. Esta postura es la que adoptó 20 años después, en 1895, Wilhem Ostwald: «La irreversibilidad real de los fenómenos naturales prueba la existencia de procesos que no pueden ser descritos mediante ecuaciones mecánicas; y con esto queda pronunciado el veredicto sobre el materialismo científico».

¹¹ El materialismo científico se remonta a Epicuro (341-271 AC), seguidor de Demócrito (460-370 AC), cuyo «jardín de filósofos» es evocado en la obra «De rerum natura» de Lucrecio (99-55 AC). Una buena glosa de estas teorías está en el poema «Al margen de Lucrecio», del poeta vallisoletano Jorge Guillen (1893-1984) [Aire Nuestro. Homenaje. Anaya & Mario Muchnik, 1993].

¹² Mach defendía el *fenomenismo*, una epistemología que no permite ir más allá de los fenómenos, y que consideraba que el uso de las hipótesis atómicas era una argucia ilegítima para desarrollar teorías científicas. Dado que los átomos sugerían la posibilidad de reducir todas las teorías a la mecánica, los fenomenistas se oponían a cualquier reduccionismo de las nuevas teorías físicas, es decir, la termodinámica y el electromagnetismo, a la vieja mecánica. Las teorías científicas debían traducir la experiencia sin hipótesis adicionales espurias, como la de los átomos defendida por Boltzmann. [J. Ordoñez, REF 20 (4), 2006]. Veremos en el capítulo VIII un nuevo tipo de oposición al reduccionismo.

átomos igual al número de Avogadro: $N_A = 6.022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$. En las unidades macroscópicas termodinámicas habituales (S.I.), la constante de Boltzmann es del orden del inverso del número de Avogadro: $k \approx 1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$. Para hacernos una idea de la enormidad de N_A (o de la pequeñez de k) podemos hacer algunos cálculos sencillos. Por ejemplo, la longitud de un hilo monoatómico sacado de un gramo de oro es ~ 10 millones de kilómetros, que es 25 veces la distancia de la tierra a la luna. La probabilidad de aspirar una de las moléculas de las que exhaló Galileo en su último suspiro, si se distribuyeron uniformemente por la atmósfera, es ~ 1 .

Einstein estuvo muy interesado en la determinación del número de Avogadro. De hecho, Einstein hizo en 1905 no una sino varias propuestas para determinar N_A . El trabajo sobre el movimiento browniano (*Sobre el movimiento requerido, por la teoría cinética del calor, de las partículas suspendidas en fluidos en reposo*, recibido en Annalen der Physik el 11 de mayo de 1905), señala la tercera ocasión, en menos de dos meses, en que Einstein hace un descubrimiento fundamental vinculado a la determinación de N_A . Los tres métodos son muy distintos. El primero (Annalen der Physik, 18 de marzo de 2005), hace uso de la ley de radiación del cuerpo negro en el límite de grandes longitudes de onda (Rayleigh-Jeans), y da $N_A = 6,17 \times 10^{23}$. El segundo hace uso del flujo incompresible de soluciones (van 't Hoff) y le dio $N_A = 2,1 \times 10^{23}$. El tercero, sobre el movimiento browniano, le dio una fórmula pero todavía no un número. De hecho Einstein siguió inventando nuevas formas de obtener el número de Avogadro: en diciembre de 1905 terminó su segundo trabajo sobre el movimiento browniano, en 1908 mediante la medición de las fluctuaciones de tensión, y en 1910 mediante el estudio de la opalescencia crítica. Esta intensa actividad de Einstein parece sugerir que pensaba que la ubicuidad de N_A zanjaría de una vez para siempre el problema de la realidad molecular, como así ocurrió.

Los famosos 5 trabajos de Einstein en el «annus mirabilis» 1905, cuyo centenario fue recientemente conmemorado como año mundial de la física, son (no en orden cronológico): 1) la explicación del efecto fotoeléctrico, que le valió el premio Nobel de 1921; 2) la teoría de la relatividad restringida, que aun es la fuente de su reconocimiento por el gran público; 3) la archifamosa relación $E=mc^2$, que se convirtió en un icono universal, 4) la explicación del movimiento browniano, que constituyó la base para la determinación experimental del número de Avogadro N_A y la consecuente aceptación de la existencia de los átomos; y 5) una determinación teórica independiente del número de Avogadro, que le valió su Tesis Doctoral (ver figura 5).

El movimiento browniano, observado primeramente por Robert Brown en 1827, es el movimiento de un conjunto de pequeñísimas partícu-

las (en este caso granos de polen) empujadas por otras partículas muchísimo más pequeñas (las moléculas del agua donde se mueve el polen). Partiendo de esta hipótesis, Einstein elaboró una fórmula relacionando el tamaño de los granos de polen y su desplazamiento cuadrático medio debido a esa «excursión a trompicones» (lo que ahora se llama «camino randómico» o al azar). Dicha relación es:

$$\langle x^2 \rangle = (RT/3\pi\eta N_A r)\tau$$

donde **R** es la constante de los gases perfectos, **T** la temperatura, η la viscosidad, **r** el radio de la partícula en suspensión, y τ el intervalo de tiempo entre medidas de la posición de la partícula. N_A es el número de Avogadro, que puede deducirse de la fórmula anterior si el resto de las magnitudes se conocen o se miden¹³.

Perrin realizó su experimento usando emulsiones con partículas microscópicas de gomorresina (un tipo de pigmento) o de resina de lentisco (un plástico claro). Con un microscopio, y mucho cuidado, esmero y afán, observó, midió y tabuló muchos desplazamientos de partículas individuales de gomorresina. A partir de estas observaciones, Perrin confirmó las predicciones de Einstein sobre la naturaleza estadística de las agitaciones, y de ellas calculó el número de Avogadro, confirmando la naturaleza atomista de la materia.

En la versión del experimento de Perrin hecha en la Universidad de Harvard en 2006 para el laboratorio de estudiantes¹⁴, sólo cambia el método de registro y medida de los desplazamientos, que ahora se realiza mediante una cámara de video conectada a un ordenador que analiza los movimientos con un programa de libre disposición. En la figura 6 se da un esquema del aparato y una gráfica con los resultados experimentales. Hoy día es un experimento rutinario, pero hace 100 años fue una proeza que inclinó la balanza del lado de los atomistas y de la mecánica estadística, las tesis que sostuvo

¹³ En su tesis doctoral, Einstein combinó las leyes de van 't Hoff para la presión osmótica con la ley de Stokes para partículas moviéndose en un medio viscoso y aplicó a todo un proceso de difusión, con equilibrio térmico y dinámico. Esto le llevó a una relación entre la constante de difusión y la viscosidad. En el trabajo sobre el movimiento browniano Einstein extrapoló la ley de van 't Hoff para la presión osmótica de un soluto a una suspensión de partículas insolubles. Integrando la ecuación de difusión para la concentración de la suspensión, obtuvo la concentración en función de la posición y el tiempo, y de ella sacó el desplazamiento cuadrático medio en función de la constante de difusión, y finalmente la ecuación vista. Pierre Langevin obtuvo la misma ecuación en 1908 usando mecánica clásica y el teorema de equipartición para escribir la energía cinética. [A. Pais].

¹⁴ R. Newburgh *et al*, *Einstein, Perrin, and the reality of atoms: 1905 revisited*, American Journal of Physics, 74, 478 (2006).

Boltzmann con la tozudez de un Galileo del siglo XIX. Boltzmann no pudo asistir a su triunfo.

Sin embargo, hay que decir que el debate sobre la realidad molecular concluyó únicamente como resultado de desarrollos en la primera década del siglo XX, y no solo a causa del trabajo de Einstein sobre el movimiento browniano, ni por una determinación aislada de N_A . Desde dominios tan distintos como la radiactividad, el movimiento browniano y el azul del cielo, era posible en 1909 afirmar que una docena de maneras independientes de medir N_A proporcionaban resultados que estaban entre 6 y 9×10^{23} . Al concluir su memoria de 1909 sobre el tema, Perrin tenía toda la razón para afirmar: «Creo que es imposible que una mente libre de todo prejuicio pueda reflexionar sobre la extrema diversidad de fenómenos que convergen así hacia el mismo resultado, sin experimentar una fuerte impresión, y pienso que de ahora en adelante será difícil defender, con argumentos racionales, una actitud hostil hacia las hipótesis moleculares». [A. Pais]

IV. LA RADIATIVIDAD, LOS RAYOS X, Y EL NÚMERO ATÓMICO

Al final del periodo clásico, se distinguen dos categorías de objetos en el universo, la materia y las radiaciones. Ese es el mensaje en la portada del libro *Física Moderna* editado por Montaner y Simon en 1897 (figura 7). La materia esta compuesta, por un lado, de corpúsculos perfectamente localizables (6 variables dinámicas por corpúsculo) que siguen las leyes de Newton, y, por otro lado, de radiaciones, cuyas variables dinámicas (infinitas) son las componentes, en cada punto del espacio, de los campos eléctrico y magnético, que siguen las leyes de Maxwell. Al comenzar el siglo XX, los esfuerzos de los experimentadores obedecen a dos tipos de preocupaciones estrechamente ligadas; en primer lugar hacer un análisis preciso de la estructura microscópica de la materia, y en segundo lugar determinar la mutua interacción de los corpúsculos materiales y sus interacciones con el campo electromagnético.

Los primeros datos sobre la estructura de la materia se obtienen del estudio de los rayos obtenidos por descargas en el seno de gases enrarecidos, rayos catódicos y rayos canales, que son chorros de partículas cargadas a gran velocidad. De este modo se descubre el electrón (J. J. Thomson, 1897), partícula de la radiación catódica. La teoría de la interacción del electrón con las ondas electromagnéticas es elaborada pronto por Lorentz. Después del experimento de Perrin de 1908 se afianza la creencia en las partículas atómicas y subatómicas, y se ponen en marcha técnicas experimentales cada vez más numerosas y perfeccionadas que permiten contar las partículas microscópicas una a una: medida de la carga elemental de la electricidad por Milliken en 1910, primera observación de trayectorias de partículas cargadas en la cámara de Wilson en 1912, primer contador de Geiger en 1913. Estas técnicas de observación «directa» no han dejado de desarrollarse y han llevado hoy día a la gran ciencia (ver apéndice I) para la exploración de fenómenos microscópicos.

A la vez que el carácter corpuscular de la materia parece confirmarse a medida que se progresa en el conocimiento de los átomos, el espectro de las ondas electromagnéticas conocidas se completa y se extiende desde el

espectro visible hacia las pequeñas longitudes de onda con el descubrimiento de los rayos X (Röntgen, 1895, primer Premio Nobel de Física¹⁵ en 1901), cuyo carácter ondulatorio se establece por los experimentos de difracción en los cristales (von Laue, 1912). Para ser exacto, hay que mencionar también la radiación γ de los cuerpos radiactivos, cuya naturaleza electromagnética no se conocería hasta mucho más tarde.

Entre tanto, un nuevo capítulo de la física comienza con el descubrimiento de la radiactividad (Becquerel 1896, Premio Nobel de Física en 1903, compartido con Marie y Pierre Curie), que es la primera manifestación de las propiedades de los núcleos atómicos. El uso de las partículas radiactivas α (núcleos de ${}^4\text{He}$) como proyectiles contra los átomos de una fina lámina de oro, permitió a Rutherford en 1911 hacer una imagen del átomo como un sistema planetario, en el que casi toda la masa está en un núcleo central con dimensiones de billonésimas de milímetro (10^{-15} m = 1 femtómetro = 1 Fermi) y con carga eléctrica positiva *entera* Z (en unidades de $|e|$), en torno al cual giran como pequeños planetas los electrones a distancias cien mil veces mayores ($\sim 10^{-10}$ m = 1 Å) que el tamaño nuclear, y masa más de varios millones de veces menor que el núcleo.

Así pues, la materia está esencialmente vacía, la masa se concentra en núcleos casi puntuales, y cada sustancia está caracterizada por un número *entero* Z , que se denomina número atómico. Esta imagen sería «vestida de teoría» por Bohr en 1913 uniendo las ideas de los fotones de Einstein de 1905 y las ideas de los cuantos de Planck de 1900, para explicar el espectro visible del átomo de Hidrógeno¹⁶ descrito por la fórmula empírica de Balmer $\mathbf{v}_{ab} = \mathbf{R}(\mathbf{n}_a^{-2} - \mathbf{n}_b^{-2})$: la frecuencia de la línea espectral, \mathbf{v}_{ab} , se obtiene a partir de dos números enteros tales que $\mathbf{n}_b > \mathbf{n}_a$. Para \mathbf{R} , la llamada constante de Rydberg, Bohr obtuvo la expresión $\mathbf{R} = (\mu/4\pi\mathbf{c}\mathbf{h}^3) (\mathbf{Z}e^2/4\pi\epsilon_0)^2$, donde μ es la masa reducida del electrón¹⁷, \mathbf{c} la velocidad de la luz, \mathbf{h} la constante de Planck –que veremos en el siguiente capítulo– y \mathbf{Z} el número atómico introducido por Rutherford, el cual coincide con el número de orden asignado por Mendeleev a cada elemento en su tabla periódica. La física empieza así a

¹⁵ Röntgen donó la recompensa monetaria a su Universidad. Al igual que haría Pierre Curie años más tarde, rechazó registrar cualquier patente relacionada a su descubrimiento por razones éticas.

¹⁶ Desde que Newton descompuso la luz blanca en colores al pasar por un prisma, se fueron desarrollando rejillas de difracción con gran poder de resolución para el estudio de los «espectros» de absorción-emisión de la luz. Estos estudios permitieron asociar a cada sustancia un espectro característico. En 1885, Johan Balmer dio una fórmula empírica para calcular la parte visible del espectro del Hidrógeno, cuya expresión fue racionalizada por Bohr en 1913.

¹⁷ $\mu = mM/(m+M)$, siendo m la masa del electrón y M la del núcleo ($M \gg 10^6 m$).

racionalizar la fenomenología química, aunque aún faltaban décadas para entender la cuantificación de la carga desde principios básicos.

En 1913, el joven Henry Gwyn Jeffreys Moseley (1887-1915) (figura 7), alumno de Rutherford, usó un tubo de vacío que emite radiación X desde un material bombardeado por electrones de gran energía (con longitudes de onda en el rango 0.1-10 Å –fotones en el rango 1-100 keV–), para estudiar el espectro característico de rayos X de 39 elementos, con pesos atómicos entre el aluminio y el oro. Obtuvo que, en general, el espectro se compone de grupos de líneas, las serie K, L, M..., cuyas frecuencias ν_n verifican una relación sencilla con el número atómico del elemento: $\nu_n^{1/2} = C_n (Z - \sigma)$, donde C_n es una constante independiente de Z , y σ (apantallamiento adimensional) está en el rango 1,0- 2,0 para la serie K, en 7,4-9,4 para la serie L, etc. La relación experimental de Moseley está de acuerdo con la relación teórica de Bohr si interpretamos los rayos X como la energía electromagnética liberada por los electrones atómicos de capas atómicas altas, los cuales ocupan los huecos de las capas internas K, L, M, etc., producidos por el bombardeo con electrones libres de alta energía en el tubo de vacío.

Es interesante notar que para evitar discontinuidades en su gráfico de frecuencias, Moseley tuvo que postular la existencia de cuatro elementos desconocidos en su época, aquellos con $Z=43$ (Tecnecio), 61 (Promecio), 72 (Hafnio) y 75 (Renio). El Tecnecio se sintetizó después en el laboratorio, y hasta hace poco se consideró que no existía en la naturaleza (de ahí su nombre) aunque se ha encontrado recientemente en muy pequeñas cantidades. Su principal aplicación es en medicina para técnicas de radiodiagnóstico.

Moseley murió en 1915 en la campaña de Gallípolis de la primera guerra mundial, como miembro del cuerpo de ingenieros del ejército inglés. Tenía 28 años y se especula que hubiera obtenido el Premio Nobel, el cual no puede otorgarse a título póstumo. El gran Erwin Schrödinger, que también fue oficial en la primera guerra mundial (figura 7), sí pudo obtener el Premio Nobel de 1933 por su creación en 1926 de la Mecánica Cuántica, un marco teórico para explicar, entre otras cosas, la «vieja» teoría cuántica de Bohr sobre el átomo, la fórmula de Balmer y los rayos X. Comentaré algo más sobre Mecánica Cuántica en el próximo capítulo. Desde Moseley, los científicos que trabajan para el ejército permanecen en sus laboratorios¹⁸. (Ver apéndice II).

¹⁸ Podría ser pertinente aquí hacer alguna reflexión sobre el papel de los científicos en las guerras del siglo XX, en particular respecto a la creación de armas nucleares, pero es un tema muy amplio y muy debatido que no cabe en esta disertación, aunque algo se dice en el Apéndice II. Cabe mencionar que en los años 50, alentado por físicos nucleares, nació el movimiento Pugwash, el cual recibió el Premio Nobel de la Paz en 1995. Joseph Rotblat (1908-2005), creador de Pugwash, participó en el proyecto Manhattan.

Como dijimos al principio de este capítulo, los rayos X son radiación electromagnética, como lo son los rayos gamma, una de las tres radiaciones emitidas por los núcleos inestables y que constituyen la radiactividad nuclear descubierta en 1896 por Becquerel. Las otras dos radiaciones son las llamadas beta y alfa, constituidas por la emisión de partículas ligeras (electrones), y pesadas (núcleos de Helio 4), respectivamente. Las tres radiaciones nucleares están presentes en el logotipo de la Real Sociedad Española de Física (figura 7). Comentaré ahora brevemente el uso de las radiaciones nucleares, tanto para la investigación básica (e.g. determinación de límites de validez en leyes de conservación y simetrías), como en la investigación aplicada, especialmente en Medicina y Ciencias de la Salud.

La radiactividad nuclear juega un papel primordial para explicar cómo se crearon los elementos a partir del Big-Bang, porqué el máximo número atómico no es mucho mayor que 100 (118 para el último elemento censado), y cual es la abundancia relativa de elementos en el universo. No es casual que uno de los trabajos que explican esas cosas fuera hecho por tres autores [R. A. Alpher, H. Bethe, and G. Gamow, *The Origin of the Chemical Elements*, *Physical Review*, 73, 803 (1948)] cuyos nombres «suenan» como las tres radiaciones nucleares: George Gamow buscó *ex-profeso* a sus colaboradores.

El ejemplo clásico de elemento radiactivo es el Radio, descubierto por los Curie en 1898. Recientemente, en el Argonne National Laboratory de USA se ha conseguido aislar y atrapar por primera vez unos pocos átomos de Radio mediante técnicas de enfriamiento por láser. Es el elemento más pesado atrapado por ahora. Se usaron solo 20 nanogramos de radio-225 (vida media de 15 días) y un microgramo de radio-226 (vida media de 1.600 años), y se atraparon unas decenas de átomos de radio-225 y unas centenas de átomos de radio-226, con las que es posible estudiar la estructura atómica del Radio, aún no bien conocida. Además puede medirse un nuevo límite para la conservación de la simetría a la inversión temporal (recordemos la flecha del tiempo y la entropía) en las transiciones electromagnéticas, que puede manifestarse mediante la existencia de un momento dipolar eléctrico atómico permanente, es decir una asimetría entre los centros de gravedad de las cargas positiva y negativa del átomo. El radio-225 es muy sensitivo a las propiedades de la carga de su núcleo porque este es muy deformado.

Hay otros experimentos, en el dominio de la física atómica, que acotan los límites conocidos tanto de la reversibilidad temporal como de la inversión de la paridad (izquierda por derecha). Esos límites discriminan las posibles teorías que trascienden el Modelo Standard –quarks, leptones, bosones intermediarios– de la física de partículas elementales. Por ejemplo,

en un experimento reciente se ha detectado una transición en Cesio atómico desde el nivel 6s al nivel 7s, la cual está prohibida a los fotones, pero es accesible a los bosones Z, partículas responsables de la interacción débil (como lo es la desintegración beta), la cual discrimina entre izquierda y derecha. Esto permite comprobar de forma cuantitativa las predicciones de la teoría electrodébil. Otros experimentos que estudian la reversibilidad temporal se basan en la creación de anti-hidrógeno, AH, el cual debe ser equivalente al hidrogeno normal, H, según el Modelo Standard de las partículas fundamentales. Dicha equivalencia es cierta si se conserva la simetría CPT, según la cual, si en una pieza de materia se invierten simultáneamente los signos de las cargas de sus partículas (C), la dirección del transcurrir del tiempo (T), y la paridad (P), resultaría una pieza de materia indistinguible de la original. En particular el H y el AH absorberán y emitirán luz a las mismas frecuencias. Se está intentando medir la transición 1s a 2s en el AH con la misma impresionante precisión que se conoce en el H, que es de 1.8 partes en 10¹⁴.

Por otro lado, para terminar este capítulo, quiero resaltar que no solo los rayos X han contribuido al enorme progreso actual de las Ciencias de la Vida, sino también otros logros de la física, la química, las matemáticas y la ciencia de computadores. *Hoy juegan un papel importante en medicina las fibras ópticas para endoscopia, los láseres, la resonancia magnética, los TAC, las gamma grafías, ecografías, o el uso de radiaciones en terapia de tumores. En análisis son cada vez más frecuentes técnicas físicas con fluorescencia, luminiscencia o espectroscopias. Los encefalogramas, electrocardiogramas o magneto cardiogramas están basados en la física. La física de fluidos es necesaria para entender la circulación de la sangre y la teoría de la corriente eléctrica sirve para modelar las señales nerviosas. Sin olvidar que los huesos, músculos y tendones forman sistemas mecánicos que siguen las leyes de la física*¹⁹.

La medicina y la física han estado ligadas desde mucho antes de los primeros tiempos del ciclotrón, pero esa alianza es hoy día mas profunda y va más allá de la radiografía o la radioterapia²⁰. En palabras de Rosalind

¹⁹ Carta de Antonio Fernández-Rañada (presidente de la RSEF) al Secretario General del Consejo de Coordinación Universitaria (CCU), 26-2-2007, en respuesta a la exclusión de la física del proyecto 2007 para los nuevos planes de estudio de Medicina.

²⁰ De hecho la relación moderna entre la física y la medicina viene desde los rayos X, cuyo uso recibió un fuerte impulso durante la I primera Guerra Mundial, gracias a Marie Curie, también premio Nóbel de Física en 1903. Ella equipó 20 «coches radiológicos» con sistemas de rayos X y los envió al frente para localizar los proyectiles y la metralla en los cuerpos de los soldados y extraérselos con rapidez, lo que permitió salvar muchas vidas. En la segunda mitad del siglo XX, a partir del libro *What is life?* (1944) de Erwin Schrödinger, la contribución de la física atómica a la biología y la medicina se hace más intensa. Ese libro,

Franklin (1920-1958), que hizo la placa de rayos X que llevó al descubrimiento del ADN, *La ciencia y la vida diaria no pueden y no deben separarse*²¹. Después de todo, los mecanismos biológicos esenciales dependen de las interacciones físicas entre moléculas, de modo que la física, la química y las matemáticas están en el centro de muchas de las claves de la biología, como la explicación de la estructura de hélice del ADN y de muchas proteínas. En la última década, los físicos han empezado a ver la materia biológica como un territorio que, incluso al nivel de la estructura electrónica, puede explorarse átomo por átomo, como veremos en el capítulo VI con algo más de detalle.

que tuvo influencia en los desarrollos de la biología molecular conducentes al descubrimiento del ADN, se inspiró en un artículo de otro físico, Max Delbrück, que también fue premio Nobel, esta vez de Medicina. La deriva de Max Delbrück hacia la medicina se debe, entre otras cosas, a la conferencia de Niels Bohr *Light and Life*, pronunciada en el congreso mundial de luminoterapia de 1932.

²¹ *Science and every day life cannot and should not be separated*, es la frase inicial del informe Science 2020 publicado por Microsoft Research en 2007 (<http://research.microsoft.com/towards2020science/>).

V. ÁTOMOS, LUZ, PARTÍCULAS: LA MECÁNICA CUÁNTICA

La mecánica cuántica es la descripción del comportamiento de la materia y de la luz en todos sus detalles y, en particular, de los acontecimientos en la escala atómica. Las cosas en una escala muy pequeña se comportan de forma muy diferente de lo que podemos imaginar: ni como ondas, ni como partículas, ni como nubes, ni como bolas, ni como pesos en muelles o algo que se haya visto alguna vez. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones, etc.) es el mismo para todos ellos; todos son «ondas de partículas» o como quieran llamarlas. Así, todo lo que aprendamos sobre las propiedades de los electrones, se lo podemos aplicar a todas las «partículas», incluyendo los fotones de la luz.

El año 2000, para conmemorar el centenario de la comunicación de 14-XII-1900 de Max Planck, que introdujo por vez primera la idea de cuantificación de las magnitudes físicas («*como un acto de desesperación*»), y que señala el origen de la física cuántica y la posterior mecánica cuántica, se hicieron multitud de congresos y actos en todo el mundo. La Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, puso en la cabecera de su página web el cuadro naïf que se reproduce en la Figura 8, de cuyo autor solo recuerdo que es un artista mexicano. Otro artista mexicano, el escritor Jorge Volpi, publicó el año 1999 la novela «En busca de Klingsor», un thriller muy bien documentado sobre la historia de la física cuántica, sus protagonistas y su implicación en la historia político-militar de entreguerras en el siglo XX²².

El cuadro naïf nos muestra, bajo la protección de Nut, diosa caldeo-egipcia que encarna la bóveda celeste, a los padres fundadores de la mecánica cuántica (con aureola de santos), discutiendo la interpretación correcta de sus postulados, alrededor de la pirámide del conocimiento teórico, sobre un campo de amapolas y margaritas por desojar. Encima del vértice de la pirámide, está el símbolo divino del infinito, y dentro de la pirámide vemos,

²² Hasta mediados los años 1930 la física importante se publicaba en Europa (Z. Physik, por ejemplo), y luego pasó a USA (Physical Review), algo no ajeno al éxodo de científicos desde la Alemania pre-nazi.

en primer lugar, las siglas del paradigma del modelo Standard de las partículas y las fuerzas elementales: QCD (Quantum Chromo-Dynamics). Debajo están sucesivamente, la famosa ecuación de Einstein, $E=mc^2$, el principio de incertidumbre de Heisenberg (el impulso y la posición de una partícula no conmutan), la ecuación de Planck para los saltos de energía en la radiación del cuerpo negro, un dibujo del modelo atómico de Bohr...: todo un programa de física reduccionista. Bohr a la izquierda y Einstein a la derecha, protagonizan el combate dialéctico. Con los dedos de la mano derecha reivindican, respectivamente, la interpretación estadística o determinista, de la medida en mecánica cuántica. Bohr dice que el «gato de Schrödinger» (una paradoja del debate real, representado a su lado por un gato de piel con calaveras) está simultáneamente medio vivo y medio muerto, mientras que Einstein, con el argumento de los dados de Dios guardado a su espalda, entona con su violín la existencia de una única realidad local, que existe aunque nadie la mire. Del lado de Bohr vemos a Heisenberg, que señala con su mano izquierda como crece la imprecisión del impulso cuando aumentamos la precisión de una medida simultánea de la posición, señalada con su mano derecha. Del lado de Einstein vemos a Feynman, arrancando de sus bongoes los diagramas que permiten redefinir la masa y la carga del electrón, que dieron lugar a la teoría más precisa jamás construida: la QED (Quantum Electrodynamics), un precedente de otras teorías «gauge» (de escala), como la QCD ya mencionada.

La controversia de Bohr con Einstein produjo una corriente mayoritaria a favor de la interpretación de Copenhague, sostenida por Bohr y Heisenberg, pero la cuestión sigue abierta, con un número creciente de científicos que sostienen interpretaciones en contra del *carácter estadístico esencial* del mundo descrito por la mecánica cuántica. Mientras que el uso de la estadística en algunos problemas de la física clásica es un mero ahorro de medios, dado el exceso de variables, pero conceptualmente es una teoría determinista, la mecánica cuántica incorpora la probabilidad como un ingrediente básico: la medida de una magnitud puede dar varios resultados cada uno con una probabilidad que podemos predecir. Una vez medida esa magnitud se obtendrá uno solo de los resultados que no podemos anticipar, pero con la probabilidad predicha para él, y el sistema quedará en adelante marcado por la probabilidad unidad (100%) de obtener ese resultado en una posterior medida de la misma magnitud. Este efecto se conoce como «reducción del paquete de ondas»²³.

²³ Un estado del sistema viene descrito por una función de onda que «contiene» todas las probabilidades de las medidas de diferentes magnitudes, y se «reduce» a probabilidad uno cuando se mide.

Antes de 1920 los físicos aceptaban sin discusión que los objetos físicos poseen propiedades bien definidas que pueden revelarse mediante las observaciones adecuadas. Pero los principios de la mecánica cuántica dicen que la medida de alguna propiedad, por ejemplo el impulso, puede llevar a un rango de resultados posibles con probabilidades diferentes. De acuerdo con la interpretación de Copenhague, propiedades como el impulso no tienen un valor definido hasta que son medidas. El paradigma de esta idea es el famoso principio de incertidumbre de Heisenberg de 1927, que dice que la medida del impulso de una partícula limita la precisión en la medida de su posición, y viceversa. Hay muchos pares de variables gobernados por el principio de incertidumbre.

Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen (EPR abreviadamente) argumentaron en 1935 que la interpretación de Copenhague lleva a inconsistencias. En ese trabajo, que es el más citado de Einstein²⁴, EPR imaginaron la creación de un par de partículas, alejándose velozmente una de otra, pero con propiedades correlacionadas, de modo que la medición del impulso o de la posición de una partícula nos diría inmediatamente la posición o el impulso de la otra. Así, un experimentador podría elegir obtener la posición o el impulso de una partícula, sin hacer ninguna observación sobre ella, simplemente observando a la otra partícula. Esto sólo puede significar que la primera partícula tenía valores simultáneos de ambas propiedades, pues cualquiera de las dos podía inferirse sin hacer ninguna acción física sobre la partícula. Por el contrario, la interpretación de Copenhague diría que las propiedades de la segunda partícula estarían definidas solamente después de medir la primera partícula, aunque las dos partículas ya no estuvieran en contacto.

EPR concluyeron que la mecánica cuántica era una teoría incompleta porque no permitía a la partícula tener posición e impulso al mismo tiempo. La respuesta de Bohr, pocos meses después, arguye que, dado que no se pueden medir la posición y el impulso al mismo tiempo, no es posible demostrar que las dos propiedades coexisten con valores definidos. A Einstein no le convenció esta respuesta porque en ella se evita decir nada sobre lo que ocurre realmente en el proceso. Así pues, la demostración de EPR sobre un experimento imaginado (*gedanken*) quedó como algo imposible de comprobar definitivamente hasta que en 1964 John Bell (del CERN en Ginebra) demostró teóricamente que una prueba estadística sobre un experimento del tipo EPR, podría comparar cuantitativamente las predicciones según la mecánica cuántica con las predicciones hechas por EPR. Esos experimentos son muy difíciles, e involucran la medida de la polarización de muchos pares

²⁴ El trabajo EPR es el más citado de Einstein y uno de los más citados en el siglo XX. El siguiente trabajo más citado de Einstein es su Tesis Doctoral (la estimación del número de Avogadro), con 2.615.

de fotones. Los resultados, publicados en 1982, demostraron que la mecánica cuántica estaba en lo cierto (Aspect)²⁵.

Ciertamente EPR usaron un buen razonamiento inequívoco basado en el realismo local. Si mantenemos el realismo, el experimento de Aspect dice que la mecánica cuántica contiene un elemento de no-localidad, es decir, una conexión sutil entre las dos partículas que persiste después de que se separan. Muchos físicos creen que tanto Bohr como Einstein no habrían recibido bien la no-localidad, cuyas implicaciones para nuestra comprensión de la naturaleza fundamental del mundo físico permanecen oscuras²⁶. Por ejemplo, Emilio Santos, que fue mi profesor de Mecánica Cuántica y Física Atómica en esta Universidad, ha escrito recientemente²⁷:

«(es posible) ...defender la posibilidad de que la naturaleza es tal que nos permite pensar que «la luna está allí aunque nadie mire» y que «no hay extrañas acciones a distancia. Y que no es necesario regresar a la era precientífica cuando «Dios jugaba a los dados», o sea, cuando algunos (o muchos) casos se producían supuestamente por casualidad, sin explicación racional posible. Por esto yo creo que la naturaleza respeta el realismo local».

Después del experimento de Aspect, si queremos mantener el realismo como un concepto fundamental parece necesario aceptar extrañas acciones a distancia, «no-locales». Otra opción es abandonar el realismo en el mundo cuántico. Un estudio reciente tipo EPR-Bell, combinando experimentos y teoría²⁸, ha demostrado que una amplia y razonable clase de teorías no-locales es incompatible con las correlaciones cuánticas observadas. Esto sugiere que cualquier ampliación futura de la teoría cuántica, si ha de estar en acuerdo con los experimentos, debe abandonar ciertos hechos de las descripciones realistas. Parece ser que, perder el concepto de localidad no es suficientemente «irreal».

Es difícil imaginar que el mundo macroscópico pueda comportarse como el mundo cuántico. ¿Es posible entonces el programa reduccionista de la ciencia? Hay otras opciones, como la que Einstein proponía, basada en la

²⁵ A. Aspect, P. Grangier, and G. Roger, «Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: a New Violation of Bell's Inequalities», Phys. Rev. Lett. 49, 91 (1982).

²⁶ El debate Bohr-Einstein es para muchos una reedición del debate Mach-Boltzman.

²⁷ E. Santos, *Bell's theorem and the increasing empirical support to local realism*, quant-ph/0410193v1.

²⁸ Gröblacher et al. *An experimental test of non-local realism*. Nature, 446, 871-875 (2007).

existencia de variables ocultas, arguyendo que la mecánica cuántica no es una teoría completa. Emilio Santos cree que los actuales experimentos ópticos sobre las desigualdades de Bell, no son útiles para refutar el realismo local. En cambio, cree que futuros experimentos pueden demostrar la violación de algunas predicciones cuánticas standard, sin que se contradiga el corpus básico de la mecánica cuántica, sino únicamente la teoría standard de la medida. Por ejemplo, aparte de problemas tecnológicos de precisión, pueden existir casos «no-ideales» de carácter fundamental, tales como una relación no lineal entre el ratio de detección y la intensidad del haz de luz incidente. Esto podría dar un margen a las teorías de variables ocultas para hacerlas compatibles con los experimentos sobre pares de fotones correlacionados.

Podemos terminar esta sección con una frase de Mario Vargas-Llosa en el prólogo de la reciente reedición de su libro «La verdad de las Mentiras» (Alfaguara, 2007):

El regreso a la realidad es siempre un empobrecimiento brutal: la comprobación de que somos menos de lo que soñamos.

VI. EL TIEMPO DE PLANCK. LOS RELOJES ATÓMICOS

Cualquier reloj, como cualquier medida rutinaria de frecuencia, depende de un movimiento periódico regular, como el de un péndulo, o el de los planetas alrededor del Sol. La primera unidad internacional de tiempo, el **segundo**, se adoptó en 1956 y se basó en la duración del «año tropical», que es el tiempo que tarda la tierra en completar su órbita en torno al sol, regresando al punto donde su eje forma un ángulo con la dirección tierra-sol idéntico al de partida. A mediados de los años 60 se hizo necesario disponer de un patrón más preciso y se recurrió a los relojes atómicos, cuyo primer modelo se había desarrollado en 1949 (US NBS) a partir de la frecuencia de inversión de la molécula de amoníaco (23870 MHz). Por supuesto, admitido que ni la tierra, ni siquiera el sol, son el centro del universo, se acepta la creencia científica de que cualquier transición no perturbada en un átomo dado es idéntica para todos los átomos del mismo tipo, no importa en que lugar del universo esté. Así que los relojes atómicos basados en dichas transiciones, generan el mismo tiempo. Y además no se desgastan ni pasan de moda, como los relojes macroscópicos.

En 1967, la 13.^a Conferencia General de Pesos y Medidas adoptó la nueva definición de la unidad internacional de tiempo: «*El segundo es la duración de 9 192 631 770 periodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de Cesio-133*»²⁹. Se usaron 10 dígitos para ajustar las mejores medidas disponibles de la unidad existente hasta entonces, el segundo «ephemeris». Este tipo de metrología, basada en propiedades físicas invariantes, se ha usado para definir otras constantes fundamentales, salvo el kilogramo, que todavía se define a partir de una pieza de platino guardada en una vitrina en París.

El desarrollo de los relojes atómicos se basa en las técnicas de resonancia magnética en haces moleculares (Ramsey 1956), cuya precisión

²⁹ De hecho, la transición $(F=3, M_F=0) \leftrightarrow (F=4, M_F=0)$ en el único isótopo estable del Cesio.

está limitada por una anchura de la resonancia de unos 100 Hz (mejorable usando fuentes de átomos «fríos»), y posteriormente en los métodos de bombeo óptico (Kastler 1950) combinados con láseres de estado sólido (final de los años 70). En 1993, el primer reloj de Cesio-133 mediante bombeo óptico construido en el NIST (National Institute of Standards and Thecnology) se fijó como el patrón de tiempo y de frecuencia de Estados Unidos. El principio de funcionamiento de estos relojes se explica en la figura 11. El tiempo muerto entre consultas es de 7 milisegundos, produciendo una línea de resonancia con anchura ~ 70 Hz. La precisión de este Standard de tiempo es $\Delta v_m/v \sim 5 \times 10^{-15}$ para un tiempo total de medida $\tau = 1$ día. Otros relojes atómicos, que mejoran aspectos concretos para aplicaciones concretas, son el reloj de Rubidio, el de Hidrógeno, el de fuente atómica, los que operan en el rango de las transiciones ópticas, y dentro de estos, los basados en enfriamiento por laser de iones individuales atrapados. En la figura 10 se da una gráfica de la precisión creciente conseguida en los últimos años para medir el tiempo.

¿Por qué es necesaria tanta precisión? Antes de describir las aplicaciones de los relojes atómicos vamos a detenernos a contemplar el montaje *El Muro de Planck*, que el artista plástico Jorge Barbi (La Guardia, 1950) instaló en la Capilla de los Condes de Fuensaldaña del Patio Herreriano, dentro del Museo de Arte Contemporáneo Español, durante el verano de 2003. En la figura 9 reproducimos una vista de esa instalación tomada del catálogo, en cuyo prólogo, nuestro alcalde y compañero, profesor León de la Riva, dice:

El límite de lo que se puede contar..., tiene un límite preciso..., un número uno que tiene a la izquierda 42 ceros precedidos del punto decimal: 0.001.

A esta barrera infranqueable ante cualquier investigación, se le denominó «El muro de Planck».

En realidad, para cuestiones de física fundamental, en las que están involucradas la mecánica cuántica y la relatividad general, es conveniente usar unidades en las que las constantes \hbar (característica de la mecánica cuántica) y c (velocidad de la luz, característica de la relatividad) se toman como la unidad. Podemos extender este convenio de modo que la constante gravitatoria G también es la unidad. Esto tiene la notable consecuencia de que todas las unidades de espacio, tiempo, masa y carga eléctrica quedan completamente fijadas, proporcionando las que se conocen como unidades de Planck (o unidades *naturales* o unidades *absolutas*). Además, también podemos tomar la constante de Boltzmann k como la unidad:

$$G = c = h = k = 1$$

y entonces la unidad de temperatura se convierte también en algo absoluto. Estas unidades, en términos de nuestras unidades convencionales, son:

masa de Planck	= 2.1 x 10 ⁻⁵ gramos,
longitud de Planck	= 1.6 x 10 ⁻³⁵ metros,
tiempo de Planck	= 5.3 x 10 ⁻⁴⁴ segundos,
temperatura de Planck	= 2.5 x 10 ³² Kelvin,
carga de Planck	= 11.7 cargas de protón.

Los estados a destacar en la evolución temporal del universo, a partir del big-bang (tiempo cero), son los siguientes: dominio de la gravedad (tiempo de Planck, 10⁻⁴⁴ s), materia en forma de quarks y leptones (10⁻⁹ s), formación de nucleones y desaparición de quarks (10⁻² s), nucleosíntesis primordial: formación de Deuterio y Helio (10² s), fin de la nucleosíntesis primordial (10³ s), formación de estados ligados del Hidrógeno (300 años), desacoplo de la materia y la radiación (3x10⁵ años), tiempo actual (10¹⁰ años).

Los relojes atómicos tienen muchas y diversas aplicaciones en las que se requiere controlar el tiempo con mucha precisión. Veamos algunas. En física fundamental, por ejemplo, las frecuencias de transición en el átomo de Hidrógeno pueden obtenerse en función de constantes fundamentales, como las mencionadas **c**, **h**, y la masa y carga del electrón, **m**, **e**. Midiendo muy precisamente dichas transiciones en H con relojes atómicos, se consiguen mejores valores de esas constantes y convalidaciones muy exigentes para la teoría. Puede también comprobarse si las constantes fundamentales de la naturaleza, como la de estructura fina $\alpha = e^2 / (4\pi\epsilon_0 \hbar c)$, varían o no con el tiempo. Si fuera así, también variarían las frecuencias relativas de diferentes átomos, como el Cesio y el Rubidio. Se ha comprobado, usando relojes de fuente atómica, que α no cambia en más de 5x10⁻¹⁵ durante un año.

También se han usado los relojes atómicos para confirmar predicciones de la teoría especial y general de la relatividad. Por ejemplo, en 1976 se envió un reloj de maser de Hidrógeno en un cohete a una altura de 10 000 km, y se midió la contracción relativista de tiempo con una precisión de 7x10⁻⁵, dando un acuerdo perfecto con la relatividad restringida de Einstein. Por otro lado, uno de los supuestos básicos de la teoría general de la relatividad es la invarianza a la posición local (LPI: local position invariance). De acuerdo con la LPI, una vez que se han sintonizado varios relojes atómicos (sintonizar significa tener iguales frecuencias), permanecerán sintonizados, independientemente de su estructura interna, aunque estén sujetos a variaciones en el potencial gravitacional.

En un trabajo reciente [Phy. Rev. Lett. 98, 070802 (2007)], se dan los resultados de una comparación a lo largo de 7 años entre relojes atómicos de Cesio y de Hidrógeno (que son los standards de frecuencia) dando un límite superior para la violación de LPI de 1.4×10^{-6} . El experimento comparó las frecuencias de cuatro masers de Hidrógeno en el NIST con cuatro relojes de fuente atómica de Cesio independientes, uno en el NIST y tres en Europa, sabiendo que el potencial gravitacional del Sol en la superficie terrestre varía debido a la excentricidad orbital de la tierra. Otro test de la relatividad se hizo en 1978 con relojes atómicos midiendo el periodo de un sistema pulsar binario, que variaba exactamente en la cantidad predicha por la pérdida de energía debida a la radiación de ondas gravitacionales. Esa fue la primera evidencia experimental de la existencia de ondas gravitacionales.

Estas comprobaciones de la teoría general de la relatividad son importantes tanto en astronomía y cosmología, como para la práctica de la navegación en el sistema de posicionamiento global GPS (Global Positioning System). Por ejemplo, la resolución de un telescopio, que depende del cociente entre la longitud de onda a detectar, λ , y la apertura del telescopio, D (diámetro de la antena efectiva, para un radiotelescopio), puede aumentarse usando dos radiotelescopios en lados opuestos de la tierra si aseguramos que en cada uno se mida el tiempo muy precisamente con un reloj atómico muy estable³⁰.

La precisión de los relojes atómicos es necesaria para el desarrollo del sistema de radio-navegación GPS. Este sistema permite a un observador recibir y analizar las señales de cuatro satélites, cada uno con un reloj atómico sincronizado a los otros, y determinar su posición con un error máximo de 10 metros y el tiempo con precisión de una diezmillonésima de segundo. Dos observadores conectados al mismo satélite puede sincronizar sus relojes con error de una milmillonésima de segundo (un nanosegundo). El proyecto europeo de navegación GPS, llamado Galileo, que nació con un presupuesto de 3.400 millones de euros y necesita ahora 2.000 más de lo previsto, es un ejemplo de I+D+i a gran escala en el que España participa como socio destacado en la parte de la i pequeña.

Otra aplicación de la navegación basada en relojes atómicos, es el seguimiento y adquisición de datos desde naves interplanetarias. Por ejemplo, el éxito de la misión de la misión Voyager a Neptuno, depende de que los operadores terrestres conozcan con precisión la posición de la nave. Esto se con-

³⁰ La resolución del radiotelescopio de Arecibo (Puerto Rico), que tiene $D=305$ m, puede detectar longitudes de onda típicas en radioastronomía (entre 2 cm y 30 m) con no mejor resolución que el ojo humano detecta la luz visible.

sigue con tres radiotelescopios en diferentes lugares de la tierra, cada uno con dos masers³¹ de hidrógeno muy estables. Los carísimos proyectos de vuelos espaciales de la NASA, que son un emblema del avance de la humanidad (con la pregunta ¿estamos solos en el Universo? como ley motiv), están siendo cuestionados y adaptados para investigaciones más cercanas y urgentes, como el de la exploración del continente Antártico. Es en el polo sur donde se descubrió el hueco de ozono, la extracción de gases de efecto invernadero y se registraron datos climáticos de hace más de medio millón de años (a partir del hielo profundo), y se constató el calentamiento anómalo de la Antártica.

Mencionamos también en esta sección sobre el control del tiempo, la reciente observación del efecto túnel de un electrón en un átomo, un proceso que ocurre en intervalos de tiempo de attosegundos (10^{-18} s). En ese proceso, un electrón de un átomo activado por un láser (luz visible) atraviesa una barrera de potencial, lo cual sólo puede ocurrir en mecánica cuántica, pues en física clásica equivaldría a una energía cinética negativa del electrón. La técnica usada [Nature, Vol 446, p. 679] permite «visualizar», mediante técnicas de láser y rayos X, el movimiento de electrones a través de barreras. El efecto túnel cuántico de los electrones en los sólidos se usa para desvelar la morfología atómica de la materia macroscópica mediante el microscopio de efecto túnel (Scanning Tunneling Microscopy, STM).

El efecto túnel de un átomo es mucho más difícil de observar, y se ha estudiado en vidrios y electrolitos, pero no en cristales. Recientemente ha sido posible observarlo experimentalmente en una estructura «caltrato» de $\text{Eu}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$, mediante espectroscopia Mössbauer [R. P. Hermann *et al*, *Phys. Rev. Lett.* 97, 017401 (2006)]. En este material, dos partes de Germanio y una de Francio albergan átomos invitados de Europio, que se pueden situar en cuatro sitios no equivalentes de la periferia de la red cristalina. Ahora se ha podido ver que los átomos de Europio fluctúan de un sitio a otro por efecto túnel, cambiando localmente las propiedades magnéticas del material.

Solo cito aquí que el premio Nobel de química de 1999 fue concedido a Ahmed Zewail por sus trabajos en el estudio ultrarrápido de reacciones químicas en el dominio del femtosegundo (10^{-15} s), que abrieron el activo campo de estudio de la femtoquímica. Es posible ahora seguir, como con una «moviola», complicadas cadenas de reacciones químicas, como las que se dan en la fotosíntesis, las vías metabólicas en general, y muchos procesos industriales (ver figura 12).

³¹ MASER es el acrónimo de Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation, aunque hoy en día son menos usados que los diseños que usan luz: LÁSER (Light Amplification...). Realmente los láser operan mediante Oscilaciones en lugar de Amplificaciones, pero el acrónimo LOSER (perdedor) no suena bien.

VII. LA NANOTECNOLOGÍA. PREDICCIONES Y MODELOS

En 1967 los Beatles publicaron el álbum de música pop más famoso del siglo XX, *Sgt. Peepers Lonely Band Club Band*. Este LP (Long Play, en la terminología de la época) se hizo popular no sólo por su música sino por su portada, que recogía multitud de personajes influyentes de la época, artistas y escritores, políticos, economistas ... y solo un científico, Einstein. Una de las creadoras, junto a Peter Blake, de la portada de ese LP, ha recreado en 2005 la portada en un mural de 5x3 m situado en Salt Lake City (SLC), sustituyendo los personajes originales por otros que considera influyentes en el siglo XXI. También esta vez sólo hay un científico, Richard Feynman (1918-1988), del que ya hemos hablado como creador de la teoría mas precisa jamás construida, la Electrodinámica Cuántica (QED). La figura 13 reproduce el mural SLC *Peepers*, en el que he destacado a Feynman (figura 14) tocando los bongoes. En 1967 Richard Feynman escribía [Feynman]:

Debemos considerarnos afortunados por vivir en una época en la que aún se están produciendo descubrimientos. Es como el descubrimiento de América: sólo se la descubre una vez. La época que nos ha tocado vivir es una época en la que estamos descubriendo las leyes fundamentales de la naturaleza, una época que no volverá nunca más. Es una experiencia apasionante y maravillosa; pero este entusiasmo tendrá que pasar. Por supuesto, en el futuro habrá otros intereses. Habrá el interés por la conexión de un nivel de fenómenos con otros, por determinados fenómenos en biología y así sucesivamente, o, si hablamos en términos de exploración, exploraremos otros planetas, pero no habrá las mismas cosas que estamos haciendo ahora.

Según Feynman, una vez descubiertas las leyes fundamentales, la física sucumbiría a pensadores de segunda fila, y las darían interpretaciones fuera de la ciencia:

Los filósofos, esos legos en la materia que están siempre haciendo observaciones estúpidas, conseguirán hacerse del gremio, pues no podemos expulsarlos diciendo: «Si llevarais razón seríamos capaces de adivinar

todas las leyes», porque cuando las leyes estén todas ahí tendrán una explicación para ellos... Se producirá una degeneración de ideas parecida a la degeneración que observan los grandes exploradores cuando los turistas exploran su territorio».

Además de su personalidad divertida (su colección de anécdotas «*Surely you are jocking, Mr. Feynman*» es impagable), su magnífico libro «*Lectures on Physics*», y la creación de la QED, que le valió el Premio Nobel de 1965, Richard Feynman es considerado el fundador de la Nanotecnología, a partir de la famosa frase «*There's plenty of room at the botton*» (Al fondo hay espacio de sobra) incluida en su conferencia de 29 de diciembre de 1959 en el Caltech (Instituto Tecnológico de California). Se refería Feynman a las posibilidades de manipulación de los electrones atómicos en un espacio prácticamente vacío entre los núcleos, casi puntuales y casi con toda la masa del sistema material. A modo de diversión, especulaba con la posibilidad de competir entre estudiantes universitarios para conseguir escribir en espacio reducido mediante caracteres de tamaño atómico. Hoy día, es posible escribir toda su charla en un espacio menor que la décima parte de la cabeza de un alfiler. En este capítulo menciono (ver figura 15) algunas aplicaciones menos anecdóticas de la nanotecnología en su estado actual (sección A), y presento algunas aplicaciones de la teoría cuántica a la simulación de procesos y sistemas en la nanoescala (sección B).

A. Ejemplos de manipulación experimental en la escala nanoscópica

1. *Es posible «ver» la corriente de electrones en una unión p-n de un semiconductor.* El diodo semiconductor de Bardeen-Schockley-Bratain (BSB) tenía el tamaño de un puño. Su funcionamiento se basa en la teoría cuántica aplicada a un sólido cristalino dopado, como explicaron BSB. Hoy día, el tamaño de los dispositivos de Silicio está alcanzando la escala atómica, donde las propiedades del sólido extenso pueden cambiar. Por ejemplo, se ha construido un chip de memoria de una centésima de milímetro (tamaño de un glóbulo blanco de la sangre), con 160 000 bits de información, o sea, con una densidad del orden de 100 billones de bits por centímetro cuadrado [Nature, 25-1-2007]. ¿Las leyes aplicadas por BSB para la unión p-n siguen siendo válidas para un dispositivo de unos pocos nanómetros de tamaño?³²

³² En el semiconductor tipo *n*, una impureza atómica aumenta la corriente de electrones libres, y en uno de tipo *p*, otra impureza dada origina una corriente de «huecos», o cargas positivas. En un contacto *p-n* los electrones y huecos se difunden en direcciones opuestas a partir de la unión, se neutralizan y crean una zona que actúa como una barrera aislante. Aplicando un voltaje del signo adecuado se restablece el flujo de corriente. Este simple dis-

Recientemente se ha podido hacer una imagen del movimiento de cargas en la unión p-n usando un microscopio STM de efecto túnel con iluminación de luz láser [S. Yoshida *et al*, *Phys. Rev. Lett*, 98, 026802 (2007)]. Se pudo obtener la densidad de «transportadores» de carga (electrones y huecos) en una unión p-n de arseniuro de galio con resolución de 10 nanómetros: al aumentar el voltaje de 0.5 a 0.9 voltios, los huecos se desplazaron desde 181 a 429 nanómetros en el lado *n* de la unión. Será posible «ver» si los dispositivos de los próximos 15 años, de unos 50 nanómetros, y una escasa densidad de impurezas, operan correctamente.

2. *Nuevos materiales de carbono: grafeno, nanotubos, fullerenos.* Como alternativa al Silicio para dispositivos electrónicos en la escala de nanómetros, pueden construirse transistores en los que un único electrón abre y cierra los circuitos y puede operar a temperatura ambiente. El material que puede destronar al Silicio se llama «grafeno», y es una forma del Carbono en dos dimensiones descubierta recientemente. Estas hojas de carbono tienen un espesor de un solo átomo dispuestos como un panal de miel, siendo muy conductoras y con una resistencia mínima. Se ha podido grabar (litografiar) en estas hojas de grafeno un dispositivo que actúa como un transistor de un electrón independiente y tiene un espesor menor de 10 nanómetros. Si un electrón es atrapado en este dispositivo se produce el llamado «bloqueo Coulombiano», que impide a otros electrones formar una corriente a través del dispositivo. Tenemos así un transistor que actúa poniendo y quitando un simple electrón, lo cual sólo requiere un cambio muy pequeño en el «voltaje de entrada» pero lleva a un cambio grande en la corriente. El dispositivo es muy sensible al cambio de voltaje, muy rápido y realmente pequeño. Un dispositivo similar de Silicio no puede operar a temperatura ambiente porque se oxida y se descompone, pero el grafeno es estable. Sin embargo quedan algunos problemas, como el de los enlaces del Carbono no saturados, que provocan la dispersión de los electrones del dispositivo de una manera aún no bien conocida. Los químicos pueden ayudar a desactivar esos enlaces no saturados (dangling) de la superficie mediante reacciones químicas. La industria electrónica espera que en el año 2020 los dispositivos de silicio hayan alcanzado los 20 nanómetros, que es su límite de tamaño y operatividad. Para entonces es posible que el grafeno pueda usarse en dispositivos más pequeños, desarrollando previamente nuevas técnicas de micro fabricación.

positivo, el diodo, es el elemento básico del transistor y otros componentes de los dispositivos electrónicos.

El grafeno tiene otras propiedades interesantes. Por ejemplo, se han construido con hojas de grafeno un tipo de resonadores que pueden activarse óptica y electrónicamente [Bunch *et al.*, *Science* (2007) 315, 490]. Las láminas de grafeno se usan como contactos enlazados débilmente (con fuerzas tipo van der Waals) a las superficies que uno desea estudiar, y las hace vibrar mediante la aplicación de un voltaje de radiofrecuencia, o de un diodo láser. Las vibraciones mecánicas, en el rango de los megahertz, pueden detectarse mediante interferometría óptica. Contrariamente al Silicio, el grafeno no pierde su módulo de elasticidad (Young) cuando su espesor disminuye. El enlace entre carbonos es similar al que tienen en el diamante, pero en el grafeno ese enlace permanece fuerte incluso en una hoja de espesor atómico. Dicha propiedad mecánica del grafeno permite usarle para medidas muy sensibles de la masa. Se ha conseguido así pesar nanoobjetos, es decir, partículas con un peso inferior a la miltrillonésima parte de un gramo. En el experimento original se pesó un nanoobjeto con solo siete zeptogramos de masa (equivalente al peso de 30 átomos de Xenon). Un Zeptogramo equivale a 10^{-21} gramos.

Se están evaluando también las posibilidades del grafeno para almacenar Hidrógeno en la construcción de pilas de combustible para los automóviles. Otros dispositivos a base de agregados atómicos de carbono, como los nanotubos y los distintos tamaños de fullerenos libre y soportados en superficies, se han desarrollado vertiginosamente en los últimos años, y no vamos a describirlos aquí. Diremos sólo que es una de las ramas más activa de la nanotecnología.

3. «Escribir» con átomos en materiales conductores y aislantes. Para hacer una imagen de la topografía de una superficie con precisión atómica con un microscopio STM (scanning tunneling microscope), se aplica un voltaje a una aguja microscópica que se mueve por encima de la superficie y se mide continuamente la corriente que fluye (por efecto túnel) entre la aguja y la superficie. En 1989, un equipo de IBM usaron la aguja de un STM para mover átomos individuales y escribieron las letras I-B-M con 35 átomos individuales de Xenon sobre una superficie de Níquel. Desde entonces se ha usado el STM para «dibujar» con átomos complicadas figuras, pero sólo sobre superficies conductoras. Existe un instrumento que se llama AFM (atomic force microscope), que al igual que el STM, hace imágenes de una superficie midiendo la fuerza mecánica sobre la aguja, y puede usarse para superficies no conductoras. Recientemente [Phys. Rev. Lett. 90, 176102 (2003)], se ha usado el AFM para mover un átomo de una superficie no conductora y sustituirlo por otro, lo que abre el camino a la «cirugía atómica». En el futuro

será posible construir nanocircuitos. No es pues una especulación la nanoelectrónica, y tampoco la manipulación de los *espines* (momentos magnéticos) atómicos, que ya está generando gran cantidad de resultados (sensores, circuitos) dentro de un nuevo campo, la «*spintrónica*», que solo menciono. Tampoco me detendré, por falta de tiempo y espacio, en las numerosas aplicaciones en biología y medicina de las técnicas de manipulación atómica, combinando el STM y AFM con todo tipo de láser y otras técnicas físicas.

4. *Creación de prototipos en la nanoescala.* En la Figura 12 se reproduce el prototipo de nanoguitarra Fender Stratocaster, del tamaño de una célula roja de la sangre (~ 1 micra), creado en el Centro de Materiales de la Universidad de Cornell mediante una técnica llamada litografía de chorro de electrones, que fue diseñada originalmente para construir micro circuitos electrónicos. Ahora se ha mejorado la técnica para construir circuitos y objetos aún más pequeños llamados NEMS (sistemas nano-electro-mecánicos) que pueden usarse también en biología. Los NEMS son dos órdenes de magnitud menores que los MEMS (micro-electromecanical-systems), y su pequeño tamaño es la clave para responder a fuerzas muy pequeñas o a biosensores tan minúsculos que pueden medir la masa de una sola bacteria. Esta nanoguitarra puede vibrar a ciertas radio-frecuencias.

B. *Simulación teórica y ejemplos en la escala nanoscópica.*

El (los) famoso(s) cuadro(s) de Rene Magritte, *Ceci n'est pas une pipe*, de la serie de 1962 *L'aire et la chanson*, despertó un gran debate en el mundo del arte sobre la representación y la realidad de los objetos (ver figura 16). En el mundo de la ciencia existía desde hacía mucho tiempo un debate similar respecto a la computabilidad del mundo físico. Ese debate se ha plasmado en la formulación del llamado Principio de Church-Turing-Deutsch³³:

Todo sistema físico realizable en un tiempo finito puede ser perfectamente simulado por un modelo universal de máquina computadora operando por medios finitos.

La razón por la que podemos construir calculadores electrónicos es que las leyes de la Física permiten la existencia de modelos para las opera-

³³ D. Deutsch, Quantum Theory, the Church-Turing Principle and the Universal Quantum Computer, *Proceedings of the Royal Society of London A* **400**, 97-117 (1985).

ciones aritméticas, tales como la adición, sustracción y multiplicación. Dicho de otro modo, la razón por la que creemos que las máquinas que llamamos calculadoras computan las funciones aritméticas que dicen que computan, no es porque se pueda comprobar el resultado: QUIST CUSTODIET IPSOS CUSTODES? La razón última es que creemos al detalle la teoría física que se ha usado en su diseño. **Esa teoría**, incluyendo el aserto de que las funciones abstractas de la aritmética son realizadas en la naturaleza, es **empírica**. Ya dijo Galileo que la naturaleza está escrita en lenguaje matemático.

La posibilidad de simular los procesos físicos supone un gran ahorro en tiempo y dinero de los procesos de prueba y error de fabricación industrial. El comportamiento de cualquier sistema compuesto de núcleos atómicos y electrones, sea cual sea su complejidad, está descrito por las ecuaciones fundamentales de la física cuántica, al menos en principio. Eso incluye sólidos, líquidos, gases, sistemas biológicos, esencialmente toda la materia que nos rodea, salvo situaciones de más alta energía como el interior de las estrellas o lo que ocurre en los aceleradores de partículas. Esas ecuaciones básicas se pueden ver en la figura 19 (que comentaremos en la sección VIII), extraídas del artículo «La teoría de todo» de Richard B. Laughlin y David Pines³⁴. En la práctica dichas ecuaciones solo son exactamente solubles para sistemas extremadamente sencillos. Se puede recurrir a su resolución numérica, pero la complejidad (y los recursos computacionales necesarios) escalan exponencialmente con el número de partículas a describir, de manera que los super-ordenadores actuales solo son capaces de resolver sistemas con unos cuantos (muy pocos) electrones.

Durante buena parte del siglo XX se han dedicado enormes esfuerzos de investigación en física y química teórica al desarrollo de métodos aproximados de atacar el llamado «problema de muchos cuerpos»³⁵. De entre ellos, el método basado en el funcional de la densidad permite hoy en día el estudio de sistemas de gran complejidad, lo que le hace aplicable en ámbitos tan diversos como la bioquímica, la nanociencia o las ciencias del medio ambiente. Dicho método se basa en un teorema de existencia de un funcional universal para la energía de cualquier sistema de electrones en un campo externo dado, en términos de la densidad de electrones. Al añadir el principio variacional, que exige que la energía de todo sistema alcance su valor

³⁴ R. B. Laughlin and David Pines, «The Theory of Everything», *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97, 28-31 (2000).

³⁵ El problema de tres cuerpos (Sol-Tierra-Luna) ya fue señalado por Hilbert en el congreso mundial de 1900 en París como uno de los tres más difíciles para el siglo XX, fuera de los de su famosa lista de 23. H. Poincaré descubrió a finales del siglo XIX que el problema de tres cuerpos tiene soluciones caóticas.

mínimo en su estado de equilibrio fundamental, y la conservación del número de electrones, resultan unas ecuaciones (íntegro-) diferenciales cuya solución permite describir el estado electrónico y la evolución de los átomos constituyentes del sistema que se quiere estudiar.

El problema de la teoría del funcional de la densidad es que solo se conoce exactamente tal funcional para sistemas modelo muy simples, por lo que primero hay que adoptar aproximaciones al funcional adecuadas, y segundo hay que resolver numéricamente, de manera aproximada pero con mucha precisión, las ecuaciones para el sistema de interés. Es como si se observara al sistema con un microscopio virtual de enorme resolución. Una iniciativa española que surgió hace una década, el llamado método **Siesta** (Spanish Initiative for Electronic Structure of Thousand Atoms), ha contribuido significativamente a aumentar el alcance de dichos cálculos, que ahora pueden aplicarse a mayores tamaños y sistemas más complejos, con un tamaño de varios miles de átomos. Para tamaños mucho más grandes hay que combinar esos códigos numéricos con otros que pierden el detalle electrónico, pero capturan lo esencial del problema a la escala de tamaño que se quiere observar, tal como se muestra en la figura 17. Esta estrategia multiescala permite el estudio de sistemas materiales en varios órdenes de magnitud de tamaño y de tiempo. Comento brevemente unos pocos casos para ilustrar lo dicho (ver figura 18).

1. *Simular un virus en acción con un supercomputador*

Uno de los supercomputadores más grandes conocidos ha reproducido un momento fugaz de la vida de un virus, lo que representa un primer paso para capturar detalles moleculares de los procesos en organismos biológicos, detalles difíciles de observar en virus reales. En la simulación se ve que aunque el virus parece simétrico tiene pulsos asimétricos hacia fuera y hacia dentro, como si respirase. Se trata de un modelo de computador del virus satélite del mosaico del tabaco, que es un minúsculo empaquetamiento esférico de RNA (figura 15). El programa de simulación utiliza en paralelo varios cientos de procesadores de una máquina del Centro Nacional de Súper computación de Urbana, y calcula las interacciones entre sí de cada uno de los átomos del virus y la gota de agua salada que le rodea (en torno al millón de átomos) cada femtosegundo (una milésima de una billonésima de segundo) durante 50.000 femtosegundos. El modelo mostró que el revestimiento del virus colapsa sin su material genético, es decir, cuando se reproduce el virus construye su revestimiento alrededor del material genético, y no al revés. La biología computacional intentará en el futuro simular virus grandes, como el de la gripe, durante milésimas de segundo, para observar

el intercambio de genes de proteínas en una célula. Esto será posible en los próximos cinco años mediante la siguiente generación de supercomputadores.

2. Resolver electrónicamente la estructura del ADN

Se han efectuado estudios detallados de la estructura electrónica de pequeñas cadenas de ADN mediante técnicas de primeros principios, es decir, resolviendo las ecuaciones de la teoría del funcional de la densidad para 10-30 pares de bases en la celda unidad (entre 250 y 700 átomos en total) en condiciones de deshidratación completa (llamada conformación A del ADN) [E. Artacho et al, *Molecular Physics*, 101, 1578 (2003)]. En la figura 15 se muestran dos superficies con densidad de carga constante correspondientes al último orbital ocupado (HOMO, en azul) y al primer orbital desocupado (LUMO, en rojo), superpuestas al esqueleto atómico de la doble hélice de poliG-poliC. Los orbitales HOMO (LUMO) se hallan esencialmente localizados en las bases de guanina (citosina).

El mecanismo más probable de conducción parece ser el movimiento de huecos originados en las bases de guanina (que es la base nitrogenada con el potencial de ionización más bajo). Análogamente, el movimiento de los electrones a través de las bases de timina (que posee el potencial de ionización más alto) parece ser el mecanismo de conducción más probable en el caso de cadenas de poliA-poliT, como parece confirmar las curvas corriente-voltaje experimentales en ADN sintético. Esto indica que ADN es un semiconductor, con un intervalo para la banda prohibida de ~ 1 eV.

Estas propiedades electrónicas pueden resultar muy útiles para aplicaciones tecnológicas. Debido a la propiedad de autoensamblado, inherente a la propia estructura de la doble hélice, permite usar el ADN como molde para confeccionar nanocircuitos, e incluso su posible empleo como componente de los mismos. En el campo de la biotecnología, la dependencia de la conductividad eléctrica y/o termoeléctrica con el tipo de orden presente en la secuencia de las bases abre la puerta al posible diseño de tests genéticos no invasivos, y en los que no sea necesario tampoco el uso de marcadores biológicos. En este contexto, el desarrollo de una teoría general de sólidos no periódicos, capaz de aportar los métodos y conceptos necesarios para comprender en profundidad las bases físicas de los fenómenos biológicos que ocurren en las macromoléculas complejas como el ADN o las proteínas constituirá, sin duda, uno de los objetivos más apasionantes de la biofísica de la materia condensada durante el siglo XXI. [E. Maciá, *El cristal aperiódico de la vida*, Revista Iberoamericana de Física, 2/1, 7 (2006)].

3. *Simular el daño de la radiación en un material cerámico*

Existen grandes cantidades de emisores pesados de radiactividad α en los residuos nucleares y en los almacenamientos de materiales nucleares en diferentes sitios del mundo. Entre esos emisores están el Plutonio y actínidos menores, como el Americio y el Curio. Para el almacenamiento geológico de residuos, hay consenso en que los actínidos separados del combustible nuclear sean inmovilizados con cerámicas con base mineral en lugar de vidrios, debido a que tienen mayor durabilidad al ataque de agua y menor riesgo de alcanzar «criticalidad» por accidente. Sin embargo, a largo plazo, las partículas α inmersas en dichas cerámicas romperán su estructura cristalina y reducirán su vida útil. Una propiedad fundamental para la predicción del daño radiactivo acumulado es el número de átomos desplazados permanentemente por cada desintegración α . Mientras que este número se estima entre 1.000 y 2.000 átomos por α en el Zirconio natural, se ha determinado recientemente [Farnan et al, Nature 445, 190 (2007)] mediante medidas de resonancia magnética nuclear, que se desplazan unos 5.000 átomos/ α , y que el daño causado en el Zirconio por el Plutonio-239 es similar al causado por la misma dosis de Uranio-238 y de Torio-232. Así se ha estimado que la estructura cristalina del zirconio dopado con 10% de Plutonio-239 terminaría por hacerse amorfa en solo 1.400 años en un almacén geológico, mientras que el tiempo de inmovilización necesario es de 250.000 años). Dado que estos experimentos son difíciles, caros y lentos, es posible hacer simulaciones teóricas muy realistas que permiten obtener el daño previsto en muy diferentes condiciones de operación (presión y temperatura). Un ejemplo se muestra en la figura 18, y una pequeña película de la simulación se verá en la exposición oral.

VIII. REDUCCIONISMO Y COMPLEJIDAD

Vimos en el primer capítulo como la ciencia moderna y la I+D+i nacieron en el siglo XVII, para lo cual tomamos como pretexto una pintura barroca de Lucas Jordan. Desde entonces, mientras Lavoisier-Intelecto persigue la verdad desnuda y Artificio-Perkins-Industria la viste de hermosos colores y perfumes artificiales, los seguidores de Newton y la tradición ateniense, se empeñan en buscar la esencia y la belleza del mundo, concentrada en un esqueleto mínimo de partículas e interacciones trenzadas por unas pocas leyes básicas, expresadas por ecuaciones matemáticas. Esa es la visión reduccionista o unificadora de la ciencia, que siempre ha tenido su contrapartida en la ciencia diversificadora, la cual explica el universo y el fenómeno de la vida como una sucesión de ruptura de escalas y simetrías. En este capítulo final presentamos una breve descripción de estas dos visiones de la ciencia, tomando como pretexto el cuadro *Heráclito y Demócrito*, que está en el Museo de Escultura de Valladolid, y fue pintado por Rubens en 1606 durante una estancia en la corte española, a la sazón en Valladolid, como embajador de Holanda (ver figura 20).

La convivencia actual de esas dos aproximaciones a la comprensión de la naturaleza, puede también ejemplificarse en los premios Nobel de Química y de Física de hace 9 años. En 1998, Walter Kohn y John Pople recibieron el premio Nobel de Química por el desarrollo de métodos cuánticos teóricos que permiten investigar las propiedades de las moléculas en procesos químicos. El físico Walter Kohn había desarrollado la Teoría del Funcional de la Densidad que hemos comentado en la sección anterior, y que es parte del programa «reduccionista» de la Ciencia. Por otro lado, el premio Nobel de Física de ese mismo año lo recibieron R. B. Laughlin, H. L. Störmer y D. Chee Tsui, por el descubrimiento e interpretación de una nueva forma de fluido cuántico con excitaciones de carga fraccionaria (efecto Hall cuántico fraccionario). Richard B. Laughlin es un brillante y activo físico contrario al programa reduccionista, que propugna en su lugar la teoría de la «emergencia» de la complejidad en los sistemas físicos.

Se llama reduccionista a la visión de la física que remite la explicación de todos los sistemas y fenómenos a descubrir y resolver un conjunto de ecuaciones (diferenciales) para los componentes elementales del sistema. Si partimos de los núcleos y los electrones atómicos, ese programa se esquemmatiza en la figura 19, tomada (con permiso) de la web de Richard Laughlin. El comentario del propio Laughlin a esa figura es el siguiente:

Nos gusta pensar que la base fundamental de todas las cosas es un conjunto de ecuaciones que describen (en mecánica cuántica, por supuesto) la forma de movimiento de las partículas más básicas de la naturaleza. Decimos, en broma, que esas ecuaciones son la «teoría de todo», porque ellas nos darían la descripción de todas las cosas del universo, si pudiéramos resolverlas. Si consideramos la lista de «cosas» en la figura 19 concluimos que la mera idea del reduccionismo es absurda. Las ecuaciones en la figura son la teoría de todo para los fenómenos de la escala en la figura, gente incluida, pero de hecho son demasiado difíciles de resolver incluso para una molécula como el DNA, y no digamos para un pez o una persona. La verdadera razón por la que comprendemos las cosas más complicadas es porque las observamos y, a partir de esas observaciones, sabemos que siguen ciertas reglas. Esas reglas no se deducen de la «teoría de todo», aunque pensamos que lo harían si las ecuaciones pudieran ser resueltas algún día. Por desgracia, esto no puede someterse a prueba porque el problema es más grande que el que pueda resolver el mayor computador existente o que pueda ser construido.

El artículo emblemático de la crítica al reduccionismo fue escrito en 1972 por P. W. Anderson, [Science, 177, pp. 393-396 (1972)] con el título **More Is Different**, y el subtítulo *Broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science*. En él, partiendo de la división de la física básica establecida por Weiskopf [Phys. Today, 20, 23 (1967)] entre física intensiva (que descubre leyes fundamentales) y extensiva (que las aplica), Anderson hace notar la falacia, inconsciente muchas veces, de identificar la hipótesis reduccionista con la «construccionista»: la habilidad de reducir todo a leyes fundamentales simples no conlleva la habilidad de reconstruir el universo partiendo de dichas leyes. De hecho, cuanto más descubren los físicos de partículas elementales sobre la naturaleza de las leyes fundamentales, menos relevancia parece tener para los auténticos problemas reales del resto de la ciencia, y mucho menos para la sociedad.

La hipótesis construccionista no se sostiene al confrontarla con las dificultades parejas de la escala y la complejidad. Las propiedades de un agregado grande y complicado de partículas elementales no se explican en base a la simple extrapolación de las propiedades de un agregado de pocas

partículas. Desde el potencial de ionización de un átomo no podemos «construir» el potencial de ionización (o función trabajo) de un sólido por extrapolación de los potenciales de ionización de agregados con varios átomos de ese elemento. Al pasar de un átomo al número de Avogadro, las diferentes propiedades de la materia no escalan simplemente con el número de átomos, y muchas propiedades sólo tienen sentido (y cambian) para la colectividad de los átomos del agregado nanoscópico, microscópico o macroscópico. A cada nivel de complejidad aparecen nuevas propiedades, cuya comprensión requiere una investigación tan fundamental como cualquier otra. Esta es la idea detrás de la jerarquía, casi lineal, propuesta por Anderson para los campos científicos:

Las entidades elementales de la ciencia X obedecen las leyes de la ciencia Y

X	\leftarrow	Y
Estado sólido/Física de muchos cuerpos		Física partículas elementales
Química		Física de muchos cuerpos
Biología molecular		Química
Biología de la célula		Biología molecular
...		...
...		...
Psicología		Fisiología
Ciencias Sociales		Psicología

Esto no significa que la ciencia X sea la ciencia Y aplicada, pues en cada estado aparecen (emergen) nuevas leyes, conceptos, generalizaciones, que exigen tanta inspiración y creatividad como en el nivel anterior. Así, la Psicología no es Biología aplicada, ni la Biología es Química aplicada.

Anderson explica en su artículo, mediante varios ejemplos extraídos de su especialidad en física de muchos cuerpos, como formular una teoría general, llamada teoría de la rotura de simetría, para pasar de la diferencia cuantitativa a la cualitativa. De hecho, clarifica como el construccionismo no es lo mismo que el reduccionismo. Los ejemplos son variados, desde el espectro de inversión del amoníaco a la superconductividad, pasando por las propiedades eléctricas y magnéticas de los agregados atómicos³⁶. No me resisto a transcribir los dos ejemplos, tomados de la economía, con los que Anderson termina y resume su trabajo:

³⁶ El XIV congreso internacional sobre agregados atómicos ISSPIC (International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters) se hará en Valladolid en septiembre de 2008, organizado por Julio A. Alonso, María José López y yo mismo, junto a otros miembros del Area de Física Atómica, Molecular y Nuclear de esta Universidad. El logotipo de dicho congreso se reproduce en la Figura 21.

Marx dijo que las diferencias cuantitativas terminan por ser cualitativas, pero un diálogo en el París de los años 20 resume esta idea más claramente:

FITZGERALD: Los ricos son diferentes a nosotros.

HEMINGWAY: Sí, ellos tienen más dinero.

Otros artículos clásicos en el debate reduccionismo-complejidad son los de Godenfeld y Kadanoff [*Simple Lessons from Complexity*, Science, 284, 87-89 (1999)], Laughlin y Pines [*The Theory of Everything*, PNAS, 97, 28-31 (2000)], los comentarios de una serie de científicos de primera línea sobre la teoría del todo [*Year of physics, endgame: A theory of everything?*, Nature, 433, 257-259]³⁷, el comentario de Philip Anderson al libro de Laughlin «A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down» [*Emerging Physic. A fresh approach to viewing the complexity of the Universe*, Nature, 434, 701 (2005)], y el artículo de G. F. R. Ellis [*Physics, complexity and causality*, Nature, 435, 743 (2005)], entre otros muchos. De estos trabajos entresaco algunas frases y comentarios en el Apéndice III.

Los descubrimientos de las décadas recientes nos han llevado a enfatizar el concepto de simetría rota. El desarrollo del universo es visto como una sucesión de ruptura de simetrías. El fenómeno de la vida se ajusta de forma natural a esta imagen. Cada vez que se rompe una simetría, se hacen posibles nuevos niveles de diversidad y creatividad. Quizá este proceso de diversificación no tenga fin. Hay pues dos estilos de ciencias, los que unifican y los que diversifican, y los dos estilos son complementarios. La ciencia de los unificadores (el espíritu de Atenas, el sueño de que el pensamiento pueda captar la realidad) es la exploración de nuestro pasado más remoto, la *recherche du temps perdu*, mientras que la ciencia de los diversificadores es una exploración del universo orientada hacia el futuro. Según Emil Wiechert, citado por Freeman Dyson, **El universo es infinito en todas las direcciones.**

La comprensión de los fenómenos naturales en la tradición del pensamiento griego contiene los dos enfoques de la ciencia, el de la diversidad y el reduccionista, ejemplificadas por *Heráclito* y *Demócrito*, respectivamente, en el cuadro de Rubens de 1606, cuando la ciencia moderna estaba naciendo. La visión del mundo físico de Heráclito «el oscuro» (540-475 a. C.) como una corriente de fenómenos emergentes («No te bañarás nunca

³⁷ Esos científicos son: Gerard 't Hooft, Leonard Susskind, Edward Witten, Masataka Fukugita, Lisa Randall, Lee Smolin, John Stachel, Carlo Rovelli, George Ellis, Steven Weinberg y Roger Penrose.

en el mismo río»), en los que el fuego (energía) es la sustancia primordial, es la misma, *mutatis-mutandi*, que la del algo mayor pero contemporáneo suyo, Lao Tsé (570-490 a. C.) en la china primitiva. Así lo reconoce Claudio Magris, en su famoso libro *El Danubio*, cuando dice:

«Pero el río es un viejo maestro taoísta, que a lo largo de sus orillas da clase sobre la gran rueda y sobre los intersticios entre sus radios».

Sin duda, se refería Magris al siguiente fragmento de Lao Tse en el libro emblemático del taoísmo, Tao Te-King³⁸:

*«Treinta radios convergen
hacia el cubo,
pero el vacío entre ellos crea la naturaleza
de la rueda*

.....

*he aquí el principio:
la materia crea lo utilitario,
lo inmaterial crea la esencia verdadera».*

La interpretación moderna de la física contenida en el taoísmo puede resumirse en los siguientes cuatro principios³⁹:

1. Una teoría física que pueda formularse no puede ser la teoría definitiva.
2. Cualquier clasificación establecida no puede clasificarlo todo.
3. La teoría definitiva informulable existe y gobierna la creación del universo.
4. Las teorías formuladas describen la materia que vemos cada día.

Este esquema no es muy diferente del que propone Roger Penrose en su último libro **El camino a la realidad**. En el epílogo de este libro, Penrose imagina a una estudiante posdoctoral de física, Antea, con un gran talento tanto artístico como matemático, contemplando el cielo nocturno frente al mar, en pleno estío, mientras se plantea profundas cuestiones sobre la gravedad cuántica, los agujeros negros y el big-bang:

³⁸ Lao Tsé, en Emyl Rude, *Typographie*, Ed. Aguilar. Madrid, 1982.

³⁹ Xiao-Gang Wen, *Quantum Field Theory of Many-body System., From the Origin of Sound to an Origin of Light and Electrons*, Oxford U.P. 2005. Ver también arXiv:cond-mat/0508020v2 (2007).

Mientras estaba allí, mirando al este, fue sorprendida por un fogonazo momentáneo e inesperado de luz verde, como si llegara el alba, antes de irrumpir el rojo vivo del sol. El fenómeno del «rayo verde» y su bien establecida explicación física eran muy conocidos por ella, pero nunca lo había presenciado antes, y le produjo un extraño efecto emocional. Esta experiencia se mezcló con varias ideas matemáticas que le habían dado problemas durante la noche⁴⁰.

Sin duda, la física atómica ha alcanzado, en sus primeros cien años de recorrido, un grado de formulación teórica y desarrollo experimental muy atractivo, tanto para los que gustan de la belleza formal, como para los que buscan aplicaciones e innovación de los utensilios. Minerva y sus trasuntos han sido propicios para esta rama de la física. ¿Lo seguirán siendo en los próximos años? ¿Existirá una próxima Antea herida por el rayo verde de las viejas cuestiones y las nuevas soluciones? Me gustaría terminar esta lección haciendo una reflexión, triste, sobre el escaso interés que tiene los jóvenes estudiantes españoles por las ciencias experimentales, y en particular por la física.

Mientras que la proporción de estudiantes de ciencias e ingeniería respecto a los estudiantes de humanidades y ciencias sociales es de 7 a 1 en Estados Unidos y de 10 a 1 en Japón, en España es de 1 a 10. Mientras que el número de alumnos que estudian la física opcional en el bachillerato de Estados Unidos (high school) está creciendo hasta el 27% en los últimos años, ese porcentaje en España está disminuyendo hasta menos del 10 %, tanto en la Física (Química) obligatoria, como, sobre todo, en la opcional. (ver Figura 22). Las autoridades académicas tienen una responsabilidad y una obligación de rendir cuentas ante este panorama, como la tenemos los docentes de estas materias a cualquier nivel. La evolución de horas asignadas obligatoriamente a Química o Física en los distintos planes de estudio de educación secundaria desde hace 40 años (LGE, LOGSE, LOCE), ha disminuido dramáticamente desde 240 en 1967, a 170 en 1970, a 60 en los últimos años.

Los científicos que hacen ciencia básica han contribuido al desarrollo industrial de los países, a cambio de un mayor o menor reconocimiento, casi siempre cicatero. Por el contrario, la contribución del sector industrial a la

⁴⁰ El rayo verde es un fenómeno de refracción de la luz entre dos medios con índice de refracción muy diferentes que cambian con la temperatura, y separados por una superficie plana. El objeto que lo emite está por debajo del horizonte y es como su primera (o última) manifestación. Cuenta **Julio Verne** (1828-1905), en su novela *El rayo Verde* que si dos personas ven el rayo verde al mismo tiempo quedarán unidas por un vínculo más fuerte que el amor.

ciencia básica no es nada generoso en nuestra sociedad, y las nuevas generaciones de estudiantes encuentran poco aliciente en hacer un esfuerzo poco o nada reconocido por las fuerzas sociales de este país. Mi deseo es que esta situación cambie, y que si algún alumno me pregunta cual es la salida de los estudios de física, no tenga que responderle lo mismo que me respondieron a mi hace cuarenta años: por la frontera.

Muchas gracias por su atención.

Dr. E. Balboa

APÉNDICES

A-I. La Gran Ciencia

Siguiendo el *Diccionario de la Ciencia* de Sánchez Ron, la Gran Ciencia es un tipo de práctica científica que requiere de grandes recursos de infraestructura y personal (económicos finalmente), cuyo nacimiento tiene que ver especialmente con la física de partículas elementales (de altas energías), buscando instrumentos que suministrasen cada vez mayor energía a partículas atómicas para que estas pudieran chocar con el núcleo y ahondar en su estructura y la de sus componentes.

A partir de 1932, después del multiplicador de 125.000 voltios de Cockcroft y Walton, empieza la construcción de ciclotrones, por Lawrence, que proporcionan energía creciente. En 1939 Lawrence anuncia una máquina de 100 MeV y en 1940 la fundación Rodefeller donaba 1,4 Millones de dólares para su construcción. En la actualidad los grandes aceleradores tienen kilómetros de radio y cuestan miles de millones de dólares. Además de las grandes máquinas, la gran ciencia agrupa físicos, químicos, ingenieros, médicos y técnicos de todo tipo, y esos laboratorios se parecen más a una gran factoría. La segunda guerra mundial impulsó ese modo «gigantesco» de organización de la Investigación Científica. De ella se derivan grandes desarrollos tecnológicos. Proyectos como el del radar o el Maniatan necesitaban, además de científicos, ingenieros, economistas y expertos en organización industrial.

Para conseguir los enormes recursos que requiere hoy la gran ciencia es necesario el concurso de varias naciones. Después de la guerra nació en Europa el CERN de Ginebra, fundado en 1952 por doce naciones Europeas, y sirvió de experiencia asociativa previa al nacimiento de la Comunidad Europea y luego la Unión Europea. El CERN, donde trabajan más de 6.000 personas, va a poner en marcha pronto el LHC (linear hadron collider: colisionador lineal de hadrones), que es como un microscopio gigantesco para ver indicios de partículas fundamentales y acotar límites de la teoría.

Incluso Estados Unidos ha necesitado abrir alguno de sus proyectos de Gran Ciencia a otros países. Por ejemplo, el telescopio espacial Hubble de la NASA con participación del 15% de la ESA. El proyecto de fusión ITER involucra también a Europa, Estados Unidos, Japón y otros países. El mundo de las naciones individuales se está quedando demasiado pequeño para la gran ciencia. Es una muestra más de la tendencia a la globalización de finales del siglo XX en la que estamos inmersos.

A-II. La militarización de la ciencia

Por otro lado, la militarización de la ciencia, se define en el diccionario de la ciencia de Sánchez Ron, como el «fenómeno que afectó a la dirección, prioridades y procedimientos adoptados en la investigación científica durante y después de la segunda guerra mundial». Un estudio detallado de este tema se puede ver en el libro del mismo autor *El valor de la Ciencia*, Crítica (2.^a edición, 2007). Un ejemplo es el descubrimiento del Plutonio en 1941 por Seaborg y Mcmillan (premios Nobel de 1951), cuya publicación fue retrasada por Physical Review hasta el final de la guerra por razones de seguridad [Seaborg et al, Phys. Rev. 69, 366 (1946); ibid, 69, 367 (1946); ibid 70, 555 (1946)]. El Plutonio fue usado en la bomba de Nagasaki al final de la segunda guerra mundial. El físico Abraham Pais calificó después este silencio de la revista, como «la no-noticia más importante de la historia de Physical Review».

Puesto que el tema no terminó, ni mucho menos, con la segunda guerra mundial, voy a comentar brevemente el artículo « $E=mc^2$, $\Delta H=D(H-H)$, and the end of the civilation», arXiv:physics/0510036v1, escrito el año 2005 por J. E. Hirsch, autor muy conocido por el famoso índice de Hirsch para evaluar la actividad investigadora de los científicos. El artículo tiene 12 secciones, a cual más jugosa: 1. El legado de Einstein; 2. Einstein y las armas nucleares; 3. Armas de destrucción masiva; 4. Física y Química; 5. La responsabilidad de los físicos; 6. Reacciones en Cadena; 7. La forma de parar esto; 8. La política de armas nucleares de Estados Unidos; 9. Irán: el peligro inminente; 10. Secuencia de sucesos que vendrán; 11. Sumario; 12. Una llamada a las armas. Reproduzco el abstract (resumen) del artículo y la dirección URL para quien quiera apoyar una petición contra acciones nucleares, preventivas o no, contra cualquier país:

<http://physics.ucsd.edu/petition>

Hace 100 años Einstein descubrió $E=mc^2$, el secreto de la energía almacenada en la masa ordinaria. $\Delta H=D(H-H)$ es la energía química liberada en la formación del enlace de dos átomos de Hidrógeno. El fallo en

reconocer la enorme diferencia de escala en estas dos ecuaciones, reflejado en los equívocos actuales sobre las armas de destrucción masiva, puede desencadenar ya mismo una reacción en cadena que conduzca al fin de la civilización. Debido a la confluencia de un conjunto de circunstancias, este momento particular es más peligroso que ningún otro en la historia de las armas nucleares. Los físicos tienen una responsabilidad especial para hacer todo lo que puedan para evitar esto. Este artículo es una llamada a las armas. Invocamos un acuerdo de no proliferación nuclear y un aumento de la seguridad y la estabilidad.

A-III. El debate complejidad versus reduccionismo

Resumo aquí algunos artículos clásicos en el debate reduccionismo-complejidad, a saber, los de Godenfeld y Kadanoff [*Simple Lessons from Complexity*, *Science*, 284, 87-89 (1999)], Laughlin y Pines [*The Theory of Everything*, *PNAS*, 97, 28-31 (2000)], los comentarios de una serie de científicos de primera línea sobre la teoría del todo [*Year of physics, endgame: A theory of everything?*, *Nature*, 433, 257-259], el comentario de Philip Anderson al libro de Laughlin «A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down» [*Emerging Physic. A fresh approach to viewing the complexity of the Universe*, *Nature*, 434, 701 (2005)], y el artículo de G. F. R. Ellis [*Physics, complexity and causality*, *Nature*, 435, 743 (2005)]. De estos trabajos entresaco algunas frases y comentarios.

Nigel Goldenfeld y Leo Kadanof [*Simple Lessons from Complexity*, *Science*, 284, 87-89 (1999)]. Lo que intriga de la física es la simplicidad y belleza de sus leyes, en términos de ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales, es decir, matemáticas de cada día. En cambio el mundo es complicado y asombrosamente complejo. De hecho, se han descrito muchos ejemplos de cómo, en situaciones de no equilibrio, los sistemas de muchas partículas se vuelven muy complicados. Es probable que esta tendencia sea la base de la vida, como explican Back, Tang y Wiesenfeld en su modelo de «auto-organización crítica» [*Phys. Rev. Lett.* 59, 381 (1987)]. El hecho de la «organización» ocurre como una propiedad emergente (en el sentido de Anderson), por ejemplo las «transiciones de fase» y las especulaciones sobre aspectos biológicos que se dan en un punto crítico entre el orden y la complejidad [S. A. Kaufman, *The Origin of Order*, Oxford UP (1993); *At Home in the Universe*, Oxford UP (1995)].

En los próximos años aumentará el número de estudios sobre la complejidad en el contexto de la dinámica estadística, para intentar una mejor comprensión de los sistemas físicos, económicos, sociales, y especialmente, biológicos. Estos estudios han de enfrentarse con una actitud diferente a la, hasta hace poco, predominante en Física. Aparentemente no hay leyes para los sistemas complejos. En su lugar, uno busca «lecciones» que puedan

aprenderse (con lucidez y claridad) en un sistema, y aplicarse en otros. De este modo los estudios de física se parecerán más a la experiencia humana.

Richard Laughlin y David Pines [*The Theory of Everything*, PNAS, 97, 28-31 (2000)]. Los fenómenos físicos emergentes regulados por principios de organización superiores, tienen la propiedad de ser «insensibles» a los microscopios, lo cual tiene relevancia directa para la cuestión de lo que es conocible, en el amplio sentido de la palabra. El espectro de excitación a bajas energías de un superconductor convencional, por ejemplo, es completamente genérico, y se caracteriza por un manojito de parámetros que pueden determinarse experimentalmente, pero que no pueden, en general, ser calculados desde primeros principios. Otro ejemplo, aun más trivial, es el espectro a bajas energías de un aislante cristalino convencional, que consiste únicamente de sonido transversal y longitudinal. Es obvio que no hay que probar la existencia de sonido en los sólidos, que es debido a la existencia del módulo de elasticidad microscópico, y, en definitiva, a la rotura espontánea de la simetría trasnacional y rotacional característica del estado cristalino. Por tanto, uno aprende poco sobre la estructura atómica de los sólidos midiendo su acústica.

El estado cristalino es el ejemplo más simple conocido de un «protectorado» cuántico, es decir, un estado estable de la materia cuyas propiedades a baja energía vienen determinadas únicamente por un principio de organización superior. Otros protectorados son: el «líquido de fermiones» de Landau (metales convencionales y Helio-3 normal), la superfluidez de líquidos de Bose (Helio-4 y condensados atómicos), la superconductividad, los aislantes de «banda», el ferromagnetismo y el antiferromagnetismo, y los estados de Hall cuánticos. Estos protectorados, con su comportamiento emergente asociado, nos proporcionan demostraciones explícitas de que la teoría microscópica subyacente puede no tener consecuencias mensurables a bajas energías, y por tanto no es conocible hasta que la energía aumenta y permite escapar del protectorado.

¿Por qué el universo, en el mundo de las altas energías, debería ser diferente? De un modo u otro no sabemos si el universo está cerca de un punto crítico o no, porque los físicos de la renormalización ocultan por principio una de las teorías microscópicas subyacentes, pues sólo disponen de medidas a baja-energía. La creencia común de que la renormalizabilidad del universo es una condición de la teoría microscópica subyacente, hace que la «Teoría del todo» sea, en lugar de una propiedad emergente, un artículo de fe no sujeto a contrastación (falsable, en el sentido de Popper). El modelo Standard, y similares, de las partículas elementales sólo serían descripciones fenomenológicas matemáticamente elegantes de las propiedades a bajas

energías, de las que poco puede sacarse sobre la teoría microscópica subyacente mientras no puedan hacerse experimentos u observaciones a energías fuera de su rango de validez.

El libro «El Fin de la Ciencia» de John Horgan [Horgan 1997], describe las barreras de la Edad de Oro de la Ciencia (el siglo XX) para adquirir más conocimiento fundamental. Sin embargo, Laughlin sostiene que el título adecuado del libro de Horgan hubiera sido «El Fin del Reduccionismo», sin que eso signifique el fin de la ciencia, ni siquiera el fin de la física teórica. Para bien o para mal, estamos siendo testigos de una transición desde la ciencia del pasado (reduccionismo) al estudio de la materia compleja adaptativa, basada en los experimentos, con la esperanza de llegar a nuevos descubrimientos, nuevos conceptos, y nueva sabiduría.

Varios autores: ¿Una teoría de todo? [*Year of physics, endgame: a theory of everything?*, Nature, 433, 257-259]. En sus últimos años, Einstein buscó una teoría que generalizara la relatividad general y además fuera una alternativa a la teoría cuántica. Ahora se conoce como «teoría de todo», si bien Einstein nunca usó esa frase. En 2005, cincuenta años después de la muerte de Einstein, la revista Nature preguntó a varios físicos relevantes «reduccionistas» (de altas energías) sobre lo cerca o lejos que estamos de esa teoría de todo. Doy a continuación un extracto de las respuestas.

1. **Gerard 't Hooft.** La mayor dificultad es conciliar la gravitación general y la teoría cuántica. Una de las paradojas es la del pequeño valor de la constante cosmológica. También hay dificultades de concepto con los agujeros negros, o sea, que ocurre cuando la fuerza gravitatoria muestra su notoria inestabilidad... Algunos de mis colegas, en particular los teóricos de las cuerdas, esperan que las leyes últimas de la física contengan una lógica aún más extraña y misteriosa que la mecánica cuántica... No digo que la teoría última no deba contener elementos estocásticos: estoy con Einstein en la sospecha de que las verdaderas ecuaciones de la naturaleza no permiten jugar a los dados.
2. **Leonard Susskind.** El foco de la física del siglo XX –la estructura de la materia– está cambiando al estudio de la estructura del universo, con nuevas cuestiones... Muchos creen que la teoría de cuerdas será la «bala de plata» matemática que explicará unívocamente nuestro mundo... parece que dicha teoría tiene tantas soluciones que da un paisaje «increíble» de posibilidades. El punto de vista de la competencia –la cosmología observacional– cree que el universo es muy grande y se compone de muchos pequeños universos, cada uno con sus partículas elementales, fuerzas, y constantes de la naturaleza. Si esto es así, la vida que cono-

mos sólo puede existir en regiones del espacio adecuadas. (Principio antrópico).

3. **Edward Witten.** Una de las pocas cosas que sabemos es que la teoría de cuerdas se parece a lo que debería ser la teoría del campo unificado. En treinta y pico años de intenso trabajo, la teoría de cuerdas ha generado una considerable panoplia de ricas ideas, que tienen gran influencia en diferentes áreas de la física y las matemáticas. Pero aun sigue ofreciendo retos a los que la practican.
4. **Masataka Fukuguita.** Probablemente no necesitamos una teoría de todo para explicar el problema de la materia oscura⁴¹, y espero que los experimentos revelen directamente la naturaleza de esa materia. La existencia de una constante cosmológica, o energía del vacío, tiene implicaciones fundamentales para la física... La cosmología no es útil, por desgracia, para construir la teoría de todo.
5. **Lisa Randall.** La física ha cambiado radicalmente durante los años que hemos aprendido los principios físicos que operan a altas energías y escalas de longitud pequeñas. La información nueva que tendremos a partir de los próximos experimentos del colisionador de hadrones pesados (LHC) del CERN, nos ayudará a descubrir más principios básicos... No se si alguna vez la teoría unificada existirá para darnos todas las respuestas, pero creo que seguiremos haciendo progresos en la comprensión profunda de las leyes fundamentales de la naturaleza.
6. **Lee Smolin.** No me gusta la frase «una teoría de todo»... es arrogante y sugiere que todo lo que queda por hacer es atar al mundo, tal como lo conocemos, en una única teoría. Pero creo que se harán avances en el descubrimiento de una comprensión más profunda y unificada de los fenómenos descubiertos hasta ahora... Un paso adelante sería el descubrimiento de un origen común para la geometría del espacio-tiempo y los fenómenos cuánticos. En esa geometría no habría nada reconocible como espacio o como física cuántica: esos conceptos saldrían como descripciones aproximadas, lo mismo que la temperatura y la presión emergen de la estadística de los movimientos de un gran número de átomos. Esa teoría no existe, pero se han dado pasos para formularla.
7. **John Stachel.** Los intentos de crear una teoría cuántica de la gravedad se encaran con el siguiente problema: ¿debemos renunciar a una

⁴¹ El 95% de la materia del universo que no se compone de los mismos elementos que la materia conocida. Esa materia «oscura» no ha sido observada todavía.

teoría independiente de la estructura cinemática espacio-temporal de base? Esta es la opción tomada, por ahora, por la teoría perturbativa de cuerdas, que introduce una base –espacio-tiempo plano de diez, once o más dimensiones– y luego aplica una variante de los procedimientos de la teoría cuántica de campos (en relatividad especial) para cuantizar esta base (los estados excitados de las cuerdas cuantizadas representan las partículas). Sin embargo yo sigo pensando que una formulación de la teoría cuántica de la gravedad con independencia de la base, si resulta posible, sería comparable al mayor logro de Einstein.

8. **Carlo Rovelli.** Personalmente, encuentro fantástica la idea de que estamos cerca de la «teoría de todo» final... Las teorías en discusión, como la «gravedad perturbativa», cuerdas, o geometría no conmutativa, son malamente incompletas... Casi nunca hemos estado tan lejos de una teoría de todo.
9. **George Ellis.** La cuestión clave es qué requerimientos de una teoría unificada de las cuatro fuerzas fundamentales la hace una teoría de todo en el verdadero sentido, es decir una teoría que explique tanto la física fundamental como los hechos de la complejidad genuina, incluyendo los seres humanos. No hay razones para creer que si tal teoría existiera llevaría a la física que funciona en la pequeña parte del espacio de posibilidades que permite la existencia de vida, dado que sólo cinco de los veinte parámetros del modelo Standard determinan que la complejidad pueda emerger... Si esto ocurriera sería necesaria una explicación más fundamental.
10. **Steven Weinberg.** No me gusta el término «teoría de todo» porque sugiere que existe una teoría que, una vez descubierta, resolvería inmediatamente todos los problemas científicos. Claramente, no existe tal cosa. Creo que podemos encontrar una «teoría final»; esto es, una única teoría sencilla que reúne y empuja todas nuestras explicaciones tan lejos como puedan ir. Puedo equivocarme en esto, pero no nunca lo sabremos si no lo intentamos.
11. **Roger Penrose.** El término «teoría de todo» no me gusta ...es arrogante, y sugiere que el conocimiento de las leyes físicas nos diría todo sobre el mundo, al menos en principio. ¿Incluiría tal teoría una teoría de la consciencia? ¿También una teoría de la moral, del comportamiento humano, o de la estética? Incluso si nuestra idea de ciencia pudiera extenderse para incorporar dichas cosas, ¿podríamos pensar que eso es física, o podría ser reducible a física?

Por mi parte, soy lo bastante arrogante para creer que una teoría física de todo debería contener la semilla de una explicación del fenómeno de la conciencia. Ese fenómeno me parece tan esencial que no puede ser simplemente una concomitancia de la complejidad de la acción cerebral. Debería ser mucho más sofisticada que la acción que nos permite penetrar profundamente en el funcionamiento del Universo para los sistemas físicos corrientes. En ese caso, estamos más lejos de entender correctamente las leyes de la naturaleza de lo que muchos físicos creen.

Aparte del problema de la conciencia, creo que estamos cercanos a una teoría física y precisa de todo... Sin embargo... aun no sabemos como los procesos cuánticos en la pequeña escala pueden sumarse en los sistemas macroscópicos complejos cuyo comportamiento es clásico. Esto no es una pura omisión, sino una inconsistencia, que tiene que ver con la paradoja de la medida (la llamada paradoja del gato de Schrödinger). Mientras este problema no se resuelva estaremos lejos de una teoría de todo, si esa teoría existe.

Philip Anderson. Comentario al libro de Laughlin «A Different Universe: Reinventing Physics from the Bottom Down» [*Emerging Physics. A fresh approach to viewing the complexity of the Universe*, Nature, 434, 701 (2005)]. El tema central del libro es el triunfo de la emergencia sobre el reduccionismo: los objetos grandes, como nosotros por ejemplo, son el producto de la organización y el comportamiento colectivo, que no puede reducirse en modo sensato alguno al comportamiento de nuestros componentes elementales... Las leyes subyacentes de la física no tienen sentido (¿conciencia?) del tiempo, y no nos dan pistas para medir o situarnos nosotros mismos en el espacio, ni para nuestra identidad: estamos hechos de ondas en un medio inexistente (una analogía de Laughlin tomada del poema de Christina Rossetti *¿Quién ha visto el viento?* –Who Has seen the Wind–). Toda nuestra identidad y percepciones son el comportamiento colectivo de «fantasmas» que toman prestada su realidad unos de otros.

El libro de Laughlin repasa una gran parte de la física sin usar ecuaciones. Pone un poco de énfasis en la Física de la materia condensada en tanto que explica cosas como los computadores (con cierto escepticismo sobre la computación cuántica), las propiedades de los metales, y cosas por el estilo. Discute algunos fenómenos cuánticos especiales, como los efectos Hall y Josephson, que, gracias a la «protección» de fenómenos cuánticos colectivos, permiten medir con enorme precisión la constante de Planck y la carga eléctrica. El término «protección» expresa el hecho de que el comportamiento preciso de objetos grandes puede resultar, e incluso beneficiarse, del comportamiento desordenado a escala atómica.

Laughlin también critica la nanotecnología con su «carnaval de chucherías» y también da información interna sobre el proyecto de «guerra de las galaxias», y el notoriamente fraudulento proyecto de arma laser de rayos X. Compara, desfavorablemente, las creaciones de la nanotecnología con los nano-objetos de la vida, las biomoléculas, a las que admira.

En la crítica al libro de Laughlin, Anderson no está de acuerdo en el ensalzamiento de Bardeen frente al ingeniero Shockley, que fue el creador del centro de investigación del Bell Labs, junto a J. Fisk y M. Kelly.

Laughlin da importancia al papel del grupo de renormalización (una forma de promediar y obtener propiedades «universales» a partir de los confusos detalles microscópicos), y a otros principios de «protección», en oposición a «mecanismo», para determinar las propiedades de las cosas. No muy convencido de ese argumento, pregunta Anderson: ¿fue Pierre Weiss, con su misterioso campo molecular y sus magnetones de Weiss, el que explicó el ferromagnetismo? ¿O fué, como yo creo, Werner Heisenberg con la teoría cuántica?

Según Anderson, las causas subyacentes iluminan nuestro pensamiento conceptual tanto o más que lo hacen los números precisos. Laughlin no esta de acuerdo con la orientación de la física de «astro-partículas» porque sobre-enfatiza los pensamientos profundos y las visiones panorámicas.

Robert B. Laughlin [Abstract a su conferencia en Madrid el 19/4/2007]. El propósito de la física es descubrir y revelar las leyes fundamentales del universo. Por desgracia, los avances experimentales han revelado dos aspectos de las leyes físicas que son bastante diferentes de los imaginados por Galileo y Newton. Uno es que muchas de las leyes más útiles –por ejemplo, la rigidez de los sólidos– son de naturaleza colectiva, y se anulan cuando la cantidad de materia es pequeña. La otra es que tales importantes leyes colectivas no pueden deducirse rigurosamente de las leyes más fundamentales que creemos que funcionan a escala muy pequeña. Esta dificultad matemática no es la excepción en física, sino la regla. Además, los experimentos en los aceleradores modernos parecen decirnos que TODAS las leyes de la naturaleza que nos son familiares, son de carácter colectivo, y las cosas emergen desde los detalles en la forma que lo hace un cuadro impresionista cuando das unos pasos hacia atrás. Esta observación tiene la siguiente perturbadora implicación: parcelas importantes de la física moderna, en particular nuestra obsesión por encontrar una teoría de todo, son ideológicas, y guardan un preocupantemente parecido con el pensamiento religioso medieval.

George F. R. Ellis [*Physics, complexity and causality*, Nature 435, 743 (2005)]. La teoría atómica de la materia y la tabla periódica de los elementos nos permite comprender la naturaleza física de los objetos materiales, incluyendo los seres vivos. La teoría cuántica ilumina las bases físicas de la tabla periódica y la naturaleza del enlace químico. La biología molecular muestra como las moléculas complejas marcan el desarrollo y funcionamiento de los organismos vivos. Y la neurofísica revela el funcionamiento del cerebro.

En la jerarquía de la complejidad, cada nivel se relaciona con el anterior (ver Anderson: *More is different*). La física de partículas es el nivel fundamental, marcando y, en cierto sentido, explicando, a todos los demás: en una visión reduccionista del mundo es todo lo que hay. Es la vindicación del concepto cartesiano del hombre como máquina.

Sin embargo, este esquema omite aspectos importantes del mundo que la física aún no sabe, pues nuestro entorno está dominado por objetos que encierran el resultado de un diseño intencionado (edificios, libros, computadores, tazas de té). No hay teoría física que explique la naturaleza de los campeonatos de fútbol, las jarras para el té, o los aviones jumbo. Incluso si hubiera una teoría satisfactoria de todo, la física no podría explicar los resultados de los propósitos humanos, y daría por tanto una descripción incompleta del mundo que nos rodea... La física por si misma no puede explicar ningún comportamiento adaptativo que depende del contexto, como la construcción de presas de los castores o la danza de las abejas. Puede ser que estos hechos hayan surgido en los últimos momentos de la expansión del universo como comportamientos autónomos de alto nivel, y que existen debido a las leyes químicas y físicas subyacentes de la materia, pero no están determinados causalmente por esas disciplinas.

Si este es el caso, la oportunidad de futuro en la ciencia es desarrollar una descripción realista de la causalidad en estructuras jerárquicas realmente complejas, donde la causa-efecto de arriba abajo y los efectos de memoria permitan la emergencia de niveles de orden autónomos causales. Por ahora, los intentos de relacionar la física y la complejidad –como la ecuación de reacción-difusión, la teoría del caos, el grupo de renormalización, la teoría de la complejidad– sólo han recorrido un pequeño paso del camino.

BIBLIOGRAFÍA

- [ASIMOV] I. ASIMOV, *Momentos estelares de la ciencia*, Alianza Editorial, 1981.
- [BALIAN] R. BALIAN, *From Microphysics to Macrophysics*, Springer, 2nd Ed. 2007.
- [DYSON] F. J. DYSON, *El infinito en todas direcciones*, Tusquets, 1991.
- [FEYNMAN] Richard FEYNMAN, *The character of Physical Law*, Cambridge, MIT Press, 1967.
La primera edición es de la BBC en 1965. Versión española en Ediciones Muy Interesante, 1986.
- [HORGAN] John HORGAN, *The end of Science: Facing the Limits of Knowledge in the Twilight of the Science Age* (Addison-Wesley, Reading, MA), 1997. Existe versión española, editada por Paidós, 1998.
- [LAUGHLIN] R. B. LAUGHLIN, *Un universo diferente. La reinención de la física en la edad de la emergencia*. Katz, Buenos Aires, 2007.
- [NEWBURGH] R. NEWBURGH, J. PEIDLE and W. RUECKNER. *Einstein, Perrin, and the reality of atoms: 1905 revisited*. American Journal of Physics, 74, 478 (2006).
- [PAIS] Abraham PAIS, «El Señor es sutil...», *La ciencia y la vida de Albert Einstein*, Ed. Ariel Métodos, 1984.
- [PENROSE] Roger PENROSE, *The Road to Reality* (Jonathan Cape, Londres), 2004. Versión española editada por Debate, 2006.
- [SÁNCHEZ-RON] J. M. SÁNCHEZ RON, *El poder de la Ciencia*, Editorial Crítica, segunda edición, 2007.
- [SCHRÖDINGER] E. SCHRÖDINGER, *What is life? The physical aspects of the living cell*, Cambridge UP, New York 1945. Traducción española, *¿Qué es la vida?*, Ediciones Orbis, Barcelona 1986.
- [WEISSKOPF] W. WEISSKOPF, *La física en el siglo XX*, Alianza Universidad, 1985, p. 318.

DOCUMENTO GRÁFICO



Luca Giordano (1632-1705): Minerva como protectora de las artes y las ciencias

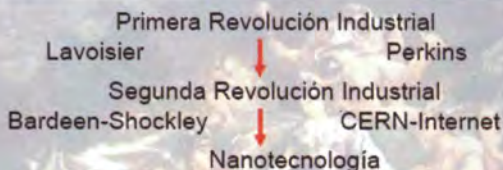
Figura 1. Alegoría de la Investigación + Desarrollo + innovación en los albores de la ciencia moderna.

Investigación+Desarrollo+innovación

1632: Galileo publica

Dialogo sopra i due massimi sistema del mondo, tolemaico e copernicano.
La Naturaleza está escrita en lenguaje matemático.

1633: Galileo prisionero de la inquisición (Y sin embargo se mueve...)



2000-2015: Millenium Development Goals (A. M. D. G.):

- Reducir a la mitad el hambre y la pobreza extrema
- Eliminar enfermedades como el sida y la malaria
- Educación primaria universal
-



1705: Isaac Newton es nombrado Sir por la Reina
Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica (1687)

Luca Giordano (1632-1705): Minerva como protectora de las artes y las ciencias

Figura 2. De Galileo y Newton, creadores de la ciencia moderna, a los objetivos del milenio, pasando por las sucesivas revoluciones industriales.

Del XVII al XIX: los frutos de la ciencia moderna



Aert van der Neer:
Winter landscape (1655)

MECÁNICA ESTADÍSTICA

James Clerk Maxwell (1831-1879)
Ludwing Boltzmann (1844-1906)
Josiah Willard Gibbs (1839-1903)

$$S = k \log W$$

S = entropía.

k = constante de Boltzmann.

W = nº de micro-estados posibles

LEYES DE LA TERMODINÁMICA

Sadi Carnot (1796-1832)

W. Thomson (Lord Kelvin, 1824-1907)

Rudolf Clausius (1822-1888):

1. Die Energie der Welt is konstant.
2. Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu: $dS = \delta Q/T$; $\oint dS \geq 0$



Henry Rousseau:
Vue de pont de Sèvres (1908)

28-9-2007

Lección Inaugural

Léon Brillouin (Sèvres 1889-NY 1969):
Science and Information Theory, 1956.

Figura 3. La termodinámica, creación del siglo XIX, es la ciencia de la energía.

1906: La constante de Boltzmann y el Número de Avogadro



Número de Avogadro = número de átomos en un mol

1 mol = peso atómico o molecular dado en gramos.
Pesos atómicos en escala relativa al carbono (C=12).

$$N_A = 6.02214 \times 10^{23}$$

Si medimos la entropía $S = k \log W$
en unidades termodinámicas
macroscópicas, Julio/(grado Kelvin),
resulta la constante de Boltzmann $k \sim 1/N_A$:



$$k = 1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$



Mach y el Positivismo:
la ciencia establece
relaciones empíricas
entre las percepciones
de nuestros sentidos,
y nada más.

Ostwald (Loschmidt, Zermelo):
reversibilidad del tiempo en
mecánica clásica. En cambio,
la entropía señala una dirección
del tiempo.



Proverbio chino: Ningún barbudo está contento con su barba

Figura 4. 1906: Mausoleo de Boltzmann y el debate con Mach y Ostwald.

1905: ANNUS MIRABILIS



5 Artículos de Einstein en Annalen der Physik:

1. "Quantum" de luz, efecto fotoeléctrico y fotoluminiscencia.
 2. Teoría del movimiento Browniano.
 3. Relatividad especial.
 4. Dependencia de la masa inercial con la energía: $E=mc^2$
 5. Determinación del tamaño atómico y el número de Avogadro.
- El artículo 1 le valió el **Premio Nobel** en 1921. (10/11/1922)
 - El artículo 2 dio la relación usada para demostrar el atomismo.
 - Los artículos 3 y 4 le convirtieron en un icono de la ciencia
 - El artículo 5 le dio la **Tesis Doctoral** en Zürich (con Kleiner).

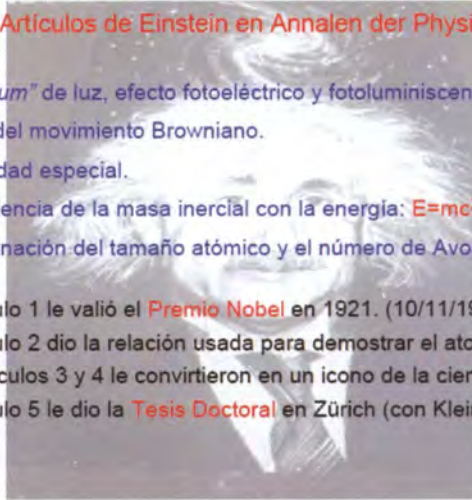
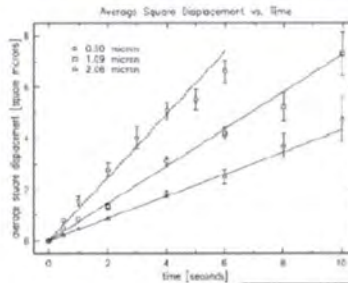
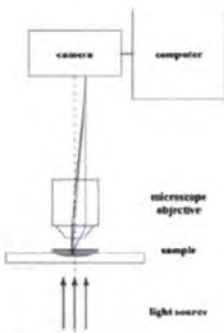


Figura 5. 1905: El «annus mirabilis» de Albert Einstein.

1907: La medición del número de Avogadro



Aparato para ver el movimiento Browniano. Es como el de Perrin con una cámara CCD en lugar de su cámara lúcida

$$\langle x^2 \rangle = (RT/3\pi\eta N_A r) t$$

$\langle x^2 \rangle$ = desplazamiento
 N_A = N° de Avogadro
 η = viscosidad
 r = radio de la partícula
 t = tiempo de medida
 R = constante de los gases
 T = temperatura






J. Perrin 1907

Figura 6. 1907: Jean Perrin y la medición moderna del número de Avogadro.


LA RADIATIVIDAD, LOS RAYOS X y EL NÚMERO ATÓMICO

W. Röntgen(1895)
W. C. Becquerel (1896)
J. J. Thomson (1897)








Niels Bohr:
Light and Life (1932)




Marie Curie



Erwin Schrödinger:
What is life (1951)



H. G. J. Moseley:
1887-1915



Rosalind Franklin (1956)
Science and everyday life cannot and should not be separated

Teoría (Balmer-Bohr):

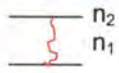
$$v = R Z^2 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right]$$


Figura 7. Radiactividad, rayos X, Moseley y la determinación del número atómico. La relación moderna entre la física y la medicina viene desde los rayos X, cuyo uso recibió un fuerte impulso durante la I primera Guerra Mundial, gracias a Marie Curie, también premio Nobel de Física en 1903. Ella equipó 20 «coches radiológicos» con sistemas de rayos X y los envió al frente para localizar los proyectiles y la metralla en los cuerpos de los soldados y extraérselos con rapidez, lo que permitió salvar muchas vidas. En la segunda mitad del siglo XX, a partir del libro *What is life?* (1944) de Erwin Schrödinger, la contribución de la física atómica a la biología y la medicina se hace más intensa. Ese libro, que tuvo influencia en los desarrollos de la biología molecular conducentes al descubrimiento del ADN, se inspiró en un artículo de otro físico, Max Delbrück, que también fue premio Nobel, esta vez de Medicina. La deriva de Max Delbrück hacia la medicina se debe, entre otras cosas, a la conferencia de Niels Bohr *Light and Life*, pronunciada en el congreso mundial de luminoterapia de 1932. Rosalind Franklin (1920-1958), hizo la placa de rayos X que llevó al descubrimiento del ADN. Hoy juegan un papel importante en medicina las fibras ópticas para endoscopia, los láseres, la resonancia magnética, los TAC, las gamma grafías, ecografías, o el uso de radiaciones en terapia de tumores. En análisis son cada vez más frecuentes técnicas físicas con fluorescencia, luminiscencia o espectroscopias. Los encefalogramas, electrocardiogramas o magneto cardiogramas están basados en la física. La física de fluidos es necesaria para entender la circulación de la sangre y la teoría de la corriente eléctrica sirve para modelar las señales nerviosas. Sin olvidar que los huesos, músculos y tendones forman sistemas mecánicos que siguen las leyes de la física.

La mecánica cuántica: el debate del realismo local



Figura 8. Representación naíf de la mecánica cuántica.

El muro de Planck : breve historia de la medición del tiempo



Jorge Barbi. Museo de Arte Contemporáneo. Patio Herreriano. 2003.
Figura 9. El muro de Planck y las unidades de Planck.

La medición del tiempo

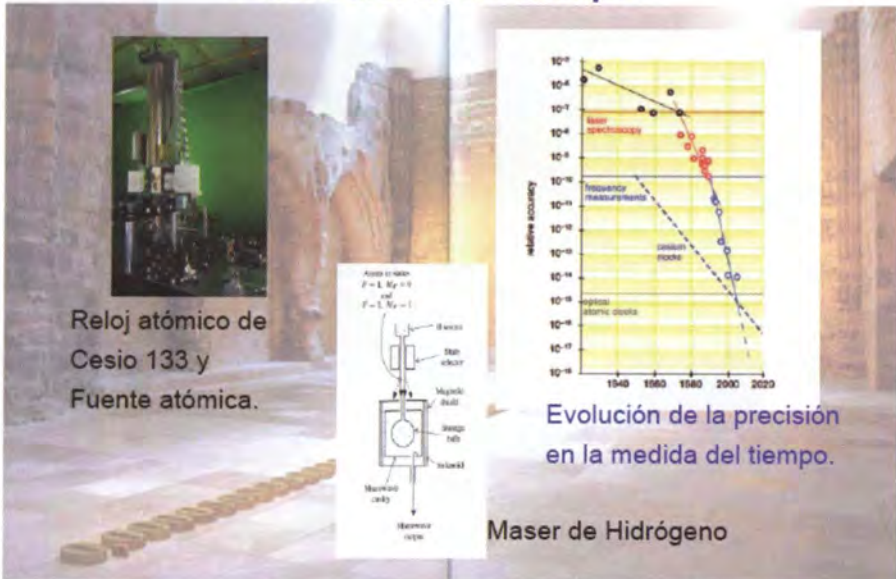


Figura 10. Reloj atómico de Cesio, maser de Hidrógeno y evolución de la precisión de los relojes.

La base de los relojes atómicos: Resonancia magnética en un haz atómico

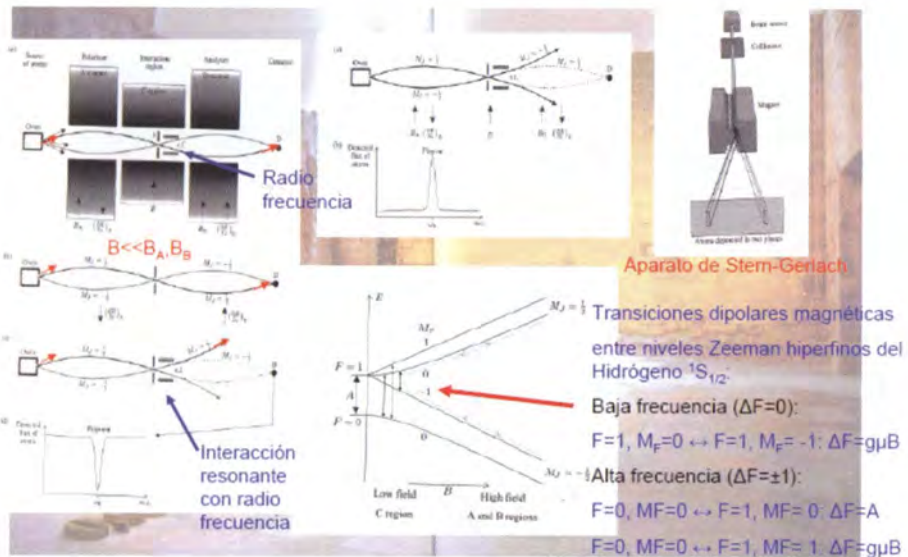


Figura 11. Esquemas básicos de funcionamiento de un reloj atómico.

Aplicaciones del laser de femtosegundos



Figura 12. Ejemplos de aplicación del láser de femtosegundos.

1967-2007: Sgt. Pepper Lonely hearth club band. LOS PERSONAJES DEL SIGLO XXI



Figura 13. 1967-2007: SLC Pepper. Las personas influyentes en el siglo XXI. Ricard Feynmann aparece resaltado en óvalo en rojo.

NANOTECNOLOGÍA

There is Plenty of Room at the Bottom

Richard Feynman, 29-XII-1959



As soon as I mention this, people tell me about miniaturization, and how far it has progressed today. They tell me about electronic monitors about the size of the nail on your small finger. And there is a dollar on the market, they tell me, by which you can write the Lord's Prayer on the head of a pin. But that's a hecking shame. I must permit me to bring up an alternative I intend to discuss. It is a staggering small world that is below. In the year 2000, when they look back at this age, they will wonder why it was not until the year 1959 that anybody began seriously to move in this direction.

Richard P. Feynman, 1960

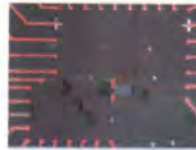
La anchura del cuadro del texto es 30 micras: se pueden hacer mil copias en la cabeza de un afiler.

Figura 14. Feynman y la Nanotecnología.

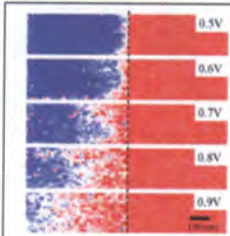
"CHUCHERIAS" DE LA NANOTECNOLOGÍA



Chip Pentium IV del tamaño de una uña con 9.5 millones de transistores.



Nueva memoria con 160 000 bits. Este chip tiene densidad de información de 100 billones de bits por cm²



Observación de la migración de portadores de una unión p-n en función del voltaje de la puerta



Cirugía molecular usando nanopartículas metálicas en sitios específicos de un gen como antenas de luz laser.

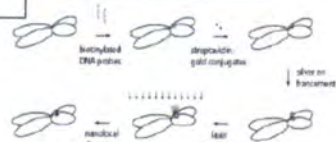


Figura 15. Ejemplos de nanotecnología: chips, visualizar unión p-n, cirugía molecular.

Principio de Church-Turing-Deutsch

D. Deutsch, *Proceedings of the Royal Society of London A* **400**, 97-117 (1985)
Quantum Theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer



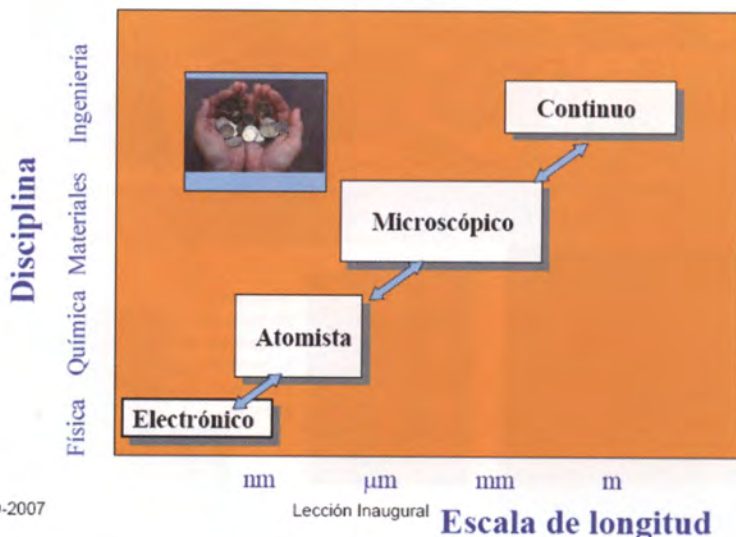
Todo sistema físico realizable en un tiempo finito puede ser perfectamente simulado por un modelo universal de máquina computadora operando por medios finitos.

La razón por la que podemos construir calculadores electrónicos es que las leyes de la Física permiten la existencia de modelos para las operaciones aritméticas tales como la adición, sustracción y multiplicación.

La razón por la que creemos que las máquinas que llamamos calculadoras computan las funciones aritméticas que dicen que computan, no es porque se pueda comprobar el resultado: **QUIST CUSTODIET IPSOS CUSTODES ?**. La razón última es que creemos al detalle la teoría física que se ha usado en su diseño. **Esa teoría, incluyendo el aserto de que las funciones abstractas de la aritmética son realizadas en la naturaleza, es empírica.**

Figura 16. Simulaciones por computador. El debate teórico.

Modelos en diseño de materiales con ayuda de ordenador



28-9-2007

Lección Inaugural

Escala de longitud

Figura 16bis. Simulación numérica multidisciplinar.

ESCALAS DE LONGITUD Y TIEMPO EN SIMULACIÓN MULTIESCALA

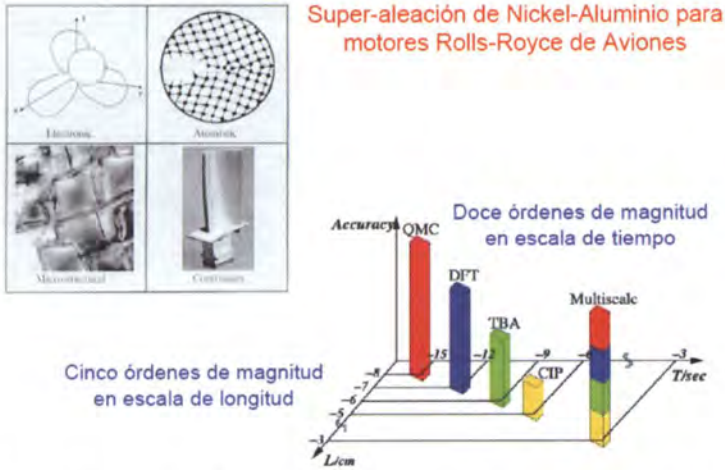
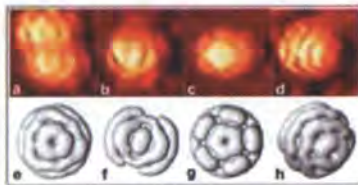
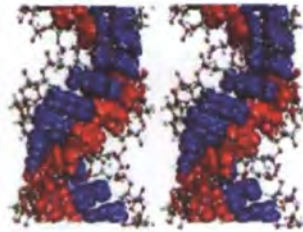


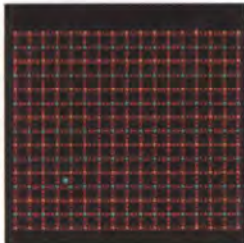
Figura 17. Simulaciones multiescala: varios órdenes de magnitud de espacio y tiempo.



Átomos y sus orbitales:
a-d) Microscopio STM
e-h) Simulación ab-initio



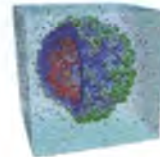
Superficies de densidad constante de la banda ocupada (rojo) y desocupada (azul) del DNA con estructura ordenada pGpC.



Partícula alfa en zirconio



Simulación de flujos de sangre en el corazón, modelo continuo



Simulación de un virus

Figura 18. Ejemplos de simulaciones numéricas. El efecto de la partícula alfa en un material cerámico se mostrará en la charla mediante una pequeña animación.

Theory of Everything

②

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$$

$$\hat{H} = -\sum_i \frac{\hbar^2}{2m_i} \nabla_i^2 - \sum_a \frac{Z_a e^2}{4\pi\epsilon_0 r_{ia}}$$

$$-\sum_{i,j} \frac{Z_i Z_j e^2}{4\pi\epsilon_0 |r_i - r_j|} + \sum_{i,j} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 |r_i - r_j|} + \sum_{i,j} \frac{\hbar^2 \nabla_i \nabla_j}{4\pi\epsilon_0 |r_i - r_j|}$$

e = electron charge
= $1.60217733(49) \times 10^{-19}$ coulomb

\hbar = planck's constant
= $1.0545718(63) \times 10^{-34}$ joule-sec.

m = electron mass
= $9.1093897(54) \times 10^{-31}$ kg

- Atoms
- Molecules
- Water
- Rocks
- DNA
- Fish
- People
- Cars
- Buildings

Increasing Complexity

Figura 19. La teoría de todo según Laughlin. Ecuaciones y sistemas.

El camino a la realidad

Los reduccionistas

Small is beautiful



	Madrid			Alicante			Londres		
	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov
I	IV	VI	II	V	III	IX	IX	IX	IX
II	IV	V	V	VI	VI	VI	VI	VI	VI

XIV International Symposium on Small Particles and Inorganic Clusters. (ISSPIC) Valladolid-2008.






Rubens (1603): Demócrito y Heráclito
Museo de Escultura, Valladolid.



Los emergentes

More is different



Signac
Avignon 1900



J. Fontcuberta
Googlerama
(2007)



Las médulas

Figura 20. El camino a la realidad. Reduccionismo y complejidad.

Estudios y estudiantes de Física (Química) en enseñanza secundaria



Figura 21. Los estudios y estudiantes de física en la enseñanza secundaria.

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.	<i>Minerva como protectora de las ciencias y las artes</i>	81
Fig. 2.	De Galileo y Newton a los objetivos del milenio.....	81
Fig. 3.	<i>Winter Landschaft</i> y <i>Vue de pont de Sévres</i> : del XVII al XX.....	82
Fig. 4.	1906: Mausoleo de Boltzmann y el debate con Mach y Ostwald	82
Fig. 5.	1905: El «annus mirabilis» de Einstein.....	83
Fig. 6.	1907: Perrin y la medición del número de Avogadro	83
Fig. 7.	Radiactividad, rayos X, Moseley y el número atómico	84
Fig. 8.	Representación Naïf de la Mecánica Cuántica.....	85
Fig. 9.	El muro de Planck y las unidades de Planck	85
Fig. 10.	Reloj atómico de Cesio, maser de Hidrógeno y precisión.....	86
Fig. 11.	Esquemas básicos para el funcionamiento de un reloj atómico	86
Fig. 12.	Ejemplos de aplicaciones del laser de femtosegundos	87
Fig. 13.	1967-2007: Sgt. Pepper Lonely Heart Club Band.....	87
Fig. 14.	Feynman y la nanotecnología.....	88
Fig. 15.	Ejemplos de nanotecnología: chips, unión p-n, cirugía molecular.....	88
Fig. 16.	Simulaciones por computador. <i>Ceci n'est pas une pipe</i>	89
Fig. 16 (bis).	Simulación multidisciplinar.....	89
Fig. 17.	Simulaciones multiescala: varios órdenes de magnitud	89
Fig. 18.	Ejemplos de simulaciones numéricas.....	90
Fig. 19.	La teoría del todo: ecuaciones.....	91
Fig. 20.	Complejidad y Reduccionismo: <i>Heráclito el Oscuro</i> y <i>Demócrito</i>	91
Fig. 21.	Estudios y estudiantes de física en la enseñanza secundaria	92

ÍNDICE

I. Introducción y resumen	7
II. El nacimiento de la ciencia moderna y la I+D+i	13
III. 1905-1908: Los debates del atomismo. Boltzmann, Einstein, Perrin y el número de avogadro	21
IV. La radiactividad, los rayos X, y el número atómico	27
V. Átomos, luz, partículas: La mecánica cuántica	33
VI. El tiempo de planck. Los relojes atómicos	39
VII. La nanotecnología. Predicciones y modelos	45
VIII. Reduccionismo y complejidad	55
APÉNDICES	63
A-I. La Gran Ciencia	65
A-II. La militarización de la ciencia	67
A-III. El debate complejidad versus reduccionismo	69
Bibliografía	77
DOCUMENTO GRÁFICO	79