

Disc. apert. UVA 1951/52

UNIVERSIDAD
DE VALLADOLID

CURSO 1951-1952

Disc. Apert. UVA 51/52

Disc. apert. UVA 51/52 BiCe



5>0 0 0 0 4 7 5 5 5 7

475 557

DISCURSO DE APERTURA

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

DR. SALVADOR VELAYOS
CATEDRÁTICO DE FÍSICA EXPERIMENTAL

Las partículas
elementales de la Física

(DISCURSO DE APERTURA)

Disc. Apert. UVA 1951/52

CURSO 1951-1952

EXCELENTÍSIMO Y MAGNÍFICO SEÑOR RECTOR:

EXCELENTÍSIMOS E ILUSTRÍSIMOS SEÑORES:

SEÑORAS Y SEÑORES:

La idea de la existencia de partículas elementales materiales, discretas, indivisibles, que constituyen toda la materia del Universo, es una idea muy antigua. Los griegos en sus especulaciones filosóficas discutieron extensamente el problema de la naturaleza última de la materia y observaron que sólo tenían dos posibilidades de elección; o bien la materia debe imaginarse como capaz de ser dividida en partes cada vez más pequeñas prosiguiendo este proceso indefinidamente, o bien debe estar constituida por pequeñas unidades totalmente indivisibles. La dificultad es muy parecida a la que uno encuentra al considerar los límites del Universo, y trata de decidir por sí mismo si le agrada más imaginar un Universo sin límites, extendiéndose hasta el infinito, o imaginar un Universo finito, con límites definidos, más allá de los cuales no hay nada, ni aun espacio. A los griegos parece haber agradado la idea de partículas materiales indivisibles, y esta hipótesis atómica fué ampliada y desarrollada, en el siglo v a. C., principalmente por Tales, Leucipo y su distinguido discípulo Demócrito, y en muchos aspectos es muy parecida a la mantenida actualmente.

Las ideas de Demócrito estuvieron en boga durante 500 años, empezando a decaer poco después del comienzo

de la Era Cristiana y habían desaparecido totalmente del pensamiento filosófico europeo 200 años d. C. La idea de los átomos materiales no reaparece en Europa hasta mediados del siglo XVII, en un momento que marca el comienzo de la gran era de la investigación científica que ha continuado creciendo con ritmo acelerado hasta nuestros días.

Durante este período, merced a la investigación científica, fundada en la experimentación, la teoría atómica de la materia fué paulatinamente desarrollándose. Faros en este desarrollo fueron las leyes de las proporciones químicas descubiertas y enunciadas por Dalton al comienzo del siglo XIX y más tarde los éxitos de la teoría cinética de los gases. Al comenzar el siglo XX el concepto de átomo químico era aceptado sin reservas como hipótesis fundada en la experimentación científica; la idea de átomo había dejado de ser una especulación filosófica para pasar a ser un hecho científicamente demostrado. De acuerdo con esta imagen toda la materia aparece constituida por una mezcla en número variable de noventa átomos químicos diferentes. El tamaño, la masa y otras propiedades de la mayoría de los átomos químicos habían sido determinados, aunque no con gran precisión.

Las primeras partículas elementales: el electrón y el protón.

Mientras el átomo químico iba siendo firmemente establecido como un hecho científico, otras investigaciones consiguieron demostrar la existencia de una partícula material más elemental que los mismos átomos químicos. En el decenio de 1890 a 1900 el descubrimiento

de los rayos X y de la radiactividad y el estudio de los fenómenos asociados con la descarga de electricidad a través de los gases, pronto demostraron la existencia del ELECTRÓN y probaron que los átomos de la Química deben ser considerados como estructuras complejas, constituídas por partículas de carácter más elemental.

El electrón se distinguía de las otras partículas previamente estudiadas en un aspecto muy importante, cual es su carácter de partícula única, en el sentido de que todos los electrones son idénticos, fuese cualquiera el proceso de su obtención. Así, por vez primera, fué revelada a la Ciencia una partícula de carácter verdaderamente elemental.

Se encontró que era siempre portador de carga eléctrica negativa y que poseía una masa unas 2000 veces más pequeña que la del átomo de hidrógeno, el más sencillo y de menor masa de todos los átomos químicos. El electrón encontró inmediatamente su sitio como una de las partículas elementales común a todas las formas de materia.

Los treinta años siguientes, de 1900 a 1930, fueron extraordinariamente fructíferos en la ampliación de nuestro conocimiento de las propiedades de los átomos químicos. Del trabajo de Moseley se deduce que los átomos son miembros de una familia, estando entre sí relacionados de modo perfectamente definido y sencillo. En 1911 el genio experimental de Rutherford demostró la existencia del núcleo atómico y consiguió en 1919 producir por vez primera un átomo de oxígeno a partir de la ruptura del núcleo de un átomo de nitrógeno (${}_7\text{N}^{14} + {}_2\text{He}^4 = {}_8\text{O}^{17} + {}_1\text{H}^1 + \text{energía}$). Entonces, en 1919, la voluntad del hombre fué capaz por vez primera de producir la desintegración de un elemento habitualmente estable, con la

liberación consiguiente de energía nuclear. Estas y otras investigaciones demuestran que el PROTÓN, núcleo del más sencillo de todos los átomos químicos, el hidrógeno, es un constituyente de todos los otros átomos, y de aquí que sea en realidad una, la segunda hasta entonces, de las partículas elementales de la materia.

Así, pues, en 1930 el físico disponía de dos partículas materiales elementales: el electrón y el protón, en función de las cuales podía intentar explicar la estructura de toda la materia. En esta explicación se consiguieron numerosos éxitos, pero en muchos casos los esfuerzos realizados condujeron al fracaso. Aparentemente nuestro Mundo no podía ser interpretado mediante este esquema tan sencillo.

En general el éxito acompañó al físico en la interpretación de aquellos fenómenos que podemos clasificar, a falta de palabras más adecuadas, como fenómenos extranucleares, y en cambio no tuvo fortuna al interpretar los fenómenos que denominamos fenómenos nucleares. Antes de seguir adelante recordaremos que desde las investigaciones de Rutherford el átomo es un «átomo nuclear», pues se compone de un núcleo pequeño y pesado con carga positiva, rodeado de una amplia envoltura constituida por los electrones ligeros y cargados negativamente. Se entiende por fenómenos extranucleares aquellos procesos en los cuales los electrones que forman las capas exteriores de los átomos son los agentes participantes activos; en este tipo de fenómenos el núcleo central del átomo, o núcleo, no experimenta perturbación alguna y no participa activamente. En cambio, en los fenómenos nucleares el núcleo es un participante activo.

Entre los fenómenos extranucleares y los fenómenos nucleares existen muchas características diferenciales. Una de las más interesantes e importantes es la referente a la

magnitud de las energías correspondientes. En los fenómenos extranucleares las energías que intervienen son menores que las correspondientes a los fenómenos nucleares. La unidad de energía que utilizan los físicos atómicos es el *electrón-voltio* (es la energía que un electrón recibe para franquear una diferencia de potencial de un voltio: $1 \text{ electrón-voltio} = 1 \text{ electrón} \times 1 \text{ voltio} = 4,80 \times 10^{-10} \text{ u. e. e. de carga} \times \frac{1}{300} \text{ u. e. e. de potencial} = 1,6 \times 10^{-12} \text{ ergios}$). Las energías de los fenómenos extranucleares están comprendidas entre una fracción de electrón-voltio y algunos electrón-voltios, mientras que a los fenómenos nucleares corresponden generalmente energías de varios millones de electrón-voltios.

Casi todos los fenómenos naturales que ocurren a nuestro alrededor son fenómenos extranucleares, por ejemplo: la combustión del carbón, el crecimiento de las plantas, la generación de energía eléctrica por los medios convencionales, la fermentación del vino, la explosión de la dinamita y muchos otros en número incontable. Los fenómenos nucleares no están tan divulgados, pero se pueden mencionar algunos de ellos, como por ejemplo: la generación del calor solar, la desintegración del radio, la fabricación del plutonio, la absorción de rayos cósmicos por la atmósfera terrestre, la explosión de una bomba atómica.

Las distancias entre los átomos que constituyen todas las sustancias y las dimensiones de sus nubes o envolturas electrónicas han sido determinadas por experiencias realizadas acerca de la difracción e interferencias originadas con rayos X, que son ondas cuya longitud de onda aproximada es de 10^{-8} cm. (unas 5.000 veces menor que la longitud de onda de la luz visible), longitud

aproximadamente igual al tamaño de los átomos y a la distancia entre ellos cuando la sustancia se encuentra en el estado sólido. Esta longitud es muy grande respecto a las dimensiones del núcleo del átomo por lo que para su medida ya no podemos utilizar los rayos X y se emplean entonces las partículas alfa (α), núcleos de helio, que experimentan desviaciones al pasar cerca de los núcleos de los átomos, y de estas desviaciones se puede deducir el tamaño de los núcleos atómicos (experiencias de Rutherford y Geiger). Los núcleos son aproximadamente 10.000 veces más pequeños que las envolturas electrónicas, es decir, su orden de magnitud es de 10^{-12} cm.

Se obtiene una imagen de estas dimensiones considerando un pequeño cristal cúbico de sal común de una milésima de milímetro de arista, todavía visible con un buen microscopio, y haciendo la hipótesis de que su tamaño se haga 10^{11} veces mayor. De este modo la arista del cristal es de 100 km., en lugar de 0,001 mm. La distancia entre los átomos que constituyen el cristal es entonces de unos 30 metros y el radio de las envolturas electrónicas estará comprendido entre 10 y 15 metros. En los centros de estas envolturas se encuentran los núcleos atómicos con un diámetro aproximado de 1 mm. De la estructura de estos pequeñísimos núcleos se ocupa la Física nuclear.

Como ya hemos indicado, en 1930 eran dos las partículas elementales de materia conocidas por los físicos: el electrón, que siempre se presenta con carga eléctrica negativa, y el protón que lo hace con carga positiva. Considerados de modo conveniente, con los conceptos teóricos que hasta aquel entonces habían sido desarrollados en la mecánica cuántica, el electrón y el protón servían como sillares o bloques de construcción, en función de los cuales se podía explicar la estructura de los

átomos en todo lo referente a los fenómenos extranucleares. En cambio cuando se intentaba representar la estructura de los núcleos de los distintos átomos, o explicar los fenómenos nucleares, estos intentos no tenían generalmente éxito.

El neutrón y el positrón.

Así las cosas, se descubren bruscamente en 1932 dos nuevas partículas elementales: el NEUTRÓN y el electrón positivo o POSITRÓN. El neutrón, descubierto por Chadwick, es una partícula neutra desprovista de carga eléctrica, y su masa es aproximadamente igual a la del protón, y por tanto a la del átomo de hidrógeno. El positrón es, en cambio, una partícula ligera de masa igual a la del electrón y de carga positiva igual a la del protón, igual por tanto y de signo opuesto a la del electrón; fué descubierta por Anderson. Las partículas elementales entonces conocidas eran cuatro: dos pesadas, el protón y el neutrón, y dos ligeras, el electrón y el positrón.

El descubrimiento del neutrón fué inmediatamente muy bien recibido, porque ahora los neutrones con los protones serán los verdaderos sillares empleados en la construcción de los distintos tipos de núcleos atómicos. Un problema fundamental y grave que hasta entonces había existido desaparecía inmediatamente, puesto que ya no era necesario seguir admitiendo la existencia de electrones *dentro* del núcleo, concepto que siempre había ido acompañado por serias dificultades teóricas.

Un aparato de gran utilidad en el estudio de las partículas que aquí consideramos es la conocida cámara de nieblas de Wilson. Si se expansiona bruscamente un

cierto volumen de gas conteniendo vapor de agua descendiendo su temperatura, y si este descenso lleva al gas por debajo del punto de rocío, el vapor se condensará sobre las partículas de polvo o sobre los iones que existan en el gas. Si un instante antes de esta expansión una partícula alfa (α) (que es un núcleo de helio y está formado por dos protones y dos neutrones) atraviesa el gas, dejará tras sí un rosario de partículas ionizadas (la ionización es un proceso por el cual un átomo o una molécula inicialmente neutros adquieren una carga eléctrica), es decir, abundantes núcleos de condensación y al ocurrir ésta nos marcará la trayectoria de la partícula ionizante, trayectoria que puede ser fotografiada. Si en lugar de partículas alfa se emplean electrones, las trayectorias son mucho más finas pues su poder ionizante es mucho menor.

Una partícula alfa en el aire, en condiciones normales de presión y temperatura, deja tras sí unos 34.000 pares de iones a lo largo de un centímetro, mientras que en las mismas condiciones un electrón, aun moviéndose con gran rapidez, producirá unos 30 pares de iones solamente. Para producir un par de iones es necesaria una energía de unos treinta electrón-voltios, por lo que una partícula alfa perderá aproximadamente una energía de un millón de electrón-voltios a lo largo de un centímetro. El poder ionizante de un protón es mayor que el del electrón y menor que el de la partícula alfa.

Las cámaras de Wilson poseen además dos artificios muy útiles en la identificación de las partículas elementales. Uno consiste en un material absorbente, tal como una placa de plomo colocada en el interior de la cámara. Y el otro, adecuado a la medida de la energía de la partícula, es un campo magnético que hará girar a las partículas electrizadas normalmente a la dirección del

campo y en órbitas que son arcos de circunferencia; el radio de estos arcos es proporcional a la cantidad de movimiento (producto de la masa de la partícula por su velocidad) de las partículas.

La lámina I se refiere a una fotografía, tomada por Blackett y Lees en una cámara Wilson, de las trayectorias de las partículas alfa emitidas por una mezcla de torio B y torio C; se observan partículas alfa de dos recorridos medios diferentes, unas de 82,7 mm. y las otras de 44,3 mm. El trazo transversal es de un *protón* arrojado de un núcleo de nitrógeno por una partícula alfa que al chocar con él lo desintegró. En cambio, en la lámina II, a) se observará el choque elástico de una partícula alfa con el núcleo de nitrógeno; en este caso el núcleo de nitrógeno no se desintegra y el trazo más corto de los dos que figuran en el centro de la fotografía es el correspondiente al nitrógeno.

Los neutrones son detectados en la cámara Wilson de un modo indirecto, pues al ser partículas neutras apenas ionizan el gas que atraviesan; solo muy ocasionalmente chocan con una partícula cargada, la cual al retroceder ionizará el gas a lo largo de su trayectoria. Los neutrones originan otros efectos nucleares que pueden dar lugar a la ionización, como ocurre cuando son capturados por núcleos atómicos y estos núcleos producen entonces partículas ionizantes. En ciertos casos el núcleo puede hacerse radiactivo y desintegrarse con emisión de electrones y una vida media que puede variar desde una fracción de segundo a miles de años. En otros casos la desintegración es inmediata, alejándose entre sí los trozos del núcleo. En cualquiera de los casos lo que se detecta y mide son las partículas que emergen del núcleo y no el neutrón que las ha originado, pero ellas nos acusan la presencia de éste. Así, por ejemplo, en la lámina II, b)

el gas hidrógeno contenido en la cámara Wilson ha sido irradiado con neutrones y aparece el trazo de un protón hacia el centro de la cámara.

El descubrimiento del electrón positivo o positrón, ocurrió durante una serie de experiencias cuyo propósito era medir las energías de las partículas producidas por los rayos cósmicos. El descubrimiento del positrón fué un descubrimiento inesperado, a pesar de que dos años antes, un físico inglés, Dirac, había anunciado una nueva teoría en la cual se predecía la existencia de positrones. Sin embargo, esta parte de la teoría no fué bien recibida; muy al contrario, fué considerada como un defecto que presentaba la teoría y fueron realizados muchos intentos, por el mismo Dirac y por otros, para corregirla, aunque todos sin éxito alguno. Si entonces se le ocurriese a un físico considerar seriamente la teoría de Dirac, hubiese tenido una admirable guía que le conduciría directamente al descubrimiento del positrón; de este modo el positrón se habría descubierto en 1930 sin esperar al 1932. Después de demostrar Anderson experimentalmente la existencia del positrón, transcurrió muy poco tiempo para que muchas de sus propiedades fuesen explicadas según la teoría de Dirac.

El descubrimiento del positrón se hizo en una cámara de Wilson sometida a la acción de un campo magnético; apareció una trayectoria de la finura correspondiente a la de los electrones conocidos pero de curvatura contraria a la de éstos. En la lámina II c) se representa la trayectoria de un positrón aislado atravesando una placa de plomo de 6 mm., destinada a medir la pérdida de energía experimentada por la partícula a través del plomo. La curvatura de la trayectoria en la parte inferior de la lámina corresponde a una energía de 63 millones de electrón-

voltios. La curvatura de la trayectoria en la parte superior corresponden a una energía de sólo 23 millones de electrón-voltios. Esto nos dice que la partícula debe ir de abajo hacia arriba, pues debe perder energía al atravesar la lámina de plomo. De esto y del signo de la curvatura en el campo magnético, de sentido conocido, se infiere el signo positivo para la carga eléctrica de la partícula. Además, no sólo el aspecto del trazo era idéntico al que mostraban los electrones negativos, sino que su recorrido por encima de la lámina de plomo era por lo menos diez veces mayor que el que podía corresponder a un protón, por todo lo cual Anderson supuso que la partícula era un electrón positivo o positrón.

El descubrimiento del positrón presenta el primer ejemplo en el cual fué reconocido el hecho de que una partícula elemental de materia pueda tener sólo una existencia transitoria. En la materia ordinaria, por ejemplo, la vida media de un positrón es sólo de unas mil millonésimas de segundo, porque cuando se encuentran un positrón y un electrón mutuamente se aniquilan, las dos partículas desaparecen y en su lugar aparece radiación; la totalidad de la sustancia material que constituye las partículas es espontáneamente transformada en energía radiante. Las medidas demuestran que este proceso está de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein: $E = m \cdot c^2$, que relaciona la masa y la energía. También existe el proceso inverso, es decir, la producción de partículas a partir de la radiación. Si radiación de energía suficientemente elevada atraviesa la materia entonces se engendran parejas electrón-positrón. Se puede observar en la lámina II d) el nacimiento de una de estas parejas a partir de la radiación gamma (γ); se reconocen los signos opuestos de las cargas por las curvaturas de sentido

contrario de las trayectorias. En este proceso la sustancia material de ambas partículas es creada a expensas de la energía de la radiación, y también de acuerdo con la mencionada ecuación de Einstein.

A la luz de estos hechos debe cambiarse radicalmente el concepto que se tenía de las partículas elementales; estas partículas ya no deben imaginarse como algo permanente, conservando siempre su identidad, y que sólo sirven como sillares que unidos en grupos forman los más complejos átomos químicos. En su lugar se debe admitir la posibilidad de la creación de partículas materiales a expensas de la radiación y la desaparición de las partículas con producción de energía radiante. Tal posibilidad era totalmente inconcebible para los griegos en sus largas discusiones filosóficas acerca de la indivisibilidad de la materia.

Algo más acerca de los neutrones.

Sabemos actualmente que las ondas no siempre se manifiestan como tales ondas, es decir, como las conocemos en la vida diaria. Los trabajos de Planck, Einstein, Bohr y Compton han demostrado que nuestras ideas eran demasiado simples, pues las ondas poseen un doble carácter; a veces se manifiestan como ondas y a veces lo hacen como partículas. Si las ondas se comportan como partículas ¿por qué las partículas no se manifiestan como ondas? Los estudios de Broglie, Heisenberg, Schroedinger y Dirac y las experiencias de Davisson y Germer, y de G. P. Thompson, completaron el aspecto de esta imagen, concluyendo que las partículas también pueden manifestarse como ondas. Se puede decir que las ondas son

partículas y las partículas son ondas, pero es mejor decir que son diferentes aspectos del mismo concepto o por lo menos diferentes descripciones del mismo.

Refiriéndonos ahora al neutrón, encontramos que de sus aspectos como partícula el más convincente es el hecho de que tiene masa. Esta fué determinada por diferentes técnicas experimentales y ha sido calculada con gran precisión a partir de los estudios realizados acerca de la liberación de la energía en algunas reacciones nucleares. Su valor es de 1,008937 unidades de masa atómica (admitiendo como masa atómica del oxígeno el valor 16) siendo 1,008131 la masa del protón.

El neutrón, lo mismo que el protón y el electrón, puede girar alrededor de un eje que pase por él y por este movimiento tiene asociado un momento angular o cinético como lo tienen todos los cuerpos que giran sobre sí mismos cual una peonza. Se dice entonces que el neutrón, lo mismo que el protón y el electrón, posee un «spin». En cambio los neutrones a pesar de ser partículas neutras presentan un momento magnético (hecho extraño, pues la aparición de un momento magnético está siempre asociada a la presencia de cargas eléctricas en movimiento), se comportan en muchos casos como pequeños imanes, cuyo movimiento, se comportan en muchos casos como pequeños imanes, cuyo momento magnético ha sido determinado con gran precisión, arrojando el valor $-1,9103$ magnetones nucleares mientras que el del protón es $+2,7896$ magnetones nucleares. El signo menos significa que las direcciones del momento angular y del momento magnético son opuestas. El momento magnético del electrón es mucho mayor, 2 magnetones de Bohr, siendo el magnetón de Bohr unas dos mil veces mayor que el magnetón nuclear.

Puesto que la masa del neutrón excede a la del protón en 0,000806 unidades de masa (equivalente según la ecuación de Einstein a una energía de 0,75 millones de electrón-voltios), es de esperar que el neutrón sea una partícula inestable que se desintegrará en un protón y una partícula beta o electrón y, con el fin de conservar el spin del sistema, aparecerá también un neutrino, nueva partícula elemental de la que nos ocuparemos más adelante. Los 0,75 millones de electrón-voltios correspondientes a la diferencia de masa (pues la masa del neutrino es casi cero) aparecerán como energía cinética de las partículas resultantes. Experimentalmente se ha encontrado que la vida media de un neutrón oscila entre 10 y 30 minutos; este es el tiempo necesario para que se desintegren la mitad de un cierto número de neutrones.

Si un neutrón con una cierta energía choca oblicuamente con un protón, ambos serán repelidos entre sí como lo harían dos bolas de billar. Este hecho nos demuestra que el momento angular de estas partículas no juega papel alguno en el choque, que es lo que ocurre en el caso de las bolas de billar que por estar demasiado pulimentadas no intercambian en el choque sus energías de rotación. En cambio es de interés el hecho de que ambas partículas se comporten cual imanes, como mas adelante veremos. El intercambio de energía en un choque elástico entre un neutrón y un núcleo pesado puede también considerarse como un choque entre dos esferas, pero ahora de diferente tamaño. El aspecto del neutrón como partícula se manifiesta también cuando se considera la «sección eficaz» de los procesos de dispersión de neutrones por los núcleos. Si colocamos el núcleo en el centro de un blanco de tiro de un centímetro cuadrado de área y se disparan al azar neutrones sobre

el blanco, entonces la probabilidad, por neutrón disparado, de pegar al núcleo viene dada precisamente en este caso por el área del núcleo; este área se denomina «sección eficaz» de este proceso. La sección eficaz para la dispersión de neutrones lentos por la mayoría de los núcleos está dada muy aproximadamente por el área del núcleo, cuyo radio se determina por otros experimentos. Sin embargo, para muchos núcleos la sección eficaz en la dispersión de neutrones lentos es mucho mayor que la dada por el área aparente del núcleo, en cuyo caso es necesario tener presentes las propiedades del neutrón como onda y explicar así estas secciones eficaces de gran tamaño.

En la mayor parte de los casos de interacción de neutrones con la materia como, por ejemplo, en la difracción de neutrones lentos por cristales, son tan marcadas las propiedades ondulatorias del neutrón, su aspecto de onda, que casi llega a olvidarse el doble carácter de esta partícula. La mayor parte de las ecuaciones que describen la difracción y la refracción de los rayos X, los cuales son naturalmente ondas, son casi directamente aplicables a los neutrones.

Uno de los métodos empleados para determinar la longitud de onda de los neutrones es el de su difracción por cristales, muy parecido al de la difracción de rayos X. Si un haz de neutrones originados en una reacción en cadena, tal como las que se desarrollan en una pila atómica, se le hace incidir sobre un monocristal, se observarán una serie de haces difractados que pueden recogerse en una película fotográfica obteniendo así el correspondiente lauegrama de difracción del cristal, análogo a los obtenidos con rayos X y que sirvieron en un principio para demostrar la naturaleza ondulatoria de estos rayos X.

En la lámina III a), b) se representan sendos lauegramas obtenidos con neutrones, en la primera con un cristal de sal común y en la segunda con una plaquita de un monocristal de plomo cuyo espesor era de ¡1,59 centímetros!, lo cual nos indica hasta qué punto es transparente la materia a los neutrones; el examen con rayos X de este cristal se hubiese limitado a una capa superficial de algunas milésimas de centímetro de espesor.

Además de demostrar las propiedades ondulatorias de la radiación difractada los lauegramas de una sustancia pueden ser útiles para establecer la posición de los átomos en la misma, es decir, determinar la estructura cristalina. Tal estudio, haciendo uso de las características ondulatorias de los rayos X y de los electrones ha sido muy desarrollado en los últimos treinta años, pero tiene también sus limitaciones y parece ser que en muchos casos el empleo de neutrones ofrece considerables ventajas sobre el de otras radiaciones.

De gran importancia en los estudios cristalográficos es el conocer el poder dispersivo relativo de los centros de dispersión que constituyen el cristal. Como hemos indicado, los neutrones son dispersados por los núcleos atómicos pero en el paso de un neutrón a través de un átomo o de su vecindad no influye en absoluto la presencia de los electrones de la envoltura de dicho átomo. La dispersión nuclear se lleva a cabo por el campo nuclear de fuerzas, acerca del cual sabemos muy poco todavía, y de aquí que no sean útiles las consideraciones teóricas que describen las amplitudes relativas de dispersión. Sin embargo, se han medido muchas secciones eficaces de dispersión nuclear y, contrariamente a lo que ocurre con las secciones para los rayos X, aquí no se presenta una variación regular de estos valores en función de la masa atómica.

Con rayos X, la sección eficaz del hidrógeno es tan pequeña respecto a las secciones eficaces de la mayoría de los elementos, que los efectos de dispersión o de difracción debidos al hidrógeno en presencia de otros átomos no son en general observables; por ejemplo, en el estudio de la estructura cristalina del hielo, los efectos con rayos X son debidos casi totalmente a los átomos de oxígeno del cristal. En cambio, con neutrones, si se emplea el deuterio en lugar del hidrógeno (el deuterio posee en su núcleo un protón y un neutrón y por tanto es un isótopo del hidrógeno), las secciones eficaces para la dispersión por átomos de deuterio y por átomos de oxígeno son aproximadamente iguales y entonces puede hacerse un análisis directo de la posición de estos átomos en el cristal.

La dispersión de neutrones por sustancias que contienen hidrógeno no es sólo interesante en lo referente a la estructura del cristal o de la molécula, sino por el significado fundamental que presenta la acción mutua entre dos partículas fundamentales, el neutrón y el núcleo del átomo de hidrógeno o protón. Como la materia está formada con neutrones y protones, el conocimiento de las fuerzas que ligan ambas partículas debe ser una parte de cualquier teoría que trate de explicar la estructura nuclear.

Cuando un neutrón choca con un protón puede ser desviado o puede ser capturado por el protón con la emisión de radiación gamma (rayos más penetrantes que los X, es decir de menor longitud de onda) y formación de un deuterón (núcleo de un átomo de deuterio). La teoría de la dispersión de neutrones por protones es en cierto modo la teoría del enlace de ambas partículas para formar un núcleo de deuterio. Experimentalmente se ha encontrado que la acción mutua entre estas dos partículas elementales depende de la orientación relativa de los

correspondientes spins, los cuales pueden ser paralelos o antiparalelos.

Hasta ahora sólo hemos considerado la interacción, o acciones mutuas, de los neutrones con los núcleos atómicos. El spin y el momento magnético de los neutrones desempeñan un cierto cometido en las interacciones nucleares, y como los electrones tienen también un spin y un momento magnético asociado es de esperar que también existan interacciones magnéticas entre neutrones y electrones atómicos. Sin embargo, sólo en ciertos casos especiales se encuentra que los átomos de una sustancia sólida posean spins y momentos magnéticos, pues en la mayoría de los casos los momentos magnéticos electrónicos de los átomos se compensan entre ellos y el átomo presenta entonces un momento magnético nulo y consecuentemente no existe interacción magnética con el posible neutrón que se le aproxime. En las sustancias ferromagnéticas cuales son el hierro, el cobalto y el níquel, y en las paramagnéticas como el óxido de manganeso, la tercera capa no saturada en los átomos metálicos o en los iones contiene electrones con spins no emparejados y son estos electrones no compensados los realmente responsables del comportamiento magnético de estas sustancias. En los materiales ferromagnéticos los spins están ordenados mientras que en las sustancias paramagnéticas están orientados al azar.

Las interacciones magnéticas de los neutrones con iones y átomos de este tipo son comparables y pueden, en algunos casos, ser mucho mayores que las interacciones puramente nucleares. Una de las experiencias más significativa asociada a la dispersión magnética de los neutrones se refiere a la polarización de estos neutrones y a su aplicación a la medida precisa del momento magnético del neutrón.

Hay otro aspecto de la dispersión magnética que promete ser de gran ayuda en la resolución de problemas referentes a la estructura de los materiales magnéticos. Se refiere al estudio de la dispersión y de la refracción de neutrones por cristales paramagnéticos y antiferromagnéticos. En algunas sustancias paramagnéticas los iones magnéticos o magnetógenos, tal como el manganeso en el sulfato de manganeso, tienen sus momentos magnéticos orientados al azar sin fuerzas de acoplo entre los imanes individuales. Otras sustancias paramagnéticas presentan un comportamiento magnético que sugiere que los momentos están acoplados entre ellos por fuerzas probablemente de canje, que actúan entre los spins electrónicos de los átomos vecinos. Como la dispersión de neutrones depende de la orientación de los momentos magnéticos en la red cristalina, la fotografía de los neutrones difractados vendrá a ser una imagen directa de la estructura magnética existente.

Los efectos de la dispersión magnética, que acabamos de bosquejar, constituyen probablemente la aplicación más interesante de la difracción de neutrones. Hace algunos años se intentó el estudio de estas sustancias magnéticas mediante la difracción de rayos X, pero el éxito no coronó estos esfuerzos por ausencia de la necesaria interacción. Empleando neutrones como radiación capaz de difractarse ya existe la imprescindible interacción magnética, y es de esperar que muchos e interesantes fenómenos magnéticos sean estudiados con esta nueva técnica.

Los mesones.

La historia de los mesones comienza, como lo hace frecuentemente la historia de los nuevos descubrimientos, con la obtención por los científicos de datos experimentales que no pueden interpretarse con las ideas aceptadas hasta entonces. En el caso actual los datos aparentemente inexplicables provienen del estudio de las propiedades de la radiación cósmica.

Se creía a finales de 1933 que la radiación cósmica consistía en una mezcla de electrones, positrones, fotones, protones y neutrones. Se había encontrado que una parte de la radiación era capaz de atravesar grandes espesores de plomo y se pensaba que esta parte estaría formada por protones. También habían sido observados electrones en grupos denominados «cascadas» aunque su modo de originarse no era de fácil interpretación.

Entre 1933 y 1936 fué muy considerable el progreso en la investigación de las propiedades de la radiación cósmica. La recientemente desarrollada cámara de Wilson provista de contador (el contador de Geiger es un artefacto adecuado para detectar y aun contar las partículas ionizantes), y bajo la acción de un intenso campo magnético, demostró ser de extraordinaria importancia en estas investigaciones. El paso a través del aparato de una partícula de la radiación cósmica inicia un impulso eléctrico en los contadores Geiger instalados en la cámara Wilson o en su vecindad y este impulso, convenientemente amplificado, provoca la expansión del gas encerrado en la cámara, ilumina este gas y dispara la máquina fotográfica. Así puede decirse que la partícula de la radiación cósmica se fotografía a sí misma. Sin embargo, algunos de los resultados obtenidos con este instrumento eran de

difícil interpretación y aun en ciertos casos contradictorios. Por ejemplo, una cuidadosa investigación de la naturaleza de la parte penetrante de la radiación condujo a resultados en absoluto opuestos a la hipótesis de que estuviese constituida por protones. Se encontró que las partículas podían tener cargas positivas y negativas, lo que sugiere naturaleza electrónica. Además el número de protones lentos que atravesaban la cámara Wilson era más pequeño de lo que podía esperarse teniendo en cuenta el número conocido de los protones rápidos y, por último, se veían partículas que atravesaban las placas de plomo del interior de la cámara con energía demasiado pequeña para poder considerarlas como protones.

Por otra parte, si las partículas penetrantes fuesen electrones, entonces la teoría de Bethe-Heitler de las pérdidas de radiación debería ser incorrecta para los electrones cuyas energías fuesen del orden de 100 Mev (1 Mev = 10^6 electrón-voltios). Esta teoría predice que los electrones deben perder una parte substancial de su energía en la creación de fotones (paquetes o partículas de energía radiante y de masa nula en reposo de los que más adelante nos ocuparemos) al atravesar materiales sólidos de elevado número atómico. Los fotones se materializarían, como más arriba hemos indicado, en pares de electrones (electrón y positrón) y estos electrones producirían a su vez nuevos fotones y así sucesivamente; en consecuencia, electrones de gran energía no serían las partículas adecuadas para atravesar una capa de plomo sin dar lugar a su multiplicación. Esta teoría suministra así una explicación del mecanismo de producción de las mencionadas «cascadas» de electrones.

Las detenidas experiencias de Anderson y Neddermeyer revelaron que las partículas de las «cascadas», las

cuales son con toda probabilidad electrones, se manifestaban de acuerdo con las predicciones de la teoría de Bethe-Heitler, mientras que las partículas aisladas rara vez se multiplicaban al atravesar el plomo. Según la teoría de Bethe-Heitler la energía perdida por una partícula rápida en la creación de fotones es inversamente proporcional al cuadrado de su masa; entonces la existencia de partículas penetrantes podría explicarse imaginando la presencia de una partícula de masa mayor que la del electrón. Los hechos anteriormente mencionados habían demostrado que la partícula no sería un protón y ya a finales de 1936 se había sugerido que en la radiación cósmica existía una partícula de masa intermedia entre la del electrón y la del protón, cargada positivamente o negativamente; esta hipótesis parecía conducir al único camino de salida de nuestro punto muerto.

En los dos años siguientes se fué afianzando la mencionada hipótesis de la existencia del MESÓN, pues este fué el nombre finalmente adoptado para la partícula de masa intermedia, y en 1938 fué obtenida la fotografía de la trayectoria del primer mesón identificado. Esta fotografía de Neddermeyer y Anderson, se reproduce en la lámina III, c) y muestra una partícula cruzando un contador Geiger colocado en el interior de una cámara Wilson y deteniéndose en el seno del gas. La cámara estaba sometida a un campo magnético y el sentido de la desviación de la partícula indica que tiene carga positiva. Medidas de la curvatura de la trayectoria de la partícula en el campo magnético permiten obtener una idea acerca de su masa y así se encuentra que su valor está comprendido entre 200 y 250 veces la masa del electrón.

Este resultado fué inmediatamente relacionado con una teoría propuesta tres años antes por Yukawa. Con

el fin de interpretar las fuerzas que mantienen unidos a protones y neutrones dentro del núcleo, Yukawa había postulado la existencia de una partícula de masa unas ciento cincuenta veces mayor que la masa del electrón. En los años siguientes se consiguió considerable información acerca de esta partícula; la masa se precisó en 220 la del electrón y se encontró el importante hecho de que el mesón era radiactivo, característica que también había sido anunciada por Yukawa. El mesón se desintegra espontáneamente originando un electrón y radiación neutra.

La desintegración del mesón fué fotografiada por vez primera por Williams y Roberts en 1940 y en 1942 Rossi y otros colaboradores midieron la vida media radiactiva de la partícula. Esta medida fué realizada interceptando mesones con un bloque de latón y determinando el intervalo de tiempo entre la llegada del mesón y la emisión del electrón de desintegración. Así se encontró para la vida media el valor de $2,15 \times 10^{-6}$ segundos; este valor es aproximadamente diez veces mayor que el de Yukawa, presentándose así la primera dificultad en el intento de identificar la partícula de Yukawa con el mesón de la radiación cósmica.

No fué esta la única dificultad que se encontró, pues pronto se vió que sólo la mitad de los mesones detenidos por el latón, en la experiencia de Rossi, se desintegraban. Se explicó este hecho fundándose en que un mesón negativo muy lento era atraído electrostáticamente por el núcleo cargado positivamente y cuando llegaba a estar suficientemente próximo era absorbido por este núcleo con fuerzas nucleares mucho más intensas. Todo esto ocurre en un intervalo de tiempo mucho más breve que el requerido para la desintegración radiactiva. En cambio

un mesón cargado positivamente era repelido por el núcleo y quedaba por tanto en condiciones de desintegrarse.

Esta explicación teórica fué sometida a comprobación experimental por Conversi, Pancini y Picconi y encontraron que los mesones positivos se desintegraban normalmente como había observado Rossi, pero los mesones negativos tenían que ser atraídos por las fuerzas electrostáticas a una distancia del núcleo extraordinariamente pequeña para que pudiese ocurrir la interacción nuclear. Esto sólo sucedía deteniendo los mesones en materiales de número atómico grande o mediano. En elementos de pequeña carga nuclear se observó que la mayoría de los mesones se desintegraban antes de que ocurriese la captura.

Así pues, el mesón de la radiación cósmica que en un principio había sido interpretado como partícula de fuerte interacción, responsable de las grandes fuerzas que actúan entre protones y neutrones, tenía en realidad interacción demasiado débil para poder ser captada por los núcleos ligeros.

Se supuso que cuando un mesón era captado por un núcleo la energía correspondiente a su masa en reposo era liberada en el interior del núcleo dando lugar a su desintegración. Imágenes de este proceso fueron obtenidas en los primeros meses de 1947 mediante una técnica totalmente nueva debida a Powell empleando emulsiones fotográficas sobre las cuales quedan las huellas de las partículas ionizantes. Un típico ejemplo de este proceso esta representado en la lámina IV, a). Unos meses después Powell y sus colaboradores detectaron con sus emulsiones fotográficas un proceso entre mesones totalmente nuevo, pues observaron que un mesón terminaba su carrera en la placa fotográfica y que en ese mismo punto aparecía un nuevo mesón.

Una de las primeras fotografías de este nuevo proceso se representa en la lámina IV, b). Estos dos mesones tienen masas diferentes: el primario, que ahora se denomina mesón *pi* (π), es de mayor masa que el secundario o mesón *mi* (μ), resultado que era de esperar si el mesón μ es un producto de la rotura de la partícula π . Las medidas sobre las trayectorias de los mesones μ demuestran que el alcance y por consecuencia la energía de estas partículas es siempre la misma. Esto indica que en la rotura del mesón π sólo se desprende una partícula neutra. Nuevas medidas de las masas de estas partículas dan para el mesón π una masa 280 veces mayor que la del electrón y para el mesón μ unas 210 veces la del electrón, valor este último aproximadamente igual al encontrado en la cámara de Wilson. Entonces el mesón μ parece ser idéntico al mesón de la componente penetrante de la radiación cósmica, suposición posteriormente confirmada.

Lo que actualmente sabemos acerca de las propiedades de los mesones π y μ es lo siguiente: los mesones π , positivos y negativos, de masa igual a 280 veces la del electrón, experimentan desintegración radiactiva con un período del orden de 10^{-8} segundos, originando un mesón μ y una partícula neutra de masa en reposo casi nula. El mesón μ , de masa 210 veces la del electrón, se desintegra en un electrón (o un positrón) y dos neutrinos en el intervalo de tiempo relativamente grande de 2×10^{-6} segundos.

Este proceso se desarrolla en la atmósfera terrestre; los mesones π se rompen dando nacimiento a los mesones μ , los cuales provistos de la misma velocidad que sus padres, las partículas π , y a causa de que su vida media es bastante grande, son capaces de atravesar toda la atmósfera. Los mesones μ nunca se producen directamente sino que provienen siempre de la rotura de los mesones π .

El comportamiento de los mesones π cuando son detenidos en su marcha, antes de que puedan desintegrarse, por sustancias en estado sólido depende del signo de la carga del mesón. Los mesones π positivos se desintegran originando los mesones μ , mientras que los mesones π negativos siempre interactúan con los núcleos, sea cualquiera la carga de éstos y en la mayor parte de los casos producen desintegraciones observables. Los mesones μ negativos poseen interacciones nucleares débiles, como fué primeramente demostrado por Conversi, Pancini y Picconi, y cuando consiguieron la interacción con núcleos medianos y pesados, sólo se desprendieron neutrones y fotones de pequeña energía. Los mesones μ positivos se desintegran siempre en un positrón y dos neutrinos.

Nuestro conocimiento acerca de la producción de mesones es relativamente reciente y nos dice que la mayor parte de los mesones de la radiación cósmica son originados en choques entre las partículas cósmicas primarias y los núcleos de las moléculas del aire.

Las partículas primarias consisten en protones y un pequeño número de núcleos algo más pesados, propagándose con gran energía. En dichos choques se produce un cierto número de mesones π , provistos de velocidades próximas a la de la luz y con direcciones de salida comprendidas todas en estrechos conos. Este proceso es el denominado de «cascadas penetrantes» o de «cascadas de partículas penetrantes», y ha sido observado colocando contadores Geiger debajo de láminas de plomo, en la cámara Wilson y en emulsiones fotográficas. Fotografías de cascadas penetrantes se muestran en la lámina V a), b).

En cada una de estas fotografías puede verse el cono de mesones rápidos; además son lanzados del núcleo protones de pequeña energía y partículas alfa. Rápidos

nucleones (se denominan nucleones a los protones y a los neutrones, sillares de los núcleos atómicos) acompañan frecuentemente al haz de mesones. También se ha encontrado que se originan parejas de electrones (electrón y positrón) por alguna radiación neutra cuya dirección está también contenida dentro del mismo cono.

Esta última hipótesis es de momento un poco obscura, aunque recientes experiencias realizadas con el ciclotrón de Berkeley (el ciclotrón es un gran aparato destinado a acelerar algunas partículas elementales. En la lámina VI, a) se representa un haz de deuterones saliendo de un ciclotrón, al aire libre, y en la lámina VI, b) se representa un sincro ciclotrón para dar una idea del tamaño de estos aparatos) sugieren la existencia de un mesón neutro con una vida media menor de 10^{-11} segundos, desintegrándose en dos fotones. Una partícula de esta naturaleza explicaría sencillamente la presencia de las parejas de electrones que acompañan a las mencionadas lluvias. No obstante es demasiado pronto para establecer categóricamente la existencia de esta nueva partícula.

Así, pues, conocemos cuál es el origen de los mesones y la naturaleza de las partículas que los producen, pero es aproximadamente el límite de nuestro conocimiento actual y son muchos los problemas que quedan pendientes de solución; veamos algunos:

Primero. ¿Cómo se producen realmente los mesones? ¿Por un único choque de la partícula primaria con uno de los protones o neutrones en el núcleo o por una sucesión de choques dentro del mismo núcleo?

Segundo. ¿Cuántos mesones son producidos en un choque aislado entre dos nucleones y cómo depende este número de la energía de la partícula? Ya puede observarse que estos dos problemas no son independientes.

El tercer problema es ¿cuál es la distribución angular con la que son lanzados los mesones y cuál es la distribución de la energía para una cierta energía de la partícula primaria? Es obvio que todas estas preguntas tendrían contestación si pudiesen observarse los choques entre los protones primarios y los núcleos hidrógeno, pero esto, desgraciadamente, constituye un problema de gran dificultad técnica. Se podría sustituir el hidrógeno por sustancias sólidas de pequeño número atómico tales como el litio, el berilio o el carbono y también sería útil la comparación de los procesos de producción entre núcleos pesados y núcleos ligeros. Estas medidas pueden hacerse en cámara Wilson o en emulsiones fotográficas y es probable que dentro de muy pocos años se consiga responder a la preguntas anteriores.

Nos podría extrañar el por qué son tantos los físicos que se interesan en los problemas de la radiación cósmica y en su relación con los mesones, y sin embargo la respuesta es sencilla: el haz de rayos cósmicos primarios está compuesto por protones con energías de hasta 10^{15} electrón-voltios, mientras que la máxima energía que puede comunicarse a un protón en el laboratorio, con los grandes aparatos o máquinas análogos a los de las figuras 13 y 14, es de unos 5×10^9 electrón-voltios; de aquí concluimos que actualmente y aun en mucho tiempo nuestra fuente de mayor energía la tendremos en la radiación cósmica.

El neutrino.

EL NEUTRINO es una interesante partícula elemental más conocida por su ausencia que por su presencia, de masa pequeñísima, menor que la del electrón, y sin carga eléctrica.

Recordaremos que las sustancias radiactivas emiten electrones denominados rayos o partículas beta (β), y que se llama proceso beta a toda aquella transformación en la cual el núcleo de un átomo se desintegra emitiendo un electrón. Si se mide, como lo hicieron Ellis y Wooster y después comprobaron Meitner y Orthmann, la energía que pierde un núcleo atómico en un proceso beta y la energía de los productos de la desintegración, se encuentra que estas dos energías no son iguales, la primera es mayor que la segunda. Parece pues que a este proceso no es aplicable la ley de la conservación de la energía. Para salvar la generalidad de esta ley imaginó W. Pauli la existencia de una nueva partícula extremadamente penetrante, la cual acompaña al electrón beta en su emisión, llevándose la fracción necesaria de energía. Esta hipotética partícula debía ser eléctricamente neutra pues ya estaba explicado el cambio de carga eléctrica experimentado por el núcleo radiactivo y debería tener una masa casi despreciable, más pequeña que la del electrón, puesto que la masa atómica no cambia sensiblemente en la transformación beta.

Al discutir esta nueva partícula hipotética, Pauli se refirió a ella como un «neutrón». Cuando las partículas que ahora denominamos neutrones fueron descubiertas por Chadwick en 1932 y Fermi daba cuenta de este descubrimiento en un coloquio en la Universidad de Roma, le preguntó un estudiante si el «neutrón de Chadwick» era el mismo «neutrón» propuesto por Pauli para los procesos beta. «No», contestó Fermi, «il neutrone di Pauli è molto più piccolo, cio è un neutrino». El nombre perseveró, y la palabra «neutrino» es ahora empleada universalmente para designar a la partícula compañera de electrón en las transformaciones radiactivas beta.

Al lado de su tarea primera, la de mantener la validez de la ley general de la conservación de la energía, el neutrino desempeña otra no menos importantante, cual es la de compensar el momento angular del núcleo atómico. El momento angular, magnitud mencionada anteriormente, es la tendencia que tiene toda masa que gira alrededor de uno de sus ejes de seguir girando; se dice entonces que esta masa posee un «spin». El spin del núcleo atómico puede determinarse experimentalmente y se encuentra que es siempre un número par o impar multiplicado por una cierta magnitud fundamental en la mecánica cuántica. Este spin es par o impar según sea par o impar la suma de los protones y neutrones contenidos en el núcleo.

Cuando un electrón es emitido en una transformación beta se debe tener presente que los electrones no son elementos constituyentes del núcleo, sino que se forman a partir de la carga eléctrica liberada en la transformación de un neutrón en un protón o viceversa. Como los electrones tienen spin impar era de esperar que en un proceso beta el spin total del núcleo cambiase de par a impar o viceversa. ¡Pero esto no ocurre! De modo que para satisfacer la ley de la conservación del momento angular se debe buscar por algún lado un spin que compense al perdido en la emisión del electrón. Independientemente de las discrepancias en la compensación de la energía, estamos, pues, obligados a hacer la hipótesis de la existencia de una partícula con el spin adecuado, la cual debe acompañar al electrón beta.

Tanto la ausencia de carga eléctrica como la masa extraordinariamente pequeña de la nueva partícula hipotética, sugieren que, una vez emitido, el neutrino presentará acciones mutuas pequeñísimas con los átomos de la

sustancia por la que se propaga y de ahí que sea muy débil la esperanza de detectarlo por una medida de absorción de la clase que sea. El medio más prometedor de obtener mayor información acerca del neutrino reside en el estudio de sus efectos sobre el núcleo en el proceso de emisión. El efecto más directo de esta clase es el retroceso del núcleo originado por la expulsión del neutrino.

Si los electrones fuesen las únicas partículas emitidas en el proceso de una transformación beta sería de esperar que los núcleos que emitiesen electrones rápidos sufrirían mayores retrocesos que los que lanzan electrones lentos. Admitiendo la hipótesis del neutrino es de preveer que el número de rápidos retrocesos nucleares sea mucho mayor, pues aun en el caso de electrones con pequeña energía debe existir un notable retroceso nuclear a causa de la emisión del neutrino de elevada energía. El primer intento experimental para resolver esta cuestión fué realizado por Leipunski quien estudió la distribución de energía en el retroceso de los núcleos provenientes de una delgada capa de una sustancia beta-activa. Sus resultados, que indican un gran exceso en el número de retrocesos nucleares rápidos, pueden considerarse como la primera prueba positiva de la existencia de los neutrinos.

Dos años más tarde Crane y Halpern realizaron análogas experiencias considerando la desintegración beta con la cámara de Wilson. En las láminas VII, a), b) se reproducen dos de sus fotografías en las que se observan la trayectoria del electrón y el retroceso del núcleo en una transformación beta de un radiofósforo. Midiendo la energía del electrón emitido (trayectoria curvada) y la del retroceso del núcleo (el trozo abultado), deducen Crane y Halpern que en muchos casos la velocidad de retroceso del núcleo es mucho mayor de lo que podía esperarse.

Esto significa que alguna otra partícula debe haber sido lanzada al mismo tiempo que el electrón. Estas experiencias dejan poca duda acerca de la existencia de una tercera partícula, aunque ella no deje su huella en la cámara a causa de no estar eléctricamente cargada y nos dan una indicación acerca de la dirección según la cual es emitido el neutrino, aunque esta indicación no sea muy precisa por la pequeña longitud de la huella del retroceso nuclear.

Una técnica ligeramente diferente fué utilizada en las recientes experiencias de Christy, Cohen, Fowler, Lauritsen, y Lauritsen, en las cuales se bombardea litio con deuterones y se obtienen núcleos de litio pesado que son inestables, por lo que a poco de producirse se descomponen en dos partículas alfa, un electrón y un neutrino. La lámina VII, c) es una fotografía de las miles obtenidas por estos investigadores con la cámara Wilson; en ella pueden verse las trayectorias de las dos partículas alfa y la trayectoria circular del electrón el cual gira en el sentido de las agujas de un reloj por la acción del campo magnético en el cual se encuentra la cámara.

De la fotografía puede calcularse la cantidad de movimiento de las tres partículas y de nuevo encontramos que no se satisface la ley de la conservación de la cantidad de movimiento; para que esto no ocurra es necesario admitir la existencia de un neutrino propagándose con elevada energía hacia el ángulo inferior derecho de la fotografía. Aunque en este caso particular, el electrón y el neutrino parecen haber sido emitidos en la misma dirección, otras fotografías muestran muy diferentes valores para el ángulo entre las direcciones de salida de estas dos partículas y nos conducen a la conclusión provisional de que no hay una relación definida entre las dos direcciones.

Estudios todavía más recientes del mismo problema, realizados por Chalmers W. Sherwin, acerca del retroceso de los núcleos que emergen de una capa monomolecular de radiofósforo, parecen indicar que existe una cierta preferencia en el sentido de que el electrón y el neutrino sean emitidos en direcciones opuestas.

Otro conjunto de experiencias que muestran el retroceso del núcleo debido a la emisión del neutrino está fundado en el denominado proceso K de captura. Si se considera un átomo capaz de lanzar un positrón desde su núcleo se puede esperar que en muchos casos absorberá uno de los dos electrones corticales más próximos a él (estos dos electrones forman la capa K y de ahí la denominación anterior). Ahora bien, la absorción de un electrón por el núcleo conducirá a la misma violación de la ley de la conservación del momento angular que en el caso de la emisión del electrón, por lo cual debemos deducir que tal proceso es imposible si no hay otra partícula participante que compense el spin. Podemos visualizar el proceso como una absorción simultánea de un electrón de la capa K y de un neutrino que venga del exterior o, en ausencia de este neutrino exterior, como la absorción de un electrón K seguida de la emisión de una partícula análoga al neutrino que se suele denominar «antineutrino».

De lo que actualmente sabemos la distinción entre el neutrino y el antineutrino es puramente académica. Se podía pensar que la relación entre neutrino y antineutrino fuese en cierto modo parecida a la que existe entre electrón y positrón, pero como el neutrino no está cargado (atributo que hace que experimentalmente puedan diferenciarse las dos clases de electrones) al diferencia entre neutrino y antineutrino sólo puede residir en la

posibilidad de su mutua aniquilación. Actualmente no hay probabilidad alguna de observar un proceso de aniquilación de neutrinos, pues la densidad de haces de neutrinos es extraordinariamente pequeña y prácticamente no hay posibilidad de que choquen dos neutrinos.

Por otro lado, el proceso K de captura, cuya realización interpretamos por la emisión de un antineutrino, es un hecho bien establecido de la Física nuclear y su estudio experimental constituye un importante argumento en favor de estas elusivas partículas elementales.

Aunque desde muy al principio, cuando la noción de neutrino fué introducida por vez primera en la Física nuclear, se sabía que su masa no era mayor sino probablemente mucho menor que la masa del electrón, sin embargo, la determinación de su valor no ha sido todavía realizada con suficiente precisión, pues implica muy serias dificultades experimentales. El método más directo para hallar la masa del neutrino sería medir muy exactamente la energía total de compensación en algún proceso beta del cual conociésemos las masas de todas las partículas participantes. Desafortunadamente las medidas de esta clase no permiten encontrar diferencia apreciable entre las energías, o sus masas equivalentes, pues los errores experimentales son del orden de un veintavo de la masa del electrón. Por ahora sólo se puede asegurar que la masa del neutrino no es mayor que la vigésima parte de la masa del electrón.

Debido a su pequeña masa y a no poseer carga eléctrica, el poder de penetración de los neutrinos a través de la materia es enorme. En ausencia de datos experimentales acerca de la absorción de neutrinos por los cuerpos materiales, se ha atacado el problema desde un punto de vista teórico y uno de los resultados de este

estudio nos conduce a la conclusión de que para absorber neutrinos provistos de una energía de un millón de electrón-voltios sería necesario un espesor de plomo de ¡35 años-luz!; recordaremos que el año-luz es el espacio que recorre la luz en un año a la velocidad de 300.000 kilómetros por segundo.

A pesar de que la existencia del neutrino puede considerarse actualmente bien fundamentada, muy poco puede, en cambio, decirse de su naturaleza física y de su relación con las otras partículas elementales conocidas. Sólo sabemos que esta partícula acompaña siempre la emisión o absorción de electrones en las transformaciones nucleares y que desempeña también un papel esencial en la desintegración de los mesones pesados y ligeros observados en los rayos cósmicos. La presencia del neutrino en los diferentes tipos de transformación beta es también la principal responsable de la relativa lentitud de estos procesos; mientras la emisión de una pareja de electrones (un electrón y un positrón) por núcleo excitado sólo dura una diezbillonésima de segundo, el proceso de la emisión del par electrón-neutrino de la misma energía tiene lugar en días o en semanas.

Para completar nuestra lista de partículas elementales debemos incluir también al FOTÓN. Esta partícula, lo mismo que el neutrino es, sin embargo, de una categoría en cierto modo diferente de la de las otras partículas. El fotón no es una partícula material en el sentido que no puede ser identificada con otra que pueda existir en reposo y posea una cantidad de sustancia ponderable. Los fotones sólo se identifican con la radiación o energía radiante.

Consideraciones finales.

Se conocen, pues, actualmente por lo menos diez partículas elementales diferentes. No puede asegurarse que esta lista esté completa; hay indicios de que no lo está, pues existen pruebas que rápidamente se acumulan de la existencia de al menos una partícula adicional. Esta partícula se encuentra en los rayos cósmicos y parece tener una masa unas mil veces mayor que la masa del electrón.

La idea de que probablemente sean de esperar nuevas adiciones a la lista de partículas elementales plantea un problema que aunque no cae dentro del campo de la Física sí guarda una estrecha relación con ella; es el referente a la nomenclatura de las nuevas partículas. Tenemos aquí un ejemplo realmente interesante de las dificultades que algunas veces se presentan a los físicos al asignar etiquetas o nombres a los distintos conceptos introducidos por la experimentación o por la teoría. Muy frecuentemente es necesario escoger alguna denominación para estos conceptos, sean o no partículas elementales, con anterioridad al conocimiento de la mayoría de los hechos que a ellos se refieren. En 1937 fué sugerido el nombre «mesotrón» para designar la nueva partícula de masa intermedia descubierta en los rayos cósmicos en 1936 y más adelante fué sustituido por el más breve de «mesón» empleado actualmente. Posteriormente se descubre, también en los rayos cósmicos, otra partícula de mayor masa y desde entonces el nombre de mesón seguido de las letras griegas pi (π) o mi (μ) sirvió para designar ambas partículas. Esta nomenclatura pareció satisfactoria hasta que

la continuada investigación empezó a demostrar la existencia de importantes y fundamentales diferencias entre ambos tipos de partículas; el empleo de un nombre genérico común, tal como mesón para designar los dos tipos de partículas puede llegar a ser totalmente ilógico y nada conveniente. Lo que actualmente debe hacerse respecto a la nomenclatura constituye un problema difícil, pero es asunto que debe recibir seria consideración, especialmente con vistas a la probable entrada de todavía otras nuevas partículas.

¿Cuál es el posible significado de los descubrimientos aquí mencionados para la Ciencia y para la Humanidad?

En la revisión que acabamos de hacer se pueden clasificar los fenómenos físicos, de acuerdo con la energía a ellos asociada, en tres categorías: pequeña energía o fenómenos extranucleares, elevada energía o fenómenos nucleares y energía extremadamente elevada o fenómenos de las partículas elementales. El conocimiento de los fenómenos extranucleares o de pequeña energía, ha afectado ya profundamente la vida sobre la Tierra de todos los seres humanos. La revolución industrial, nuestra mecanizada civilización, el empequeñecimiento de nuestro planeta a causa de los progresos en comunicación y transporte, no son más que aplicación directa de nuestro conocimiento de los fenómenos extranucleares. Indirectamente han sido los responsables de toda nuestra organización política y económica. Muy bien esta edad, nuestra edad, podía recibir la denominación de «edad extranuclear».

Desde la explosión de la bomba atómica y desde que se vislumbra la posibilidad de liberar energía nuclear en gran escala, parece evidente que entramos en un nuevo período en el cual los fenómenos nucleares

están destinados a desempeñar un importante papel en el desarrollo y formación de la humanidad en un futuro muy próximo.

Hace sólo cincuenta años que todo lo que sabíamos acerca del electrón se limitaba a la observación de un tenue resplandor verdoso en un tubo de vidrio, y ahora nadie podría negar que nuestro conocimiento de las propiedades del electrón ha influido enormemente en el desarrollo de nuestra civilización. También hace sólo unos cincuenta años toda nuestra ciencia acerca de los fenómenos nucleares se reducía a las ideas que nacían en la mente de Becquerel para tratar de interpretar una cierta área obscurecida sobre una placa fotográfica.

Actualmente nuestro conocimiento de todos estos fenómenos es todavía muy incompleto, y en particular esto es verdad para los fenómenos de energía elevada o fenómenos de las partículas elementales, cuya denominación, después de todo lo que aquí hemos dicho, parece un poco engañosa, pues a los objetivos de la actual investigación física difícilmente les podemos llamar *partículas* y su estudio tampoco se presenta actualmente como muy *elemental*.

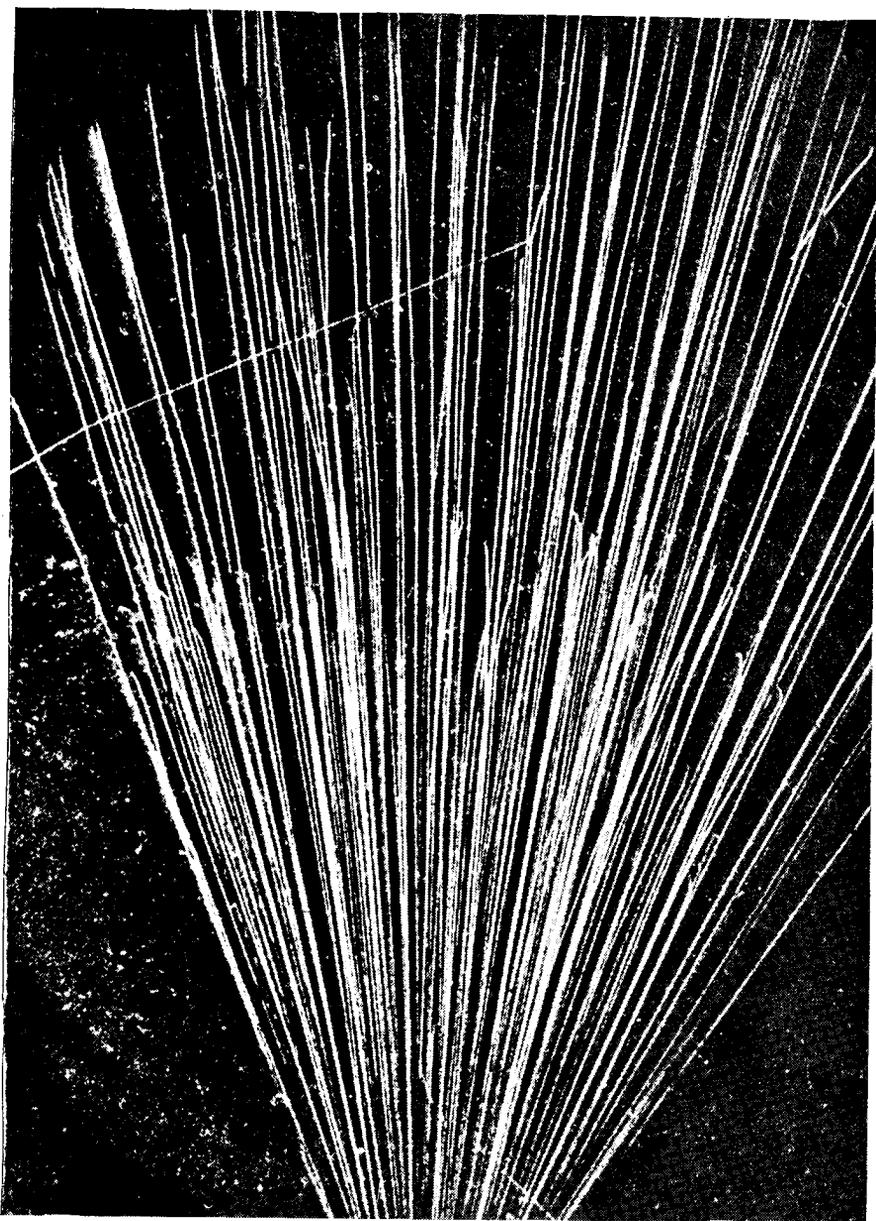
La Física atómica enseña que para conocer regiones cada vez más pequeñas de espacio es necesario realizar experiencias con objetos individuales cuyo contenido en energía sea cada vez más grande. La investigación de estas pequeñas dimensiones y elevadas energías ha demostrado, como anteriormente hemos indicado, que las partículas —que hace sólo unos años eran consideradas como indivisibles— pueden en realidad transformarse unas en otras sin necesidad de imaginarlas divisibles en el sentido más sencillo de la palabra. Los constituyentes normales de la materia, los electrones y los núcleos, pueden en violentos

choques originan nuevas partículas, mientras los núcleos pueden romperse en neutrones y protones. Choques entre electrones, protones y neutrones dan lugar a múltiples partículas, tales como fotones, positrones y diferentes clases de mesones. Así uno se enfrenta con diferentes y variados objetos no directamente relacionados obteniendo la impresión que de elementales sólo tienen el nombre.

Quizá ha sido un hecho muy desafortunado que el gran impulso recibido por el estudio de los fenómenos nucleares, desarrollado principalmente durante la última guerra, tuviese por causa el deseo de construir un arma tan destructiva como la bomba atómica, pero no se debe pensar que la investigación conduce siempre a tan horribles resultados. En realidad, el valor de un cierto conocimiento depende de su aplicación para obtener nuevas y útiles condiciones de vida beneficiosas para la sociedad, pero es algunas veces inevitable que al lado de estas beneficiosas aplicaciones surjan otras en extremo perjudiciales para la vida de los pueblos y el hecho de que un aspecto prepondere sobre el otro sólo depende de la educación de estos pueblos.

¿Qué nos tiene reservado el porvenir en el continuado estudio de los fenómenos de las partículas elementales? Seguramente nuevos descubrimientos que nos revelarán fenómenos de gran belleza y de extrema complejidad que finalmente serán interpretados, pues la historia de la investigación científica es una historia cuyo objetivo crece en el transcurso del tiempo; su último capítulo no será escrito en tanto existan nuevas verdades por conocer y hombres con suficiente curiosidad e inventiva para descubrirlas y encontrarles nuevas aplicaciones. En cambio es muy difícil predecir cuál será la influencia de estos nuevos

descubrimientos en la vida de los seres humanos, aunque a la luz de la historia del desarrollo científico es de esperar que esta influencia no será pequeña y dependerá en grado sumo de la preparación ética y moral de todos los hombres, de su buena voluntad, por lo que debemos pedir y rogar al Supremo Hacedor nos guíe e ilumine en nuestros pensamientos y tareas.



LAMINA I. Partículas alfa con dos alcances diferentes, emitidas por una mezcla de torios B y C. En la desintegración de un núcleo de nitrógeno por una partícula alfa ha resultado un protón de gran alcance al que corresponde el trazo transversal.

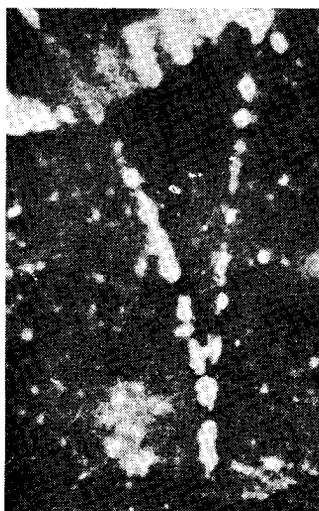
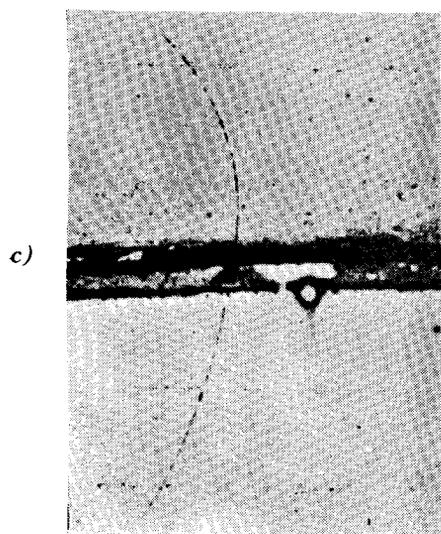
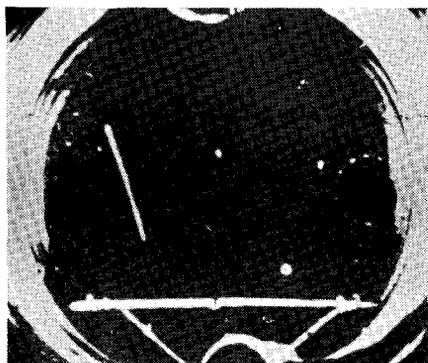
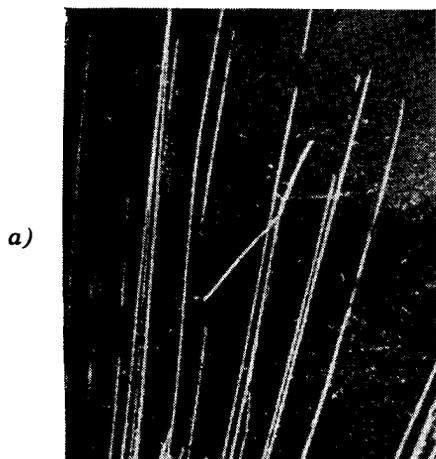
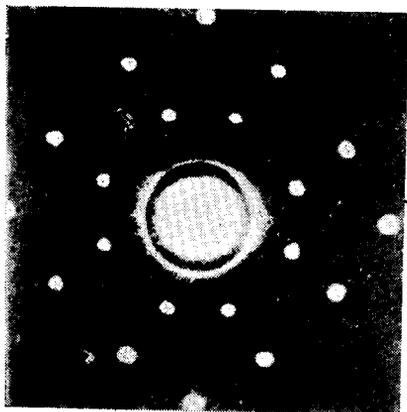
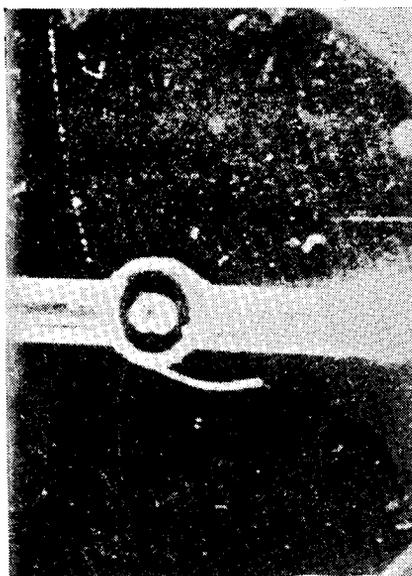
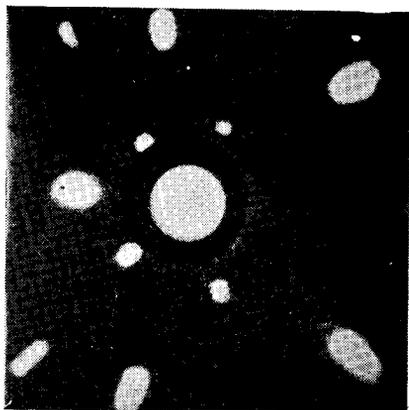


LÁMINA II. a) Choque elástico de una partícula alfa con un núcleo de nitrógeno. El trozo más corto pertenece al nitrógeno. b) El trazo grueso y rectilíneo del centro de la fotografía es la trayectoria de un protón originado por un neutrón. c) Un positrón de 63 millones de electrón-voltios (mitad inferior) atravesando una placa de plomo de 6 milímetros de espesor y saliendo como un positrón de 23 millones de electrón-voltios (mitad superior). d) Materialización de la energía radiante. Nacimiento de una pareja de electrones (electrón y positrón) a expensas de radiación gamma.

a)

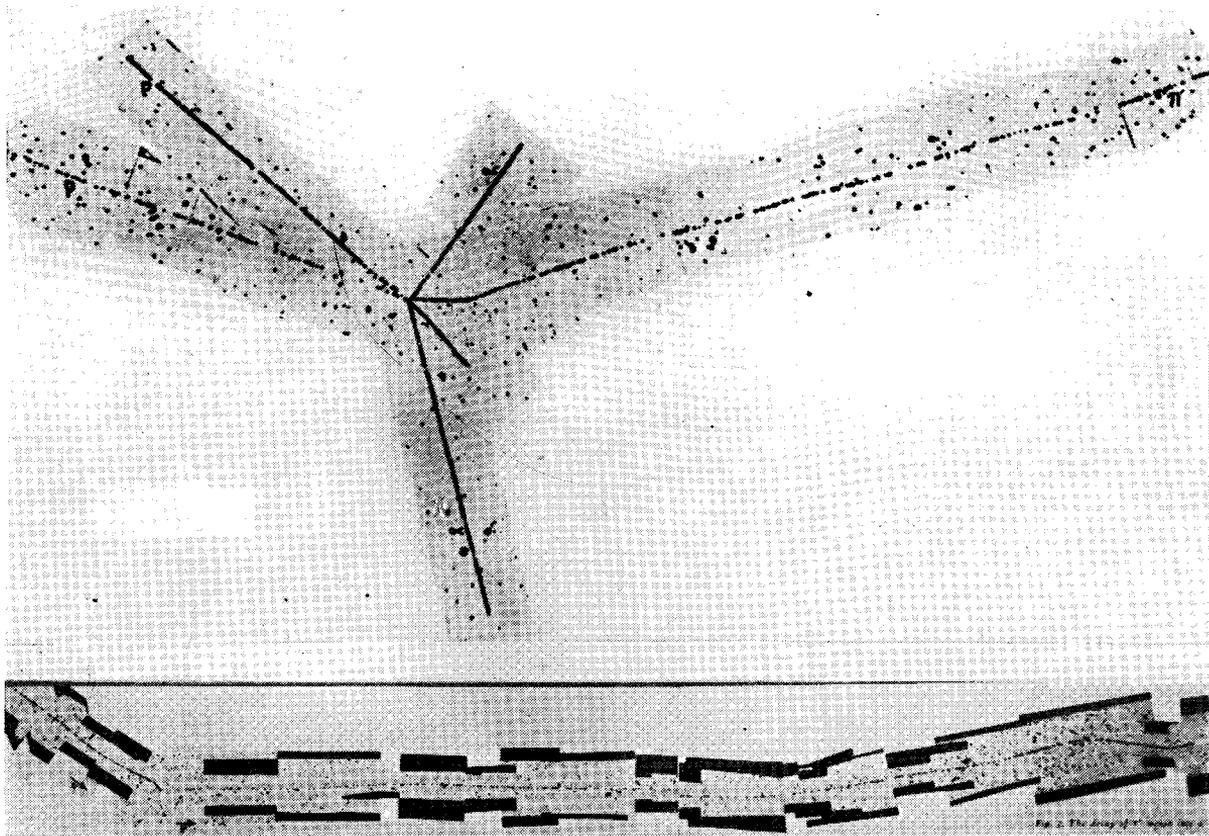


b)



c)

LÁMINA III. a) Lanegráfico, con neutrones, de sal común. b) Lanegráfico, con neutrones, de un cristal de plomo de ¡1,59 centímetros! de espesor. c) El primer mesón identificado. Ha atravesado un contador de Geiger-Müller en el interior de la cámara Wilson. Se obtuvo la masa de la partícula midiendo la curvatura de la trayectoria de la mitad superior y determinando la cantidad de masa atravesada hasta llegar al reposo; su valor fué de 220 ± 35 veces la masa del electrón.



a)

b)

LÁMINA IV. a) Desintegración del núcleo de un átomo por un lento mesón π . Se identifican protones y partículas alfa. b) Desintegración de un mesón π^+ en un mesón ligero μ^+ .

a)

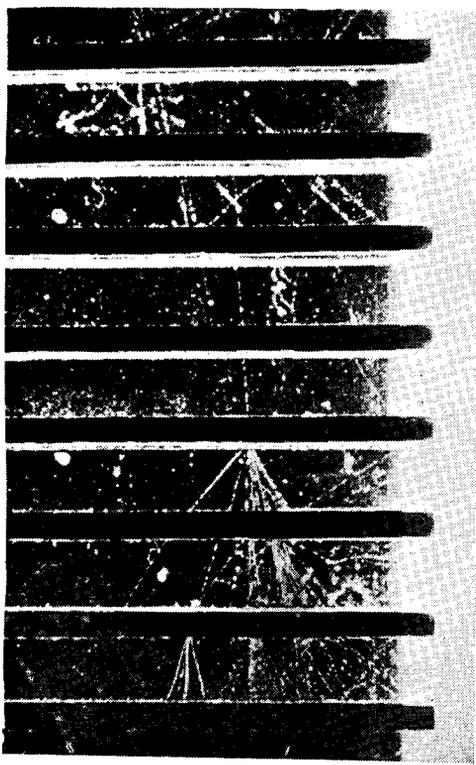


LÁMINA V. a) Una partícula ionizante, probablemente un protón, produce una desintegración nuclear en una lámina de plomo y esta desintegración origina una «cascada» de electrones y otras partículas penetrantes. Una de estas últimas produce una desintegración secundaria.

b)

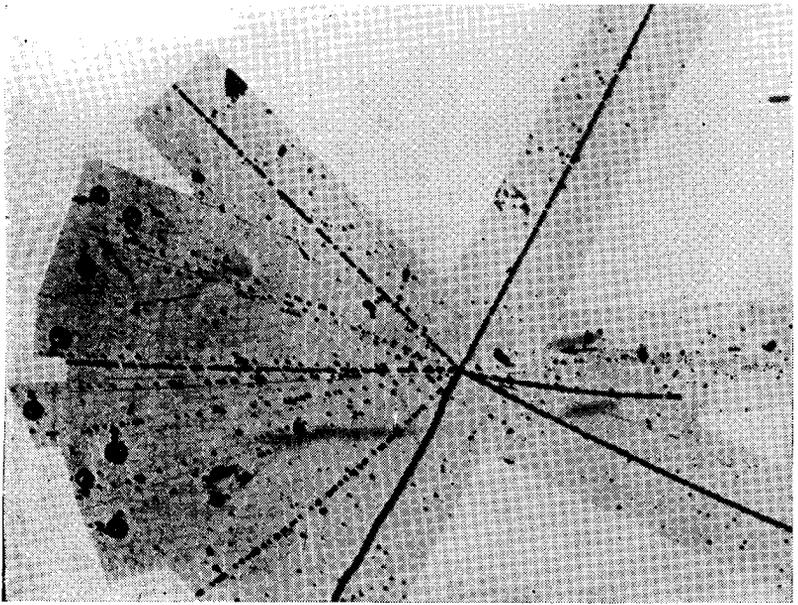
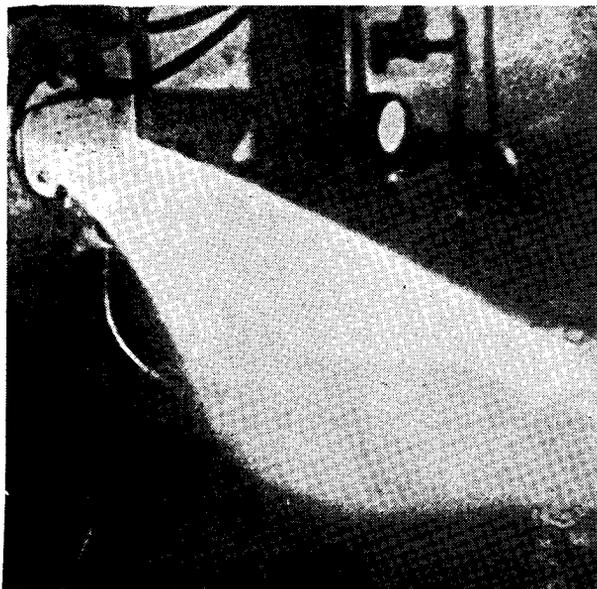
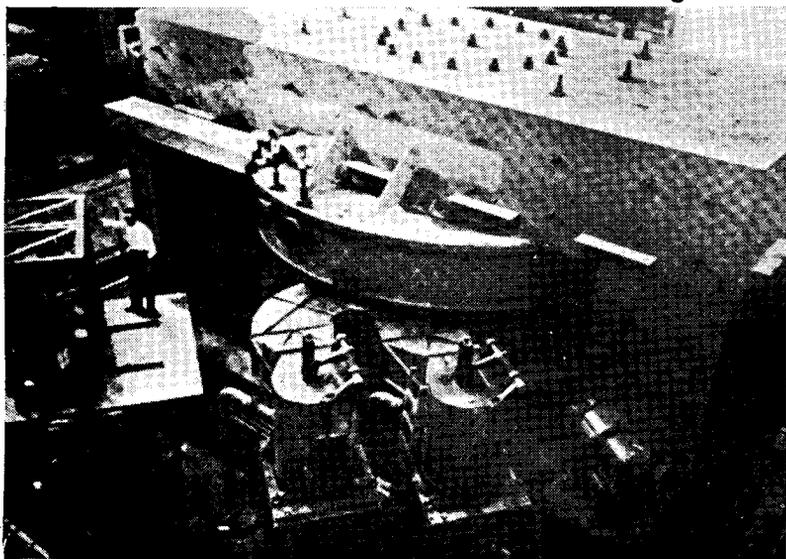


LÁMINA V. b) Un protón cuya energía es de 2×10^{10} electrón-voltios produce la desintegración explosiva de un núcleo. La mayoría de las ocho partículas numeradas son rápidos mesones π .

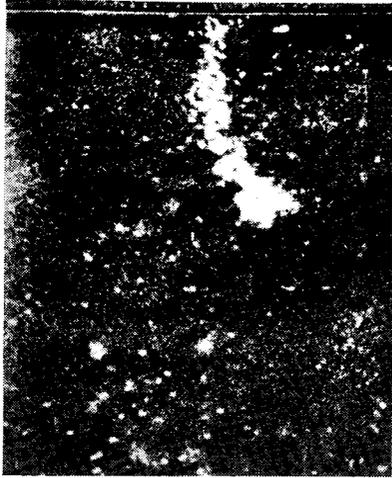


a)

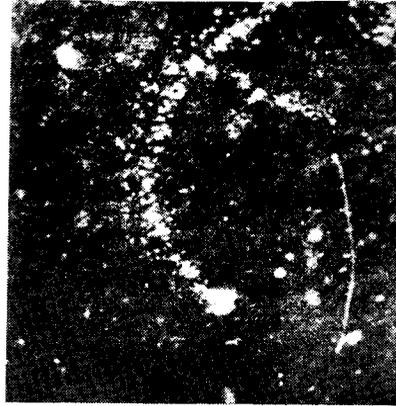


b)

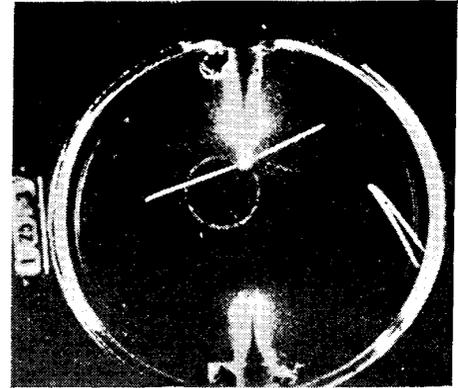
LÁMINA VI. a) Un haz de deuterones de 10.000.000 electrón-voltios emergen de un ciclotrón. b) El sincro-ciclotrón de la Universidad de Columbia (N. Y.) puede alcanzar los 400.000.000 electrón-voltios. La parte de hierro de este aparato pesa 2.500 toneladas y el hilo de cobre de sus arrollamientos más de 300 toneladas.



a)



b)



c)

LÁMINA VII. a) Demostración de la existencia del neutrino. Retroceso del núcleo atómico en una transformación beta. b) Demostración de la existencia del neutrino. Retroceso del núcleo atómico en una transformación beta. c) Desintegración de un núcleo de litio pesado originando dos partículas alfa (trazos gruesos), un electrón (trazo fino circular) y un neutrino (no visible).