



UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

# RAYOS COSMICOS

Magnífico DISCURSO INAUGURAL  
DEL CURSO ACADÉMICO 1950-1951

POR

Carlos Nogareda Domenech

Catedrático de Química física de la Facultad de Ciencias



SALAMANCA

1950

1920-1921  
D. 12  
A. 2



UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

# RAYOS COSMICOS

DISCURSO INAUGURAL  
DEL CURSO ACADÉMICO 1920-1921

por

Carlos Nogueira Domenech

Comisario de Quintos libros de la Facultad de Ciencias



SALAMANCA

1920  
SUC. DE RIVADENEYRA, S. A.—MADRID

*Magnífico y Excelentísimo señor Rector, Dignísimas Autoridades, Ilustre Claustro de Profesores, Señores Alumnos, Señoras y Señores:*

Sean mis primeras palabras de salutación y bienvenida, en nombre del Claustro y mío, para vosotros, jóvenes estudiantes, que acabáis de entrar en esta vieja y gloriosa Universidad. Al felicitaros por tal honor y distinción, desearía inculcaros, desde el primer momento, la obligación sagrada de llevar con orgullo y dignidad el honroso título de ESTUDIANTES DE SALAMANCA. Para estar a la altura de tal título, ¡que vuestros actos se inspiren siempre en el amor a la Ciencia, a la Virtud, a la Patria y a los más nobles ideales del espíritu humano! Así sea.

Este discurso ha sido escrito pensando en vosotros como símbolo y esperanza de un próximo resurgimiento científico Nacional. Versa sobre RAYOS COSMICOS, tema de gran interés y actualidad, a cuyo estudio se consagran los mejores físicos del mundo.

No faltará quien pregunte: ¿Para qué sirven los Rayos cósmicos? Esta clase de pregunta no es nueva. Ya en la época griega, un joven estudiante preguntó a Euclides: "¿Para qué sirve la Geometría?" Por toda contestación, el gran geómetra se limitó a darle unas monedas de cobre, a título de limosna.

Tales preguntas revelan, en efecto, un escaso temperamento científico, pues, como es sabido, la palabra *utilidad* no existe en el vocabulario de la Ciencia pura. El científico de vocación, el de verdad, es un idealista, un soñador, que se desvive por averiguar el porqué de las cosas, analizando sus causas y sus leyes y aspirando, como única recompensa,

al placer de contemplar la belleza de la Verdad conquistada como fruto de su esfuerzo personal, sin pensar ni remotamente en las posibles aplicaciones de sus descubrimientos. Es cierto que esta clase de temperamento es propicio para el cultivo sistemático del hambre y de las privaciones; pero el científico, con su intensa vida espiritual, de orden superior, sabe vivir muy por encima de las estrecheces y miserias humanas.

La investigación de carácter utilitario incumbe, en todo caso, a la labor de los técnicos, guiados por la luz de la Ciencia pura. Así, cuando el físico Hertz descubrió, en 1890, las ondas electromagnéticas, que en su honor se llaman *hertzianas*, confirmando en ellas el carácter "luminoso" previsto por Maxwell, hecho de gran trascendencia para la Física teórica, ni por equivocación se preocupó de averiguar si su descubrimiento tendría alguna finalidad práctica. Este aspecto fué estudiado por un técnico, el ingeniero Marconi, quien, al observar algunas propiedades de las ondas hertzianas, inventó, en 1892, la telegrafía sin hilos. Sin Hertz, Marconi no existiría; sin Ciencia no hay Técnica.

De momento, los Rayos cósmicos sólo *sirven* como "objeto" de estudio científico por parte de los físicos. Se citan algunos ensayos de investigación acerca de la influencia de los Rayos cósmicos sobre los fenómenos biológicos. (H. Thomas.)

La energía de los Rayos cósmicos es extraordinariamente grande, expresándose con cifras descomunales, aterradoras. Con su aprovechamiento podrá fabricarse una nueva bomba del porvenir: la *bomba cósmica*, ante la cual, la de Uranio y la de Hidrógeno quedarán en ridículo. Con la bomba cósmica se podrá acaso volar y aniquilar todo el Sistema planetario. La Humanidad podrá, pues, suicidarse en masa, si así es su deseo, cumpliéndose con ello al pie de la letra *el suicidio cósmico* de que nos habla una Escuela pesimista alemana del siglo pasado. Esta puede ser una de las perspectivas de los "inocentes" Rayos cósmicos (1).

---

(1) Por si fuera poco, nos espera otra bomba, todavía superior a la cósmica: la bomba *relativista* o superbomba de Einstein, en la que se logrará la transformación integral de la masa material en energía, de acuerdo con el conocido postulado relativista de Einstein, 1905, verificado ya de hecho, aunque en pequeña escala, en todas las reacciones nucleares, y el cual sirve precisamente de fundamento a las bombas atómicas actuales.



Por su propia naturaleza y condiciones especiales de trabajo, las exploraciones cósmicas suelen ser peligrosas, siendo muchos ya los accidentes trágicos que han costado la vida a numerosos investigadores. La historia de la Física cósmica se escribirá, pues, sobre eternos mármoles, con nombres gloriosos de jóvenes entusiastas, sabios y héroes a la vez, que supieron sacrificar su vida al servicio de los más altos ideales de la Ciencia. ¡Morir por un ideal! ¡¡ Bello gesto y hermosa lección para nuestro prosaico, envilecido y putrefacto Siglo XX!!

A lo largo de la lista de investigadores dedicados al estudio de los Rayos cósmicos, debe ser incluido el nombre de un ilustre físico español, de reconocida competencia internacional: el Dr. A. Duperier, actualmente en la Escuela Cósmica de Londres, dedicado a la investigación de efectos meteorológicos en conexión con los Rayos cósmicos (1).

Por todo lo dicho, es mi más ferviente deseo contribuir a fomentar, por todos los medios, la afición por el estudio de la Física en un grado superlativo. ¡Que de entre vosotros, jóvenes estudiantes, surja, pues, cuanto antes, un nuevo Arquímedes, Galileo, Newton o Einstein! Con fe, entusiasmo y perseverancia, llegaréis mucho más lejos todavía. Así sea, para legítimo orgullo de España y nuevo timbre de gloria de la Universidad de Salamanca.

\* \* \*

El contenido del tema se desarrolla en doce capítulos bastante condensados, en los que se expone el estado actual de los diversos problemas planteados por la investigación acerca de los Rayos cósmicos.

Como primer capítulo no he podido evitar una introducción atómico-molecular. Una introducción de esta clase es, en efecto, una cosa obligada, como recopilación de ideas básicas indispensables para la mejor comprensión del texto.

He dedicado bastante espacio, aunque menor del merecido, al electrón de Dirac y al mesón teórico de Yukawa. Entiendo que esto es lo menos que se debe hacer en justo homenaje a unas atrevidísimas previsiones teóricas, cuya primera evidencia experimental fué proporcionada por los Rayos cósmicos en manos de Anderson.

---

(1) Según noticias de Prensa española, de hace unos meses, se está instalando o se piensa instalar una Escuela Cósmica Nacional en lo alto de Sierra Nevada, Granada, España.

He destinado un capítulo entero a los mesones cósmicos experimentales, espacio todavía pequeño ante el número e importancia de los componentes de la gran familia mesónica.

No puedo ni quiero ocultar mi especial predilección por los mesones artificiales, extraídos de los núcleos atómicos terrestres por Gardner y Lattes, de la Universidad de Berkeley, California, 1948. Al dedicarles un capítulo especial, no hago más que reconocer un nuevo éxito trascendente de la Física nuclear con el descubrimiento de tales Rayos cósmicos artificiales, cien millones de veces más intensos que los Rayos cósmicos naturales. Gracias a este descubrimiento se logra el primer abrazo íntimo entre la Física cósmica y la Física nuclear, hecho de incalculables consecuencias.

En materia de Rayos cósmicos, el tratado más joven de que dispongo expone el estado de la cuestión en el año 1947. Desde entonces acá se habrán publicado alrededor de un millar de trabajos de investigación, dispersos sobre las distintas revistas científicas, muchos de los cuales han sido consultados para la puesta al día del tema.

Del penoso trabajo de selección bibliográfica han sido extraídas algunas cuestiones de gran importancia, tales como: la exploración cósmico ultra-estratosférica a expensas del cohete alemán V-2 hasta la altura de 161 kilómetros sobre el nivel del mar; el descubrimiento de los Rayos cósmicos artificiales, ya consignado; el descubrimiento de los mesones cósmicos hiper-pesados  $\tau$ ; el descubrimiento recentísimo, 1950, del mesón neutro; la teoría de Fermi acerca del carácter complejo de los mesones vectoriales  $\pi$ , con la hipótesis de los anti-nucleones; la teoría recentísima, 1950, acerca del origen solar de los Rayos cósmicos primarios, etcétera, etc.

Estos nuevos hechos cósmicos han sido englobados con los antiguos, procurando dar al conjunto la mayor unidad y homogeneidad posibles.

## ÁTOMOS Y MOLÉCULAS

El análisis físico ha puesto de manifiesto la existencia de tres partículas por ahora indivisibles, consideradas, por tanto, como partículas elementales: los electrones, los protones y los neutrones (1). La agrupación de estas partículas constituye los átomos, así como la agrupación de los átomos constituye las moléculas o compuestos químicos.

Los átomos fueron previstos metafísicamente por Demócrito en la Antigüedad y admitidos por Dalton, en 1808, para explicar las leyes fundamentales de la Química. Tanto Demócrito como Dalton creyeron que los átomos, de acuerdo con su etimología, son indivisibles. Actualmente se ha demostrado que no es así, conservándose la palabra por tradición. El creador de la hipótesis molecular fué Avogadro, en 1811.

Lord Rutherford, de Cambridge, ha demostrado que los átomos constan de dos partes: la parte cortical, ocupada por los electrones, y la parte nuclear, ocupada por los protones y los neutrones. Por eso las partículas nucleares se llaman también, genéricamente, nucleones (2).

Los protones son núcleos del átomo de hidrógeno ordinario, con la masa individual,  $1,6729 \cdot 10^{-24}$  gramos, y con la carga eléctrica positiva,  $4,803 \cdot 10^{-10}$  unidades electrostáticas (u. e. s.). Fueron descubiertos como rayos canales por Goldstein, en 1886, al operar con hidrógeno como gas residual del tubo de descarga. Su presencia en los núcleos de los demás átomos fué descubierta por Lord Rutherford en 1919.

Los neutrones son núcleos de hidrógeno ligero, eléctricamente neutros, con la masa individual,  $1,6752 \cdot 10^{-24}$  gramos, ligeramente superior a la del protón. Fueron descubiertas en Cambridge por Chadwick, discípulo y colaborador de Lord Rutherford, en 1932.

(1) Entre las partículas fundamentales deben incluirse los fotones o átomos de luz, el neutrino de Pauli y de Fermi y el mesón de Yukawa. Estas partículas se engendran en el transcurso de ciertos cambios de estado cuántico que serán considerados más adelante. Puede prescindirse de ellas en una rápida descripción provisional del átomo.

(2) En rigor, los neutrones y los protones son dos variedades cuánticas de una misma y única partícula fundamental: el *nucleón*. Véase más adelante.

Los electrones fueron descubiertos por Sir J. J. Thomson, de Cambridge, en 1897, como componentes de los rayos catódicos. Su masa, en reposo, es de  $9,107 \cdot 10^{-28}$  gramos, y su carga eléctrica, negativa, es de  $4,803 \cdot 10^{-10}$  u.e.s. Por encima de una velocidad de  $10^{10}$  centímetros por segundo, el electrón sufre una variación *relativista* de masa suficientemente considerable para ser tenida en cuenta.

En estado normal, el átomo es eléctricamente neutro. Ello obliga a que el número de electrones sea igual al de protones, ya que estas partículas llevan la misma carga eléctrica, pero de signo contrario. Así, el átomo más sencillo, el de hidrógeno ordinario, consta de un electrón y de un protón. El átomo de curio, Cm, consta de 96 electrones y 96 protones.

El número de protones o de electrones es lo que confiere el carácter químico a los elementos. Se llama *Número atómico* y se representa por  $Z$ . Para el hidrógeno,  $Z = 1$ . Para el curio,  $Z = 96$ .  $Z$  varía de modo rigurosamente regular, según la serie natural de los números enteros.

Para un valor dado de  $Z$ , o sea para un mismo elemento químico, existen núcleos con distinto contenido en neutrones, cuya presencia no afecta sensiblemente al carácter químico del elemento. Surgen así los *isótopos*, elementos químicamente casi idénticos, pero de distinto peso atómico, a los cuales corresponde un mismo lugar en la clasificación natural de los elementos químicos, hecho al cual deben su nombre. Así, para el hidrógeno,  $Z = 1$ , primer lugar de la clasificación natural de los elementos, hay tres isótopos: H-1; H-2; H-3. El primero, hidrógeno ordinario, consta de un protón. El segundo, hidrógeno pesado o deuterio, consta de un protón y un neutrón. El tercero, llamado tritio, consta de un protón y dos neutrones. Para el helio,  $Z = 2$ , segundo lugar de la clasificación natural, hay dos isótopos: He-3 y He-4. El núcleo del primero consta de dos protones y un neutrón. El núcleo del segundo consta de dos protones y de dos neutrones.

Un isótopo cualquiera queda definido por  $Z$  y por el número de nucleones,  $n$ , pudiendo ser representado por  $E_n^Z$ .

Así,  $U_{235}^{92}$ , significa el isótopo del uranio,  $Z = 92$ , cuyo núcleo contiene 92 protones y  $n - Z = 235 - 92 = 143$  neutrones.

El número actual de elementos químicos es de 97. El número total

de isótopos, entre naturales y artificiales, es de unos 700. El número total de moléculas, entre las homonucleares y heteronucleares, las naturales y las artificiales, se eleva a unas 700.000.

Gracias al espectrógrafo de masas de Aston, Cambridge, perfeccionado, los pesos isotópicos pueden expresarse actualmente con seis cifras significativas. El patrón de pesos isotópicos relativos es el isótopo más ligero y más frecuente del oxígeno, con el valor  $0 = 16,00000$ . Si este número se expresa en gramos, se tiene el isótopo-gramo. De acuerdo con el postulado de Avogadro, 1811, en el isótopo-gramo de un elemento cualquiera existe un mismo número de átomos individuales. Este número es una constante universal de la Naturaleza, se llama Número de Avogadro, se representa por  $N$  y vale, actualmente,  $N = 6,023 \cdot 10^{23}$ . Ha sido medido por muchos procedimientos. Dividiendo por  $N$  el peso isotópico-gramo, se tiene el peso individual del isótopo en gramos.

El oxígeno ordinario contiene tres isótopos: 0-16, 0-17 y 0-18. El peso de esta mezcla isotópica es 16,0035. Los químicos han tomado como patrón de pesos atómicos relativos la mezcla isotópica del oxígeno natural con el valor,  $0 = 16,0000$ . La escala química de pesos atómicos no concuerda, pues, con la escala física de pesos isotópicos, siendo éstos sistemáticamente superiores en una proporción constante. Para pasar de la escala física a la escala química hay que dividir por el factor universal de conversión: 1,000275.

En la escala física, las magnitudes relativas de las tres partículas fundamentales son las siguientes:

Protón-gramo .....	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Masa} = 1,00758 \text{ gramos.} \\ \text{Carga (electropositiva)} = 96500 \text{ culombios.} \end{array} \right.$
Neutrón-gramo .....	
Electrón-gramo .....	$\left\{ \begin{array}{l} \text{Masa} = 0,0005485 \text{ gramos.} \\ \text{Carga (electropositiva)} = 96500 \text{ culombios.} \end{array} \right.$

Un peso isotópico-gramo cualquiera puede ser expresado por la ecuación:

$$E_n^z = Z (0,0005485) + Z (1,00758) + (n - Z) (1,00895) = Z (1,00813) + (n - Z) (1,00895).$$



En esta expresión, 1,00813, es el peso atómico del hidrógeno ordinario. Esta ecuación es la expresión actual de la conocida ley de los *Números enteros*, con la que el físico inglés Prout enunció, en 1815, su teoría sobre la Unidad de la Materia, según la cual el hidrógeno es el elemento primordial de la Naturaleza.

Según Aston, de Cambridge, 1928, dicha ecuación da pesos isotópicos teóricos sistemáticamente, ligeramente superiores a los observados experimentalmente. Aston interpreta esta pérdida de masa según un efecto *relativista* de Einstein, 1905, de acuerdo con la ley einsteniana de equivalencia entre la masa material y la energía,  $E = m c^2$ , siendo  $c$  la velocidad de la luz. Dividiendo la pérdida total de masa,  $-\Delta m$ , por el número de nucleones,  $n$ , participantes en la síntesis, se tiene lo que Aston llama "packing effect", o calor de formación de los elementos por átomo-gramo de hidrógeno reaccionante:  $-\Delta m : n$ . El calor de formación de los elementos en función de su número atómico, ofrece un mínimo para la plata,  $Z = 47$ . La plata es, pues, el elemento más exotérmico, el que posee menos energía interna, y, por tanto, el más estable. Con respecto a la plata, todos los elementos son metastables. Si los elementos persisten en su metastabilidad, sin transformarse en plata, es debido a la existencia de resistencias pasivas que se oponen a todo proceso químico y alquímico. El vencimiento de estas resistencias pasivas supone el consumo de una cierta cantidad de energía llamada *energía de activación*, concepto introducido por Arrhenius en el siglo pasado. En las reacciones químicas ordinarias la energía de activación es de unas 100.000 calorías por molécula-gramo. En las reacciones alquímicas, la energía de activación es del orden de un billón de calorías por átomo-gramo. Esta energía tan elevada hace que no sea espontánea la síntesis de los elementos del ramal descendente de la curva de Aston. La síntesis de estos elementos tiene lugar en las estrellas y en el Sol por activación térmica (reacciones termonucleares). Se logra en los laboratorios recurriendo a reactivos muy enérgicos, tales como las partículas alfa, o bien activando artificialmente algunos proyectiles nucleares, verbigracia, en el ciclotrón de Lawrence, de California (1). El ramal analítico, ascendente,

(1) Las reacciones artificiales internucleares fueron descubiertas por Lord Rutherford, en 1919, al bombardear el núcleo de nitrógeno con partículas alfa (núcleos de helio muy energéticos, emitidos espontáneamente por algunos radioelementos):



de la curva de Aston, es espontáneo, bajo forma de desintegraciones radiactivas naturales. En este caso la energía de activación procede del propio núcleo, cuyas partículas, eventualmente activas, pueden salvar las barreras de potencial eléctrico que se oponen a su salida.

*Estructura cortical del átomo.*—El radio nuclear es del orden de  $10^{-12}$  centímetros. El radio atómico es del orden de  $10^{-8}$  centímetros. El radio del electrón es de  $10^{-13}$  centímetros. El núcleo contiene casi toda la masa del átomo, ya que la masa de los electrones es, relativamente, insignificante.

La zona cortical del átomo, eléctricamente neutro, contiene  $Z$  electrones. Teniendo en cuenta el diámetro nuclear y el diámetro atómico, así como el tamaño del electrón, el espacio cortical resulta inmensamente vacío.

Según Bohr, de Copenhague, 1913, los electrones describen órbitas alrededor del núcleo, de modo parecido a los planetas en torno al Sol (1). Existen distintos radios para las órbitas electrónicas, según leyes de estratificación bien definidas. Los  $Z$  electrones planetarios están definidos por cuatro números cuánticos, nombre derivado de la teoría de los cuantos, de Planck, aplicada por Bohr a la estructuración cortical del átomo. Dichos números cuánticos son:

- 1.º El número cuántico principal,  $n$ , con los valores 1, 2, 3, 4...
- 2.º El número cuántico secundario,  $l$ , con los valores 0, 1, 2, 3 ...  $n-1$ .
- 3.º El número cuántico magnético,  $m$ , con los valores  $l$ ;  $l-1$ ;  $l-2$ ; ... 0 ...  $-(l-2)$ ;  $-(l-1)$ ;  $-l$ .
- 4.º El número cuántico de rotación (spín),  $s$ , con los valores  $\pm \frac{1}{2}$ .

El Principio universal de exclusión, de Pauli, 1925, establece que en un mismo átomo no pueden existir dos electrones con sus cuatro números

Se engendra oxígeno (el isótopo 0-17), liberándose un protón.

Por tener lugar una transmutación de elementos, estas reacciones se conocen también con el nombre de reacciones alquímicas, en recuerdo de nuestros colegas de la Antigüedad y de la Edad Media. Actualmente se conocen alrededor de un millar de reacciones alquímicas, sin contar las transmutaciones por radiactividad natural.

(1) La Mecánica ondulatoria ha desechado la imagen planetaria de Bohr (que algunos siguen usando por inercia y comodidad de la imaginación), manteniendo, en cambio, la parte medular, los números cuánticos, a quienes ha dado significado físico y, por tanto, mayor vitalidad.





ros cuánticos iguales. Este principio permite la distribución de los  $Z$  electrones, según pisos distintos. Para  $n = 1$ ,  $l = 0$ ,  $m = 0$  y  $s = \pm \frac{1}{2}$ . Por tanto, en la órbita más profunda, la primera, piso  $1_s$ , caben dos electrones. Para  $n = 2$ ,  $l = 0$  y  $l = 1$ . Para  $l = 0$ , estamos en el caso anterior. Para  $l = 1$ ,  $m$  toma los valores, 1, 0,  $-1$ , a cada uno de los cuales corresponde la dualidad de spín. Por tanto, la órbita segunda consta de dos sub-pisos: el nivel  $2_s$ , con dos electrones, y el nivel  $2_p$ , con seis electrones. De modo análogo, en la órbita tercera,  $n = 3$ , hay tres sub-pisos: el  $3_s$ , con dos electrones; el  $3_p$ , con seis electrones, y el  $3_d$ , con diez electrones. Y así sucesivamente.

Las órbitas de Bohr son estacionarias, pues en ellas el electrón no pierde ni gana energía. Cuando por la acción de un agente exterior el átomo se excita, un electrón salta a una órbita más externa, absorbiendo una cantidad bien definida de energía. Cuando el electrón vuelve a su órbita, la energía es devuelta al exterior bajo forma de una radiación monocromática, cuya energía individual es:  $E = h\nu$ , siendo  $\nu$  la frecuencia de vibración, y  $h$ , la *constante de Planck* ( $h = 6,6 \cdot 10^{-27}$  erg.  $\times$  seg.).

A cada excitación distinta corresponde una radiación monocromática distinta, y el conjunto de radiaciones constituye el espectro del átomo en cuestión. Si los saltos electrónicos tienen lugar hasta órbitas muy profundas, las radiaciones emitidas son muy energéticas, perteneciendo al espectro de alta frecuencia (rayos X). El espectro óptico ordinario se obtiene cuando la órbita más interna, afectada por los saltos electrónicos, es la más externa en estado normal. Por eso los electrones de la última órbita se llaman electrones ópticos. Estos electrones, por ser, a su vez, los responsables del enlace químico, se llaman también electrones de valencia.

Los elementos químicamente análogos tienen el mismo número de electrones en la órbita de valencia. Al pasar gradualmente de un elemento a otro, según se número de orden o Número atómico,  $Z$ , se reproduce, periódicamente, la estructura electrónica de la órbita de valencia, justificándose así la "ley periódica" descubierta por el químico ruso Mendelejeff, en 1869, base de la clasificación natural de los elementos químicos.

Un átomo, eléctricamente neutro, al perder un electrón se convierte en un residuo atómico electropositivo, llamado *ión positivo* o *cación*, cuya carga es de 96,500 culombios por ión-gramo. Ejemplo: ión sodio,  $\text{Na}^+$ .



Si un átomo, eléctricamente neutro, adquiere un electrón, se convierte en un *ión* negativo o *anión*, con la carga de 96,500 culombios por ión-gramo. Ejemplo: ión cloro,  $\text{Cl}^-$ . Ambos iones son *monovalentes*, por acarrear la carga elemental de un átomo de electricidad. Análogamente, se tendrían los iones divalentes: ión calcio,  $\text{Ca}^{++}$ ; ión oxígeno,  $\text{O}^{=}$ ; etcétera.

Las emanaciones del tubo de descarga, las radiaciones de los radio-elementos y otros agentes, tienen la propiedad de ionizar los gases que encuentran a su paso, los cuales, por consiguiente, presentan una cierta conductividad eléctrica. El aparato utilizado para esta experiencia se llama cámara de ionización.

Los compuestos químicos capaces de experimentar el conocido fenómeno de la electrolisis están formados por iones; vgr.: el cloruro sódico [ $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ ]. En estos compuestos, llamados compuestos iónicos, el enlace químico es debido a una fuerza atractiva coulombiana. Esta clase de enlace se llama enlace *electrovalente*. Los iones fueron previstos en el siglo pasado por Faraday, Clausius y Arrhenius.

Los átomos neutros también se unen entre sí, formando los compuestos atómicos. En esta clase de compuestos, el enlace es debido a una fuerza de resonancia, por intercambio de electrones de valencia entre los átomos integrantes de la molécula. Este enlace químico se llama *covalente*. Ejemplos: hidrógeno, H-H; agua, H-O-H; etc. La unión de los nucleones entre sí se explica también por enlaces covalentes análogos.

En los compuestos químicos se cumple también el Principio de exclusión de Pauli.

*Magnitudes y características nucleares.*—Un núcleo contiene  $n$  nucleones,  $Z$  protones y  $n-Z$  neutrones. La carga eléctrica del núcleo vale, pues,  $Z \cdot 96,500$  culombios (carga  $+$ ) por átomo-gramo. La masa nuclear vale:  $Z(1,00758) + (n-Z)(1,00895)$  gramos por átomo-gramo, en la escala física. El radio nuclear viene dado por la fórmula empírica:

$$r = \frac{2}{3} Z \cdot 10^{-13} \text{ cm.}$$

*Spin nuclear.*—Para la interpretación de la estructura hiperfina de los espectros, Pauli sugirió, en 1924, que el núcleo posee un movimien-

to de rotación sobre sí mismo, lo mismo que los electrones y los planetas. El momento cinético de rotación, momento angular, cuantizado estilo Bohr, vale:

$$I \frac{h}{2\pi}$$

siendo  $h$  la constante de Planck e  $I$  el número cuántico de espín nuclear. Para partículas de masa *impar*,  $I$  puede tomar los valores:

$$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \text{etc.}$$

Para partículas de masa *par*,  $I$  toma los valores: 0, 1, 2, 3, etc.

Así, para las partículas impares, el protón y el neutrón,  $I = \frac{1}{2}$ .

Análogamente, para el isótopo 7 del litio, Li-7,  $I = \frac{3}{2}$ .

Para la partícula par, helio ordinario, He-4,  $I = 0$ . Análogamente, para el deuterio, H-2,  $I = 1$ .

El espín nuclear es importante para dilucidar problemas nucleares, cumpliéndose la ley de la conservación del espín para toda reacción alquímica: "La suma de los momentos angulares de los reactivos es igual a la suma de los momentos angulares de los productos de la reacción."

*Momento magnético.*—Debido al movimiento de partículas cargadas eléctricamente, los protones, el núcleo posee un momento magnético, aunque muy pequeño y, por tanto, de medida difícil. Es enigmático el hecho de que el neutrón, eléctricamente neutro, presenta también un momento magnético.

*Estadística nuclear.*—Los núcleos atómicos no se adaptan a la estadística clásica de Maxwell, de Cambridge, y de Boltzmann, de Viena. Los núcleos de masa impar siguen la estadística moderna de Fermi-Pauli. Los núcleos de masa par siguen la estadística moderna de Bose-Einstein.

Más adelante se abordarán algunos aspectos del magno problema, acerca de la estructura nuclear.

## DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS CÓSMICOS.—GENERALIDADES

El descubrimiento de los Rayos cósmicos se inició en una fecha ya tan lejana como el año 1900, por Elster y Geitel, en Alemania, y C. T. R. Wilson, en Inglaterra, ante el hecho de que un electroscopio, rigurosamente aislado, se descarga lentamente en el seno del aire. Análogamente, la cámara de ionización acusa una débil conductividad eléctrica para el estado normal del aire. El aire está, por lo tanto, ionizado. Según Lord Rutherford, 1903, se forman, en Inglaterra, unos cinco pares de iones por segundo y por centímetro cúbico de aire, al nivel del mar.

Como la ionización no es un proceso espontáneo, se supuso, en un principio, que el agente ionizante era una radiación electromagnética de alta frecuencia (rayos  $\gamma$ ), procedente de algún radio-elemento terrestre. Como es sabido, los rayos  $\gamma$  son las radiaciones más penetrantes conocidas en Radiactividad natural.

Lord Rutherford y McLennan observaron, en 1903, la persistencia de una débil ionización residual cuando la cámara de ionización se protege con una plancha de plomo de unos 3 cm. de espesor. Esta experiencia planteó el intrigante problema de la existencia de una radiación nueva, mucho más penetrante que los rayos  $\gamma$  más energéticos conocidos.

En 1909 el físico suizo Göckel señaló el camino a seguir para el descubrimiento de la nueva radiación al verificar el primer sondeo atmosférico hasta una altura de 4.500 metros sobre el nivel del mar. Con gran sorpresa, la intensidad de la ionización, lejos de disminuir, aumenta con la altura, lo cual descarta definitivamente a la Tierra como presunto manantial de la radiación misteriosa.

En 1911 el físico austriaco Hess, en sus conocidas ascensiones aerostáticas hasta una altura de 5.200 metros sobre el nivel del mar, confirmó cuantitativamente las observaciones de su antecesor. En colaboración con Kolhörster, 1913, encontró, para la altura de 9.000 metros, una intensidad de ionización unas trece veces superior a la existente sobre el nivel del mar.

Hess observó, asimismo, que la intensidad de la ionización no va-

ría sensiblemente al pasar del día a la noche (1), por lo que el Sol quedaba descartado, a su vez, como presunto foco emisor de la radiación enigmática (2). Hess es, pues, el primero que considera la nueva radiación como procedente de lejanos espacios interestelares. En 1936 la Academia de Ciencias de Suecia otorgó a Hess el premio Nóbel de Física, en calidad de descubridor de los nuevos rayos, conocidos actualmente con la denominación de Rayos cósmicos a propuesta de Millikan, 1925.

Terminada la Primera Guerra mundial, se inician las exploraciones estratosféricas por Millikan, Tizzard, Regener, Piccard, etc. Regener alcanzó la altura de 26 kilómetros en 1932. Muy recientemente, 1948, los físicos norteamericanos Allen y Tatel han explorado la atmósfera desde el nivel del mar hasta la altura de 161 kilómetros, gracias al empleo del cohete alemán V-2.

Las experiencias realizadas en 1926 por Millikan, en Sudamérica, demuestran que los Rayos cósmicos no proceden de la Vía Láctea.

Millikan observó, en 1928, la presencia de Rayos cósmicos en el fondo de los lagos norteamericanos. Regener, en 1932, hizo observaciones análogas en el lago Constanza (Suiza). Posteriormente se han encontrado Rayos cósmicos en el interior de minas muy profundas.

El físico holandés Clay demostró, en 1927, que la intensidad de la radiación cósmica varía con la latitud geomagnética, siendo máxima en los Polos y mínima en el Ecuador, con una diferencia del 14 por 100. Este hecho se debe a que en la radiación cósmica predominan, sobre los fotones o átomos de luz, los corpúsculos cargados eléctricamente, los cuales se concentran sobre los Polos por la acción del campo magnético terrestre. Por la misma teoría explica el físico noruego Störmer el origen de las auroras boreales.

Clay y Millikan observaron, de modo independiente, en 1934, un efecto de la longitud geomagnética sobre la intensidad de la radiación cósmica, efecto debido a la asimetría del campo magnético terrestre.

---

(1) El propio Hess ha demostrado recientemente que la radiación cósmica no es rigurosamente isotrópica a través del tiempo, pues presenta una intensidad máxima hacia las doce del día. Según medidas del físico español Duperier (*Nature*, 158, 196, 1946), dicha variación diurna alcanza un máximo del 4 por 1.000 solamente.

(2) Sin embargo, según una teoría recentísima (del año en curso), que se expondrá oportunamente, los Rayos cósmicos proceden, precisamente, del Sol.



Así, a lo largo de la línea ecuatorial, en Singapoore, 105° E., y en el Pacífico central, 165° O., se forman, respectivamente, 1,53 y 1,57 iones por centímetro cúbico y por segundo. La variación máxima de intensidad correspondiente a la *asimetría* de "longitud" es del 8 por 100.

La rotación del campo magnético terrestre hace desviar las partículas cósmicas electronegativas hacia Oriente, y las electropositivas hacia Poniente. Del hecho de haberse encontrado, en la zona ecuatorial, una acusada *asimetría Este-Oeste*, se llega a la conclusión de que en la radiación cósmica predominan las partículas electropositivas.

El físico ruso Skobelzyn, en 1929, midió, por vez primera, la energía de los Rayos cósmicos por medio de la cámara de niebla, aparato cuya descripción se reserva para un capítulo próximo, habiendo observado la presencia de electrones cósmicos con energías de hasta 1.000 Mev. El orden de magnitud de la energía de las radiaciones naturales terrestres es solamente de unos 10 Mev. (El mega-electrón-voltio, Mev, es la unidad de energía más frecuentemente usada en Física atómica. Es un millón de veces la energía adquirida por la carga elemental de un átomo de electricidad, bajo la diferencia de potencial de un voltio.  $1 \text{ Mev} = 1,6 \cdot 10^{-6}$  ergios.)

Prescindiendo de los efectos de latitud, de longitud y del Este-Oeste, así como de la pequeña variación temporal, la radiación cósmica es, sensiblemente, uniforme sobre la superficie terrestre, a través del tiempo y del espacio. En números redondos, según Millikan, dos millones de partículas cósmicas atraviesan nuestro cuerpo a lo largo del día. Cada segundo nuestra cabeza es atravesada por dos proyectiles cósmicos.

El físico norteamericano Anderson, en 1932, analizando los Rayos cósmicos, descubrió los electrones positivos (positrones) previstos, en 1928, en una concepción atrevidísima del genial matemático Dirac, de Oxford. Poco después, en 1934, los esposos Joliot-Curie, de París, lograron extraer electrones positivos de los núcleos de los elementos terrestres, con el descubrimiento de la Radiactividad artificial.

En 1933 Blackett y Occhialini, de Cambridge, descubren el interesante fenómeno de los *chaparrones* cósmicos, conjunto de pares, electrón negativo : electrón positivo, procedente de una misma partícula inicial.

En 1937 Anderson descubre el mesón cósmico, partícula interesan-

tísima para la constitución nuclear, prevista teóricamente por el físico japonés Yukawa en 1935.

En 1948 Gardner y Lattes, de la Universidad de Berkeley, California, han extraído, por vez primera, mesones de los núcleos de los elementos terrestres (Rayos cósmicos artificiales).

Actualmente se conocen varias clases de mesones: positivos, negativos, pesados, ligeros, etc. En fecha muy reciente, 1950, parece haberse descubrido el mesón neutro, neutreto, cuya existencia invocan todos los teóricos como una realidad evidente.

El descubrimiento de los mesones cósmicos y terrestres señala el comienzo de la *época heroica* de la Física nuclear y de la Física cósmica.

### III

#### EL ELECTRÓN DE DIRAC Y LOS RAYOS CÓSMICOS

La primitiva Mecánica ondulatoria del príncipe de Broglie y de Schrödinger no es aplicable a las partículas animadas de una velocidad muy grande, próxima a la de la luz, por el hecho de que en estas condiciones dichas partículas sufren una variación sensible de masa, plenamente justificada por el postulado relativista de Einstein. Por otra parte, la existencia del spin del electrón, postulada por Uhlenbeck y Goudsmidt, en 1924, obliga a modificar la primitiva ecuación de ondas en el sentido de transformar la función escalar en una función vectorial.

En consideración a esta doble exigencia, Dirac, de Oxford, en 1928, creó la *Mecánica relativista* que lleva su nombre, a base de una nueva ecuación de ondas tal, que al satisfacer el Principio de Relatividad, de Einstein, tiene en cuenta las propiedades vectoriales derivadas del spin.

De acuerdo con el principio de Einstein, a las coordenadas de espacio,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , hay que añadir el tiempo,  $t$ , multiplicado por  $ic$ ; siendo  $i = \sqrt{-1}$ , y  $c$ , la velocidad de la luz. En total, cuatro coordenadas,  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ,  $ict$ , correspondientes, según Minkowski, a un espacio de cuatro dimensiones. De acuerdo con todas estas consideraciones, la Mecánica relativista de Dirac establece una función vectorial de cuatro componentes, que satisface a un sistema de cuatro ecuaciones en derivadas parciales de primer orden.



Las conocidas ecuaciones relativistas

$$E = m c^2, \text{ y } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

en conexión con la cantidad de movimiento o momento dinámico,  $p = m v$ , conducen a la expresión:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4,$$

siendo  $E$  la energía del corpúsculo,  $m_0$  su masa en reposo y  $c$  la velocidad de la luz.

Para cualquier valor de  $p$  hay siempre dos valores de la energía,  $+E$  y  $-E$ , que satisfacen esta expresión. Además, de acuerdo con la teoría cuántica, según la cual los cambios de estado tienen lugar por saltos, los autovalores posibles para la energía del electrón son, o mayores que  $m_0 c^2$  o menores que  $-m_0 c^2$ , siendo prohibido, en consecuencia, el intervalo comprendido entre  $-m_0 c^2$  y  $+m_0 c^2$ .

En Física clásica carecen de sentido los estados de energía negativa, por lo que las ecuaciones de Dirac, aunque llenas de lógica matemática, aparentan estar en pugna con la experimentación ordinaria.

El propio Dirac soslayó esta dificultad, argumentando del modo siguiente: Desde un punto de vista teórico, los estados de energía negativa tienen el mismo fundamento que los de energía positiva. De hecho, esta igualdad no se manifiesta en la Naturaleza, ya que los procesos ordinarios tienen lugar exclusivamente en el dominio de la energía positiva. Para justificar este hecho, y ante la exigencia del Principio de exclusión de Pauli, según el cual, en cada estado de energía sólo cabe un electrón, Dirac admite, resueltamente, los estados de energía negativa, los cuales estarían ocupados normalmente por electrones negativos inasequibles a la observación.

Si, previa absorción de energía *positiva*, de este océano de estados de energía negativa se libera un electrón con energía positiva,  $E > m_0 c^2$ , se tendrá un electrón ordinario susceptible de observación; pero en dicho océano quedará un espacio vacío, un *agujero*, equivalente a una carga positiva. Según las ecuaciones de Dirac, el agujero en cuestión, rodeado de electrones con energía negativa, se comporta exactamente como un electrón positivo con energía positiva, y, por tanto, como una

entidad observable. Crear un agujero equivale, pues, a crear un electrón positivo o positrón *tangible*.

La liberación previa del electrón negativo exigirá, evidentemente, el consumo de una energía igual a  $2m_0c^2$ , valor del desnivel comprendido entre  $-m_0c^2$  y  $+m_0c^2$ , y esta energía podrá ser suministrada bajo forma de luz. En cuyo caso, un fotón suficientemente energético quedará *materializado*, creando el par electrón-positrón.

Recíprocamente, la caída de un electrón ordinario desde un estado alto de energía positiva a un agujero de Dirac, significará el *aniquilamiento relativista* del par electrón-positrón, para engendrar un fotón.

En resumen: un electrón imponderable por poseer energía negativa,  $-m_0c^2$ , se hace visible cuando, por absorción de un fotón, adquiere el nivel energético,  $+m_0c^2$ , en cuyo caso se crea simultáneamente un agujero o positrón. En términos relativistas, el fotón o átomo de luz, entidad energética, se ha materializado, engendrando dos entidades corpusculares, de acuerdo con la ecuación: 1 fotón = 1 electrón + 1 positrón.

El proceso inverso: 1 electrón + 1 positrón = 1 fotón, es otra consecuencia importante de la teoría.

En un principio se creyó que las ideas de Dirac, a pesar de su aparato matemático, eran tan atrevidas como artificiosas. Pero cuando, cuatro años más tarde, el físico norteamericano Anderson, analizando Rayos cósmicos, descubrió, de hecho, el electrón positivo, la admiración de los físicos convergió sobre el joven matemático de Oxford, gloria de la Física-matemática moderna.

Según hemos visto y volveremos a ver, todas las predicciones de Dirac se han cumplido al pie de la letra. Sin embargo, la alta Física teórica de los agujeros se ha enfrentado con algunos problemas muy serios y difíciles, sin perspectivas de solución por ahora.

\* \* \*

En fecha muy reciente, el físico-matemático Feynman, de la Universidad de Cornell, Ithaca, Nueva York (1), pretende el establecimiento teórico del positrón sobre bases más asequibles, reemplazando la teoría de los agujeros por una nueva interpretación de las soluciones de

---

(1) *Phys. Rev.*, 76, 749, 1949.

la ecuación de Dirac. Recurriendo, en efecto, a la imposición de adecuadas condiciones "marginales" a la función de ondas de Dirac, surge felizmente una nueva y completa solución del problema que contiene, automáticamente y sin ninguna violencia, todas las posibilidades inherentes a la creación y aniquilamiento relativistas del par electrón-positrón.

En esta solución los estados de energía negativa vienen representados por ondas, que, en el espacio-tiempo, viajan desde el potencial externo del campo hacia atrás en el tiempo. (Es obvio que en la dimensión temporal cabe considerar dos sentidos: hacia atrás y hacia adelante.)

Si un electrón, en un potencial, se mueve hacia adelante en el tiempo, puede ser desviado hacia adelante en el tiempo (desviación electrónica ordinaria) o desviado hacia atrás en el tiempo. Esta última posibilidad corresponde físicamente al aniquilamiento relativista del par electrón-positrón.

Si un positrón, en un potencial, se mueve hacia atrás en el tiempo, puede ser desviado hacia atrás en el tiempo (desviación efectiva del positrón) o desviado hacia adelante en el tiempo. Esta última posibilidad corresponde físicamente a la creación relativista del par electrón-positrón.

#### IV

#### EL MESÓN DE YUKAWA EN LA FÍSICA NUCLEAR Y EN LA FÍSICA CÓSMICA

Aunque, según hemos visto ya en el análisis del "packing effect", de Aston, los núcleos atómicos son metastables con relación al de la plata, su estabilidad es extraordinaria, exigiendo para su desintegración una energía de activación del orden de un billón de calorías. Este hecho demuestra la existencia de fuerzas atractivas intensísimas entre las partículas integrantes del núcleo. La experimentación directa a base de la difusión de los nucleones por los núcleos, confirma la evidencia de la existencia de tales fuerzas.

Estas fuerzas gozan de las propiedades siguientes: 1) Se ejercen entre partículas a la distancia exigua de unos  $10^{-13}$  cm.; 2) Se extinguen rápidamente más allá del radio nuclear; y 3) Se reparten entre un

número muy reducido de partículas, de modo muy análogo al enlace covalente de los compuestos atómicos, tales como el  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ , etc.

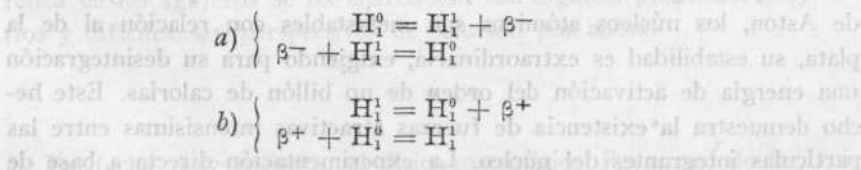
El carácter de saturabilidad es el rasgo más saliente de las fuerzas del enlace nuclear, y se pone de manifiesto por el hecho de que la energía de enlace crece proporcionalmente con  $n$  y no con  $n(n-1):2$ , como lo exigiría el caso de fuerzas ejercidas por igual entre todos los  $n$  nucleones de un núcleo, según sus combinaciones binarias posibles, como, de hecho, ocurre entre las cargas eléctricas sumisas a las leyes de Coulomb. Las fuerzas nucleares se asemejan, pues, a las fuerzas cohesivas de Van der Waals, que sólo se ejercen entre moléculas líquidas vecinas, analogía que sirve de base al modelo nuclear "de gotas", de Gamow, 1928, el cual, en manos de Bohr, permitió calcular, en 1939, que el U-235 es el isótopo explosivo (*bomba atómica*).

Cabe preguntar ahora de qué naturaleza es la fuerza atractiva que realmente existe entre dos protones, dos neutrones, un protón y un neutrón. El gran físico teórico alemán Heisenberg, ampliando ideas del físico ruso Iwanenko, trató de abordar el problema en 1934. Empezó por sugerir que los núcleos están integrados exclusivamente por protones y neutrones, cuya interacción mutua puede seguir uno de los dos procesos siguientes:

a) En el par neutrón-protón, el neutrón emite un electrón y se convierte en un protón. A su vez, el protón inicial absorbe el electrón, convirtiéndose en un neutrón. Y así sucesivamente.

b) En el par protón-neutrón, el protón emite un positrón y se convierte en un neutrón. A su vez, el neutrón inicial absorbe el positrón, convirtiéndose en un protón. Y así sucesivamente.

Esquemáticamente:



Protones y neutrones desempeñan, pues, un papel simétrico; uno de ellos se transforma en el otro, y reciprocamente, constituyendo, por tanto, dos *variedades* o *estados cuánticos* de una misma y única partícula fundamental: el "nucleón". Según la teoría nuclear de Heisenberg, la carga eléctrica, aun conservando su carácter absoluto, no está ligada a

ningún corpúsculo determinado, ya que la supuesta interacción entre protones y neutrones exige un intercambio incesante de carga. En el cambio de estado cuántico del nucleón se crea un electrón o un positrón, de modo análogo a como en el cambio de estado cuántico de un átomo, inherente al salto de un electrón planetario de una órbita a otra, se crea un fotón.

El intercambio de carga entre los dos estados del nucleón, a través del campo electromagnético correspondiente, origina una fuerza atractiva por resonancia, en cierto modo análoga a la calculada, con auxilio de la Mecánica ondulatoria, por Heitler y London, en 1927, para el enlace covalente entre los átomos neutros de la molécula de hidrógeno,  $H_2$ .

Las ideas de Heisenberg, sostenidas, con pequeñas variantes, por otro gran físico teórico, Fermi, de Roma, en 1934, si bien representan el primer intento de sondeo de las fuerzas nucleares, son inaceptables desde diversos puntos de vista. Su defecto fundamental consiste en presuponer un campo electromagnético culombiano como soporte de tales fuerzas, siendo así que en un campo de semejante naturaleza dejan de cumplirse cada uno de los tres requisitos, oportunamente consignados, exigidos por la conducta de las acciones nucleares. Para señalar el caso de máxima desavenencia, ¿cómo concebir una atracción culombiana entre partículas del mismo signo eléctrico, tales como los protones? De hecho, los protones se atraen; pero culombianamente se repelen siempre. No queda más remedio que admitir que, para los protones, al lado de la repulsión culombiana prevalece una atracción de otra naturaleza.

El joven físico teórico japonés Yukawa inició, en 1935, la solución provisional del magno problema, con un cambio radical de ideas, adornadas con gran lujo matemático, las cuales, aunque poco aceptadas en un principio, acabaron por imponerse, mereciendo el premio Nóbel de Física 1949.

La idea fundamental de Yukawa consiste en reemplazar el campo electromagnético de Coulomb, origen de todos los vicios, por un nuevo campo de fuerzas: el *campo nuclear* de Yukawa, cuyas características esenciales emanan de las consideraciones siguientes, en parte compatibles con las ideas de Heisenberg y de Fermi.



La interacción instantánea entre dos partículas a distancia exige la existencia de un campo intermediario, que en las ideas de Heisenberg y de Fermi era un campo electromagnético coulombiano, soporte de las acciones de Coulomb y de Laplace.

El carácter continuo del clásico campo electromagnético de Maxwell, con propagación de perturbaciones por ondas electromagnéticas, ha tenido que modificarse, haciéndose *granular*, por exigencias de la Mecánica cuántica, siendo precisamente el fotón o átomo de luz el gránulo de perturbación electromagnética del campo electromagnético moderno. La existencia experimental del fotón, demostrada por fenómenos tales como el efecto fotoeléctrico, el efecto Compton, etc., nos pone de manifiesto que el campo electromagnético de Maxwell posee, en efecto, un aspecto corpuscular con asiento en el fotón. Por tanto, ondas luminosas, ondas electromagnéticas y ondas fotónicas expresan, substancialmente, un mismo y único concepto. Así, en la interacción entre dos partículas, vgr., entre dos electrones, existe un campo electromagnético en interacción con cada uno de los electrones. En lenguaje corpuscular, un electrón emite un fotón, que es absorbido por el otro electrón. Interacción entre dos electrones o emisión y absorción de fotones es, pues, lo mismo.

Entre los nucleones hay también interacción, con su campo intermediario consiguiente. Pero este campo no puede ser electromagnético, por el hecho, tantas veces consignado, de que las acciones nucleares no son coulombianas ni laplacianas. Clásicamente no existe ningún otro campo de fuerzas, pues el campo de Newton, dada la pequeñez de las masas nucleónicas y de la constante de la Gravitación universal, supone una atracción debilísima, desautorizada por la experiencia (1).

Ante este estado de cosas, Yukawa admite un nuevo campo de fuerzas, un campo de distinta naturaleza, el cual, al satisfacer dichas exigencias generales, sea responsable, al mismo tiempo, de la conducta específica de las fuerzas nucleares en lo que concierne a su carácter de saturabilidad, extinción rápida con la distancia, etc.

El campo nuclear de Yukawa poseerá también su aspecto corpuscular, pero el corpúsculo no será el fotón, privativo del campo electro-

---

(1) En fecha muy reciente, Einstein, el rey de reyes de la Física, pretende que el campo de Newton y el de Coulomb son dos variantes de un solo campo universal de fuerzas. Es probable que el nuevo campo de Yukawa constituya la tercera variante de una *trinidad unitaria* de la Naturaleza.

magnético de Maxwell. Un campo nuevo exige, evidentemente, un *corpúsculo-campo* nuevo. Este corpúsculo es el hipotético *mesón* de Yukawa, nombre cuya etimología justificaremos luego. El mesón es, pues, el aspecto corpuscular del campo nuclear de Yukawa, de modo exactamente análogo a como el fotón es el aspecto corpuscular del campo electromagnético de Maxwell, a cuyas ondas fotónicas corresponderán, evidentemente, las nuevas ondas: las ondas mesónicas de Yukawa.

Intentaremos aclarar este lenguaje sibilino con los recursos del cálculo. La teoría escalar del mesón de Yukawa se inspira en la clásica ecuación del potencial de las ondas electromagnéticas:

$$\Delta U = \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 U}{\delta t^2}; \quad a)$$

siendo  $U$  el potencial,  $c$  la velocidad de la luz,  $t$  el tiempo y  $\Delta U$  la expresión abreviada de la laplaciana

$$\Delta U = \frac{\delta^2 U}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 U}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 U}{\delta z^2};$$

en la que  $x$ ,  $y$ ,  $z$  son las coordenadas cartesianas de un espacio de tres dimensiones.

La ecuación a) tiene como solución estática bien definida el potencial coulombiano  $U = \frac{e}{r}$ , siendo  $e$  la carga del átomo de electricidad, y  $r$ , la distancia.

Yukawa, para evitar precisamente que el campo nuclear sea coulombiano, introduce la modificación:

$$\Delta U = \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 U}{\delta t^2} + K^2 U; \quad b)$$

siendo  $K$  una nueva constante universal,  $K = 0,5 \cdot 10^{13} \text{ cm.}^{-1}$

El término adicional  $K^2 U$  representa la innovación substantiva, clave de la ecuación del potencial de las ondas mesónicas de Yukawa. Su presencia, aunque aparentemente artificiosa, se justifica plenamente por razones de invariancia relativista.

Para un campo mesónico estático, la ecuación b) posee, como solución bien definida:

$$U = \frac{g}{r} e^{-Kr};$$



expresión del potencial nuclear de Yukawa, en la que  $g$  desempeña un papel análogo al de la carga eléctrica en el potencial de Coulomb. (Huelga decir que en el potencial de Yukawa,  $e$  representa la base de los logaritmos neperianos.) El potencial así definido contiene un factor exponencial que permite la extinción rápida de las fuerzas nucleares en función de la distancia creciente, en consonancia con las exigencias experimentales.

Según las ideas del príncipe de Broglie, creador de la Mecánica ondulatoria, 1925, la partícula de energía,  $E$ , y momento dinámico,  $p_x$ , que viaja a lo largo de la dirección del eje de las  $x$ , lleva asociada una onda plana, monocromática, que satisface la ecuación:

$$\Psi = Ae^{2\pi i (nx - vt)}; \quad c)$$

siendo  $n$  el número de onda,  $\nu$  la frecuencia de vibración y  $t$  el tiempo.

Por ser  $n = \frac{1}{\lambda}$ , y la longitud de onda  $\lambda$ , de acuerdo con la ecuación fundamental del príncipe de Broglie,  $\lambda = \frac{h}{p_x}$ , se tiene  $n = \frac{p_x}{h}$ . Por otra parte, y de acuerdo con la teoría de los cuantos de Planck,  $E = h\nu$ .

Teniendo en cuenta estas dos relaciones, la ecuación de ondas del príncipe de Broglie, c), toma la forma:

$$\Psi = Ae^{\frac{2\pi i}{h} (p_x x - Et)} \quad d)$$

Diferenciando esta ecuación con relación a  $x$ , resulta:

$$\frac{\delta \Psi}{\delta x} = \Psi p_x \frac{2\pi i}{h};$$

de donde, sucesivamente:

$$\Psi p_x = \frac{h}{2\pi i} \frac{\delta \Psi}{\delta x};$$

$$p_x = \frac{h}{2\pi i} \frac{\delta}{\delta x};$$

$$p_x^2 = \frac{h}{2\pi i} \frac{\delta}{\delta x} \cdot \frac{h}{2\pi i} \frac{\delta}{\delta x} = -\frac{h^2}{4\pi^2} \frac{\delta^2}{\delta x^2}.$$

Análogamente, se tendría:

$$p_y^2 = -\frac{h^2}{4\pi^2} \frac{\delta^2}{\delta y^2}; \quad p_z^2 = -\frac{h^2}{4\pi^2} \frac{\delta^2}{\delta z^2};$$

para partículas moviéndose a lo largo de las direcciones de los ejes y, z, respectivamente.

Considerando una dirección cualquiera en un espacio de tres dimensiones: x, y, z, se tendría para el momento dinámico resultante,  $p$ :

$$p^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 = -\frac{h^2}{4\pi^2} \left( \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2} \right). \quad e)$$

Diferenciando d) con relación al tiempo, resulta:

$$\frac{\delta \Psi}{\delta t} = -\frac{2\pi i}{h} \Psi E;$$

de donde, sucesivamente:

$$\Psi E = -\frac{h}{2\pi i} \frac{\delta \Psi}{\delta t};$$

$$E = -\frac{h}{2\pi i} \frac{\delta}{\delta t};$$

$$E^2 = -\frac{h^2}{4\pi^2} \frac{\delta^2}{\delta t^2}. \quad f)$$

Si llamamos  $\mu$  la masa del mesón en reposo, la ecuación relativista deducida en el capítulo anterior (Electrón de Dirac) se convierte en la expresión  $E^2 = p^2 c^2 + \mu^2 c^4$ , que podemos poner en la forma:

$$\frac{E^2}{c^2} = p^2 + \mu^2 c^2.$$

Sustituyendo en esta ecuación los valores de  $p^2$  y  $E^2$  por los dados por e) y f), respectivamente, resulta:

$$-\frac{h^2}{4\pi^2} \cdot \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2}{\delta t^2} = -\frac{h^2}{4\pi^2} \left( \frac{\delta^2}{\delta x^2} + \frac{\delta^2}{\delta y^2} + \frac{\delta^2}{\delta z^2} \right) + \mu^2 c^2.$$

Multiplicando ambos miembros por U y despejando, resulta finalmente:

$$\Delta U = \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 U}{\delta t^2} + \frac{4\pi^2}{h^2} \mu^2 c^2 U. \quad g)$$

Esta ecuación no es otra que la ecuación de ondas de un corpúsculo en Mecánica ondulatoria relativista. Por otra parte, la ecuación b) define la propagación de las partículas que constituyen el aspecto corpuscular del campo nuclear de Yukawa. Por consiguiente, las ecuaciones b) y g) son, substancialmente, iguales. De su identificación resulta:

$$K^2 = \mu^2 c^2 \frac{4\pi^2}{h^2};$$

de donde

$$\mu = \frac{Kh}{2\pi c} = \frac{0,5 \cdot 10^{13} \cdot 6,5 \cdot 10^{-27}}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{10}} = 175 \cdot 10^{-27} \text{ gramos.}$$

Como la masa individual del electrón en reposo es  $m_e = 0,91 \cdot 10^{-27}$  gr., se deduce, para la masa del mesón,  $\mu = 200 m_e$ . Es decir, según los cálculos de Yukawa, la masa del mesón, en reposo, debe ser 200 veces la del electrón. De ahí, precisamente, el nombre de *mesón*, alusivo a una partícula de masa intermedia entre la del electrón y la del protón.

El gran mérito de la teoría de Yukawa estriba en que la masa del mesón cósmico, descubierto tres años más tarde por Anderson, 1938, es, en efecto, 200 veces superior a la del electrón. Por otra parte, la extracción artificial de mesones de los núcleos atómicos terrestres, mesones terrestres, por Gardner y Lattes, de Berkeley, California, 1948, debe ser considerada como la verificación experimental más brillante de las ideas de Yukawa.

\* \* \*

La teoría escalar de Yukawa proporcionaba una solución con simetría esférica, y la experiencia enseña que el potencial depende de las orientaciones recíprocas de los "spines" de las partículas nucleares. Además, la primitiva teoría de Yukawa es incapaz de explicar la existencia de dos estados para el núcleo del deuterio: un estado estable, con una energía de enlace de 2,15 Mev, y otro estado inestable, con una energía de enlace casi nula.

El propio Yukawa propuso una primera teoría vectorial en la que se asigna al mesón el spin 1. El mesón queda así descrito por un cuadvectores que desempeña el papel del cuadvectores potencial electro-magnético

tico de la teoría clásica de Maxwell, con el ya consignado término suplementario del mesón escalar.

Con auxilio de estas ecuaciones puede obtenerse el potencial de interacción entre protones y neutrones, con resultados concordantes con la experiencia, incluso el cálculo energético de los dos estados del deutón.

El enlace entre protones y neutrones sería consecuencia de uno de los dos procesos siguientes, algo análogos, en apariencia, a las interacciones de Heisenberg y de Fermi:

a) En el par neutrón-protón, el neutrón emite un mesón negativo, convirtiéndose en un protón. Recíprocamente, el protón inicial absorbe el mesón, convirtiéndose en un neutrón. Y así sucesivamente.

b) En el par protón-neutrón, el protón emite un mesón positivo, convirtiéndose en un neutrón. Recíprocamente, el neutrón inicial absorbe el mesón, convirtiéndose en un protón. Y así sucesivamente.

Esquemáticamente:

$$\begin{array}{l}
 a) \left\{ \begin{array}{l} H_1^0 = H_1^+ + \mu^- \\ \mu^- + H_1^+ = H_1^0 \end{array} \right. \\
 b) \left\{ \begin{array}{l} H_1^+ = H_1^0 + \mu^+ \\ \mu^+ + H_1^0 = H_1^+ \end{array} \right.
 \end{array}$$

Estos procesos serían casi instantáneos y se repetirían incesantemente con una frecuencia elevadísima, apareciendo con ello una fuerza de intercambio por resonancia, en cierto modo análoga a la del enlace químico covalente, ya consignada. El campo nuclear de Yukawa, el campo mesónico, es, pues, un campo de intercambio de cargas mesónicas, a través del cual se ejercen las fuerzas atractivas entre los nucleones.

\* \* \*

Entre los datos experimentales de la bibliografía figuran las dispersiones considerables de los protones de gran energía por los protones, hecho que pone de manifiesto la existencia de una fuerte atracción *no coulombiana* entre estas dos partículas.

Kemmer, para explicar dicha atracción, así como la existente entre dos neutrones, introduce la hipótesis seductora de los mesones neutros, llamados neutretos, ya que no se concibe, en buena lógica física, ningún intercambio de carga entre partículas de idéntica naturaleza. Según

Kemmer, el enlace protón-protón y el enlace neutrón-neutrón tendría lugar por una fuerza de canje por intercambio de mesones neutros.

Habría, pues, tres mesones: el mesón negativo,  $\mu^-$ , para la interacción neutrón-protón; el mesón positivo,  $\mu^+$ , para la interacción protón-neutrón, y el mesón neutro,  $\mu^0$ , para las interacciones protón-protón y neutrón-neutrón. Los mesones cargados acarrearían la carga de un átomo de electricidad.

La experiencia ha confirmado la existencia de los dos primeros en los Rayos cósmicos y en los núcleos atómicos terrestres. En cuanto al mesón neutro, parece haber sido descubierto en 1950, por Bjorklund, Crandall, Moyer y York (1), de Berkeley, California, como producto de extracción artificial de algunos núcleos atómicos terrestres, bombardeados por protones acelerados entre 180 y 350 Mev. Tienen una masa 300 veces superior a la del electrón, perteneciendo, por tanto, a la variedad vectorial  $\pi^0$ , que describiremos más adelante. Su vida es ultra-efímera, del orden de  $10^{-11}$  segundos.

Los mesones descritos por Yukawa serían partículas de tránsito, de vida fugaz, cuya muerte sobrevendría por desintegración en un electrón y un neutrino, partícula postulada por Pauli y Fermi en 1934. Las previsiones de Yukawa han sido confirmadas por Williams en la cámara de niebla, 1940. (Véase capítulo IX.)

\* \* \*

Para explicar la complejidad mesónica actual, Möller y Rosenfeld han ensayado la descripción matemática, altamente difícil, de dos clases de mesones: el mesón *pseudo-escalar*, de vida media,  $10^{-6}$  segundos, y el mesón *vectorial*, de vida más breve, del orden de  $10^{-8}$  segundos.

El mesón pseudo-escalar se confundiría con el mesón ordinario  $\mu$ , llamado también mesón ligero. El mesón vectorial, designado por  $\pi$ , sería el mesón pesado hallado como componente de los Rayos cósmicos en las partes más altas de la atmósfera. Su masa es casi doble de la del anterior. En 1948, Gardner y Lattes, de Berkeley, California, han extraído artificialmente mesones  $\pi^+$  y mesones  $\pi^-$ , de los núcleos atómicos terrestres, con una masa  $313 \pm 16$  veces la del electrón. Hemos señalado ya el descubrimiento recentísimo del mesón neutro, artificial,  $\pi^0$ .

(1) *Phys. Rev.*, **77**, 213 (1950).

Muy recientemente, 1949, se ha descubierto el mesón hiper-pesado, por Leprince-Ringuet (1) y otros varios autores de diferentes países. Según investigaciones de Wagner y Cooper (2), se encuentran mesones de esta clase nueva, en las altas regiones estratosféricas, a la altura de unos 30 kilómetros sobre el nivel del mar. Su masa es 725 veces la del electrón. Se consideran como muy inestables, de vida cortísima, razón por la cual mueren antes de llegar a la superficie terrestre.

En los capítulos IX y X se insiste sobre los mesones cósmicos y los mesones terrestres, los mesones teóricos y los mesones experimentales.

## V

### DETECCIÓN DE LOS RAYOS CÓSMICOS

La investigación experimental de los Rayos cósmicos es muy laboriosa y delicada, requiriendo el empleo de métodos de trabajo refinadísimos, entre los cuales los más usados son: la cámara de niebla, el contador de Geiger y el método fotográfico.

*Cámara de niebla de Wilson.*—Ya Laplace y Lavoisier observaron, a fines del siglo XVIII, que algunas de las burbujas de hidrógeno obtenido al reaccionar un ácido con un metal, están cargadas eléctricamente. En 1897, el físico inglés Townsend observó la fácil formación de una niebla bien acusada cuando, en la obtención del hidrógeno, el gas se hace burbujear a través de agua. En cambio, el hidrógeno, desecado a través de ácido sulfúrico, permanece rigurosamente transparente. Townsend dedujo de estas experiencias que los iones gaseosos tienen la propiedad de condensar el vapor de agua cuando éste se halla en estado de saturación. Este fenómeno reviste gran interés, por cuanto permite la *visibilidad* de los iones.

C. T. R. Wilson, de Cambridge, citado ya como uno de los iniciadores del descubrimiento de los Rayos cósmicos, inspirándose en las experiencias e ideas de Townsend, elaboró, en 1911, la primera *cámara de niebla* que tanta importancia había de adquirir en el campo de la Física atómica como preciadísimo instrumento de investigación.

(1) *Rev. Mod. Phys.*, **21**, 42 (1949).

(2) *Phys. Rev.*, **76**, 449 (1949).



En una cámara llena de aire saturado con vapor de agua se provoca una brusca expansión adiabática cuyo enfriamiento, por efecto Joule, lleva al vapor por debajo de su punto de rocío. Si el aire y el vapor están exentos de iones y de polvillo, persiste la metastabilidad inherente al estado de sobresaturación del sistema, el cual, por lo mismo, permanece transparente, si bien tiene lugar una condensación parcial del vapor sobre las paredes frías de la cámara. Pero sí un corpúsculo ionizante penetra en la cámara en el momento de la expansión, los iones gaseosos formados a su paso actúan, al principio, como núcleos de condensación del vapor para convertirse luego en soportes de las gotitas formadas. El paso del corpúsculo ionizante se manifiesta, pues, por la aparición de una fina estela blanca de niebla (líneas de niebla, *fog tracks*), visible a simple vista. Iluminando la cámara en el momento de la expansión, las líneas de niebla pueden ser fotografiadas.

A cada corpúsculo ionizante corresponde una línea de niebla bien definida, de cuyo análisis pueden extraerse muchas conclusiones de un valor inestimable, tales como: el conocimiento de los choques entre partículas, la dirección de emisión de rayos secundarios, estudio de problemas sobre ángulos, etc. Por eso las experiencias de la cámara de niebla se consideran como las más maravillosas de la Física atómica, siendo de una fecundidad extraordinaria.

Los fotones y neutrones, y demás partículas eléctricamente neutras, no engendran líneas de niebla por la sencilla razón de no ser agentes ionizantes. Esta cualidad la ofrecen únicamente los corpúsculos cargados eléctricamente y animados de gran energía cinética: electrones rápidos, partículas alfa, etc.

Colocada la cámara en un campo magnético, las líneas de niebla se curvan según arcos de círculo impuestos por la ley de Laplace, del conocimiento de cuyo radio de curvatura puede evaluarse la energía del corpúsculo, de acuerdo con las ecuaciones:

$$Hr = \frac{m_0}{e} \cdot \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

$$E = \frac{m_0 c^2}{e \cdot 10^8} \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right);$$



siendo  $H$  el campo magnético (gauss);  
 $r$ , radio de curvatura, en cm.;  
 $m_0$ , la masa del corpúsculo, en reposo;  
 $e$ , la carga del átomo de electricidad;  
 $v$ , la velocidad del corpúsculo;  
 $c$ , la velocidad de la luz, y  
 $E$ , la energía en electrón-voltios.

Cuando la energía del corpúsculo es excepcionalmente elevada, dando un valor muy grande frente a  $m_0c^2$ , resulta la expresión abreviada

$$E = Hr \frac{c}{10^8} = 300Hr, \text{ que ya no contiene la masa de la partícula.}$$

La cámara de niebla solamente acusa la presencia de corpúsculos durante el cortísimo tiempo de la expansión adiabática (cerca de una centésima de segundo). Para provocar la expansión inmediata hace falta transcurrir alrededor de medio minuto. Este intervalo es un tiempo muerto durante el cual la cámara no registra ningún acontecimiento. Por consiguiente, la cámara de niebla, al no poder seguir todas las incidencias de las partículas en una sola expansión, exige la obtención de muchas fotografías, muchas de ellas inútiles. Las fotografías útiles son fragmentos de la conducta parcial de los corpúsculos cuya historia completa no siempre es fácil elaborar por falta de algún episodio, acaso el más interesante.

Dando grandes dimensiones a la cámara, E. J. Williams ha logrado prolongar hasta 1-2 segundos el estado de sobresaturación del sistema después de la expansión, en cuyo caso, a lo largo de dicho tiempo, relativamente muy grande, son denunciadas las vicisitudes de las partículas objeto de estudio.

Según veremos más adelante, Blackett y Occhialini, de Cambridge, en 1933, lograron, con la más feliz elegancia, completar los datos de la cámara de niebla con las indicaciones del contador de Geiger, combinando adecuadamente los dos instrumentos.

*Contador de Geiger-Müller.*—Lo mismo que la cámara de niebla, no falta en ningún Laboratorio dedicado a Física cósmica. Su principio fundamental es debido a Lord Rutherford, 1908.

Una de las formas del contador de Geiger consiste, esquemáticamente, en un cátodo tubular de pequeñas dimensiones (unos dos centímetros de diámetro por seis centímetros de altura), envuelto por una

cámara cilíndrica de vidrio, llena de hidrógeno, a la presión de 100 milímetros, con algo de gases extraños para favorecer la interrupción de la descarga. El ánodo es filiforme y ocupa el eje longitudinal de la cámara a cuyos extremos está soldado. Los electrodos van conectados con los polos correspondientes de un manantial de alto voltaje, generalmente una batería de acumuladores.

Operando con tensiones elevadas tales que el efluio se halle muy cerca de su manifestación, la penetración ulterior de un rayo ionizante en la cámara provoca la descarga disruptiva, cuyo impulso, previamente amplificado, se registra sobre un oscilógrafo o bien se cuenta automáticamente con un numerador mecánico, tal como se indica esquemáticamente en la figura adjunta. (Fig. 1.)

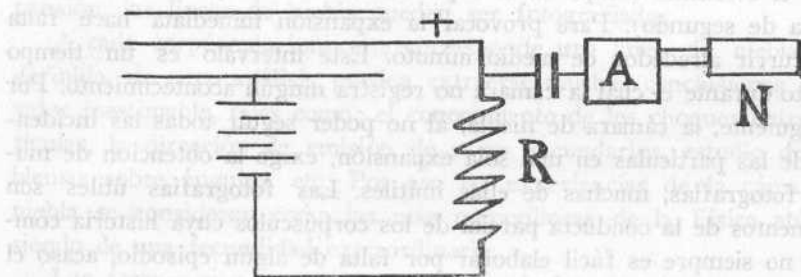


Fig. 1. Esquema del contador de Geiger: R, resistencia; A, amplificador; N, registrador automático del número de impulsos.

La elevada resistencia, R, por donde circula la corriente al originarse la descarga disruptiva, disminuye lo suficiente la diferencia de potencial entre los electrodos del tubo de Geiger para que tenga lugar la interrupción brusca de la descarga, después de lo cual el contador vuelve a cargarse automáticamente.

*Contadores de Geiger en "coincidencia".*—El contador de Geiger no sólo responde al paso de las partículas cósmicas, sino también al de las radiaciones espontáneas o parásitas: radiactividad de las paredes, radiactividad terrestre, etc.

Las radiaciones parásitas son de escaso poder de penetración frente a la radiación más interesante: el componente duro de los Rayos cósmicos. El estudio selectivo de los Rayos cósmicos hiperpenetrantes se

efectúa por el método de las "coincidencias", usado por vez primera por Rossi en 1930.

Sean dos tubos de Geiger,  $G_1$  y  $G_2$ , con sus ejes longitudinales paralelos entre sí, y un Rayo cósmico ultra-rápido capaz de atravesar los dos tubos y la plancha de plomo,  $P$ , interpuesta. Los impulsos de los dos tubos de Geiger son amplificados por  $A_1$  y  $A_2$ , respectivamente; pero el seleccionador,  $S$ , sólo funciona cuando dichos impulsos son coincidentes, es decir, simultáneos, en cuyo caso son registrados automáticamente por el numerador  $N$ , tal como se indica, esquemáticamente, en la figura 2.

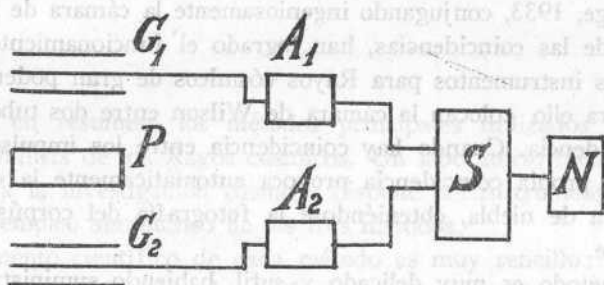


Fig. 2. Circuito binario de Rossi en el método de "coincidencias".

Como el Rayo cósmico que atraviesa todo el sistema, por el solo hecho de hacerlo es velocísimo, sus efectos sobre ambos tubos de Geiger son prácticamente simultáneos y, por tanto, coincidentes. Como tales son registrados por el instrumento, altamente sensible.

Se llama *tiempo de resolución*,  $\tau$ , del aparato, al valor límite del tiempo hasta el cual las descargas parciales son coincidentes. Para los sistemas binarios, el tiempo de resolución es del orden de  $10^{-3}$  segundos, y puede reducirse considerablemente con empleo de circuitos especiales.

El número de coincidencias,  $N$ , en la unidad de tiempo y para un sistema binario, viene dado por la expresión

$$N = 2 N_1 N_2 \tau,$$

siendo  $N_1$  y  $N_2$  el valor promedio de los impulsos de los contadores respectivos en la unidad de tiempo.

Para tres contadores, en coincidencia, se tiene la expresión aproximada:

$$N = 6 N_1 N_2 N_3 \tau^2,$$

donde se observa que el número de coincidencias disminuye rápidamente con el número de contadores, como es lógico esperar.

El empleo del método de las coincidencias es frecuentísimo en el análisis de los Rayos cósmicos, habiendo multitud de variantes, tanto por el número de contadores utilizados como por su acoplamiento especial.

Según hemos indicado oportunamente, Blackett y Occhialini, de Cambridge, 1933, conjugando ingeniosamente la cámara de niebla con el método de las coincidencias, han logrado el funcionamiento simultáneo de ambos instrumentos para Rayos cósmicos de gran poder de penetración. Para ello colocan la cámara de Wilson entre dos tubos de Geiger en coincidencia. Cuando hay coincidencia entre los impulsos de ambos tubos, la propia coincidencia provoca automáticamente la expansión de la cámara de niebla, obteniéndose la fotografía del corpúsculo correspondiente.

El método es muy delicado y sutil, habiendo suministrado una información detallada, abundante y preciosa para el conocimiento íntimo de muchos procesos cósmicos.

#### *Método fotográfico.*

Aunque antiguo, este método ha sido perfeccionado por Powell y Occhialini en 1946, habiendo prestado, desde esta fecha, servicios extraordinarios en el estudio de los Rayos cósmicos, así como en la investigación de los productos de la escisión nuclear, base de la "bomba atómica" y de la "pila de Fermi".

La sensibilidad actual del método en cuestión estriba en que los gránulos del bromuro de plata se hallan muy finamente divididos, presentando, además, una gran concentración en la emulsión de gelatina.

Cuando una partícula atraviesa la emulsión sensible, su trayectoria se manifiesta a la vista del observador, con auxilio del microscopio, previo revelado de la placa fotográfica, como una sucesión lineal de puntos negros.

El método fotográfico sirve especialmente para la detección de me-

sones. Los neutrones, a pesar de su invisibilidad como tales, se manifiestan de modo indirecto, a expensas de los protones de la gelatina liberados en choque elástico. Los electrones producen líneas débiles y sinuosas. Es muy marcado el paso de los protones y de las partículas alfa.

La gran ventaja del método fotográfico radica en su extraordinaria comodidad de empleo, pues para la captura eventual de los Rayos cósmicos basta con abandonar a su propia suerte una caja de placas fotográficas, ya en un globo-sonda, surcando las altas regiones de la atmósfera, ya en las estaciones exploradoras, distribuídas sobre la superficie terrestre. La experiencia se hace por sí sola, siendo fecundísima en hallazgos tan recientes como interesantes.

\* \* \*

Estos son, en resumen, los métodos principales utilizados para la detección y análisis de los Rayos cósmicos. Un laboratorio bien equipado, dedicado a la investigación cósmica, dispone del instrumental necesario para el empleo simultáneo de los tres métodos.

El fundamento científico de cada método es muy sencillo; pero su puesta en marcha, la técnica de su funcionamiento, es harto delicada, exigiendo dotes de investigador poco frecuentes.

El método fotográfico y el de la niebla tienen de común el hecho de ofrecer la fotografía de las trayectorias de las partículas con sus incidencias eventuales, de gran interés para el conocimiento del rayo incógnito. Coleccionando un número suficiente de fotografías pueden hacerse consideraciones estadísticas conducentes al conocimiento de la longitud media de las trayectorias, la energía, la carga y la masa de los proyectiles, etc. Una partícula queda identificada, es decir, se conoce su naturaleza cuando se logra medir o calcular su carga y su masa, problema no tan fácil de resolver, exigiendo el concurso de varias fotografías complementarias. Es frecuente la necesidad de emitir hipótesis provisionales ante la carencia de la suficiente documentación experimental. Tales hipótesis, más o menos adornadas con cálculos y pruebas indirectas, suelen ser afortunadas. La historia de los Rayos cósmicos está llena de casos semejantes.

El contador de Geiger, 1913, perfeccionado por Müller en 1928, es de una sensibilidad extrema; pero por su carácter no es más que un simple contador *cuantitativo*, sin ofrecer ninguna indicación acerca de la

naturaleza de los corpúsculos contados. Sin embargo, con el método de las coincidencias se hace ya una selección, en el sentido de registrar exclusivamente las partículas ultra-rápidas, cuya identificación ulterior puede lograrse indirectamente por el propio método, aunque no siempre con éxito. En la práctica, los contadores de Geiger, en coincidencia, son analizadores de mesones. Operando con circuitos en coincidencia, con un número progresivamente creciente de contadores de Geiger, se logra el fraccionamiento de los Rayos cósmicos según el espectro completo del poder de penetración de cada uno de los corpúsculos componentes de la radiación penetrante.

Se comprende que el empleo simultáneo de los tres métodos permite el conocimiento mejor de los problemas planteados.

## VI

### LOS RAYOS CÓSMICOS AL NIVEL DEL MAR.—“EFECTO DE LATITUD”.—EL POSITRÓN.—LOS “CHAPARRONES CÓSMICOS”

*Intensidad.*—Prescindiendo de la ligerísima variación diurna del cuatro por mil, medida por el físico español Duperier, de algunas fluctuaciones y variaciones periódicas ligadas a periodicidades astronómicas (1), la radiación cósmica se manifiesta por su carácter altamente isotrópico, como procedente por igual de todas las direcciones de la bóveda celeste. Independientemente de la hora, del día, de la noche, de la estación, del Sol, de la Luna, de la Vía Láctea y de todos los astros del firmamento, la Tierra es el blanco de un bombardeo cósmico incesante cuyos proyectiles nos atraviesan de parte a parte, con una cadencia regular y un ritmo monótono, imperturbable, como impuesto por leyes de invariancia fatal.

Según Millikan, de Pasadena, Norteamérica, 100 proyectiles cósmi-

---

(1) Véanse más adelante las variaciones de intensidad debidas a tempestades magnéticas (*magnetic storms*), que Alfven pretende explicar en fecha muy reciente, 1950, atribuyendo un origen solar a los Rayos cósmicos. Véase asimismo (capítulo XII) la débil fluctuación periódica, con un período de veintisiete días, tiempo que dura una rotación del Sol sobre sí mismo, debida, pues, a influencias solares a las que concede gran interés la investigación actual.



cos atraviesan nuestra cabeza cada minuto. Por cada segundo llegan a la superficie total de la Tierra unos  $10^{18}$  rayos individuales. Si cada uno acarrea la carga de un átomo de electricidad, la intensidad cósmica sobre nuestro planeta sería equivalente a la de una corriente eléctrica de 0,15 amperios, intensidad insignificante, unas seis veces menor que la de una lámpara eléctrica de incandescencia de tipo corriente (100 watios y 125 voltios).

*Espectro energético.*—Suponiendo que los Rayos cósmicos vienen todos desde arriba hacia abajo, aunque con ángulos de inclinación distintos, las desviaciones, según arcos de círculo de sentidos opuestos, de

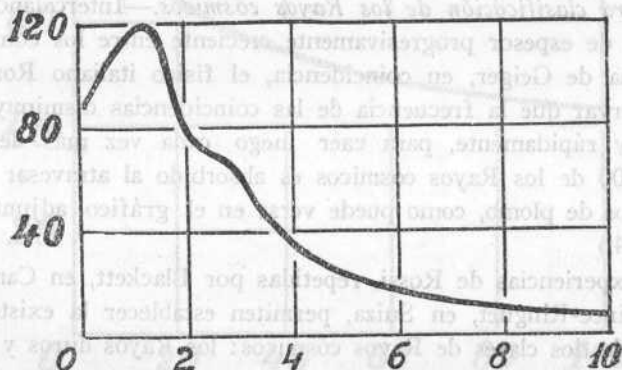


Fig. 3. Espectro energético de los Rayos cósmicos, según Blackett. En ordenadas, el número de Rayos cósmicos; en abscisas, la energía en BeV (1 BeV = 1 000 Mev).

las consiguientes estelas de niebla sometidas a un fuerte campo electromagnético, revelan la existencia de Rayos cósmicos electropositivos y electronegativos. Del amplio campo de valores del radio de curvatura de tales arcos de círculo ha sido extraído, por diversos autores, el espectro de energías de los Rayos cósmicos, cuya curva se inserta a continuación. (Fig. 3.)

Puede observarse el predominio de los Rayos de unos 2.000 Mev, energía mil veces superior a la de los rayos naturales terrestres, más energéticos. Por dificultades de experimentación no ha sido explorado con exactitud el límite superior del espectro, aunque se ha detectado la presencia esporádica de iones cósmicos monovalentes de hasta 100 mi-

lones de Mev, cifra aterradora por lo descomunal, muy cercana del límite consentido por la teoría.

El valor promedio de la energía individual de los Rayos cósmicos es tan elevado que, a pesar de la dilución extraordinaria de sus componentes, según acabamos de ver en el epígrafe anterior, el flujo global que cae sobre la Tierra equivale al 50 por 100 de la energía total que nos llega del Sol y demás estrellas bajo forma de luz y de calor. Según evaluaciones estadísticas, la energía de los Rayos cósmicos llega a representar el 99,66 por 100 de la energía total del Universo bajo forma de calor y de luz. Estas cifras demuestran, por sí solas, la importancia de los Rayos cósmicos.

*Primera clasificación de los Rayos cósmicos.*—Intercalando láminas de plomo de espesor progresivamente creciente entre los contadores de un sistema de Geiger, en coincidencia, el físico italiano Rossi ha podido observar que la frecuencia de las coincidencias disminuye al principio muy rápidamente, para caer luego cada vez más despacio. El 20 por 100 de los Rayos cósmicos es absorbido al atravesar unos diez centímetros de plomo, como puede verse en el gráfico adjunto. (Figura núm. 4.)

Las experiencias de Rossi, repetidas por Blackett, en Cambridge, y por Leprince-Ringuet, en Suiza, permiten establecer la existencia bien definida de dos clases de Rayos cósmicos: los Rayos duros y los Rayos blandos.

Los Rayos blandos son los capaces de atravesar unos 10 cm. de plomo solamente. Representan el 20 por 100 de los Rayos cósmicos, al nivel del mar. A la altura de 3.500 metros sobre el suelo, según experiencias de Leprince-Ringuet en Jungfrauoch, Suiza, la radiación blanda es tres veces más intensa que la radiación dura. Los Rayos blandos son absorbidos proporcionalmente, no con el Número atómico, sino con el cuadrado de esta magnitud del absorbente, hecho que revela una conducta muy especial.

Los Rayos duros, frente a los blandos, presentan características opuestas. En primer lugar, su gran poder de penetración: un metro de plomo detiene solamente el 50 por 100 de estas partículas. Por otra parte, los Rayos duros ofrecen una variación muy escasa de su porcentaje, en función de la altura atmosférica. Finalmente, siguen la ley normal de absorción, al ser ésta proporcional con el Número atómico del

absorbente. La lógica física permite inferir de esta dualidad de conducta, tan manifiesta, la existencia de una composición o naturaleza distinta para cada una de las dos clases de Rayos cósmicos. Más adelante precisaremos estos extremos a la luz complementaria de otros hechos. De momento nos limitaremos a consignar que el distinto poder de

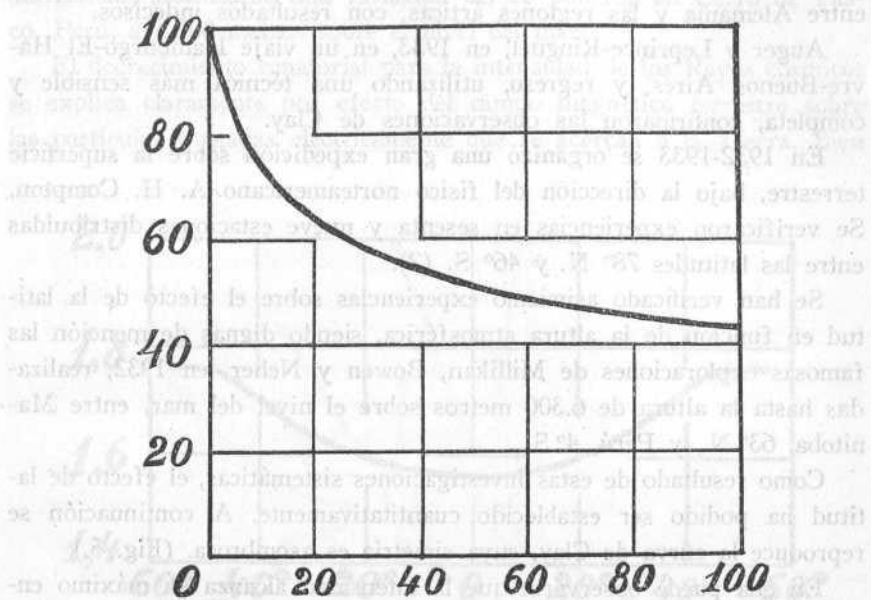


Fig. 4. Curva de absorción de los Rayos cósmicos verticales por el plomo, al nivel del mar, según Rossi. (En ordenadas, tanto por ciento; en abscisas, centímetros de plomo.)

penetración de los Rayos cósmicos es una consecuencia de su espectro energético, en el sentido de que los rayos más penetrantes son, a su vez, los de mayor energía.

*"Efecto de latitud".*

Sobre la superficie terrestre, al nivel del mar, los Rayos cósmicos presentan una intensidad mínima en el Ecuador y una intensidad máxima en los Polos, con una variación del 14 por 100. El físico holandés Clay fué el primero en observar, en 1927, la existencia cualitativa

de este efecto de latitud (1), en experiencias verificadas entre Amsterdam y Batavia (Java), aunque no pudo dar cifras cuantitativas hasta 1928-1930, al estudiar la variación de la intensidad entre Holanda y Singapoore.

Bothe y Kolhörster, en 1930, repitieron las experiencias de Clay entre Alemania y las regiones árticas, con resultados indecisos.

Auger y Leprince-Ringuet, en 1933, en un viaje Hamburgo-El Havre-Buenos Aires, y regreso, utilizando una técnica más sensible y completa, confirmaron las observaciones de Clay.

En 1932-1933 se organizó una gran expedición sobre la superficie terrestre, bajo la dirección del físico norteamericano A. H. Compton. Se verificaron experiencias en sesenta y nueve estaciones distribuidas entre las latitudes  $78^{\circ}$  N. y  $46^{\circ}$  S. (2).

Se han verificado asimismo experiencias sobre el efecto de la latitud en función de la altura atmosférica, siendo dignas de mención las famosas exploraciones de Millikan, Bowen y Neher, en 1932, realizadas hasta la altura de 6.300 metros sobre el nivel del mar, entre Manitoba,  $63^{\circ}$  N., y Perú,  $4^{\circ}$  S.

Como resultado de estas investigaciones sistemáticas, el efecto de latitud ha podido ser establecido cuantitativamente. A continuación se reproduce la curva de Clay, cuya simetría es asombrosa. (Fig. 5.)

En ella puede observarse que la intensidad alcanza su máximo entre los  $45^{\circ}$  y  $50^{\circ}$  de latitud, en ambos hemisferios, manteniéndose luego en este nivel hasta los Polos. Más adelante insistiremos sobre este hecho.

También ha podido ser trazado el mapa de *isocosmas*, líneas que unen entre sí todos los puntos del Globo de igual intensidad cósmica. Salvo pequeñas excepciones, estas líneas son paralelas al ecuador mag-

---

(1) Millikan reclama para sí la prioridad de este descubrimiento, en experiencias bastante groseras verificadas, en 1925, entre Los Angeles y el Perú.

(2) Todos los miembros del grupo expedicionario destinado a la exploración cósmica en Alaska,  $68^{\circ}$  N., murieron a consecuencia de un trágico accidente, habiendo podido salvarse los resultados de sus investigaciones. Son muy frecuentes los accidentes de esta naturaleza en la investigación de los Rayos cósmicos, siendo muchas las vidas sacrificadas heroicamente al servicio de la Física cósmica. La historia de la Física cósmica se escribirá, pues, con nombres de investigadores sabios y héroes a la vez.

nético con una concordancia asombrosa, lo cual demuestra, de modo concluyente, que el efecto en cuestión es debido a la latitud geomagnética y no a la latitud geográfica. (Como es bien sabido, el ecuador magnético no coincide con el geográfico.)

El efecto de latitud es mucho más acusado para grandes alturas atmosféricas, alcanzando una variación del 33 por 100 en Cerro de Pasco, Perú, a 4.300 metros sobre el nivel del mar.

El decrecimiento ecuatorial para la intensidad de los Rayos cósmicos se explica claramente por efecto del campo magnético terrestre sobre las partículas cargadas eléctricamente que se acercan a la Tierra. Bien

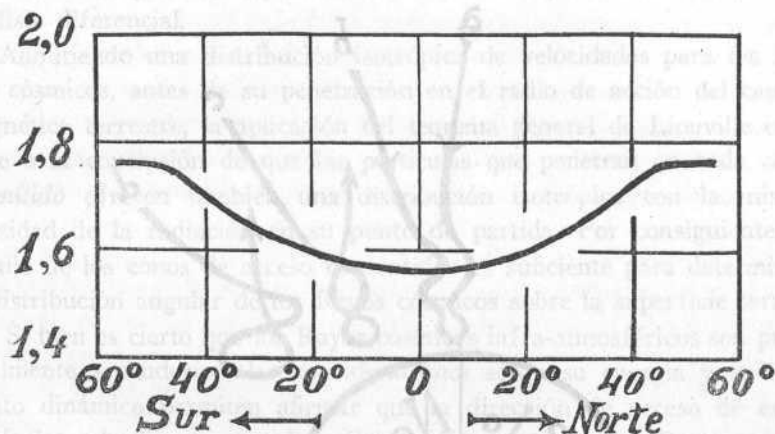


Fig. 5. Variación de la intensidad de los Rayos cósmicos en función de la latitud geomagnética, al nivel del mar, según Clay. (La intensidad se expresa por el número de pares de iones por c. c. y por segundo.)

sabido es que la Tierra es un imán natural gigantesco, aunque muy débil. Su intensidad máxima, alcanzada en las cercanías de la corteza terrestre, llega solamente a unas décimas de gauss. (En Madrid la componente horizontal vale unos 0,233 gauss.) Según Peters, el campo magnético terrestre es sensible hasta una distancia de 16.000 kilómetros, abarcando, por consiguiente, con grandísimo exceso, nuestra atmósfera, cuyo espesor no pasa de unos—muy pocos—centenares de kilómetros.

El análisis físico-matemático del movimiento de los iones en el cam-

po de un dipolo magnético ha sido realizado por vez primera por el físico noruego Störmer, en conexión con su teoría acerca del origen de las auroras boreales, según la cual el campo magnético terrestre concentra sobre los Polos los electrones de poca energía emitidos por el Sol.

Las ideas de Störmer han sido aplicadas por Rossi, Epstein, Vallarta y el canónigo belga Lemaitre al estudio matemático del efecto de latitud geomagnética, cuyas conclusiones han sido verificadas en el laboratorio, singularmente por Brüche, observando las trayectorias de un haz de electrones desviados por un imán. En el gráfico adjunto pue-

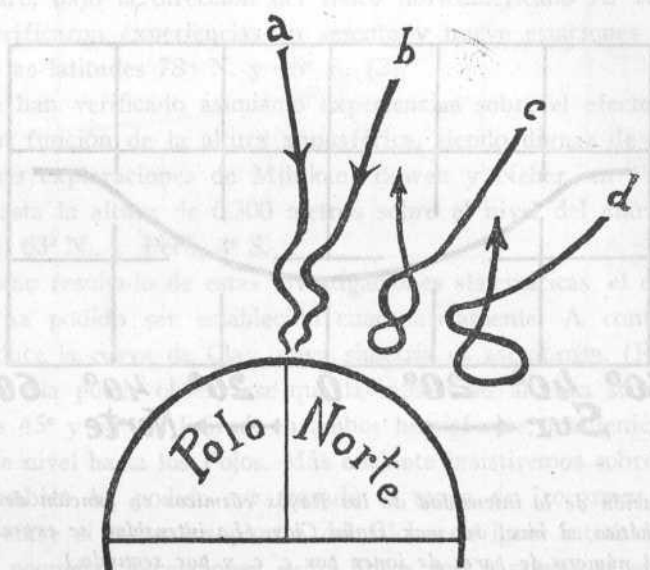


Fig. 6. Trayectorias electrónicas en las cercanías de un Polo, según Brüche.

den observarse las trayectorias electrónicas en las cercanías de un Polo. Los electrones a) y b), dirigidos hacia las regiones polares, alcanzan fácilmente la Tierra, mientras que los electrones c) y d) debido a su ángulo de incidencia y a su poca energía, se arrollan en hélice sobre los tubos de fuerza del campo magnético terrestre, siendo rechazados y desviados hacia las zonas polares. (Véase fig. 6.)

La energía mínima,  $E$ , que debe poseer una partícula cósmica pri-



maria para lograr su incidencia vertical sobre la Tierra, viene dada por:

$$E = 15 \cos^2 \lambda \text{ Bev,}$$

siendo  $\lambda$  la latitud geomagnética y  $B = 10^\circ$ .

Para el ecuador magnético,  $\lambda = 0$ ,  $E = 15 \text{ Bev}$ .

Partículas con esta energía alcanzarán el ecuador con mayor o menor facilidad, según su dirección. Para las partículas positivas, la dirección de acceso más fácil es la de Oeste a Este.

Lemaître y Vallarta han demostrado que, para energías superiores a este mínimo, el acceso de los Rayos cósmicos está confinado a un cono de forma complicada, cuyos límites han sido fijados con auxilio del análisis diferencial.

Admitiendo una distribución isotrópica de velocidades para los Rayos cósmicos, antes de su penetración en el radio de acción del campo magnético terrestre, la aplicación del teorema general de Liouville conduce a la conclusión de que las partículas que penetran en cada cono *permitido* ofrecen también una distribución isotrópica con la misma densidad de la radiación en su punto de partida. Por consiguiente, el cálculo de los conos de acceso consentidos es suficiente para determinar la distribución angular de los Rayos cósmicos sobre la superficie terrestre. Si bien es cierto que los Rayos cósmicos infra-atmosféricos son principalmente secundarios, las consideraciones sobre su energía y su momento dinámico permiten afirmar que la dirección de acceso de estas partículas a la Tierra reproduce fielmente la propia de los Rayos primarios. En este sentido, la Tierra, en calidad de un débil imán gigantesco, es un analizador de los Rayos cósmicos, aun cuando su misión selectiva se halla entorpecida y enmascarada por la acción absorbente de la atmósfera, como veremos más adelante.

Como hemos visto, el efecto de latitud geomagnética alcanza su máximo entre los  $45^\circ$  y  $50^\circ$ , antes de llegar, pues, a los Polos. A la latitud de  $50^\circ$ , las partículas de 3.000 Mev pueden atravesar el campo magnético terrestre y llegar verticalmente a la Tierra. La ausencia de un efecto de latitud para latitudes más altas indica que, o no hay partículas primarias con energía menor de 3.000 Mev, o que tales partículas carecen de efecto filtrante a través de la atmósfera. Este problema ha intentado resolverse mediante experiencias a grandes alturas atmosféricas. En este sentido, tanto Millikan, Bowen y Neher, en la

expedición ya citada, como Cosyns, han encontrado que el efecto de latitud para grandes alturas cesa también a los 50°, lo mismo que al nivel del mar. Las medidas de Carmichael y Dymond, realizadas en 1937 muy cerca del polo magnético, confirman los mismos resultados (1).

Parece, pues, presumible que el espectro energético de los Rayos cósmicos primarios no se extiende por debajo de 3.000 Mev. Jánossy, en 1937, sugiere que el momento magnético del Sol ejerce una acción selectiva sobre las partículas, prohibiendo su llegada a la órbita terrestre para las de una energía inferior a dicho límite. No está claro, sin embargo, si el momento magnético del Sol, calculado a base del efecto Zeeman del espectro del limbo solar, es suficiente para justificar semejante prohibición. Si realmente existe tal "efecto solar", debe esperarse una variación diurna en la intensidad de los Rayos cósmicos, debida a la rotación de la Tierra con respecto a los conos solares de acceso parcial, aunque de tamaño excesivamente pequeño para permitir la detección del efecto en los datos experimentales existentes. Por otra parte, la teoría de Heitler, expuesta en el capítulo XI, justifica plenamente la existencia de tal aparente anomalía en dicho efecto de latitud.

*Efecto azimutal.* — Según las delicadísimas experiencias del físico norteamericano Johnson, de la Fundación Bartol, y las de Alvarez y Compton, de la Universidad de Chicago, realizadas ambas, de modo simultáneo e independiente, en la primavera de 1933, existe una asimetría manifiesta entre el número de rayos procedentes del Este y los procedentes del Oeste. En efecto, inclinando el sistema vertical de Geiger

---

(1) En fecha muy reciente, 15 marzo 1950, Martin A. Pomerantz, de la Fundación Bartol, Pensilvania, en un trabajo publicado en *Phys. Rev.*, **77**, 830 (1950), encuentra datos y conclusiones en abierta contradicción con todo lo expuesto. Observa, en efecto, y en contra de la curva de la figura 5, que el efecto de latitud geomagnética en Churchill, Manitoba, 69° N., es más intenso que en Swarthmore, Pensilvania, 52° N. Existen, pues, en la radiación cósmica primaria partículas de energía inferior al límite admitido hasta ahora, las cuales incrementan la intensidad cósmica de las grandes latitudes. Por otra parte, Pomerantz infiere de sus revolucionarias experiencias la no existencia de un campo magnético solar permanente. Es más probable un campo variable con una intensidad máxima diecisiete veces inferior a la calculada hasta ahora. Las experiencias de Pomerantz pueden tener importancia, en un futuro próximo, para dilucidar el actualmente supuesto origen solar de los Rayos cósmicos. En este sentido, Pomerantz prepara nuevas experiencias, que se espera sean decisivas, sobre el cielo del Canadá, para el otoño próximo.

hacia el Oeste, se registra un número mayor de impulsos que cuando se inclina hacia el Este, hecho que demuestra el predominio de iones positivos en la radiación primaria. En las latitudes ecuatoriales existe un exceso considerable de partículas procedentes del Oeste. Ya que, según hemos visto, esta dirección es la de acceso más fácil para las partículas positivas, la asimetría Este-Oeste revela el predominio de partículas electropositivas para los Rayos cósmicos. Experiencias posteriores de Auger y Leprince-Ringuet han confirmado los resultados anteriores. El efecto Este-Oeste debe presentar su máximo para el ecuador magnético, previsión brillantemente verificada por distintos investigadores. En fecha muy reciente, 1949, el físico Barber, de Berkeley, California (1), ha revisado la asimetría Este-Oeste a distintas latitudes para la altura de 10.500 metros sobre el nivel del mar. Ha podido estudiar separadamente tal asimetría para los Rayos blandos y los Rayos duros. De acuerdo con los resultados generales de sus antecesores, predominan siempre los Rayos procedentes del Oeste, tanto si son blandos como si son duros. De un análisis muy concienzudo, Barber infiere que ambos componentes proceden de Rayos primarios electropositivos, por lo menos en su mayor parte.,

La asimetría Levante-Poniente fué prevista teóricamente por Rossi, Lemaître y Vallarta, quienes sugirieron la verificación de las experiencias confirmativas en las cercanías del ecuador magnético donde el efecto debía ser máximo. En este sentido los intentos reiterados del propio Rossi fracasaron repetidamente, siendo la extraordinaria finura experimental de Johnson la que permitió el descubrimiento del fenómeno en cuestión.

El análisis completo de la asimetría Este-Oeste se halla complicado por la absorción atmosférica, la cual es también una función del ángulo zenital. En la figura 7 se representa el efecto en cuestión para una sección ecuatorial. Los iones cósmicos con energía suficiente para atravesar la atmósfera y llegar verticalmente a la Tierra, sufren la desviación magnética consiguiente. Los iones positivos se desvían hacia el Este, adquiriendo, por tanto, con respecto a la vertical, la dirección Oeste-Este. Los iones negativos, por el contrario, se desvían hacia el Oeste, adquiriendo, en consecuencia, la dirección Este-Oeste.

Como consecuencia del estudio del efecto azimutal, debe inferirse el

---

(1) *Phys. Rev.*, 75, 590 (1949).

predominio de las partículas electropositivas en los Rayos cósmicos, hecho de capital importancia para el conocimiento de su composición.

*Efecto de longitud.*—Como consecuencia del hecho de que el campo magnético terrestre no es simétrico, el cálculo exacto de los conos de accesos permitidos prevé la existencia de una asimetría de distribución entre los rayos cósmicos procedentes del Norte y los procedentes del

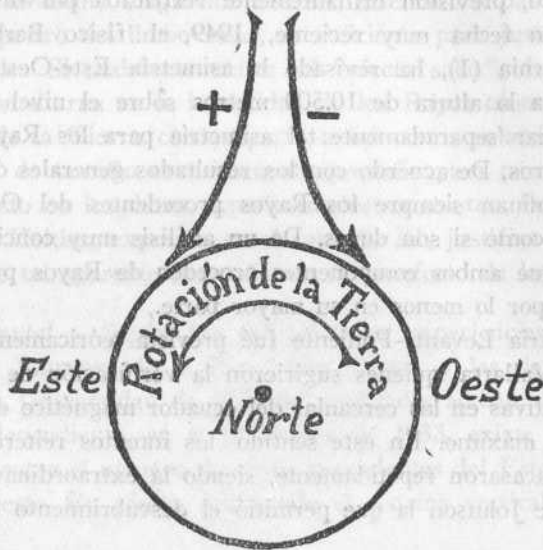


Fig. 7. Asimetría Levante-Poniente.

Sur. Esta asimetría se manifiesta en forma de una variación de la intensidad cósmica a lo largo del ecuador magnético, según una función periódica de la longitud geomagnética. En efecto, este *efecto de longitud* ha sido observado por Clay y por Millikan, de modo independiente, en 1934. El valor máximo de tal asimetría es de un 8 por 100.

### *El positrón.*

En 1932 el físico norteamericano Anderson intercaló una lámina de plomo, de seis milímetros de espesor, en posición diametral, en el interior de una cámara de niebla con eje horizontal, colocada entre los polos de un potente electroimán. Entre muchas trayectorias debidas a los Rayos cósmicos, destacó por su significación singularísima la de una partícula en todo igual al electrón, pero de signo eléctrico opuesto. Así descubrió Anderson el electrón positivo, previsto por Dirac en 1928.

Por el cambio del radio de curvatura de la trayectoria, experimentado al atravesar la lámina de plomo, Anderson pudo averiguar el sentido del movimiento de traslación de la partícula, el cual, en conexión con el sentido de la desviación electromagnética, le permitió identificarla como un positrón.

El descubrimiento del electrón positivo fué confirmado por Blackett y Occhialini en 1933, en el curioso fenómeno de los "chaparrones cósmicos", que describiremos en el epigrafe siguiente.

El propio Anderson y Joliot-Curie, de París, obtuvieron el positrón haciendo llegar Rayos  $\gamma$ , procedentes de núcleos atómicos terrestres, sobre una lámina de plomo colocada en el interior de una cámara de niebla. Se observa que de un punto de la lámina emergen dos trayectorias, que en un campo magnético se curvan en sentido opuesto. Su análisis reveló se trata del par electrón-positrón engendrado por la materialización relativista del fotón  $\gamma$ . Por otra parte, el físico francés Thibaud, de Lyon, realizó la experiencia inversa, proyectando un haz de positrones sobre electrones dispuestos a modo de anti-cátodo, logrando su aniquilamiento relativista bajo forma de fotones  $\gamma$ , según un proceso de rendimiento muy elevado. Con ello se han cumplido, al pie de la letra, las previsiones teóricas de Dirac, consignadas oportunamente.

En 1934 los esposos Joliot-Curie, de París, con el descubrimiento de la Radiactividad inducida, lograron la extracción artificial de positrones de los núcleos atómicos terrestres.

El positrón no tiene existencia libre en el núcleo.



### "Chaparrones cósmicos".

Descubiertos, en 1933, por Blackett y Occhialini, en el Cavendish Laboratory de la Universidad de Cambridge, Inglaterra, y vistos a través de la cámara de niebla, los *chaparrones* constituyen el espectáculo más hermoso de la Física cósmica. Dichos investigadores, empleando su original y ya citada feliz conjunción de la cámara de Wilson con el contador de Geiger, lograron fotografías de Rayos cósmicos con gran rendimiento, entre las cuales es frecuente la aparición de un conjunto de trayectorias procedentes, a modo de un abanico de fuegos artificiales fantásticos, de un punto común situado en las paredes de la propia cámara o en las láminas de plomo colocadas en su interior. A veces el número de trayectorias se eleva a un millar. De ahí, precisamente, el nombre de chaparrones (*shower*, en inglés; *gerbe*, en francés) dado a tan curioso fenómeno. Es frecuente la aparición de una serie de chaparrones en cascada, chaparrón de chaparrones, cuyo aspecto recuerda el del racimo de umbelas de las inflorescencias compuestas.

En un campo magnético, la mitad de las trayectorias se curvan en sentido opuesto a la otra mitad, según arcos de círculo simétricos entre sí. El análisis demuestra se trata de trayectorias de electrones y positrones en número, estadísticamente, igual.

La partícula primaria, la que por interacción con un obstáculo interpuesto a su paso engendra el chaparrón, puede ser ionizante o no. En el primer caso la cámara acusa la estela de niebla del proyectil incidente, mientras que, en el segundo se observa solamente la emergencia divergente de las trayectorias secundarias de un punto de la lámina, donde el chaparrón parece haberse producido por generación espontánea. Entre las partículas no ionizantes, invisibles en la cámara de niebla, capaces de engendrar chaparrones deben figurar, además de los fotones, los corpúsculos cósmicos de gran energía y, por tanto, de escasísimo poder ionizante, prácticamente nulo.

Experiencias de Auger, 1939, han demostrado que se producen coincidencias entre contadores de Geiger separados por la distancia horizontal de 75 metros. Estas coincidencias son debidas a chaparrones gigantes producidos en el seno del aire.

Finalmente, hay que señalar la existencia de unos chaparrones especiales, los chaparrones *explosivos*, cuyas trayectorias proceden tam-



bién de un punto común, pero que se distribuyen radialmente en el espacio en todas direcciones, a modo de una *estrella*. Se trata de la verdadera evaporación explosiva de un átomo, provocada por el bombardeo de un Rayo cósmico, siendo las trayectorias observadas, cuyo número es a veces muy elevado, las propias de los fragmentos atómicos, entre los cuales se observan, además de los electrones y positrones, mesones, protones, neutrones, fotones y restos nucleares pesados, verbi-gracia, heliones. Los chaparrones explosivos pertenecen, pues, al capítulo de reacciones nucleares inducidas por Rayos cósmicos.

Los chaparrones explosivos son mucho menos frecuentes que los ordinarios. Según Fussell (1936), Janosey (1942) y Hazen (1944), de cada 900 fotografías obtenidas en la cámara de niebla, solamente tres presentan la estrella de las explosiones atómicas. El número de chaparrones, tanto explosivos como ordinarios, crece considerablemente con la altura atmosférica. El análisis de los chaparrones explosivos reviste gran importancia para el estudio de la constitución nuclear, y su investigación actual se verifica ventajosamente mediante el método de las emulsiones fotográficas.

Baldwin y Klaiber, 1946, han provocado la formación artificial de estrellas nucleares, con Rayos X muy energéticos obtenidos con electrones acelerados en el betatrón de la General Electric Co.

En 1933 el físico italiano Rossi, usando el sistema de Geiger en coincidencia triple, abordó por vez primera el problema acerca del origen de los chaparrones. Para ello colocó debajo de una lámina de plomo tres contadores en triángulo (uno en cada vértice de un triángulo), dispuestos en posición horizontal, con sus ejes paralelos entre sí.

Con este montaje es imposible obtener una descarga coincidente con una sola partícula incidente, dado que, en ausencia de un campo dispersante, la trayectoria es rectilínea e incapaz, por tanto, de atravesar sucesivamente, en línea recta, los tres contadores en triángulo. Si bien es posible la coincidencia triple a base de dos partículas incidentes, independientes y simultáneas, el caso es demasiado poco probable.

La existencia efectiva y frecuente de coincidencias triples exige, por consiguiente, y como única explicación posible, la llegada simultánea de varios rayos secundarios, dos por lo menos, engendrados bajo forma de chaparrón en un punto de la masa de plomo, a expensas de una partícula cósmica incidente. A cada coincidencia corresponde, pues, la formación de un chaparrón.

A igualdad de las demás circunstancias, la probabilidad de engendrar chaparrones será proporcional al espesor de la lámina de plomo, hasta un cierto límite impuesto por la acción absorbente del propio plomo sobre los corpúsculos chaparrónicos formados en las capas superiores. El número de chaparrones por unidad de tiempo, en función del grosor de la lámina, pasará, pues, por un máximo para un espesor

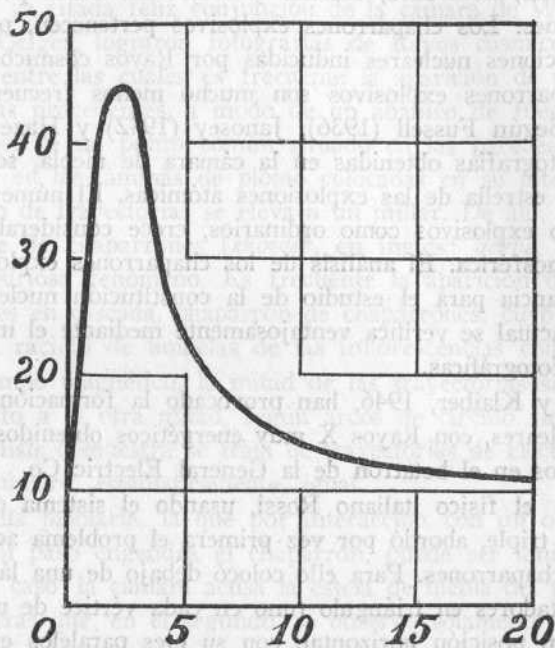


Fig. 8. Frecuencia de los chaparrones en función del espesor de una lámina de plomo, según Rossi. (En ordenadas, número de coincidencias por hora; en abscisas, espesor de plomo en centímetros.)

correspondiente a la penetrabilidad de los rayos secundarios, más allá del cual dicho número irá en decrecimiento progresivo, según la ley de absorción de los corpúsculos incidentes. En la figura 8 se resumen las experiencias de Rossi.

El máximo esperado aparece para un espesor de 15 milímetros de plomo. Más allá del máximo, la pendiente cae más de prisa de lo que exige la ley de absorción para los Rayos duros, lo cual hace sugerir a

Rossi que los chaparrones no son engendrados directamente por los Rayos cósmicos duros, sino por una radiación intermediaria, blanda, de mayor absorbibilidad que la dura. Recuérdese que los Rayos duros son absorbidos proporcionalmente con el Número atómico del absorbente, mientras que los blandos lo son según el cuadrado de esta magnitud. Tal "radiación productora de chaparrones" no es ionizante, estando integrada probablemente por fotones producidos en la interacción de los Rayos cósmicos duros con los átomos del bloque de plomo.

Más adelante se completará la teoría acerca del origen de los chaparrones cósmicos. (Capítulo XI.)

## VII

### EXPLORACIONES CÓSMICAS EN ALTURA Y EN PROFUNDIDAD

Los sondeos atmosféricos, iniciados por Göckel en 1909 y proseguidos por Hess en 1912 y por Kolhörster en 1913, quedaron interrumpidos durante la Primera Guerra mundial. En 1922 los físicos norteamericanos Millikan y Bowen reanudaron estas investigaciones, enviando por vez primera aparatos auto-registradores a la estratosfera, iniciándose con ello la época de las grandes exploraciones cósmicas en altura —exploraciones estratosféricas—, en cuya tarea colaboraron físicos tales como Millikan, Regener, Piccard, etc.

La primera exploración estratosférica fué realizada por Millikan y Bowen, utilizando un tren de dos globos-sonda llenos de hidrógeno y provistos de aparatos de medida (electroscopio, barómetro y termómetro). La experiencia duró tres horas, a una altura de 15.500 metros sobre el nivel del mar.

De éste y de otros sondeos estratosféricos, Millikan pudo inferir la existencia de una radiación hiperpenetrante que nace más allá de la atmósfera, de acuerdo con las conocidas previsiones de Hess. A esta radiación, Millikan la denominó Rayos cósmicos, en 1925, expresión aceptada universalmente.

Millikan ha sido, asimismo, el primero en medir el poder de penetración de los Rayos cósmicos, sumergiendo el electroscopio a distintas profundidades en algunos lagos de montaña norteamericanos, entre 1922 y 1927. La primera sumersión, realizada por Millikan y Cameron, tuvo

lugar en el *Muir Lake*, California, a una altura de 3.500 metros sobre el nivel del mar, habiéndose confirmado en ella la existencia de una radiación penetrante procedente exclusivamente de lo alto, con un poder de penetración veinte veces superior al de los rayos  $\gamma$  más energéticos.

Experiencias semejantes realizadas en otro lago de California, a la altura de 1.600 metros sobre el nivel del mar, demostraron que existe una correspondencia rigurosa entre las medidas de ambos lagos. A igualdad de profundidad, la intensidad de la radiación cósmica es la misma, siempre que se descuenta el espesor de dos metros de agua, equivalente a la capa de aire de 2.000 metros, diferencia de altura entre los niveles de ambos lagos (1).

Como conclusiones bien establecidas, logradas ya en 1932, como fruto de las exploraciones en altura y en profundidad con auxilio de los métodos clásicos de investigación, deben consignarse el origen ultra-atmosférico de los Rayos cósmicos, su poder de penetración y su independencia aparente de las influencias solares y estelares.

*Intensidad en función de la altura.*—Ha sido estudiada por numerosos investigadores, con el mayor refinamiento de la técnica actual y escalando las distintas alturas atmosféricas con distintos medios, tales como laboratorios de alta montaña, globos-sonda, aviones estratosféricos, cohetes alemanes V-2 auto-dirigidos y gobernados por radar, etcétera.

Como resultado de estas investigaciones sistemáticas ha sido establecida, con gran rigor y concordancia entre los distintos autores, la variación de la intensidad cósmica en función de la altura atmosférica. Las curvas obtenidas revisten gran importancia por la solidez de los datos experimentales, siendo de las mejor establecidas y definidas en el campo de la investigación cósmica.

A continuación se reproducen las curvas de Millikan para la intensidad de los Rayos cósmicos en función de la altura atmosférica. (Figura 9.)

La curva a) se ha obtenido a la latitud geomagnética  $\lambda = 3^\circ \text{ N.}$ , correspondiente a Madras, India. La curva b) se ha obtenido a  $45^\circ \text{ N.}$ ,

---

(1) El poder absorbente de la totalidad de la atmósfera para rayos de origen extra-terrestre equivale al de 10,33 metros de agua, valor de la presión atmosférica normal.

correspondiente a Oklahoma, América del Norte. Finalmente, la curva c) se ha obtenido a 58° N., correspondiente a Saskatoon, Canadá.

Dentro de un hábito completamente general y en magnífica correspondencia con la distribución de los Rayos cósmicos sobre la superficie

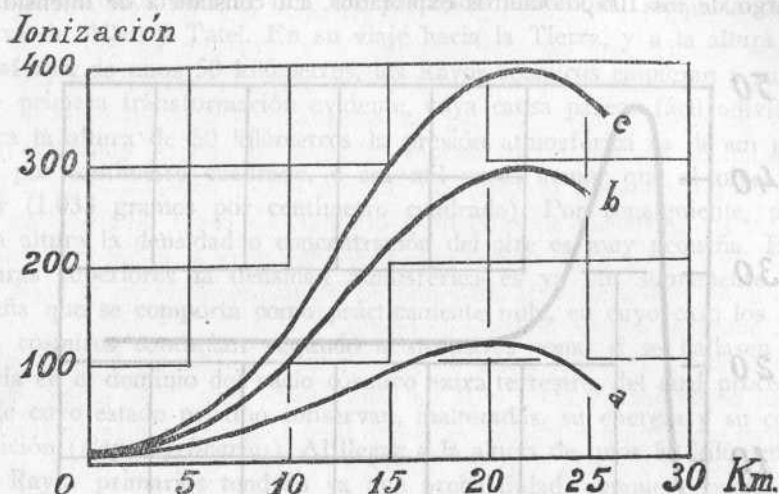


Fig. 9. Intensidad de los Rayos cósmicos en función de la altura atmosférica, según Millikan, Neher y Pickering, 1942. La altura se expresa en Km. por encima del nivel del mar. La intensidad se expresa por el número de iones por centímetro cúbico y por segundo.

terrestre, al nivel del mar, para una misma altura atmosférica, la intensidad crece siempre desde el ecuador magnético a los Polos.

Es muy significativo el hecho de que todas las curvas presentan un máximo bien acusado alrededor de los 20 kilómetros, cuya existencia se considera como el mejor soporte experimental en favor de una radiación cósmica secundaria que ya empieza a engendrarse en las regiones atmosféricas más altas.

Las recientes exploraciones de Allen y Tatel, realizadas en Norteamérica, hasta la altura de 161 kilómetros sobre el nivel del mar (1), gracias al cohete alemán V-2, gobernado por radar, con un sistema de

(1) *Phys. Rev.*, 73, 245 (1948).



propulsión, dirección y autorregistro, maravilloso prodigio de la técnica física actual, han permitido fijar el límite del descenso de la intensidad de la radiación cósmica en función de la altura creciente. En la curva adjunta se observa que dicha intensidad disminuye hasta la altura de unos 55 kilómetros, para permanecer luego rigurosamente constante a lo largo de los 106 kilómetros explorados. La constancia de intensidad

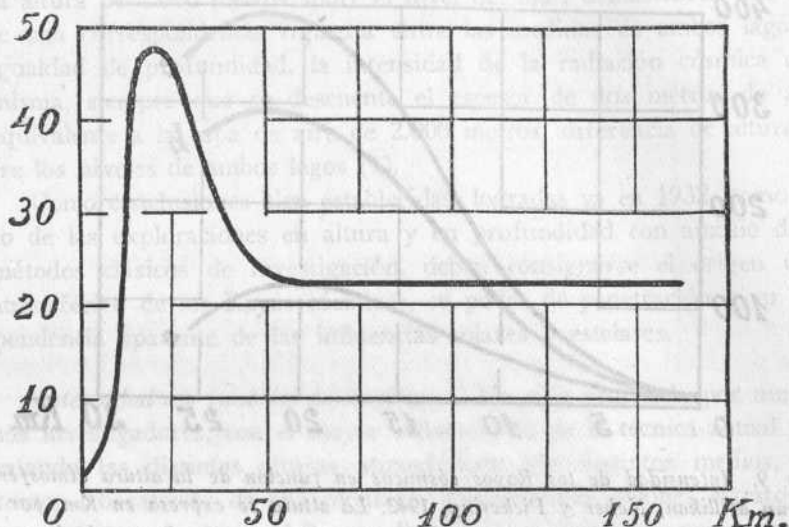


Fig. 10. Curva de Allen y Tatel, obtenida en 1948 sobre la variación de la intensidad de los Rayos cósmicos en función de la altura atmosférica hasta la altura de 161 kilómetros sobre el nivel del mar. Las experiencias se realizaron a la latitud geomagnética de 41° N. La intensidad se expresa por la frecuencia de los impulsos de un contador de Geiger.

en este campo de alturas viene expresada, gráficamente, con una perfección geométrica asombrosa. (Fig. 10.)

La curva de Allen y Tatel tiene una importancia extraordinaria. En primer lugar, por corresponder a la exploración estratosférica de mayor altura registrada hasta la fecha, con una diferencia abismal con respecto a todas las demás, pues según se observa ya en las curvas de la figura 9, las exploraciones estratosféricas anteriores no habían logrado rebasar la altura de 30 kilómetros sobre el nivel del mar, cifra más de



cinco veces inferior a la obtenida actualmente. Por otra parte, la nueva curva debe ser considerada como la prolongación más feliz de las partes altas de las curvas anteriores, zona cuya exploración experimental reviste gran interés teórico para dilucidar la conducta de los Rayos cósmicos primarios frente a la atmósfera.

Intentaremos ensayar una interpretación provisional simplista de la curva de Allen y Tatel. En su viaje hacia la Tierra, y a la altura atmosférica de unos 50 kilómetros, los Rayos cósmicos empiezan a sufrir una primera transformación evidente, cuya causa parece fácil adivinar. Para la altura de 50 kilómetros la presión atmosférica es de un gramo por centímetro cuadrado, o sea mil veces menor que al nivel del mar (1.033 gramos por centímetro cuadrado). Por consiguiente, para esta altura la densidad o concentración del aire es muy pequeña. Para alturas superiores la densidad atmosférica es ya tan sumamente pequeña que se comporta como prácticamente nula, en cuyo caso los Rayos cósmicos continúan viajando a su través como si se hallasen todavía en el dominio del vacío cósmico extra-terrestre, del cual proceden y de cuyo estado pristino conservan, inalteradas, su energía y su composición (*Rayos primarios*). Al llegar a la altura de unos 50 kilómetros, los Rayos primarios tendrán ya una probabilidad, aunque pequeña, de chocar con los átomos de nitrógeno y oxígeno atmosféricos, dando lugar a la génesis de un gran número de partículas procedentes de la colisión (*Rayos secundarios*). Aumentará, pues, la intensidad de la radiación cósmica con el crecimiento de la densidad atmosférica; pero este aumento no podrá ser ilimitado, por el hecho de que la propia atmósfera es absorbente, como es natural, de los Rayos cósmicos, y el grado de absorción crece también, lógicamente, con la densidad atmosférica. Este razonamiento, tan elemental como simplista, nos hace comprender la existencia del máximo, tan característico de las curvas en cuestión.

Sin embargo, y a pesar de la solidez experimental de tales curvas y de la universalidad de su hábito típico, no es posible la extracción físico-matemática de ninguna conclusión que pueda ilustrarnos acerca de la naturaleza de los Rayos cósmicos. Este interesante problema no se resuelve con sólo el análisis de tales curvas, exigiendo el concurso de otros antecedentes, entre los cuales debe figurar el conocimiento de la conducta parcial de los componentes de la radiación cósmica en función de la altura atmosférica.

Por el momento, contentémonos con ver en dichas curvas la manifestación más palpable de la existencia de Rayos secundarios engendrados por la violenta colisión de los Rayos primarios, de origen ultraterrestre, con los átomos de nitrógeno y oxígeno atmosféricos.

*Intensidad en función de la profundidad.*—En las experiencias ya citadas de Millikan, en Norteamérica, y de Regener, en Suiza, se ha estudiado el poder de penetración de los Rayos cósmicos a través del agua de algunos lagos. Corling ha encontrado Rayos cósmicos a una profundidad de 500 metros debajo del agua del mar. A unos 200 metros de profundidad, la radiación cósmica queda reducida a un 2 por 100 de su intensidad sobre el nivel del mar. La curva de absorción de Millikan y la de Regener son muy parecidas entre sí y con la de Rossi (fig. 4), obtenida en la absorción de los Rayos cósmicos, al nivel del mar, sobre un bloque filtrante de plomo.

De nuevo se pone, pues, de manifiesto la existencia bien definida de un componente blando y de un componente duro. Este último, dado su gran poder de penetración, es el que llega a las partes más profundas.

Además del efecto filtrante del agua del mar y de los lagos, se ha estudiado el poder de penetración de los Rayos cósmicos a través de toda clase de obstáculos materiales, en especial la corteza terrestre.

Entre las investigaciones a grandes profundidades, deben citarse las muy recientes de Barnóthy y M. Forró (1), realizadas en la mina de carbón de Dorog, cerca de Budapest, bajo una capa de tierra equivalente a 1.000 metros de agua. Análogamente, Miyazaki ha hecho experiencias en el interior del túnel de Shimizu, Japón, bajo una mole de espesor equivalente a 3.000 metros de agua (2).

Finalmente, Miesowicz, Jurkiewicz y Massalski (3) han realizado experiencias en la mina de sal de Cracow, Polonia, a una profundidad equivalente a 600 metros de agua.

En las tres investigaciones citadas se ha observado la presencia de productos de desintegración de los mesones cósmicos hiperpenetrantes, discrepando únicamente acerca de la supuesta naturaleza de dichos productos.

(1) *Phys. Rev.*, **74**, 1300 (1948).

(2) *Phys. Rev.*, **76**, 1733 (1949).

(3) *Phys. Rev.*, **77**, 380 (1950).

## VIII

### NATURALEZA DE LOS RAYOS CÓSMICOS. — TEORÍA DE BETHE Y HEITLER

Expuesta con detalle la distribución de los Rayos cósmicos a través del tiempo y del espacio, conviene ocuparnos ahora del estudio de su naturaleza, problema capital, de grandes dimensiones, no bien resuelto todavía.

La dispersión geomagnética natural de los Rayos cósmicos, así como la incurvación de las estelas de niebla de origen cósmico, ante las líneas de fuerza de un campo electromagnético intenso, nos ha revelado ya la presencia de iones negativos y positivos como componentes principales de dichos rayos. Pero queda por esclarecer su naturaleza, así como la de los rayos restantes, no iónicos.

Desde fecha remota el análisis espectral ha revelado que en las estrellas no existen elementos químicos distintos a los de la Tierra. Era, pues, de prever que los Rayos cósmicos, eco de sucesos atómicos estelares o interestelares acaecidos a una lejanísima distancia extra-terrestre, no contendrían nada nuevo, en cuanto a su composición, con respecto a las radiaciones terrestres, diferenciándose únicamente por su procedencia y por su energía, excepcionalmente elevada. Veremos que así es, en efecto, pues hasta la fecha todo componente cósmico es, a su vez, un componente terrestre, dándose únicamente la circunstancia de que, de modo análogo a como el helio se descubrió primero en el Sol, y luego en la Tierra, algunas partículas, los positrones y los mesones, se han descubierto antes en los Rayos cósmicos que en los núcleos atómicos terrestres.

Uno de los iones cuya existencia entre los Rayos cósmicos se supuso desde un principio, es el electrón. Para comprobar la existencia efectiva de Rayos cósmicos electrónicos ha tenido que darse un pequeño rodeo, consistente en someter los bien conocidos electrones terrestres a un tratamiento teórico, con auxilio de la Mecánica cuántica, para energías progresivamente crecientes, desde el nivel de las radiaciones naturales terrestres hasta el propio de las radiaciones cósmicas.

Con ello se crea, teóricamente, un Rayo cósmico electrónico artificial, de origen terrestre, cuya conducta específica se somete a un estudio ulterior. Si esta conducta resulta concordar con la de algún compo-

nente de los Rayos cósmicos naturales, habrá de inferirse que algunas radiaciones cósmicas están integradas por electrones.

Este camino arduo y espinoso, trazado en 1933 por Bethe, de Norteamérica, y por Heitler, de Irlanda, es el único viable que existe y se continúa siguiendo, en la actualidad, con buen resultado. Fué elaborado para electrones y fotones en una fecha en que ya se había descubierto el positrón, así como la materialización relativista del fotón, creando el par electrón-positrón y el aniquilamiento relativista de dicho par para engendrar un fotón. Todo ello de acuerdo con las hermosas predicciones teóricas de Dirac, aludidas reiteradamente.

El punto esencial a investigar es el comportamiento del electrón en su paso a través de la materia, para energías extraordinariamente elevadas. Los electrones son frenados por la materia que atraviesan, según dos procesos muy distintos: enfrenamiento por colisión y enfrenamiento por radiación. Vamos a considerar por separado ambos procesos.

#### *Pérdida de energía por colisión.*

El electrón pierde energía por colisión con los electrones planetarios de los átomos con que tropieza en su paso a través de la materia. Algunos electrones son expulsados, formándose, en consecuencia, iones primarios. Algunos átomos logran mantener incólume su integridad, pero sus electrones adquieren niveles altos de excitación que, cuando recuperan el estado primitivo, normal, devuelven el exceso de energía bajo forma de radiaciones cuánticas. Estas radiaciones y los electrones expulsados en el caso anterior pueden provocar, a su vez, excitaciones e ionizaciones secundarias.

Este proceso de colisiones electrónicas tiene lugar, de modo exclusivo, cuando la energía del electrón no pasa de 0,01 Mev.

Por otra parte, esta clase de fenómenos no deben sorprendernos demasiado, pues son una versión moderna de las clásicas experiencias de Frank y Hertz, 1912, acerca de los potenciales de resonancia y de ionización.

En general, la energía necesaria para formar un simple par de iones individuales es considerablemente mayor que el potencial de ionización. Dicha energía es, prácticamente, constante para todas las partículas ionizantes, a través de un medio dado. Para el aire, el valor más probable es de 32,2 electrón-voltios.

Con auxilio de la teoría cuántica, Bethe y Heitler han calculado la pérdida total de energía,  $-dE$ , correspondiente a un elemento de trayecto,  $dx$ , para un electrón ionizante, por colisión con los átomos que atraviesa:

$$-\frac{dE}{dx} = nZ\Phi \frac{1}{\beta^2} \left\{ \log \frac{E^2\beta^2(E-\mu)}{2\mu I^2 Z^2} + \frac{\mu^2}{E^2} \right\}.$$

siendo:

$n$  = número de átomos por c. c. ;  
 $Z$  = Número atómico;

$$\Phi = \frac{8\pi}{3} \frac{e^4}{m_0^2 c^4} = 6,57 \cdot 10^{-25} \text{ cm.}^2,$$

$\beta = \frac{v}{c}$ , siendo  $v$  = velocidad del electrón, y  $c$  = velocidad de la luz;

$\mu = m_0 c^2$ , siendo  $m_0$  = masa del electrón en reposo;

$I$  = valor promedio de la energía de ionización de un electrón en el átomo.

Se observa, en primer lugar, que dicha pérdida por colisión depende, fundamentalmente, de  $n$  y de  $Z$ , o sea del número de electrones por centímetro cúbico de material filtrante, puesto que  $I$  cambia muy poco de un elemento a otro. Considerando que, salvo pocas excepciones, el Número atómico y el peso atómico son magnitudes proporcionales, las pérdidas de energía dependen, en general y en primera aproximación, de la masa del absorbente.

En cuanto a la proporcionalidad con relación a  $Z$ , Número atómico, se observa una conducta rigurosamente paralela con la consignada para la ley de absorción de los Rayos cósmicos duros, hecho que no puede ser casual y sobre el cual volveremos a insistir cuando sea esgrimido más adelante a favor de la existencia del mesón.

La teoría enseña asimismo que una partícula pesada, con la carga unidad, pierde la misma energía que un electrón de la misma *velocidad*.

Sin embargo, pierde más energía que un electrón de la misma energía, pues en este caso la partícula pesada será más lenta que el electrón y, por tanto, más ionizante. En efecto, como es bien sabido, la intensidad de la ionización aumenta cuando disminuye la velocidad del agente ionizante hasta un máximo a partir del cual dicha intensidad cae



bruscamente. Esta conducta es tan universal y rigurosa que, según hemos visto ya en otro lugar, las partículas cósmicas ultra-veloces no son ionizantes y, en calidad de tales, son invisibles en la cámara de niebla.

Como ya hemos dicho y volveremos todavía a decir, para energías débiles del orden de 0,01 Mev, los electrones pierden energía exclusivamente por colisión. En cambio, para energías altas, superiores a 100 Mev, la energía se pierde exclusivamente por el efecto nuclear que se estudia a continuación.

#### *Pérdida de energía por enfrenamiento nuclear.*

Al lado de la pérdida de energía por colisión ionizante, los electrones son frenados por los núcleos atómicos, según un proceso radicalmente distinto, aunque tampoco nuevo del todo. Es bien sabido que el espectro de Rayos X consta de radiaciones características discontinuas y de radiaciones difusas continuas. Las primeras son debidas a variaciones cuánticas orbitales, bien definidas y específicas de cada átomo, provocadas por la actuación de los electrones catódicos en calidad de elementos de choque contra los electrones de los átomos anti-catódicos. En cambio, la radiación difusa es debida a un enfrenamiento de los electrones catódicos por los núcleos de los átomos anti-catódicos, por cuya virtud la energía cinética del electrón catódico es convertida en energía radiante (Rayos X difusos o de enfrenamiento). La continuidad de esta radiación debe interpretarse como la resultante de un efecto de enfrenamiento a expensas del cual los electrones catódicos pierden bruscamente parte de su energía según una ley de probabilidad que permite todos los valores posibles para dicha pérdida, dentro de un cierto campo de acción. En términos más elegantes y modernos, pudiera decirse que tales pérdidas ofrecen todos los valores posibles, dentro de ciertos límites, por la sencilla razón de no estar sujetas a ninguna restricción cuántica. Es un caso análogo al del espectro continuo producido por un electrón óptico, libre, recién escapado de un átomo determinado: en estas condiciones, el electrón cambia también su energía cinética en energía radiante, según un espectro de rayas continuas, dentro de un cierto campo de valores. Podrían citarse otros ejemplos parecidos.

De modo completamente general, se emiten radiaciones cuánticas cuando un electrón sufre un enfrenamiento a través del campo electromagnético existente alrededor de todo núcleo atómico. Aun cuando el



mecanismo profundo de este enfrenamiento nuclear se nos escapa por ahora, puede decirse, sin embargo, que en el intenso campo electromagnético, en torno del núcleo, se ejercen aceleraciones violentas sobre los electrones que lo atraviesan, como consecuencia de la modificación del campo nuclear debida al efecto de "pantalla" de los electrones planetarios (*screening effect*, expresión universal que no suele traducirse). Este screening es mayor cuando el electrón-proyectil es muy rápido, pues en estas condiciones se producen efectos sensibles a gran distancia del núcleo.

Ya en el epígrafe anterior se habló de la influencia de la energía del electrón en el sentido de ser esta energía la que gradúa la intensidad del efecto de colisión. El efecto de radiación es impuesto también por la propia energía del electrón, por lo que será conveniente deslindar los respectivos campos de acción de ambos efectos.

Para la energía individual de 1 Mev, ambos efectos se reparten por igual, o sea, de la pérdida total de energía del electrón a lo largo de su recorrido a través de la materia, el 50 por 100 se ha perdido por efecto de colisión y el 50 por 100 restante se ha perdido por efecto de radiación.

Para la energía de 0,1 Mev, cerca de un 5 por 100 de la pérdida total de energía es debida al efecto de radiación, y el 95 por 100 restante, al efecto de colisión.

Para la energía de 0,01 Mev no hay, prácticamente, ningún efecto de radiación y la pérdida de energía es debida exclusivamente al efecto de colisión.

Para 100 Mev la pérdida de energía por radiación es 100 veces superior a la pérdida de energía por colisión (1).

En números redondos puede decirse, por consiguiente, que por debajo de 0,1 Mev predomina el efecto de colisión, y que por encima de 10 Mev predomina el efecto de radiación. La energía de 10 Mev es la que poseen precisamente algunas partículas  $\beta^-$  naturales que, por lo mismo, se han prestado para la comprobación experimental de las ideas de Bethe y Heitler.

La pérdida de energía por radiación, por centímetro de recorrido, y

---

(1) Estas cifras se refieren al plomo como absorbente. Para absorbentes ligeros, el efecto de radiación, en calidad de predominante, exige energías sistemáticamente más altas.

para electrones muy energéticos—de screening completo—, viene dada por:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{nZ^2}{137} \cdot \frac{e^4}{m_0^2 c^4} \cdot E \left( 4 \log 183 Z + \frac{2}{9} \right).$$

Esta ecuación nos indica que, para grandes energías, el electrón pierde una fracción constante de su energía, por efecto de radiación, por cada centímetro de recorrido a través del material filtrante.

Puede observarse asimismo que la pérdida de energía, por efecto de radiación, es proporcional al cuadrado del Número atómico,  $Z$ , en paralelismo exacto con la ley de absorción de los Rayos cósmicos blandos, según se ha consignado ya oportunamente.

Finalmente, la pérdida de energía por efecto de radiación, calculada por la fórmula de Bethe y Heitler, está caracterizada por la gran probabilidad de que un electrón pierda la casi totalidad de su energía en un solo proceso. En cuyo caso la radiación cuántica correspondiente, por su elevado contenido en energía, tiene asimismo una gran probabilidad de sufrir un primer proceso de materialización relativista, engendrándose el primer par, electrón-positrón. El enfrenamiento nuclear de estos dos electrones puede provocar la emisión de sendas radiaciones cuánticas secundarias, susceptibles de ulterior materialización relativista, engendrando la segunda generación de pares electrónicos, en número de dos, con un total de dos electrones y dos positrones. Siguiendo este camino, la teoría prevé una multiplicación electrónica en forma de secundarios y de chaparrones, según el esquema en cascada de la figura adjunta, número 11.

La teoría inicial de Bethe y de Heitler, retocada y completada más tarde por los propios autores y por el físico indio Bhabha y los americanos Carlson y Oppenheimer, proporciona una explicación simple y satisfactoria del espléndido espectáculo de los chaparrones cósmicos, descubiertos en 1933 por Blackett y Occhialini en el Cavendish Laboratory de la Universidad de Cambridge, Inglaterra.

El gran mérito de la teoría de Bethe y Heitler consiste en que previó precisamente la existencia de tales fenómenos con el cálculo de la frecuencia estadística de su aparición. Por eso la teoría de Bethe y Heitler se mira con cierta admiración, presidiendo, de hecho, el desarrollo del pensamiento científico dedicado al cultivo de la Física cósmica teórica.

### Comprobación experimental de la teoría de Bethe y Heitler.

Con el fin de comprobar la teoría de Bethe y Heitler se han hecho experiencias de filtración de electrones a través de láminas de plomo, usando electrones bajo forma de partículas  $\beta^-$  naturales con una energía

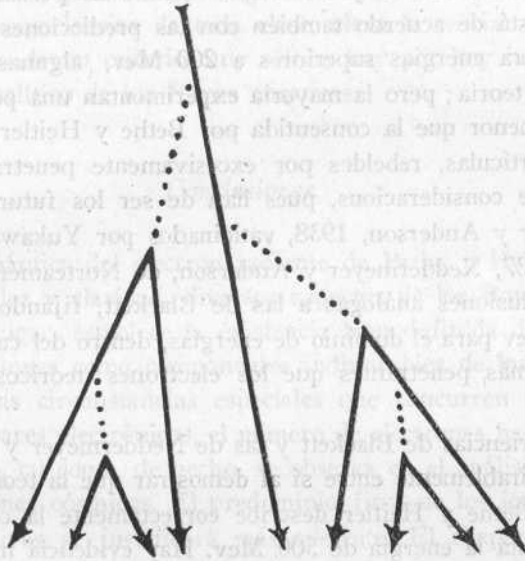


Fig. 11. Producción de una cascada de chaparrones, según la teoría de las cascadas, de Bhabha y Heitler y de Carlson y Oppenheimer. Las líneas de puntos representan las trayectorias de los fotones.

individual de 11 Mev, para cuyo dominio debe esperarse un predominio del efecto radiante sobre el efecto de colisión.

Para este valor de la energía y según experiencias realizadas en 1937 por Turin y Crane y por Laslett y Hurst, el valor promedio de la pérdida experimental de energía es sistemáticamente superior a la pérdida teórica, con una discordancia pequeña, aunque manifiesta. La teoría logra triunfar de la prueba, aunque con un triunfo raquítico, estrictamente decoroso, nada brillante.

En cambio, en las regiones de las energías cósmicas, las medidas sobre las estelas de niebla han mostrado la existencia de partículas cuya pérdida de energía concuerda magníficamente con la teoría de Bethe y Heitler.

Según Blackett, Londres, 1938, todas las partículas clasificables en grupos energéticos hasta 200 Mev, experimentan una pérdida colectiva de energía, por cada grupo en bloque, que concuerda satisfactoriamente con la pérdida teórica, y la distribución de las pérdidas individuales de energía está de acuerdo también con las predicciones estadísticas de la teoría. Para energías superiores a 200 Mev, algunas partículas se adaptan a la teoría; pero la mayoría experimentan una pérdida de energía mucho menor que la consentida por Bethe y Heitler.

Estas partículas, rebeldes por excesivamente penetrantes, merecen toda clase de consideraciones, pues han de ser los futuros mesones de Neddermeyer y Anderson, 1938, vaticinados por Yukawa en 1935.

Ya en 1937, Neddermeyer y Anderson, de Norteamérica, habían llegado a conclusiones análogas a las de Blackett, fijando los límites de 120 y 500 Mev para el dominio de energías, dentro del cual muchas partículas son más penetrantes que los electrones teóricos de Bethe y Heitler.

Las experiencias de Blackett y las de Neddermeyer y Anderson concuerdan admirablemente entre sí al demostrar que la teoría del electrón radiante de Bethe y Heitler describe correctamente la conducta de los electrones hasta la energía de 500 Mev. Hay evidencia indirecta de que es válida también para energías mucho más altas, para cuyo dominio el estudio teórico, delicado y sutil, se ha hecho por extrapolación de la teoría de las cascadas de chaparrones cósmicos.

Se ha comprobado asimismo la teoría de Bethe y Heitler en lo que se refiere al origen de los chaparrones cósmicos, haciendo experiencias en la cámara de niebla sobre Rayos cósmicos a través de láminas de plomo de espesor variable hasta 1,6 centímetros. Se ha observado la producción efectiva de rayos secundarios, así como su ley de multiplicación, según un proceso en cascada en concordancia maravillosa con las predicciones teóricas.

Con el mismo fin, Montgomery y Montgomery, 1938, han realizado experiencias sobre chaparrones explosivos mayúsculos—de unos 100 rayos—, a través de láminas de plomo. El agente provocador es un

electrón cósmico cuya energía se extiende desde 1.000 Mev hasta el valor fantástico de 1.000.000 Mev.

Experiencias recientes han demostrado que algunos electrones cósmicos estratosféricos con la energía, fabulosamente descomunal, de 10.000 millones de Mev, son los que producen los chaparrones atmosféricos gigantes de Auger, capaces de ser detectados por dos contadores en coincidencia a la distancia horizontal de 300 metros.

En resumen: la crítica más exigente, realizada sobre un conjunto sistemático de experiencias de toda clase, eleva la teoría de Bethe y Heitler al rango de un criterio muy sólido, hoy por hoy imprescindible en el estudio analítico de los Rayos cósmicos.

### *Conclusiones.*

La teoría cuántica del electrón radiante de Bethe y Heitler explica, con gran sencillez y claridad, diversos aspectos de los Rayos cósmicos.

En primer lugar, establece la existencia bien definida de electrones, positrones y fotones como componentes indiscutibles de los Rayos cósmicos. Dadas las circunstancias especiales que concurren en su nacimiento, según pares electrónicos, el número de electrones ha de ser igual al de positrones, tal como, de hecho, se observa en el análisis estadístico de los chaparrones cósmicos. El predominio final de los iones positivos sobre los negativos se justificará más adelante. El chaparrón cósmico puede ser iniciado indistintamente por un fotón, por un electrón o por un positrón.

En segundo lugar, la curva de la variación de la intensidad de los Rayos cósmicos en función de la altura atmosférica, figura 10, queda ahora plenamente justificada. Siguiendo el curso natural de los Rayos cósmicos primarios en su viaje hacia la Tierra, el arranque del ascenso de la curva significa la formación de los primeros chaparrones estratosféricos. El crecimiento de la intensidad con la disminución de la altura es lo que corresponde a un chaparrón en desarrollo vertical, de arriba hacia abajo, que crece según un cono cuya punta inicial, que contuvo el germen provocador del chaparrón, está en las alturas, y cuya base se extiende hacia la Tierra. La inflexión de la curva, después del máximo consiguiente, significa la coexistencia simultánea de dos procesos antagónicos: la formación de chaparrones cósmicos y la absorción at-



mosférica, progresivamente predominante, de los rayos secundarios, cada vez más débiles.

Finalmente, las predicciones de la teoría de Bethe y Heitler están de acuerdo excelente con las propiedades del componente blando de los Rayos cósmicos: en cuanto a su poder de penetración; a su ley de absorción, también proporcional a  $Z^2$ , según se ha hecho constar reiteradamente; a su ley de variación con la altura, de acuerdo magnífico con la distribución atmosférica de los chaparrones cósmicos, etc., etc.

Con ello se llega a la conclusión de que los Rayos cósmicos blandos son de indiscutible naturaleza electrónica y fotónica, cuyos componentes, los electrones y los fotones, de gran energía, se desarrollan y transforman recíprocamente según la hermosa y fecunda teoría de las cascadas.

\* \* \*

Del incumplimiento de la teoría de Bethe y Heitler por parte de los Rayos cósmicos duros, queda por extraer el hecho trascendente de la existencia del mesón. Según hemos visto ya en el capítulo IV, el mesón es en la actualidad el primer protagonista de la Física cósmica y de la Física nuclear. Bien merece, pues, el honor de un capítulo especial.

## IX

### MESONES CÓSMICOS

La existencia de partículas cósmicas hiperpenetrantes—Rayos duros—, de propiedades tan distintas a los Rayos blandos en lo que se refiere a su poder de penetración, ley de absorción (1), distribución en

---

(1) Recordemos una vez más que, salvo el caso poco frecuente de las reacciones nucleares inducidas por mesones, los Rayos duros pierden su energía principalmente por colisión ordinaria, engendrando iones. El enfrenamiento nuclear con emisión de radiaciones cuánticas, tan característico de los electrones, no desempeña aquí ningún papel, salvo, acaso, para el caso de energías excepcionalmente elevadas. Como consecuencia de ello, y gracias singularmente a las memorables experiencias de Ehrenfest (2), se ha confirmado siempre el hecho de

---

(2) Malogrado joven, héroe de la Física cósmica, víctima de un accidente de montaña.



altura atmosférica, aptitud para engendar chaparrones, etc., tenía verdaderamente perplejos a los físicos. Si los Rayos blandos, por su exacta obediencia a la teoría de Bethe y Heitler, se dejan identificar con los electrones, es evidente que los Rayos duros, rebeldes a tal teoría, no pueden ser electrones. La presencia de los dos signos eléctricos, en número casi igual para los Rayos duros, impide su identificación con una radiación de protones, de la cual discrepan, además, por su poder de penetración y otras características.

¿Qué son, pues, los Rayos duros, esos rayos rebeldes y enigmáticos, de energías fantásticas, que emprenden tan largos viajes llenos de soledad y de monotonía, refractarios a la formación de secundarios y a la pérdida de energía a través de los obstáculos interpuestos a su paso?

A pesar de algunos ensayos provisionales a base de electrones con una conducta radicalmente distinta, según su contenido en energía (imagen del paracaídas de Blackett: *cerrado*, sin resistencia atmosférica para grandes energías—electrones duros—, y *abierto*, con gran resistencia atmosférica, para energías inferiores—electrones blandos—), la situación embarazosa de los físicos no se despejó hasta que Anderson y Neddermeyer, en 1938, lograron la primera prueba experimental convincente en favor de la existencia efectiva del mesón, previsto por Yukawa en 1935, según hemos hecho constar con reiterada insistencia y complacencia. Se trata de una fotografía del final del recorrido de un mesón, en cuyo caso las pérdidas de energía son ya mucho más considerables, permitiendo, en consecuencia, el estudio analítico de la partícula incógnita por el cambio brusco del radio de curvatura de su trayectoria, en la cámara de niebla, al atravesar una lámina de plomo.

Gracias a esta feliz circunstancia dichos físicos pudieron evaluar, por dos procedimientos, la masa del ion hiperpenetrante, la cual ha resultado ser 200 veces superior a la del electrón. Con ello adquiría existencia real cósmica el mesón teórico de Yukawa, cuya confirmación definitiva tuvo lugar poco después gracias a las afortunadas fotografías

---

que las absorciones son sistemáticamente proporcionales al Número atómico  $Z$ , de la lámina interpuesta, o sea al número de electrones atómicos expulsados por el rayo ionizante, en concordancia excelente con el mecanismo de la pérdida de energía por colisión ionizante, consignado oportunamente.

Otra consecuencia de esta conducta es el carácter eternamente solitario de los Rayos duros, sin formación de secundarios o chaparrones.

de los expertos investigadores Leprince-Ringuet, 1940, 1943, y Williams y Roberts, 1940.

El método de las emulsiones fotográficas espesas ha permitido obtener un número muy considerable de pruebas en favor de la existencia, ya indiscutible, del mesón cósmico.

### *Propiedades del mesón cósmico.*

*Masa.*—El valor más probable, fruto de investigaciones sistemáticas de distintos físicos, es de 200 veces la masa del electrón, de acuerdo excelente con los cálculos apriorísticos de Yukawa.

*Carga eléctrica.*—Hay mesones negativos y mesones positivos. Desde hace unos pocos meses se posee ya una cierta evidencia experimental en favor del mesón neutro—neutroto—, cuya existencia es teóricamente necesaria.

Los mesones iónicos son monovalentes. Así se infiere del hecho que todas las partículas cósmicas rápidas ofrecen la misma ionización específica, siendo ésta proporcional al cuadrado de la carga eléctrica de la partícula ionizante, según es bien sabido. Los mesones acarrean, pues, la carga elemental de un átomo de electricidad positiva o negativa.

*Espectro de energías.*—Dentro de la zona observable, la energía de los mesones se extiende desde 500 Mev hasta 10.000 Mev. Por encima de esta cifra las medidas son imprecisas, existiendo, por tanto, una proporción considerable de mesones, de energía excepcionalmente elevada, que escapan a la observación cuantitativa actual.

La curva que relaciona la proporción de los mesones con su energía presenta un máximo muy acusado correspondiente a una energía media de 2.000 Mev. Predominan, pues, los mesones de este nivel de energía. La curva es rápidamente decreciente a partir del máximo, habiendo una proporción muy escasa de mesones para el límite superior del espectro.

*Desintegración del mesón. Su vida media.*—Según las especulaciones teóricas de Yukawa, en parte expuestas oportunamente, el mesón tiene una cierta probabilidad para desintegrarse espontáneamente creando el par electrón-neutrino. Este proceso seguiría la conocida ley exponencial, estadística, de la desintegración radiactiva:

$$n = n_0 e^{-\lambda t} ;$$

siendo  $n$  el número de átomos radiactivos existentes en el tiempo  $t$ , y  $\lambda$  la velocidad específica de desintegración. Como es bien sabido, se llama *vida media*,  $\tau_0 = 1 : \lambda$ , con lo que la ecuación anterior toma la forma:

$$\frac{n}{n_0} = e^{-\frac{t}{\tau_0}}$$

Haciendo,  $\frac{n}{n_0} = \frac{1}{e}$ , resulta:  $\frac{1}{e} = e^{-1} = e^{-\frac{t'}{\tau_0}}$  de donde,  $t' = \tau_0$ .

Queda así definida la vida media como el lapso de tiempo para el cual un átomo radiactivo tiene para su supervivencia la probabilidad aproximada de un tercio ( $e = 2,72$ ).

Como los mesones rápidos están animados de velocidades cercanas a las de la luz, el cálculo de la vida media debe someterse a la corrección relativista consiguiente. En términos relativistas, el mesón es un *reloj*, y su vida media, medida por un observador terrestre, se alarga cuando su velocidad se acerca a la de la luz, de acuerdo con la conocida expresión relativista, relación de retrasos de los relojes:

$$\frac{\tau}{\tau_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}};$$

siendo  $\tau_0$  la vida media en reposo;  $\tau$ , la vida media a la velocidad  $v$ ;  $\beta = \frac{v}{c}$  y  $c$ , la velocidad de la luz.

A base de estas consideraciones y operando con una masa teórica, 200 veces la del electrón, Yukawa, en 1935, pudo evaluar la vida media del mesón, en reposo, en dos millonésimas de segundo (dos microsegundos).

En 1940, Williams y Roberts, en una feliz fotografía ya mencionada, obtenida en la cámara de niebla, fueron los primeros en confirmar la desintegración  $-\beta$  de los mesones y en medir su vida media, de acuerdo con los cálculos de Yukawa.

En esta interesantísima fotografía se asiste al final de la vida de un mesón en el momento crítico de su transformación en el par electrón-neutrino. Al final de una trayectoria densa, de indiscutible naturaleza

mesónica, nace bruscamente, con un radio de curvatura muy distinto, una trayectoria corta y finísima, de indiscutible naturaleza electrónica. El carácter mesónico y electrónico de las trayectorias respectivas queda asegurado por las medidas de la ionización y de los radios de curvatura.

Las experiencias de Williams y Roberts establecen, pues, de modo concluyente, la desintegración radiactiva del mesón con emisión de un electrón rápido. En cuanto al neutrino, aunque invisible, hay datos indirectos en favor de su génesis simultánea con la del electrón. Por otra parte, el neutrino, la partícula hipotética, ya citada, de Pauli y de Fermi, portadora del complemento de energía necesaria para salvar el Primer principio de la Termodinámica en los procesos de desintegración de los elementos  $\beta$ -radiantes, tiene ya una gran probabilidad de existencia real, extraída de una serie de experiencias de otra índole.

En términos relativistas, la masa del mesón en reposo equivale a la energía de 120 Mev. El aniquilamiento relativista del mesón en el acto de su desintegración radiactiva, supone, pues, la liberación de 120 Mev. La creación relativista del electrón absorbe únicamente unos 0,5 Mev. La creación relativista del neutrino, por tratarse de una masa despreciable, absorbe una energía muchísimo menor. Considerando que la energía se reparte aproximadamente por igual, resulta que, en números redondos, el electrón y el neutrino deben poseer ambos unos 60 Mev, bajo forma de energía cinética.

Teniendo en cuenta, por otra parte, que el impulso del mesón, al final de su carrera, es nulo, se infiere que el electrón y el neutrino deben ser emitidos en direcciones opuestas.

En la fotografía de Williams y Roberts se confirman todas estas previsiones. De un lado, la energía medida para el electrón concuerda con la calculada. De otro, aun dada la invisibilidad del neutrino, se observa que la dirección del electrón es muy distinta de la del mesón, tal como exige la teoría.

Se dispone actualmente de un gran número de fotografías de desintegración del mesón, entre las cuales cabe citar la obtenida por Anderson en 1947, viajando en avión a la altura de 9.200 metros sobre el nivel del mar. En este caso el electrón emitido posee únicamente la energía de 24 Mev. Este defecto tan excesivo de energía se interpreta admitiendo la génesis relativista de un mesón neutro como nuevo producto de desintegración del mesón primario.

Según experiencias extraordinariamente delicadas de los físicos ita-

lianos Rossi, Bernardini y Conversi, la mitad aproximada de los mesones cósmicos, probablemente los positivos, sufren la desintegración  $-\beta$ .

El análisis de las fotografías de desintegración del mesón, a base de los datos experimentales consiguientes, permite la medida de la vida media del mesón, llevada a cabo, por vez primera, por Williams y Roberts (1940).

Como resultado de numerosas medidas de diversos investigadores, el valor actual más probable para la vida media del mesón en reposo es de  $2,2 \pm 0,3$  microsegundos, cifra oficial presentada por Bernardini al Congreso de Cracovia, 1947.

*Explosiones nucleares inducidas por mesones.*—Los mesones positivos sufren siempre la desintegración  $-\beta$ . Los mesones negativos, cuando viajan a través de obstáculos con núcleos atómicos ligeros, acostumbran experimentar el mismo proceso.

Sin embargo, y según Rasetti, 1946, los mesones negativos, especialmente los lentos, suelen morir de modo muy diferente cuando se enfrentan con los núcleos atómicos pesados. El núcleo pesado atrae electrostáticamente al mesón negativo (hacia el final de su recorrido, cuando su energía cinética es muy pequeña) y acaba por englobarlo en su seno—proceso de captura—. En fecha más reciente, esta modalidad ha sido calculada teóricamente por los físicos japoneses Tomolagua y Araki. El mesón capturado sucumbe por aniquilamiento relativista, sin creación de nuevas partículas. La integridad de la energía liberada es almacenada por el núcleo absorbente, el cual adquiere, en consecuencia, un elevadísimo grado de excitación (un sobrenivel de 120 Mev), capaz de provocar una subsiguiente explosión nuclear fulminante, generalmente bajo forma de estrella.

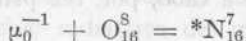
El espectáculo maravilloso de estas evaporaciones explosivas y radiantes del núcleo, se observa singularmente con el empleo del moderno método de las emulsiones fotográficas, siendo muy notables en este sentido, y entre otras, las experiencias de Perkins y las de Powell y Occhialini, de la Escuela Cósmica de Bristol.

Perkins obtuvo, en 1947, la primera fotografía, reproducida en la figura número 12, de una explosión nuclear inducida por un mesón en reposo.

Al final de su recorrido, un mesón lento, negativo, es capturado por un núcleo de oxígeno de la emulsión fotográfica, neutralizándose la car-



ga de un protón y formándose, en consecuencia, un núcleo de nitrógeno. El aniquilamiento relativista del mesón en reposo libera 120 Mev, almacenados íntegramente por el núcleo de nitrógeno, que, por lo mismo, queda altamente excitado:



La explosión subsiguiente del núcleo de nitrógeno se manifiesta en la fotografía por las huellas de los fragmentos nucleares que se ale-

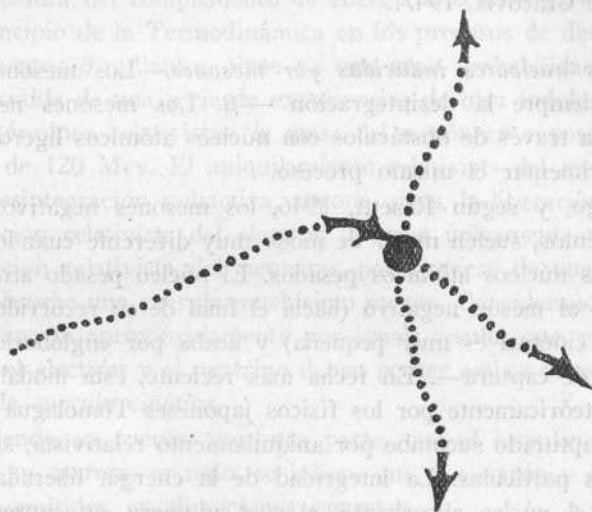
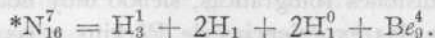


Fig. 12. Reproducción esquemática de la "estrella" de Perkins.

jan radialmente de su punto de origen. El análisis de las huellas y el balance energético del proceso están de acuerdo con la siguiente reacción nuclear, de abigarrada policromía:



El núcleo de nitrógeno ha sido materialmente pulverizado. La acción disgregante del mesón reviste importancia actual para los sondeos nucleares, siendo de esperar una pronta exploración sistemática de los diferentes núcleos atómicos por este nuevo procedimiento de análisis. El inconveniente que para ello supone la llegada eventual de mesones cósmicos, tiene que desaparecer ante la producción a voluntad de me-



sones terrestres, logrados artificialmente por Gardner y Lattes, de Berkeley, California, 1948.

Dentro de las explosiones nucleares con intervención de mesones, merecen destacarse algunas estrellas recientes de la Escuela Cósmica de Bristol, en las que se observa la presencia de mesones como fragmentos procedentes de una desintegración nuclear. Estas estrellas revisten gran importancia, por cuanto aportan la primera prueba experimental en favor del mesón, en su calidad de constituyente nuclear, tal como supuso Yukawa en 1935. En todo caso las experiencias de Bristol deben considerarse como antesala de la extracción artificial de mesones de los núcleos atómicos terrestres, realizada por Gardner y Lattes, de Berkeley, California, 1948, y en la que se confirma la existencia efectiva del campo mesónico nuclear de Yukawa, 1935.

#### *Mesones cósmicos $\pi$ .*

La Escuela Cósmica de Bristol, con Occhialini y Powell a la cabeza, ha descubierto, en 1947, un fenómeno nuevo, aunque previsto por los teóricos, que señala el primer grado de complejidad de la radiación mesónica natural. Al final del recorrido de un mesón lento nace, casi en ángulo recto, la trayectoria de una partícula que resulta ser otro mesón. La identificación de ambos mesones descansa sobre las mejores garantías experimentales.

El fenómeno en cuestión va siempre acompañado de dos rasgos característicos: de un lado, su sencillez extraordinaria, exteriorizada por la nitidez impecable de las dos trayectorias únicas, y de otro, la constancia de caracteres del mesón secundario, con un recorrido único de unos 0,61 milímetros, valor promedio extraído del análisis de quince fotografías, con una diferencia del 3 por 100 impuesta por el régimen fluctuante del medio ambiente.

A este recorrido universal corresponde la energía de 3,8 Mev. Por otra parte, la identidad de recorrido y de energía exige, para el mesón secundario, una masa única y distinta de la del mesón primario. Como la masa interviene decisivamente en la definición de las partículas, se llega a la interesante conclusión de que se trata de un proceso fundamental, de nuevo estilo, por el cual un mesón primario engendra, espontáneamente y de modo directo, un mesón secundario de distinta na-

turalidad. Dicho en otros términos: el mesón secundario no es hijo de la interacción del mesón primario con un núcleo atómico, como de hecho ocurre algunas veces; pues, de ser así, ambos mesones podrían ser de la misma clase. El fenómeno en cuestión es muy otro, y de su análisis se infiere la existencia bien definida de dos clases de mesones con un nexo genético directo.

La Escuela Cósmica de Bristol, con su proverbial elegancia de procedimientos (recuérdese que Occhialini ha sido discípulo y colaborador de Blackett), ha logrado el esclarecimiento del fenómeno midiendo la relación de masas entre ambos mesones, hallando el valor  $1,8 \pm 0,3$ . Se descubre así un nuevo mesón, el mesón de Bristol, denominado mesón  $\pi$ , con una masa cerca de 400 veces la del electrón, doble, por tanto, de la del mesón antiguo. La vida media del nuevo mesón es muy pequeña, del orden de  $10^{-8}$  segundos. De los dos mesones, el primario es, evidentemente, el mesón  $\pi$ , y el secundario, el clásico mesón teórico,  $\mu$ , de Yukawa, 1935, descubierto en 1938 por Anderson y Neddermeyer en los Rayos cósmicos (1).

El cumplimiento de las leyes sobre la conservación de la energía y la cantidad de movimiento, exige que la creación del mesón  $\mu$  vaya acompañada de la creación simultánea de una partícula neutra, invisible, emitida en dirección opuesta, de modo análogo al neutrino que acompaña al electrón procedente de la desintegración  $-\beta$  del mesón ordinario. En efecto: la creación exclusiva del mesón ligero  $\mu$ , con sólo la energía de 3,8 Mev y con la mitad de la masa del mesón primario  $\pi$ , significaría la pérdida del 50 por 100 de la energía relativista inicial (2).

Se demuestra que la probabilidad de que la supuesta partícula neutra sea un fotón es extraordinariamente pequeña cuando la relación de masas  $\pi : \mu$  se acerca a 2, caso actual. Excluido, pues, el fotón, queda como recurso admisible el mesón neutro, tantas veces invocado por los teóricos, en cuyo caso la reacción de desintegración espontánea del

---

(1) La Escuela de Bristol designa como mesones  $\rho$  los que mueren sin producir en apariencia ningún secundario; mesones  $\sigma$ , los que producen explosiones nucleares, y mesones  $\pi$ , los que, por desintegración espontánea, producen mesones más ligeros.

(2) Según medidas más precisas y recientes, 1948, de Brown y Fowler, sobre mesones cósmicos, y de Serber sobre mesones de origen terrestre, las masas de los mesones  $\pi$  y  $\mu$  son 280 y 210  $m_e$ , respectivamente. Con estos nuevos datos, la masa de la partícula neutra, complementaria del mesón  $\mu$ , es mucho menor,

mesón  $\pi$  podría consistir en la simple equipartición del mesón primario según dos mesones ligeros  $\mu$ , de igual masa, uno cargado y el otro neutro:

$$\pi = \mu + \mu^0 \text{ (neutro).}$$

Se tiene con ello un nuevo argumento teórico en favor de la existencia del mesón neutro o neutreto.

Del hecho que algunos mesones pesados mueren siempre por desintegración espontánea y nunca como consecuencia de un choque con un núcleo atómico, se infiere que se trata de partículas electropositivas,  $\pi^+$ .

En algunas explosiones nucleares inducidas por mesones negativos se ha observado un sobrenivel de 200 Mev para la energía de excitación del núcleo absorbente, cifra doble de la correspondiente al aniquilamiento relativista del mesón ligero  $\mu$ . Ello obliga a pensar en la existencia del mesón pesado negativo, del tipo del mesón  $\sigma$ , simétrico del mesón pesado positivo  $\pi^+$ . Como se trata de dos variedades eléctricas de un mismo mesón, es más cómodo y simplista el empleo de un solo símbolo, con la notación de la carga correspondiente:  $\pi^+$  y  $\pi^-$ .

Los mesones pesados  $\pi$  se originan en las grandes alturas atmosféricas. Este hecho, unido a su vida brevísima, explica su total ausencia al nivel del mar.

Sin ánimo de restar ningún mérito a la Escuela experimental de Bristol, es de justicia consignar el hecho de que el mesón  $\pi$  fué previsto matemáticamente por Möller y Rosenfel, y físicamente por Heitler, Hamilton y Peng, en 1943. Estos autores supieron precisar las circunstancias que concurren en el nacimiento del nuevo mesón, con todos sus atributos específicos. Dicho mesón, como se indica ya en el capítulo IV, fué descrito, en efecto, como perteneciente a la variedad vectorial  $\pi$ , en oposición a la variedad pseudo-escalar  $\mu$ , con el spin 1 y la vida media de  $10^{-8}$  segundos, desintegrable espontáneamente según los procesos:

- a)  $\pi^+ = \mu^+ + h\nu$  (fotón).
- b)  $\pi^+ = \mu^+ + \mu^0$  (neutreto).

Este último proceso es el encontrado más tarde por la Escuela Cósmica de Bristol.

Pertencen a la variedad vectorial  $\pi$  parte de los mesones extraídos

artificialmente de los núcleos atómicos terrestres por Gardner y Lattes, de la Universidad de Berkeley, California, 1948.

*Mesón hiper-pesado.*—En el capítulo IV se ha hecho ya mención del novísimo mesón *hiper-pesado*  $\tau$ , de masa 725, casi doble del mesón  $\pi$ , originado en las más altas regiones estratosféricas y con una vida fugacísima que impide su llegada al nivel del mar. Descubiertos por Leprince-Ringuet en 1949, y confirmados luego por distintos investigadores, se han expuesto algunas dudas acerca de su existencia, las cuales acaban de ser disipadas por el propio descubridor. Es prematuro especular sobre la importancia y significado de su existencia.

*Mesón neutro.*—Como se indica ya en el Capítulo IV, la existencia del mesón neutro ha sido impuesta teóricamente por las interacciones, protón-protón y neutrón-neutrón, que realmente tienen lugar en el seno de los núcleos atómicos, y las cuales son inconcebibles sin un intercambio incesante de mesones neutros. Por otra parte, el balance energético en la desintegración  $-\beta$  del mesón ordinario, observada por Anderson en una experiencia consignada oportunamente, así como las exigencias de la desintegración espontánea del mesón  $\pi^+$ , que acaba de ser objeto de consideración, conducen lógicamente a la existencia indudable del mesón neutro..

Según experiencias recentísimas, 1950, ya consignadas en el Capítulo IV, se tiene la primera evidencia experimental en favor del mesón neutro, extraído artificialmente de algunos núcleos atómicos terrestres, perteneciente a la variedad vectorial  $\pi^0$ , de vida media pequeñísima, del orden de  $10^{-11}$  segundos.

Noticias de Prensa de principios de primavera dan como un hecho incuestionable el descubrimiento definitivo del mesón neutro (1). En ninguna de las revistas científicas a nuestra disposición hemos visto publicado todavía el descubrimiento de referencia (2).

---

(1) Dichas noticias de Prensa, algo confusas, dejan entrever que un helión cósmico primario, en colisión violenta con un núcleo de plata de la emulsión fotográfica, ha provocado una explosión nuclear en estrella, la *Estrella de Rochester*, de cuyos 74 trazos, 50 pertenecen a mesones ordinarios y 24 a mesones neutros. La experiencia se realizó, en febrero de 1950, con auxilio de globos-sonda, a la altura de 30 kilómetros sobre el nivel del mar, bajo la dirección de B. Peters y H. L. Bradt, de la Universidad de Rochester.

(2) Acaba de llegar a nuestras manos un trabajo de E. Pickup y L. Voy-

Huelga decir que la dificultad en descubrir el mesón neutro estriba precisamente en su *neutralidad* eléctrica y en su energía generalmente muy elevada, dos circunstancias que se aúnan para hacerlo invisible en la cámara de niebla y en las emulsiones fotográficas.

El mesón neutro puede morir de tres maneras: por desintegración, desdoblándose en mesones cargados, más ligeros:  $\pi^0 = \mu^+ + \mu^-$ ; por aniquilamiento relativista, transformándose en fotones, en número de dos o tres, según los spines del mesón; finalmente, por interacción con los núcleos atómicos, provocando la reacción nuclear consiguiente. Se comprende, pues, la existencia de varios mesones neutros: mesones  $\pi^0$ , mesones  $\sigma^0$ , mesones  $\mu^0$ , etc.

### ¿Son los mesones partículas elementales?

Tal es el título de un trabajo muy reciente, diciembre de 1949, del genial y famoso físico teórico italiano Fermi, con residencia actual en Norteamérica (1), en el que se emite la atrevida hipótesis de que los mesones  $\pi$  son partículas compuestas, formadas por asociación de un nucleón con un anti-nucleón. Según Fermi, el nucleón y el anti-nucleón son dos partículas simétricas entre sí: el nucleón es, con respecto al anti-nucleón, lo que el positrón al electrón. El nucleón y el anti-nucleón presentan, pues, la misma masa. Aunque los anti-nucleones no han sido descubiertos experimentalmente, su existencia no es ni repugnante ni muy revolucionaria, según Fermi. Dada la pequeñez de la masa del mesón  $\pi$ , con respecto a la de sus partículas integrantes, el calor relativista de formación del mesón, la energía de enlace de sus componentes, es elevadísima: 1.730 Mev, cifra del orden de las energías cósmicas. La pérdida de masa es, en efecto, de  $3,08 \cdot 10^{-24}$  gr. por mesón individual sintetizado.

El mesón positivo,  $\pi^+$ , resulta de la asociación de un protón y un

---

vodic, del Consejo de Investigación Nacional de Ottawa, Canadá, publicado el 1.º de septiembre del año en curso (*Phys. Rev.*, **79**, 899—1950—), acerca de una estrella nuclear gigante, de origen cósmico, de la cual se pretende la extracción teórica del mesón neutro. De la parte bibliográfica del trabajo de referencia parece inferirse que, en contra de las aludidas noticias de Prensa, no ha sido lograda todavía la *visión* directa e incontrovertible del mesón neutro.

(1) E. Fermi y C. N. Yang: *Phys. Rev.*, **76**, 1739 (1949).



anti-neutrón. El mesón negativo,  $\pi^-$ , resulta de la unión de un neutrón y un anti-protón. Finalmente, el mesón neutro,  $\pi^0$ , resulta de la unión entre un neutrón y un anti-neutrón, o de la unión entre un protón y un anti-protón.

De la discusión crudísima del nuevo modelo, introducido con gran lujo y rigor matemáticos, se infiere que el nuevo mesón, el mesón teórico de Fermi, se identifica en su comportamiento con el mesón teórico de Yukawa, en su variedad vectorial  $\pi$ , descrita matemáticamente por Möller y Rosenfeld. Este hecho puede considerarse como un buen soporte de las ideas de Fermi, cuya importancia estriba, por otra parte, en que aportan una innovación teórica acerca de la constitución del núcleo atómico.

## X

### MESONES TERRESTRES (RAYOS CÓSMICOS ARTIFICIALES)

En la revista *Science*, 12 marzo 1948, Gardner y Lattes, de la Universidad de Berkeley, California, publican un trabajo por el cual se tiende un puente de unión entre los dominios de la Física cósmica y los de la Física nuclear. Nos referimos a la extracción artificial de mesones de los núcleos atómicos terrestres, hecho calificado por Powell, de la Escuela Cósmica de Bristol, como de primerísima importancia (1).

El descubrimiento de Gardner y Lattes, al que hemos aludido con gran frecuencia, tuvo lugar al bombardear placas fotográficas recubiertas con gruesas capas de negro de humo (carbón grafitico finamente dividido), con núcleos de helio acelerados hasta 380 Mev en el ciclotrón gigante del Prof. Lawrence, de la Universidad de Berkeley, California.

Como resultado de la colisión se engendran mesones pesados  $\pi$ , monovalentes, positivos y negativos, con la masa  $313 \pm 13 m_e$ , la cual, corregida más tarde por Serber, de Berkeley, California, resulta ser  $286 \pm 6 m_e$ .

Posteriormente se han hallado, asimismo, mesones ligeros,  $\mu$ , de origen todavía discutible, monovalentes, positivos y negativos, con la masa

(1) C. Powell, Jour. Phys., tomo IX, serie VIII, año 1948, pág. 297.—La talla cósmica de Powell queda confirmada con el Premio Nóbel de Física 1950, que acaba de otorgarle la Academia de Ciencias de Suecia, según noticias de la Agencia Efe del 11 de noviembre del año en curso.



200  $m_e$ , la cual, corregida más tarde por Serber, de Berkeley, California, resulta ser  $212 \pm 10 m_e$ .

El signo eléctrico de los mesones ha sido dado por el sentido de su desviación en el campo electro-magnético del ciclotrón. La masa de los mesones ha sido calculada a expensas del radio de curvatura en el campo electro-magnético y el recorrido restante a través de la emulsión fotográfica.

El 85 por 100 de los mesones pesados negativos,  $\pi^-$ , se comporta como mesones  $\sigma$ , provocando explosiones nucleares en estrella. Es muy probable que el 15 por 100 restante se comporta de igual manera, aunque la técnica actual no es lo suficientemente precisa para poder observarlo.

Hay indicios evidentes de que los mesones pesados positivos,  $\pi^+$ , se comportan como lo que son, es decir, como mesones  $\pi$ , desintegrables espontáneamente en mesones ligeros  $\mu$ .

En cuanto a la explosión nuclear provocada en el proceso de captura del mesón  $\pi^-$ , el núcleo absorbente es un núcleo de plata de la emulsión fotográfica, cuyo sobrenivel de energía es de 156 Mev, correspondiente al aniquilamiento relativista de la masa  $313 m_e$  del mesón  $\pi^-$ , en reposo, de acuerdo con el simple cálculo:  $313.0,5 \text{ Mev} = 156 \text{ Mev}$ . (Recuérdese que 0,5 Mev es la energía equivalente, en términos relativistas, a la masa de un electrón en reposo.)

Según Gardner y Lattes, el proceso de colisión por el cual se crea el mesón tiene lugar entre un núcleo de helio—proyectil—y un núcleo de carbono. Considerando que el proyectil acarrea consigo 380 Mev por núcleo individual, y que el núcleo de helio consta de cuatro nucleones, a cada nucleón del proyectil corresponde la energía de 95 Mev. Como la capa de negro de humo que sirve de blanco a los proyectiles está quieta, la energía cinética del núcleo de carbono es prácticamente nula frente a los 380 Mev del proyectil.

Por otra parte, todo nucleón posee unos 25 Mev como energía cinética interna, tanto si pertenece al núcleo de helio como si al núcleo de carbono. Con estos antecedentes, y admitiendo un choque de máxima eficacia entre ambas partículas, se tendrá:

$$\frac{1}{2} \left[ \sqrt{95} + \sqrt{25} + \sqrt{25} \right]^2 \cdot \text{Mev} = 195 \text{ Mev,}$$

como energía utilizable para la producción del mesón. Como la creación

relativista del mesón  $\pi$ , de masa  $313 m_e$ , absorbe 156 Mev, queda todavía un remanente de 39 Mev, que el mesón recién creado podrá acarrear bajo forma de energía cinética (1).

Es característico de la producción artificial de mesones terrestres o Rayos cósmicos artificiales su elevadísimo rendimiento, en comparación con la débil intensidad de los Rayos cósmicos naturales. Con el ciclotrón gigante de la Univesidad de Berkeley, California, se logra un flujo mesónico terrestre cien millones de veces más intenso que el flujo cósmico natural. Si bien es cierto que, por ahora, los mesones artificiales son menos energéticos que los naturales, el nuevo factor de intensidad abre un abismo insondable entre ambas radiaciones a favor de los Rayos cósmicos artificiales. Unido esto a la posibilidad evidente de aumentar dicha energía, a voluntad, con el empleo de aceleraciones más altas con máquinas todavía más infernales que el actual ciclotrón gigante de Berkeley, California, el descubrimiento de Gardner y Lattes debe considerarse como un hecho de incalculables consecuencias teóricas y prácticas para un porvenir no muy lejano.

Por otra parte, gracias al empleo del betatrón como acelerador de electrones proyectados, a modo de rayos catódicos, sobre un anti-cátodo de wolframio, Baldwin y Klaiber lograron, en 1946, la obtención de rayos X de energía comparable a los fotones cósmicos, cuando la aceleración de los electrones catódicos alcanza la cifra de 100 Mev. Es evidente que con el sincrotón actual, capaz de aceleraciones del orden de 1.000 Mev, se podrán obtener radiaciones cuánticas muchísimo más energéticas todavía. Como los fotones son capaces de engendrar chaparrones y cascadas, dentro de muy poco el físico tendrá en sus manos los medios para reproducir en el Laboratorio toda la gama de las radiaciones cósmicas naturales, con una intensidad y energía regulables a voluntad. Es, pues, de esperar o temer que en un futuro muy

---

(1) En las interacciones ordinarias entre núcleos no se engendran mesones por el hecho de transcurrir a expensas de un choque inelástico de relativamente poca energía, pues según veremos en el capítulo siguiente al comentar la teoría de Heitler, las ondas mesónicas sobre las que cabalga su aspecto corpuscular, el mesón, sólo se engendran por la interacción violentísima entre dos campos nucleares de Yukawa, lo que exige el concurso de un proyectil nuclear activadísimo, el cual, por choque, suministre la energía necesaria para la creación relativista del mesón.

próximo los Rayos cósmicos naturales sean en todo eclipsados por los Rayos cósmicos artificiales, en cuyo caso la Física cósmica quedará englobada dentro de los dominios de la triunfal Física nuclear.

\* \* \*

El descubrimiento de los mesones artificiales, al borrar la línea divisoria entre la Física cósmica y la Física nuclear, hace vislumbrar las perspectivas de una concepción unitaria, en cuanto a su naturaleza y conducta, entre los mesones cósmicos y los mesones terrestres y entre los mesones teóricos y los mesones experimentales.

Sin embargo, la fecundidad y complejidad mesónicas no acaban de agotarse todavía, desconociéndose en este momento la verdadera magnitud y dimensiones del problema planteado, en cuyo servicio colaboran la más alta Matemática y la más alta Física teórica.

El ardor de la investigación mesónica crece con ritmo vertiginoso, reservándonos todavía sorpresas insospechables. La teoría de Yukawa, a pesar de sus lagunas, ha abierto ya grandes horizontes para el Laboratorio y la Especulación.

Sin embargo, y al compás de los adelantos evidentes de la investigación, el núcleo se manifiesta como cada vez más insondable, más misterioso. En este sentido, pudiera decirse que el mesón de Yukawa no es más que una rendija muy estrecha, a través de la cual empiezan a vislumbrarse los gradientes de obscuridad progresiva de las tinieblas nucleares.

El mesón de Yukawa, descubierto en los Rayos cósmicos, ha permitido, en efecto, un primer sondeo provisional de los núcleos atómicos al establecer y definir las fuerzas nucleares. Este señalado servicio prestado por el mesón cósmico no debe olvidarse cuando, dentro de poco, la Física cósmica gire, como un satélite, en torno de la Física nuclear.

## XI

### ORIGEN DE LOS RAYOS CÓSMICOS SECUNDARIOS

El análisis teórico y experimental de los Rayos cósmicos ha revelado la presencia de partículas, tales como los fotones, electrones, positrones, mesones, así como neutrones, protones y algunos agregados nu-

cleónicos procedentes de explosiones nucleares. Es incuestionable, por otra parte, la existencia de Rayos primarios y Rayos secundarios, engendrados éstos por la interacción de los primarios sobre los núcleos atómicos atmosféricos.

Cabe preguntar ahora: ¿De qué naturaleza es la radiación primaria, progenitora de las cascadas y de los mesones observados en la abigarrada radiación secundaria? ¿Cuál es el mecanismo de formación de tales secundarios?

En un principio se creyó que la radiación primaria era de naturaleza electrónica; pero esta suposición no pudo sostenerse mucho tiempo ante la presencia de nuevos argumentos de gran solidez pronunciados en sentido contrario, entre los cuales deben incluirse, en primer lugar, los dimanados de la propia experimentación. Medidas verificadas, en efecto, muy por encima de la altura atmosférica correspondiente al máximo de intensidad de la radiación cósmica, demuestran que la proporción de electrones de gran energía, en vez de aumentar, como lo exige tal suposición, disminuye con la altura. Sondeos estratosféricos más recientes, con auxilio de los cohetes V-2, confirman cuantitativamente dichas conclusiones, al encontrar la débil proporción de un 20 por 100 de electrones para la composición de los Rayos cósmicos de gran altura.

Por otra parte, el efecto Este-Oeste, ya consignado, según el cual predominan, en el grupo duro, las partículas cósmicas procedentes del Oeste sobre las procedentes del Este, obliga a admitir un predominio de iones cósmicos positivos en los Rayos primarios, en contra de la hipótesis en cuestión.

Ante estos hechos, entre otros, y descartados los fotones, por no ionizantes, y los mesones, por su vida efímera, la idea primitiva de una radiación electrónica primaria ha sido reemplazada, ventajosamente, por la hipótesis actual de una radiación primaria de protones.

En 1943, Heitler y sus colaboradores Hamilton y Peng han podido elaborar la teoría físico-matemática de la génesis de los Rayos secundarios a expensas de una radiación de protones primarios. Esta teoría, apoyada sobre la piedra angular de las ideas de Yukawa acerca de la constitución nuclear, y completada recientemente por el propio Heitler y Walst, es una teoría unitaria y general que intenta explicar todos los hechos cósmicos en una síntesis tan atrevida como maravillosa. Partiendo de la interacción inicial de los protones primarios con los núcleos atómicos atmosféricos, la teoría da cuenta del origen de los mesones,

de las cascadas y demás componentes de la abigarradísima radiación secundaria, con todo su historial íntimo, desde lo alto de las lejanas regiones estratosféricas hasta las grandes profundidades marinas, lacustres y subterráneas. A pesar de sus naturales lagunas, inherentes a una teoría incipiente, la teoría de Heitler domina, cualitativa y cuantitativamente, todo el ingente panorama de la Física cósmica actual.

El desarrollo matemático de la teoría de Heitler no cabe en este lugar. En su defecto, la teoría nuclear de Yukawa, que le sirve de base, será suficiente, sin más adornos matemáticos, para dar una idea elemental acerca de la génesis de los mesones y de las cascadas cósmicas.

Si un protón primario, rápido, penetra en la atmósfera, puede entrar en colisión con un núcleo de nitrógeno o de oxígeno. Como es bien sabido, los núcleos se suponen integrados exclusivamente por nucleones, en sus variedades cuánticas, protones y neutrones. Cada uno de estos nucleones, lo mismo que el protón primario—proyectil—, está sumergido en un campo mesónico de Yukawa. En una colisión violenta entre el protón y el núcleo, se engendran ondas mesónicas, de modo semejante a como se emiten ondas luminosas en el choque violento de un electrón con otra partícula cargada eléctricamente. Gracias, en efecto, a este enfrenamiento, según hemos visto ya oportunamente, Bethé y Heitler han logrado explicar, con gran elegancia y felicidad, el origen de las cascadas y de los chaparrones cósmicos. La creación de ondas mesónicas equivale a la creación de mesones, ya que los mesones son el aspecto corpuscular de las ondas mesónicas. Las ondas mesónicas son inconcebibles sin mesones, como las ondas luminosas sin fotones.

Por consiguiente, así como el enfrenamiento de los electrones por los núcleos atómicos produce fotones, progenitores de cascadas, el enfrenamiento de los núcleos por los núcleos, o sea la interacción violenta entre dos campos mesónicos de Yukawa, produce mesones. Para la eficacia del proceso es preciso la concurrencia de un choque violento, de cuya energía pueda extraerse la necesaria para la creación relativista del mesón.

De acuerdo, pues, con las ideas de Yukawa, los mesones cósmicos son creados por el paso de los protones primarios a través de la atmósfera. En las primeras capas atmosféricas se forman preferentemente los mesones pesados, vectoriales, de spin 1, cuya vida media, pequeñísima, del orden de  $10^{-8}$  segundos, les impide alcanzar la superficie terrestre. Mueren, pues, en lo alto o en el camino, ya por desintegración espontánea.



nea, mesones  $\pi$ , ya víctimas de una captura nuclear explosiva, mesones  $\sigma$ .

Los mesones vectoriales  $\pi$  producen, por desintegración espontánea, los mesones ligeros, pseudo-escalares,  $\mu$ , de spin 0: son los clásicos mesones teóricos de Yukawa, 1935, y los clásicos mesones experimentales, cósmicos, de Anderson y Neddemeyer, 1938. Los mesones ligeros,  $\mu^+$  y  $\mu^-$ , se engendran también por interacción directa de los protones primarios con los núcleos atómicos atmosféricos.

Los mesones  $\mu$ , con su vida media mayor, del orden de  $10^{-6}$  segundos, si son muy rápidos tienen tiempo de alcanzar la superficie terrestre antes de morir. Los lentos, por el contrario, sucumben en el camino, ya por desintegración espontánea en un electrón y un neutrino (mesones ligeros,  $\beta$ -radiantes), ya por captura nuclear explosiva (mesones ligeros, tipo  $\sigma$ ). Este último proceso, privativo de los mesones negativos,  $\mu^-$ , es poco frecuente para núcleos atómicos ligeros, como son los atmosféricos.

La captura nuclear de los mesones negativos justifica el predominio de los mesones positivos, observado en las alturas y al nivel del mar.

Los electrones y positrones rápidos, procedentes de la desintegración  $\beta$  de los mesones  $\mu^-$  y  $\mu^+$ , por enfrenamiento nuclear emiten radiaciones cuánticas o fotones, cuya materialización relativista ulterior provoca la formación del par electrón-positrón, susceptible de automultiplicación progresiva según el proceso general de las cascadas cósmicas.

Con ello ya tenemos una explicación sucinta del mecanismo de formación de los componentes principales de la compleja radiación secundaria, con la intervención exclusiva de los protones primarios y los núcleos atómicos atmosféricos en calidad de reactivos básicos.

Las ideas de Yukawa son capaces, pues, de proporcionar una explicación cualitativa de la gran complejidad de los Rayos cósmicos secundarios. La teoría de Heitler y colaboradores, feliz complemento de las ideas de Yukawa, llega mucho más lejos, al dar también una explicación cuantitativa de dichos fenómenos. No hay duda alguna, pues, de que las ideas de Yukawa son rigurosamente correctas.

Entre los éxitos de la teoría de Heitler debe citarse la previsión de la existencia de los mesones  $\pi$ , desintegrables según los esquemas:

$$\text{a) } \pi = \mu + h\nu,$$

$$\text{b) } \pi = \mu + \mu^0,$$

siendo el proceso b) el confirmado experimentalmente por la Escuela Cósmica de Bristol en 1947.

Por otra parte, la extracción artificial de mesones de los núcleos atómicos terrestres por Gardner y Lattes, de Berkeley, California, 1948, debe ser considerada como la verificación experimental más brillante de las previsiones teóricas de Heitler, al lograr, de hecho, la génesis de mesones por el enfrentamiento violento de dos campos mesónicos de Yukawa.

Renunciamos a exponer la justificación detallada de la complejidad cósmica con auxilio de la teoría de Heitler y colaboradores, limitándonos a consignar, dentro de los hechos más salientes, la explicación satisfactoria de la aparente anomalía observada en el estudio del efecto de latitud geomagnética, expresada en la curva de la figura 5. La inflexión prematura de la curva a los  $50^{\circ}$  N. y  $50^{\circ}$  S., tanto para los rayos blandos como para los rayos duros, resulta estar de acuerdo perfecto con los cálculos de Heitler.

Finalmente, señalaremos otro éxito para la teoría de Heitler al justificar plenamente el predominio de las partículas cósmicas positivas sobre las negativas, cuestión tantas veces aludida, por la presencia de protones primarios y por la captura nuclear de los mesones negativos.

\* \* \*

En 1943 el físico Swann admitió la presencia de heliones al lado de los protones en los Rayos cósmicos primarios, para explicar la intensidad de la componente horizontal de los Rayos cósmicos de gran altura atmosférica.

En fecha más reciente, 1949, Martin A. Pomerantz, de la Fundación Bartol del Instituto Franklin, de Pensilvania (1), en una concienzuda revisión sistemática de la propiedades de la radiación cósmica para alturas atmosféricas muy grandes, confirma la naturaleza protónica de los Rayos cósmicos primarios y, de acuerdo con Swann, admite también la presencia de partículas nucleares pesadas, acaso heliones, junto con los protones.

El mejor documento experimental en favor de la presencia efectiva de núcleos de helio o de agregados nucleónicos pesados, de carga múltiple—polivalentes—, integrantes de la radiación cósmica primaria, lo constituye una fotografía reciente, 1949, en la cámara de niebla, ob-

---

(1) *Phys. Rev.*, 75, 69 (1949).

tenida a la altura de 145 kilómetros sobre el nivel del mar por Golan y colaboradores (1), con auxilio del cohete alemán V-2, que voló hasta 159 kilómetros sobre el suelo. La interpretación de dicha fotografía conduce a la evidencia experimental de tales partículas pesadas.

El estado actual de la investigación cósmica obliga, pues, a admitir una mezcla de protones y núcleos pesados, acaso heliones, para la composición de los Rayos cósmicos primarios.

## XII

### ORIGEN DE LOS RAYOS CÓSMICOS PRIMARIOS

Las experiencias y teorías expuestas en el capítulo anterior han demostrado que los Rayos cósmicos primarios están integrados por protones y una pequeña proporción de agregados nucleónicos polivalentes (núcleos pesados de carga múltiple). Interesa averiguar ahora el origen de tales Rayos primarios, así como el modo de adquisición de tan fabulosas energías, problemas apasionantes no bien resueltos todavía.

Siguiendo el orden histórico, el propio Hess, el descubridor oficial de los Rayos cósmicos, fué el primero en sugerir que tales Rayos no proceden del Sol, por el hecho ya consignado, y descubierto por él, de que la intensidad de los Rayos cósmicos no varía sensiblemente al pasar del día a la noche. Si el Sol fuese, en efecto, el manantial de los Rayos cósmicos, las posiciones relativas entre el Sol y la Tierra, las cuales, como se sabe, se reproducen cada veinticuatro horas, darían lugar a variaciones periódicas en la intensidad de la radiación cósmica, con un máximo diurno y un mínimo nocturno, ambos muy acusados, de modo exactamente análogo al caso de la luz solar vista por un observador terrestre. La idea de Hess parte del supuesto implícito de que los Rayos cósmicos viajan en línea recta hacia nosotros, como la luz solar.

De hecho se han observado ciertas fluctuaciones periódicas, a saber: con el período de un día solar, el período de un día estelar, el período de un año solar y el período de veintisiete días, tiempo de duración de

---

(1) *Phys. Rev.*, **75**, 524 (1949).

una rotación del Sol sobre sí mismo. Pero la magnitud de estas fluctuaciones es solamente del orden del 1 por 1.000, cifra demasiado insignificante para pretender extraer de ella un origen solar para los Rayos cósmicos. En términos comparativos, basta considerar, en efecto, la diferencia de luz solar entre las doce del día y las doce de la noche, a que estamos tan familiarizados.

Tiene interés, de todos modos, estudiar el origen de tales débiles fluctuaciones periódicas.

Parece bien probada la existencia de un Efecto Zeeman en la luz del Sol, del cual sería responsable un campo magnético solar. Del análisis cuantitativo de dicho efecto se han extraído de 10 a 30 gauss para la intensidad magnética sobre la superficie del Sol. Como este campo parece disminuir muy rápidamente con la altura, con lo cual su influencia sería nula a pocos centenares de kilómetros lejos del Sol, se supone, como hipótesis más sencilla, que se trata del campo de un dipolo magnético.

Con esta hipótesis, las ligeras fluctuaciones observadas se interpretan como efectos secundarios debidos a la acción del campo magnético solar sobre las partículas cósmicas que se hallan eventualmente en el espacio comprendido entre la Tierra y el Sol. La posición del campo magnético solar, con relación a un observador terrestre, varía con el tiempo, engendrando débiles fluctuaciones de carácter periódico.

La fluctuación, cuyo período es de un día solar, es debida a la rotación de la Tierra sobre sí misma, gracias a la cual la Tierra y el Sol reproducen su posición relativa cada veinticuatro horas. La fluctuación, cuyo período es de veintisiete días, es debida a la rotación del Sol sobre sí mismo. Su existencia revela que el eje del momento magnético solar no coincide con el eje de rotación del Sol. La fluctuación, cuyo período es de un año solar, es debida, de un lado, a que la distancia entre la Tierra y el Sol presenta tal periodicidad, y de otro, a que el supuesto dipolo magnético solar no es perpendicular a la eclíptica. Finalmente, la fluctuación, cuyo período es de un día estelar, se atribuye a la presencia de campos magnéticos en la Vía Láctea, siendo posibles otras explicaciones.

Por otra parte, la existencia de un campo magnético solar es invocada por los teóricos para justificar la carencia del efecto de latitud

para las grandes latitudes, según se consigna en el capítulo VI (1).

Al lado de las débiles fluctuaciones periódicas, del orden del 1 por 1.000, cabe señalar las fuertes variaciones, generalmente de carácter accidental, entre otras las debidas a supuestas *tempestades magnéticas* terrestres, con una variación del orden del 10 por 100, sobre las cuales insistiremos más adelante, y las atribuidas a llamas o fulgores solares, cuya variación llega a ser del 100 por 100. Pertenecen a este último tipo los bruscos incrementos de intensidad acaecidos los días 19 y 29 de noviembre de 1949, los cuales fueron observados en distintos países y por diferentes investigadores. Según las observaciones de D. C. Rose, realizadas en Ottawa, Canadá, publicadas el 15 de abril del año en curso (2), la variación de intensidad correspondiente al citado 19 de noviembre se elevó, en el corto espacio de unos seis minutos, hasta un 170 por 100 por encima de su valor medio normal. Se registró el mismo fenómeno, de modo exactamente simultáneo, en Cheltenham y Godhaven, aunque con un incremento menor, del 43 por 100. En Huancayo no se observó nada. Con poco retraso, el fenómeno fué visto por Dauvillier en Bagnères, Francia, con un incremento del 3,6 por 100 solamente. Se trata, pues, de efectos esporádicos y locales, distribuidos irregularmente sobre la superficie terrestre.

Así justificadas las fluctuaciones, sin necesidad de un origen solar para los Rayos cósmicos, ha prevalecido entre los físico-cósmicos, desde la época de Hess hasta 1949, la creencia primitiva, según la cual ni el Sol, ni los astros, ni las aglomeraciones de estrellas son el origen de los Rayos cósmicos. Desde 1949 empieza a opinarse que los Rayos cósmicos proceden precisamente del Sol. Más adelante procuraremos conciliar con la experiencia este cambio tan radical de ideas. Entretanto, continuaremos siguiendo el orden histórico que ha presidido el desarrollo de una cuestión tan interesante como el origen de los Rayos cósmicos.

\* \* \*

---

(1) Sin embargo, de las experiencias recientes de M. A. Pomerantz (loc. citada en el capítulo VI), parece inferirse la no existencia de ningún campo magnético solar permanente, siendo variable o de ninguna clase, por lo que todas las explicaciones a base de influencias magnéticas solares, están expuestas a una revisión, de confirmarse las experiencias de Pomerantz.

(2) *Phys. Rev.*, **78**, 181 (1950).



Si los Rayos cósmicos no proceden del Sol ni de los demás astros del firmamento, se pensó en un origen interestelar a expensas de la materia infinitamente diluída que puebla los inmensos espacios cósmicos, cuyo grado de vacío (un átomo individual de hidrógeno por centímetro cúbico, correspondiente a una densidad,  $10^{-24}$  gr. / cc.) es muy superior al logrado en el laboratorio. Así localizado, hipotéticamente, el nacimiento de los Rayos cósmicos, quedaba por averiguar el origen de su energía. Como esta energía es elevadísima, había que pensar en inyecciones heroicas de gran estilo.

Millikan, considerando el elevadísimo equivalente energético de la materia, cree que la energía excepcional de los Rayos cósmicos podría ser debida a un aniquilamiento relativista de masas materiales, de acuerdo con el conocido postulado de Einstein.

El aniquilamiento parcial que acompaña a la síntesis de los elementos a partir del hidrógeno (véase *packing effect* de Aston, capítulo I), es insuficiente para justificar energías tan altas como  $10^9$  Mev, observadas de hecho en los Rayos cósmicos. En efecto, la síntesis del núcleo de uranio, uno de los más complejos del Sistema periódico,  $Z = 92$ , con ser, por consiguiente, una de las síntesis más exotérmicas, libera solamente 2.000 Mev.

Millikan recurre, entonces, al aniquilamiento integral de las masas materiales. La energía de masa del electrón es de 0,5 Mev; la del protón, 1.000 Mev; la del helión, 4.000 Mev; la del núcleo de oxígeno, 16.000 Mev; la del núcleo de U-238, 238.000 Mev, etc.

Considerando que los Rayos primarios son de naturaleza protónica, el primer núcleo, teóricamente apto a este fin, será el de helio. Para salvar, por otra parte, el principio de la conservación de la cantidad de movimiento será preciso que el aniquilamiento relativista del núcleo-padre vaya acompañado de la formación de dos protones, emitidos en sentidos opuestos. Por consiguiente, y suponiendo los dos protones engendrados en estado equi-energético, el cálculo de la energía de los protones primarios debe hacerse restando dos unidades másicas al núcleo-padre, valor de la masa de los dos protones, y el resto hay que dividirlo por dos. Así, los protones procedentes del helio tendrán 1.000 Mev; los procedentes del oxígeno, 7.000 Mev; los procedentes del U-238, 118.000 Mev, etcétera.

Estos valores son ya algo más plausibles, y de hecho son frecuentes tales niveles de energía en los Rayos cósmicos. Sin embargo, no que-

dando muchos núcleos aniquilables por encima del uranio, vuelven a quedar sin justificación las energías altas, por encima de 200.000 Mev, hasta  $10^9$  Mev.

Por otra parte, hasta la fecha no se han observado, en el laboratorio, tales aniquilamientos integrales, si bien este argumento no impide que tengan lugar en la Naturaleza. Si se logran aniquilamientos parciales, bien pueden lograrse, al parecer, aniquilamientos en masa.

\* \* \*

Según la teoría de Millikan, los Rayos primarios adquieren su energía en el momento y en el lugar de su nacimiento.

Según otras teorías, los Rayos cósmicos son inicialmente pobres en energía y la adquieren con el tiempo por inyecciones graduales a expensas de aceleraciones provocadas por inmensísimos campos eléctricos o magnéticos, celestiales o estelares. Esta clase de teorías son las más aceptadas en la actualidad. Pertenecen a ellas la del físico sueco Alfven, 1937, según la cual el origen de la energía de los Rayos primarios es debida a la aceleración de los protones cósmicos a expensas de sendos campos magnéticos existentes en las estrellas apareadas (estrellas dobles) en movimiento de rotación. Tales estrellas se comportarían, pues, como ciclotrones naturales gigantescos. Inspirado en este punto de vista, M. A. Pomerantz (loc. cit.) pretende actualmente un origen solar para los Rayos cósmicos, cuyo ciclotrón sería el propio Sol.

Pertenece también a este grupo de teorías la muy reciente (1) del genial físico italiano Fermi, con residencia actual en Chicago, según la cual los Rayos cósmicos se originan y aceleran primariamente en el espacio interestelar de la galaxia por colisiones con campos magnéticos errantes, allí existentes según Alfven. Estos campos son muy estables por sus dimensiones inmensas, del orden de magnitud de años de luz, y por la relativamente elevada conductividad eléctrica del espacio interestelar. La conductividad es, en efecto, tan grande, que se pueden describir las líneas de fuerza magnética como adheridas a la materia y participando en sus movimientos, dando lugar a ondas magneto-elásticas cuyas características han podido ser muy bien calculadas por Alfven. Fermi infiere de todos estos antecedentes que las partículas del espacio

(1) *Phys. Rev.*, **75**, 1732 (1949).

interestelar pueden adquirir energía por interacción con las irregularidades errantes del campo magnético interestelar. La velocidad de inyección es muy pequeña, pero resulta capaz para proporcionar energía hasta los valores máximos observados. Por otra parte, la ley del espectro de energías de los Rayos cósmicos primarios, surge de la teoría con gran naturalidad, adaptándose satisfactoriamente a los hechos naturales. Sin embargo, y según manifestación del propio Fermi, la nueva teoría falla ante la presencia y conducta de las partículas cósmicas primarias pesadas, con carga múltiple.

\* \* \*

Algunos autores han buscado el origen de los Rayos cósmicos en las explosiones violentas de ciertas estrellas, *nova* y *supernova*, con liberación de cantidades astronómicas de energía. Sin embargo, ni el ritmo, fuertemente irregular, de estas explosiones estelares, ni la energía liberada, están en consonancia con el carácter altamente isotrópico de los Rayos cósmicos ni con su espectro energético.

Según Regener, los Rayos cósmicos vienen a ser como radiaciones *fósiles* engendradas en época remotísima, cuando el Universo era todavía joven y ofrecía un *clima* adecuado para la génesis de energías excepcionalmente elevadas. Tales rayos siguen viajando, desde su nacimiento, según trayectorias circulares, dentro del Universo curvo de Linstein. Según Regener, estos rayos deben ser considerados como documentos preciadísimos para ilustrarnos acerca del origen mismo del Mundo y de su evolución.

En Lovaina el canónigo Lemaître, citado ya como teorizante del efecto de latitud, cree, con Regener, que los Rayos cósmicos son un "recuerdo arqueológico" de los primeros grandes cataclismos del Universo. En el transcurso de la actividad primaria del Cosmos, acompañada de la fragmentación y expansión del Universo, con su consiguiente incremento de entropía, habría tenido lugar la producción de los Rayos cósmicos, según un proceso muy parecido a la génesis de las emanaciones de los átomos radiactivos. Vistos así, los Rayos cósmicos serían radiaciones en *conserva*, testigos de una supuesta gran actividad radiactiva de las primeras edades del Universo.

Se comprende que las teorías de Regener y Lemaître, aunque muy seductoras, son de difícil verificación en el laboratorio.

En cuanto a la solidez del apoyo termodinámico de la teoría de Le-maitre, nos permitimos reproducir las siguientes palabras textuales del propio G. N. Lewis, patriarca de la termodinámica moderna: "Thermodynamics gives no support to the assumption that the univers is running down. Gain in entropy always means loss of information and nothing more."

#### *Supuesto origen solar de los Rayos cósmicos.*

El físico francés Dauvillier ha sido el primero en sugerir, en 1934, que los Rayos cósmicos pueden proceder del Sol. Considerando, de un lado, el carácter iónico de los Rayos primarios, y de otro la presencia de un campo magnético solar, las trayectorias rectilíneas supuestas por Hess y admitidas universalmente, podrían ser reemplazadas por trayectorias curvas cuya deformación progresiva llegaría a comunicar a los Rayos cósmicos su típico carácter isotrópico. Gracias, pues, a esta desviación magnética, los Rayos cósmicos serían Rayos solares isotrópicos sobre la superficie terrestre.

Las ideas de Dauvillier no fueron aceptadas, en su aspecto cuantitativo principalmente, ya que la debilidad y cortas dimensiones del campo magnético solar se aúnan para mantener la anisotropía y, por tanto, el carácter periódico de una radiación tan energética y, en consecuencia, tan poco sensible a los campos magnéticos. En 1948, un físico-cósmico como Leprince-Ringuet dice, acerca de la teoría de su compatriota Dauvillier, que es inadmisibile para la totalidad de la radiación, pues debían observarse fluctuaciones muy superiores al 1 por 1.000, singularmente para partículas de energía muy grande, las cuales escapan a la influencia del campo magnético terrestre.

Admitiendo campos magnéticos débiles, pero inmensamente grandes, del orden del año de luz, sobre partículas inicialmente pobres en energía, se lograrían, a la vez y de modo progresivo, grandes desviaciones y grandes inyecciones de energía, hasta alcanzar respectivamente el carácter isotrópico y el nivel energético de los Rayos cósmicos. Tales campos magnéticos han sido postulados, antes de ahora, por distintos físico-cósmicos. Este es, fundamentalmente, el punto de vista actual acerca del origen solar de los Rayos cósmicos.

Veamos la opinión de H. Alfven, R. D. Richtmyer y E. Teller (1), del Instituto de Tecnología, Estocolmo, Suecia, el primero; del Instituto de Estudios Superiores, Princeton, Nueva Jersey, el segundo, y del Instituto de Estudios Nucleares, Universidad de Chicago, el último:

“El descubrimiento de núcleos altamente cargados entre los Rayos cósmicos primarios hace que parezca probable que tales rayos sean debidos a procesos de aceleración electromagnética. El gran contenido de energía total, presente en los Rayos cósmicos, requeriría métodos muy eficientes para la producción de estos rayos, si se supone que los Rayos cósmicos se difunden uniformemente por toda la galaxia y por todo el espacio intergaláctico. Para orillar esta dificultad se puede suponer que los Rayos cósmicos se engendran en el Sol o en sus proximidades, y que se mantienen dentro del Sistema solar gracias a la acción de campos magnéticos inmensos. Estos campos podrían explicar la isotropía y constancia de los Rayos cósmicos, reflejando y homogeneizando repetidamente las partículas cargadas. La supuesta existencia de tal campo simplifica considerablemente el problema del origen de los Rayos cósmicos.

Si se admite que los Rayos cósmicos se hallan confinados dentro del Sistema planetario, la intensa radiación luminosa solar dará lugar a un número suficiente de *efectos Compton* para eliminar todos los electrones, incluso los de energía muy baja, justificándose así la carencia electrónica observada en los Rayos primarios.

Durante las tempestades magnéticas, aludidas oportunamente, se observan a veces variaciones de un 20 por 100 en la intensidad de los Rayos cósmicos. Estas variaciones no pueden explicarse como efectos de perturbaciones del campo magnético terrestre. El único fenómeno capaz de explicar esta variación parece ser el campo eléctrico de los rayos productores de tempestades magnéticas. Según la teoría corpuscular de las tempestades magnéticas, el Sol emite rayos con una velocidad muy grande. Durante su paso a través del campo magnético solar estos rayos se polarizan y el campo eléctrico, así engendrado, es responsable probablemente de las variaciones de intensidad de los Rayos cósmicos durante las tempestades magnéticas.

Parece plausible suponer que los Rayos cósmicos se producen por el paso repetido de las partículas a través de los rayos así descritos. Durante tales pasos las partículas pueden acelerarse o frenarse por los

(1) *Phys. Rev.*, **75**, 892 (1949).



campos eléctricos de los rayos. Pueden ocurrir otros cambios en la energía de las partículas como consecuencia de los cambios en el campo magnético solar, en conexión con los rayos productores de tempestades magnéticas. Por término medio, predomina el proceso de aceleración y la partícula puede adquirir la energía de los Rayos cósmicos."

R. D. Richtmyer y E. Teller insisten en su punto de vista en un trabajo posterior (1), auxiliados en la parte crítica por el gran físico teórico Fermi.

La hipótesis de que los Rayos cósmicos se hallan confinados en nuestro Sistema planetario, surge de considerar el enorme caudal de energía que supondría invadir con Rayos cósmicos todos los espacios galácticos e intergalácticos. Si así fuese, la energía total de los Rayos cósmicos calculada a base de su densidad de energía sobre la Tierra ( $3.10^{10}$  Mc<sup>2</sup>/c. c., siendo M la masa del protón), alcanzaría el valor super-astronómico de  $10^{-4}$  de la energía relativista de toda la masa material del Universo.

La hipótesis de que los Rayos cósmicos se hallan confinados en nuestro Sistema planetario, conduce a una serie de conclusiones que concuerdan satisfactoriamente con los hechos experimentales. Entre ellas destacaremos las que se refieren al espectro de energías de los Rayos cósmicos.

Como valores límites superiores se han calculado  $10^8$  Mev para los protones y  $10^{10}$  Mev para los núcleos pesados. Partículas con energía superior no pueden estar confinadas en el Sistema planetario.

Es probable la existencia de partículas cósmicas con una energía menor de 2.500 Mev, límite inferior del espectro de energías de los Rayos primarios admitido para explicar el efecto de latitud geomagnética para las grandes latitudes. En este sentido, los cálculos de Richtmyer y Teller confirmarían, por otro camino, las ideas de M. A. Pomerantz (locución citada).

En resumen, la energía de los Rayos cósmicos procede del manantial más energético de nuestra vecindad: el Sol. Un campo magnético de unos  $10^{-5}$  gauss, extendido por todo y allende el Sistema planetario, serviría para convertir los Rayos cósmicos en una radiación isotrópica. El largo periodo de circulación en dicho campo (de mil años a cien millones de años) explicaría asimismo que la intensidad de los Rayos cósmi-

(1) *Phys. Rev.*, 75, 1729 (1949).

cos no presente fluctuaciones de largo período relacionadas, por ejemplo, con el ciclo de las manchas solares. Finalmente, el campo magnético contribuiría a que la radiación cósmica adquiriese su elevado nivel de energía.

El ya citado H. Alfven, en dos trabajos posteriores (1) ofrece una explicación plausible del campo magnético en cuestión, describiendo un mecanismo nuevo para la aceleración de las partículas cargadas cerca del Sol. Según Alfven, dicho campo magnético debe ser toroidal, con una extensión de 0,1 años de luz. Un campo de esta clase puede engendrarse por el movimiento del Sistema solar con relación a la materia interestelar. La teoría de Alfven explica bien y de modo cuantitativo el espectro de energías y la intensidad total de los Rayos cósmicos.

Según un artículo periodístico de B. Bromel (Derechos exclusivos "Opera Mundi"), publicado en *La Gaceta Regional*, Salamanca, 23 agosto 1950, el físico norteamericano Martin A. Pomerantz, citado ya con motivo de su pretendida corrección del efecto de latitud geomagnética para grandes latitudes (loc. cit. en el capítulo VI), ha hecho declaraciones según las cuales está preparando, para este otoño, una exploración cósmica sobre el cielo del Canadá, con el fin de confirmar que el Sol, a semejanza de las estrellas dobles, es un dipolo magnético variable capaz de actuar, por tanto, como un gigantesco ciclotrón acelerador de Rayos cósmicos de origen solar. La idea de Pomerantz no es nueva del todo: es una versión de la de Alfven, ya consignada, acerca de la supuesta conducta de las estrellas dobles. Lo interesante, en todo caso, son las experiencias en perspectiva.

De todos modos, parece poder afirmarse la existencia de una corriente de opinión en favor de un origen solar para los Rayos cósmicos. En este sentido, la firma de Alfven es toda una garantía. Otra garantía de gran valor es la intervención del genial físico italiano Fermi, con residencia actual en Chicago, quien, con su sagaz espíritu crítico, ha guiado el citado trabajo de Richtmyer y Teller, según hacen constar reiteradamente estos autores.

\* \* \*

---

(1) { *Phys. Rev.*, **75**, 1732 (1950).  
*Phys. Rev.*, **77**, 375 (1950).

Si llega a confirmarse la nueva teoría, los Rayos cósmicos perderán gran parte de su encanto fascinador, aureolado por su supuesto origen lejano y misterioso, perdido en las inmensidades del tiempo y del espacio. Con tal nacimiento, a dos pasos de la Tierra, los Rayos cósmicos ya no serán los emisarios enigmáticos de sucesos atómicos acaecidos en las lejanías de los espacios sin fin del Universo curvo de Einstein, ni el eco fosilizado de las primeras convulsiones geológicas del Cosmos.

Sin embargo, los Rayos cósmicos, al convertirse en *hijos del Sol*, se acercarán más a nosotros, prestándose, en consecuencia, a un estudio mejor. Adquirirán, pues, mayor consistencia científica, siendo de esperar, en este sentido y un futuro muy próximo, nuevas y grandes conquistas para la Física cósmica y la Física nuclear.

Salamanca, Béjar, Salamanca, verano de 1950.

Agradezco a mi Profesor adjunto, J. Zato del Corral, su eficaz colaboración en la corrección de pruebas.

(1) *Rev. Rev.* 25, 1712 (1950).  
*Rev. Rev.* 27, 252 (1950).

## BIBLIOGRAFIA

- R. A. Millikan: *Cosmic Rays*. 1939.  
H. J. J. Braddick: *Cosmic Rays and Mesotrons*. 1939.  
L. Leprince-Ringuet: *Les rayons cosmiques.—Les mésons*. 1948.  
Lapp-Andrews: *Nuclear Radiation Physics*. 1949.  
J. Sancho: *Introducción a la Química nuclear*. 1948.  
Max Born: *Atomic Physics*. 1944.  
J. Thibaud: *Vida y transmutaciones de los Atomos*. 1939.  
L. Brú: *El núcleo atómico*. 1940.  
*The Physical Review*. Revista norteamericana.  
*Le Journal de Physique et le Radium*. Revista francesa. París.  
*Nature*. Revista inglesa. Londres.  
*La Gaceta Regional* (1). Diario local. Salamanca.

---

(1) Es un motivo de satisfacción poder consignar el hecho de que la Prensa diaria se preocupa del progreso de la Ciencia, ofreciendo las primicias de descubrimientos importantes cuya publicación en las Revistas científicas tarda algunos meses en aparecer. Así, el descubrimiento del Berkelio, elemento número 97, comunicado por la Prensa a principios de enero de 1950, se publica el 15 de marzo de 1950 en *Phys. Rev.*, 77, 838 (1950). Espero ver confirmado, asimismo, el descubrimiento del mesón neutro en la Estrella de Rochester, anunciado a principios de marzo de 1950. En el recién citado artículo periodístico de B. Bromel se hace fiel referencia a unas experiencias recientes de M. A. Pomerantz (loc. cit. en el capítulo VI), las cuales, en efecto, han sido realizadas por dicho investigador, según consta en *Phys. Rev.*, 77, 830 (1950).

b 13527 885

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA



6404236434

915821930

## INDICE DE CAPITULOS

	Página.
I.—Átomos y moléculas .....	9
II.—Descubrimiento de los Rayos cósmicos.—Generalidades .....	17
III.—El electrón de Dirac y los Rayos cósmicos .....	20
IV.—El Mesón de Yukawa en la Física cósmica y en la Física nuclear.	23
V.—Detección de los Rayos cósmicos .....	33
VI.—Los Rayos cósmicos al nivel del mar.—“Efecto de latitud”.—El positrón.—Los “Chaparrones cósmicos” .....	40
VII.—Exploraciones cósmicas en altura y profundidad .....	55
VIII.—Naturaleza de los Rayos cósmicos.—Teoría de Bethe y Heitler ...	61
IX.—Mesones cósmicos .....	70
X.—Mesones terrestres (Rayos cósmicos artificiales) .....	82
XI.—Origen de los Rayos cósmicos secundarios.—Teoría de Heitler ...	85
XII.—Origen de los Rayos cósmicos primarios .....	90