

# La gran energía de la radiación cósmica y el problema de su utilización

T. BATUECAS

Catedrático de Química Física de la Universidad compostelana.

## Introducción y conceptos generales.

Con ocasión de los Cursos Universitarios que durante el verano viene organizando—desde hace cuatro años—la Universidad compostelana en Vigo, el autor pronunció (agosto, 1946) una conferencia de tipo informativo sobre la *radiación cósmica*. Las presentes páginas constituyen un amplio resumen de la citada conferencia.

Pero antes de abordar el tema, y a manera de introducción, parece conveniente exponer algunos conceptos generales sobre las radiaciones. Estas cabe definir las como intercambios de energía que los cuerpos, o sistemas materiales, efectúan a través del espacio. Ahora bien: como el intercambio puede llevarse a cabo sin transporte simultáneo de materia o con él, las radiaciones se clasifican en *ondulatorias* y *corpúsculares*.

Las más importantes y de mayor interés para nuestro objeto, entre las ondulatorias, son las radiaciones electromagnéticas, caracterizadas por una serie de propiedades bien conocidas: propagación rectilínea en el vacío, velocidad igual a la de la luz, reflexión, refracción, etc. Las radiaciones electromagnéticas abarcan el conjunto del espectro, desde las ondas hertzianas—cuya longitud de onda puede alcanzar varios kilómetros—a los rayos X, los  $\gamma$  y los cósmicos (todos ellos de longitud de onda pequeñísima), pasando por las radiaciones caloríficas, las del espectro visible y las ultravioleta. Como las diferentes radiaciones electromagnéticas se distinguen entre sí por el valor de su *frecuencia* (cociente de la velocidad por la longitud de onda correspondiente a la radiación), la diferencia entre ellas es sólo *cuantitativa*.

Las radiaciones corpúsculares, en que el transporte de materia acompaña—según queda dicho—al de energía, están constituidas por haces de partículas atómicas o subatómicas, cuya velocidad difiere según los casos, mas *nunca* alcanza la velocidad de la luz. Los corpúsculos de estas radiaciones pueden ser átomos neutros, pero en general son iones o electrones, dotados, pues, de carga eléctrica. Radiaciones corpúsculares de tipo *electrónico* son, por ejemplo, los

rayos  $\beta$  de las sustancias radioactivas y los rayos catódicos; en cambio, de tipo *iónico* son los rayos  $\alpha$ , emitidos por los cuerpos radioactivos y los rayos *canales*.

Para la Física clásica del siglo XIX, la diferencia entre las radiaciones de uno y otro tipo era fundamental. Sin embargo, con el advenimiento de la *Teoría de los cuantos*—establecida por Max Planck a principios de este siglo—, y más tarde de la *Mecánica ondulatoria*—fundada por L. de Broglie y E. Schrödinger—, las ideas sufrieron un cambio profundo. De una parte, en efecto, los admirables experimentos de Davisson y Germer, G. P. Thomson, Rupp, etcétera, efectuados con electrones y partículas atómicas, demostraron que es posible producir fenómenos interferenciales y de difracción mediante corpúsculos. Por otra parte, según la teoría de los *cuantos*, los sistemas atómicos o moleculares sólo pueden absorber o emitir energía por múltiplos enteros de la expresión  $h \cdot \nu$ , producto de la frecuencia por la constante de Planck,  $h = 6,626 \times 10^{-27}$  erg-seg. Esta energía mínima, cuyo valor cambia, desde luego, con la frecuencia, recibe el nombre de *fotón*. Los fotones son, pues, especie de corpúsculos de la energía radiante, y su existencia aparece, por ejemplo, bien manifiesta en el "efecto fotoeléctrico" y el "efecto Compton", donde la energía de tipo ondulatorio, al actuar sobre ciertas sustancias, se invierte *total o parcialmente* en liberar electrones de energía idéntica a la que pierde la radiación. Resulta, por tanto, que la energía radiante manifiesta el doble carácter ondulatorio y corpúscular, mas—entiéndase bien—*nunca* actúa con los dos al mismo tiempo, sino *con uno u otro* exclusivamente.

La analogía profunda entre ambas clases de radiaciones aparece más clara todavía, admitiendo con Einstein que, de acuerdo con su teoría de la relatividad especial, toda energía equivale a una masa y recíprocamente, estando ligadas ambas magnitudes por la sencilla relación  $m = E/c^2$ , en que  $m$  designa la masa,  $E$  la energía y  $c$  la velocidad de la luz en el vacío

( $c = 3 \times 10^{10}$  cms/seg.). El postulado relativista de la identidad entre masa y energía no sólo implica que la materia representa una concentración energética enorme, sino también que el fotón debe poseer una cierta masa dinámica (dada por la fórmula  $\mu = h \cdot \nu / c^2$ ), en consonancia con el hecho experimental de la *presión de la luz* y con los fenómenos de "materialización" y "desmaterialización", importantísimos—según veremos—para nuestro objeto. Por lo que a la "materialización" se refiere, baste decir que cuando Anderson—en sus estudios sobre la radiación cósmica—descubrió el *positrón* (partícula elemental que sólo difiere del electrón ordinario en el signo de su carga), pudo preverse que toda radiación suficientemente *dura*, al actuar sobre núcleos atómicos pesados, podría engendrar un positrón y un electrón, ya que el postulado referente a la conservación de la carga eléctrica exige la formación de dos partículas. Conocida la masa del electrón (positivo o negativo)  $m = 9.1 \times 10^{-28}$  gr., la relación de Einstein, escrita en la forma:  $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = 2 mc^2$ , permite deducir que todos los fotones cuya longitud de onda,  $\lambda$ , sea inferior a  $1.21 \times 10^{-10}$  cms., serán capaces de engendrar un par electrónico. Por otro lado, dada la vida tan efímera del positrón, cuando choca con un electrón negativo desaparecen ambos, o, mejor aún, se "desmaterializan", dando lugar a *dos* fotones, cuya energía (unos  $10^6$  electrón-voltios = 1 MeV) equivale exactamente a la masa del par electrónico extinguido (1).

En fin, antes de abordar el estudio de la radiación cósmica, conviene conocer la manera de comportarse las radiaciones corpusculares y ondulatorias a su paso por la atmósfera terrestre. Estamos acostumbrados a pensar que esta última no supone obstáculo alguno para las radiaciones, porque la luz del sol y las estrellas llega a nosotros sin dificultad aparente. La realidad, sin embargo, es muy otra, pues sólo regiones muy limitadas del espectro tienen libre acceso hasta la superficie del planeta. En efecto, no sólo la *ionosfera* refleja (a unos 100 ó 200 kiló-

metros de altitud) las ondas hertzianas de la radiotelegrafía y radiotelefonía, sino también las ondas caloríficas son absorbidas, en gran parte, por el vapor acuoso y el anhídrido carbónico del aire; la capa de ozono (a una altitud aproximada de 40 kilómetros) detiene por completo los rayos ultravioleta de longitud de onda inferior a  $2.9 \times 10^{-5}$  cms., y, por último, los rayos X y  $\gamma$ , capaces de atravesar espesores notables de materia ligera, son detenidos totalmente por la atmósfera. En resumen, exceptuando una zona limitada, que comprende el infrarrojo, el espectro visible y el ultravioleta cercano, las demás radiaciones electromagnéticas son absorbidas por la atmósfera. Únicamente las de longitud de onda pequeñísima, o frecuencia muy elevada, pueden atravesar la envoltura gaseosa terrestre, la cual—para estos efectos—equivale a un espesor de 10 m. de agua o a 90 cms. de plomo.

Veamos ahora el comportamiento de las radiaciones corpusculares a su paso por la atmósfera. Para los cuerpos ordinarios, el poder de penetración de un móvil aumenta con la masa, siempre y cuando las velocidades sean comparables; así, una locomotora con velocidad de 20 metros por segundo, puede atravesar un muro no grueso, en tanto que una bala de fusil, con velocidad inicial de 700 m/seg., apenas si penetra en él. Por lo que respecta a los electrones y corpúsculos atómicos, su poder de penetración en el aire no excede algunos centímetros aun para velocidades de 100.000 km/seg. Una consecuencia importante para nuestro asunto es que sólo radiaciones de tipo ondulatorio y frecuencia muy elevada, o corpúsculos de velocidad *casi idéntica* a la de la luz, podrán atravesar la atmósfera terrestre.

#### Descubrimiento y caracteres más salientes de la radiación cósmica.

El descubrimiento de la radiación cósmica tuvo por origen las numerosas medidas hechas por diversos investigadores—apenas descubierta la radioactividad—a fin de averiguar la presencia y distribución sobre la corteza terrestre de los minerales de urano y thorio. El rasgo esencial que caracteriza los fenómenos radioactivos, la emisión continua de energía en forma de rayos  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , tiene por efecto—como es bien sabido—*ionizar* el aire circundante, provocando la descarga rápida de los electroscopios. Un dispositivo sencillo, utilizado ya por los primeros experimentadores en radioactividad, consta de una *cámara de ionización* y un electroscopio sensi-

(1) El cálculo se lleva a cabo, en forma sencilla, mediante la citada relación de Einstein, puesta en la forma  $e \frac{V}{300} = 2 mc^2$ , siendo  $e$  la carga eléctrica elemental (igual a  $4.8 \times 10^{-10}$  u. e. s.) y  $V$  la diferencia de potencial en voltios. El *electrón-voltio*, la unidad de energía usual en física atómica, cuyo valor es  $1.6 \cdot 10^{-12}$  erg., representa la energía que adquiere un electrón acelerado por la diferencia de potencial de *un* voltio.

ble (2), cuya descarga, en función del tiempo, se observa. Las medidas en cuestión permitieron comprobar que, aun protegida la cámara con gruesa chapa de plomo, y lejos de toda sustancia radioactiva, la descarga del electroscopio, si bien muy amortiguada, seguía produciéndose. Esta *descarga residual* fué atribuída, en un principio, a la acción de algún cuerpo radioactivo ignorado, cuyos rayos, muy penetrantes, serían capaces de atravesar espesores de materia considerables.

Para comprobar la exactitud de tal hipótesis, precisaba realizar medidas a diversas altitudes, sirviéndose de globos o aeroplanos, pues si el origen de la radiación era el indicado, al ascender en la atmósfera disminuiría la ionización, o, lo que es igual, la descarga de los electroscopios resultaría más lenta que al nivel del suelo. Ahora bien: las primeras observaciones en tal sentido, hechas en 1909 por los suizos Bergwitz y Goeckel, ascendiendo en globo hasta 4.000 metros, dieron a conocer que la ionización, en efecto, decrece al principio, mas a partir de los 400 metros aumenta de *modo continuo* con la altura. Resultado tan sorprendente fué confirmado, poco después, por el austríaco V. Hess, elevándose hasta 5.000 metros; Hess fué el primero en sugerir que la explicación más plausible del curioso fenómeno obligaba a suponer un origen extraterrestre a la radiación ultrapenetrante. En época posterior el alemán Kollhörster, alcanzando alturas de 9.000 metros, obtuvo resultados análogos, probando, además, que a semejante altitud la descarga de los electroscopios es *ocho o diez* veces más rápida que al nivel del suelo. Por otra parte, los norteamericanos Bowen, Millikan y Neher, utilizando electroscopios insensibles a las vibraciones y autorregistradores (tipo Neher), lanzados en globos-sondas hasta 16.000 metros, demostraron que la ionización alcanza un máximo a gran altura y luego descende. En fin, las medidas realizadas, de una parte, por Kollhörster en un glaciar alpino, y de otra, por Millikan y Camerón en un lago californiano de aguas exentas de toda radioactividad, aportaron la prueba concluyente de que la ionización *decrece* con el espesor de hielo o agua

(2) Una cámara de ionización está constituída, de ordinario, por un cilindro metálico con una varilla conductora, bien aislada, conectada al electroscopio y cargada a un potencial de algunos centenares de voltios, mientras el cilindro se une a tierra. Cuando en las cercanías del dispositivo hay sustancias radioactivas, el aire o gas de la cámara se ioniza, tornándose conductos y provocando la descarga del electroscopio.

atravesados, pero es *todavía apreciable* a profundidades que alcanzan varios centenares de metros.

Como las demás radiaciones hasta entonces conocidas eran incapaces de atravesar tales espesores de materia, los experimentos citados sólo podían interpretarse en forma adecuada, admitiendo con Hess que la radiación ultrapenetrante proviene de los espacios interestelares. Importa señalar, a este propósito, que ni el Sol ni la Vía Láctea parecen ser origen de la radiación cósmica, pues según observaciones llevadas a cabo en el hemisferio austral—donde la Vía Láctea permanece oculta durante varias horas—, la intensidad de la radiación es la *misma* de día o de noche y en ausencia o presencia de la Galaxia. Ello justifica que Millikan—con indudable acierto—la denominase *radiación cósmica*, y que el calificativo haya sido universalmente aceptado.

Veamos ahora los caracteres más salientes de la radiación cósmica, tan distinta a las demás en muchos aspectos. Por de pronto, los métodos utilizados en su estudio son más bien de observación que experimentales, pues la radiación no es controlable. Se puede, en efecto, variar las sustancias sobre que actúa, investigar sus efectos al paso por la atmósfera o sobre los materiales pesados de la corteza terrestre, y, asimismo, perfeccionar los dispositivos usados para estudiarla. Mas no cabe modificar la intensidad de la radiación para aumentar sus efectos, ni tampoco separar con facilidad uno cualquiera de los componentes que integran su espectro complejo.

Otro carácter destacado de la radiación cósmica lo constituye su *enorme energía*, superior a todo lo conocido. Hagamos notar, sin embargo, que con ello no se alude a la intensidad de la radiación—bien pequeña, según veremos en otro lugar—, sino a que el producto  $h \cdot \nu$ , expresado, por ejemplo, en electrón-voltios, toma en ella valores elevadísimos, en consonancia con su enorme frecuencia y gran poder de penetración.

Un rasgo importantísimo de la radiación cósmica es su *peculiar complejidad*, manifestada en el hecho de que su poder ionizante disminuye con el espesor de materia atravesado, según una ley no simplemente exponencial, y, sobre todo, por los varios efectos que sobre la radiación ejerce el campo magnético terrestre. El primero de tales efectos *geomagnéticos*, en orden cronológico, fué descubierto, en 1927, por el holandés Clay, durante un viaje marítimo de Amsterdam a Batavia, realizando continuas medidas a

bordo del navío que transportaba el equipo experimental adecuado. Las medidas pusieron de manifiesto que la intensidad de la radiación cósmica (expresada en número de iones formados por  $\text{cm}^3$  de aire) *variaba con la latitud geomagnética*, o sea, referida al Ecuador magnético y no al geográfico. Este resultado importantísimo, confirmado poco después por las medidas de otros eminentes investigadores (A. H. Compton, Kolhörster, Millikan y colaboradores, entre otros), puso de relieve que la intensidad de la radiación cósmica mínima en el Ecuador magnético aumenta hasta los  $50^\circ$  de latitud aproximadamente, a partir de la cual se estaciona. Ulteriores medidas de Millikan, Bowen y Neher (utilizando globos-sondos y electroscopios modelo Neher, con un dispositivo especial que permite cargarlos cada cuatro o cinco minutos), confirmaron el efecto geomagnético de latitud a grandes alturas, si bien la curva de ionización cambia entonces con la latitud magnética.

Antes de conocido el efecto de latitud, parecía indudable que la radiación cósmica sólo podía ser de tipo ondulatorio, dado su enorme poder penetrante. Con el descubrimiento de Clay las ideas cambiaron por completo, pues sólo estando constituida de partículas eléctricamente cargadas cabía explicar la acción del campo magnético terrestre sobre la radiación primaria, que penetra en la atmósfera. A base de este importantísimo resultado, y teniendo en cuenta la débil intensidad del campo magnético terrestre, las trayectorias, en arco de círculo, que el campo impone a las partículas, y, en fin, admitiendo un cierto valor para la energía de estas últimas, varios investigadores han abordado el estudio teórico del efecto de latitud. Los primeros cálculos del norteamericano Epstein, en 1930, indicaban que, para electrones de energía próxima a  $10^9$  eV, existía una latitud crítica por debajo de la cual los electrones eran detenidos, mientras que al norte de ella podían alcanzar la superficie terrestre. Tales cálculos, completados en 1933 por el belga Lemaitre y su colaborador Vallarta, mostraron, sin embargo, que existían *dos latitudes críticas* y no una; en la zona comprendida entre ambas latitudes, el número de electrones al nivel del suelo crece en dirección Norte, pero en el casquete polar, limitado por la latitud crítica más elevada, dicho número permanece constante. Otra consecuencia de los cálculos de Lemaitre es, que la extensión del casquete polar varía con la energía de las partículas y con la altitud, decreciendo con ésta, todo

ello en buen acuerdo con los resultados experimentales.

Otro efecto geomagnético interesante, llamado de *longitud*, fué también descubierto por Clay en 1934, al efectuar la travesía marítima Amsterdam-Batavia, una vez por Suez y otra doblando el Cabo de Buena Esperanza. El efecto de longitud—revelador de una ligera disimetría en el campo magnético terrestre, aun a grandes distancias—consiste en que las líneas de igual intensidad de la radiación transcurren, en general, paralelas al Ecuador magnético; pero en este último muestran una *depresión sensible*, la cual varía con la longitud del lugar.

Existe, por último, el *efecto geomagnético azimutal*, o también *Este-Oeste*. Para destacar su interés bastará decir que su existencia viene a ser la mejor prueba de que la radiación cósmica primaria está formada por partículas, *si no exclusivamente, al menos en su mayoría positivas*. A este importantísimo resultado se llegó, utilizando un dispositivo cuya parte esencial lo forman dos contadores tipo Geiger (3), montados uno sobre otro en un soporte vertical giratorio. Conocida la dirección (Sur a Norte) de las líneas de fuerza magnéticas en el campo terrestre, si las partículas son todas o en su mayoría positivas, cabe prever que un mayor número de ellas atravesará ambos contadores cuando el soporte esté inclinado al Oeste; en cambio, si las partículas fueran todas o en gran parte negativas, los contadores serían atravesados por un mayor número de ellas estando el soporte hacia el Este. Las observaciones de T. S. Johnson y de Alvarez y Compton, al probar la existencia del efecto azimutal, demostraron que la radiación cósmica primaria está constituida, *en gran parte o en su totalidad*, por partículas con carga eléctrica positiva. El efecto geomagnético Este-Oeste, confirmado por otros investigadores, alcanza su valor máximo en el Ecuador magnético, según demostró Johnson, uno de sus descubridores.

(3) Este admirable instrumento, mucho más sensible que el electroscopio, se basa en que la pequeña ionización producida por una sola partícula de gran energía (rayo cósmico, electrón o partícula  $\alpha$ ) se amplifica al engendrar por choque nuevos iones. El contador Geiger consta de un tubo metálico (20 cms. de longitud y 5 cms. de diámetro) que lleva coaxialmente un alambre conductor, tenso y bien aislado. Entre ambos se establece un potencial bastante alto y muy poco inferior al necesario para que salte la chispa. Cuando un rayo cósmico incide sobre el tubo, liberando electrones rápidos, éstos ionizan el aire y provocan la descarga, cuya corriente es comunicada a un electroscopio sensible con mecanismo registrador.

En conclusión a lo dicho sobre los varios efectos geomagnéticos, agregaremos que ellos constituyen sendos argumentos a favor del origen extraterrestre de la radiación cósmica. En efecto, sólo así cabe explicar de manera satisfactoria resultados experimentales sólidamente establecidos, gracias al empleo de métodos admirables por su finura y precisión.

#### Origen probable y constitución, según las ideas actuales, de la radiación cósmica.

A su entrada en la atmósfera terrestre—acabamos de decirlo—la radiación cósmica está formada, al menos en gran parte, por partículas de carga positiva. Durante años se creyó que eran electrones positivos, engendrados en lugares remotísimos del Universo. Ahora bien: la existencia predominante, o acaso exclusiva, de positrones en la radiación cósmica primaria resulta poco verosímil, y ello porque el único proceso natural que los origina, la “materialización”, produce al mismo tiempo electrones negativos, cuya ausencia en la radiación es un enigma. Mas si la radiación primaria no está formada de positrones, la hipótesis más plausible, admitida en la actualidad, supone que deben ser *protones*, dotados de gran energía y venidos acaso de nebulosas remotísimas. ¿Cuál es, sin embargo, el origen de su gran energía, o, mejor aún, el mecanismo que la produce? Hubo un tiempo en que, siguiendo a Millikan, se aceptaba que la energía de la radiación primaria era debida a procesos de “desmaterialización” ocurridos en las profundidades ignoradas del Cosmos. La hipótesis parecía verosímil, porque la “desmaterialización” de elementos químicos ligeros conduce a valores de la energía muy semejantes a los que entonces se atribuían a la radiación. Así, por ejemplo, un cálculo sencillo (4) muestra que en la “desmaterialización” del helio se liberarían  $3,7 \cdot 10^9$  eV, valor análogo a la energía me-

dia de la radiación cósmica primaria. Pero el avance en los métodos experimentales, habiendo puesto en evidencia energías de  $10^{15}$  eV, y acaso más elevadas todavía, la hipótesis de Millikan resulta inadmisibile, ya que un cálculo análogo al antes citado demuestra que la energía correspondiente a la “desmaterialización” del uranio (el núcleo atómico más pesado entre todos los estables conocidos) es de  $2,2 \cdot 10^{11}$  eV, muy inferior, por tanto, a las mencionadas. Por todo ello, la hipótesis más plausible, en la actualidad, supone que los protones de la radiación primaria adquieren su formidable energía por *aceleración en campos electrostáticos de extensión inmensa*, pero—según todas las probabilidades—de *escasa intensidad*. Respecto al origen y localización de tales campos, nada concreto se sabe, pues hasta se ignora si serán interestelares o intergalácticos.

La radiación primaria de gran energía, luego de penetrar en la atmósfera terrestre, provoca una serie de fenómenos peculiares y complejísimos, cuyo esclarecimiento ha ido lográndose, poco a poco, en estos últimos años. A ello han contribuído, en forma decisiva, ciertas teorías de eminentes físicos y, sobre todo, los resultados conseguidos por destacadísimos especialistas, utilizando la “cámara de Wilson” en campos magnéticos intensos (5). Algunos de estos resultados son, empero, tan esenciales y han contribuído en tal forma al esclarecimiento de la radiación cósmica, que hacen inexcusable tratar aquí de ellos brevemente.

Comencemos por lo relativo a los descubrimientos del *positrón* y *mesotrón*. Es muy interesante hacer notar que en ambos casos precedieron anticipaciones teóricas tan admirables como fecundas. Así, la existencia del positrón había sido prevista—en cierto modo—por el

(4) El cálculo se lleva a cabo merced a la fórmula de Einstein, varias veces citada:  $h \cdot v = mc^2$ , en que  $m$  designa ahora la masa de un solo átomo. En el caso del helio, cuya masa atómica es 4,00389, la masa de un átomo aislado se obtiene dividiendo este valor por  $6,023 \times 10^{23}$  (número de Avogadro), con lo que resulta:  $6,65 \times 10^{-24}$  gr. Multiplicando esta masa por  $9 \times 10^{20}$  (cuadrado de la velocidad de la luz), se tendrá la energía equivalente a un átomo de He.:  $5,99 \times 10^{-3}$  erg.; en fin, dividiendo por  $1,6 \times 10^{-12}$ , resulta el valor de la energía expresado en electrón-voltios:  $3,74 \times 10^9$ . Tratándose del uranio de masa atómica 238, un cálculo análogo da, para masa de un átomo,  $3,95 \times 10^{-22}$  gr., equivalente a la energía 0,356 erg., o bien, a  $2,2 \times 10^{11}$  eV.

(5) Esta cámara, prodigiosa invención del físico inglés C. T. R. Wilson, se ha revelado como insustituible en los estudios sobre la radiación cósmica. He aquí, brevemente expuesto, su fundamento: El recipiente cilíndrico que forma la cámara, y cuyo volumen puede variar al moverse un émbolo, contiene aire saturado de vapor acuoso; al descender el émbolo y producirse la expansión adiabática del aire, éste se enfría y sobresatura, dando lugar a una condensación en gotitas sobre los *iones gaseosos* existentes. En consecuencia, si una partícula ionizante cualquiera penetra en la cámara en el momento de la expansión, los iones producidos condensan sobre sí el vapor acuoso; iluminando fuertemente, sobre fondo oscuro, las gotitas de agua aparecen como una estela blanca, que, fotografiada, *visualiza* la trayectoria del proyectil atómico.

gran físico inglés Dirac, al aplicar al electrón la Mecánica ondulatoria, en su modalidad relativista, creada por él. Y, en efecto, estudiando la radiación cósmica con la cámara de Wilson, situada en campo magnético intenso, Anderson—de acuerdo con lo previsto—descubrió una partícula de carga positiva y masa electrónica, a la que denominó *positrón* (abreviatura de *positivo electrón*). A modo de explicación sucinta, digamos que, así como las trayectorias electrónicas en ausencia de campo magnético son rectilíneas, cuando el campo interviene las trayectorias son en arco de círculo, y ello sea cualquiera la carga; pero siendo la curvatura necesariamente distinta para los electrones positivos y negativos, la aparición de una estela curvada en sentido contrario a las bien conocidas de los electrones pudo ser interpretado por Anderson con facilidad. Aunque el positrón sea indudablemente una partícula elemental, en la actualidad no se admite que pueda formar parte de los núcleos atómicos. Ciertamente que los *radioelementos*, descubiertos por I. Curie y F. Joliot, emiten positrones nucleares; pero así como los fotones no preexisten en la periferia atómica, apareciendo en el momento de la emisión, así los positrones de los *radioelementos* son engendrados en procesos intranucleares, donde un protón se convierte en neutrón. La misma teoría de Dirac, ya citada, preveía la inestabilidad de los positrones, dada su facilidad para chocar con los electrones ordinarios, tan abundantes en la periferia atómica. Este importantísimo fenómeno de la “desmaterialización”, a que hemos aludido en otro lugar, ha sido confirmado por las maravillosas experiencias de los franceses F. Joliot y J. Thibaud, entre otros. Lo mismo que el electrón ordinario, el positrón provoca fenómenos de ionización o emisión de fotones al actuar sobre los electrones periféricos de los átomos, propiedad a la que debe el ser *visible* en la cámara de Wilson. Ambas clases de electrones—positivos y negativos—ejercen una acción muy peculiar cuando atraviesan el campo eléctrico muy intenso que rodea los núcleos atómicos. Al ser frenado o acelerado el electrón por el campo, se produce la emisión de rayos  $\gamma$ , los cuales, a su vez, por “materialización”, en presencia de núcleos pesados engendran un par electrónico, y así sucesivamente. Tal es el origen del *proceso en cascada o reveladores*, cuya existencia ha paeado de manifiesto la cámara de Wilson, aplicada al estudio de la radiación cósmica.

Pasemos ahora al *mesotrón*, otro de los hallazgos sensacionales logrados en el estudio de

los rayos cósmicos. Las anticipaciones teóricas, en este caso, se deben al gran físico japonés Yukawa, y ello como consecuencia de su teoría sobre las fuerzas nucleares. Así como las acciones entre cargas eléctricas se explican adecuadamente en la teoría del campo electromagnético, desarrollada por Faraday y Maxwell, así también las acciones entre los constituyentes de los núcleos atómicos cabe explicarlas—según Yukawa—admitiendo que cada *nucleón* (los protones y neutrones que integran los núcleos, reciben ahora el nombre de *nucleones*) posee un campo eléctrico intenso que desarrolla fuerzas potentísimas cuando otra partícula nuclear penetra en él. La analogía en que Yukawa fundó su teoría llevaba a la conclusión de que, lo mismo que los fotones transportan la energía del campo electromagnético, las partículas  $\gamma$  (de carga positiva o negativa), ideadas por el físico japonés, al permitir la transformación recíproca de neutrones en protones, explicarían las fuerzas nucleares. Su alcance extraordinariamente pequeño (alrededor de  $10^{-13}$  cms.) y el valor enorme de tales fuerzas las diferencian por completo de las otras conocidas. Resulta admirable y sorprendente que las principales características asignadas por Yukawa a sus partículas: masa unas 200 veces mayor que la del electrón, carga positiva o negativa y vida media muy efímera (alrededor de  $10^{-7}$  seg.), concuerden con las del *mesotrón*, descubierto en 1937 por Anderson y Neddermeyer, estudiando la radiación cósmica con cámara de Wilson en campo magnético intenso y provista en su interior de una lámina de plomo a guisa de diafragma. Ulteriores investigaciones han venido a demostrar que la masa probable del *mesotrón* (término que significa *electrón pesado*) es 180 veces la del electrón ordinario, que su carga es positiva o negativa y, en fin, que su vida media es muy efímera, alrededor de dos microsegundos. De acuerdo asimismo con las previsiones de Yukawa, e. *mesotrón* se desintegra, dando un electrón y una partícula neutra, acaso el neutrino (6); la prueba directa de ello se debe a los ingleses Williams y Roberts, quienes, utilizando la cámara de Wilson, obtuvieron una fotografía donde aparece la estela de un *mesotrón* y, emergiendo de ella, otra más fina de un electrón.

Una grave dificultad de la teoría de Yukawa es que no explica la *escasa o nula interacción*

(6) Partícula hipotética de masa en reposo *nula y sin carga*, postulada por W. Pauli y no identificada todavía.

de los mesotrones y el campo eléctrico nuclear. Esta dificultad, que pone en grave aprieto la teoría del físico japonés referente a las fuerzas nucleares, constituye un enigma para la física atómica actual. Con todo, es indudable que los mesotrones intervienen en los núcleos atómicos, como lo prueba el hecho observado en la cámara de Wilson, de que ciertos rayos cósmicos, al actuar sobre el nitrógeno del aire, provocan la expulsión de numerosos mesotrones. Debido a su carga eléctrica, éstos provocan fenómenos de ionización, o bien, por impacto directo, arrancan a los átomos electrones de gran energía, los cuales originan luego *procesos en cascada*.

Tomando por base las nociones precedentes, veamos cómo se supone actualmente constituida la radiación cósmica. Además de la radiación primaria, formada por protones de gran energía, es usual distinguir en la radiación que atraviesa la atmósfera una componente *dura*, capaz de atravesar espesores equivalentes a 30 m. de agua, y otra *blanda*, que es detenida por pequeños espesores de plomo. Entre la radiación primaria y las dos componentes existe una relación genética, aún no esclarecida por completo, pero sí lo bastante para dar cuenta satisfactoria de los fenómenos tan complejos observados. He aquí cómo las cosas suceden, en opinión de eminentes investigadores: los protones de la radiación primaria, al actuar sobre los núcleos atómicos, engendran uno o más mesotrones, según que el impacto tenga lugar sobre el hidrógeno o sobre otros elementos. Sin embargo, a veces aparecen cascadas mesotrónicas, según han demostrado Janossy, Rochester y otros, empleando contadores de Geiger funcionando en *coincidencias múltiples*, y, más claramente aún, Rochester con la cámara de Wilson. La teoría más aceptada en la actualidad, debida a Hamilton, Heitler y Peng, explica la aparición de mesotrones aislados en los choques inelásticos de un protón con otro o con un neutrón, mientras que si el choque tiene lugar con núcleos atómicos pesados, aparece una cascada mesotrónica. Ahora bien: dada la inestabilidad de los mesotrones, al engendrarse en la alta atmósfera y penetrar hasta la superficie terrestre, o se desintegran, o, por impacto directo con electrones, producen los "reveladores" ya citados. Sólo así cabe explicar la existencia de electrones bajo grandes espesores de plomo, o a grandes profundidades bajo tierra y agua. Resulta, pues, que la componente *dura* de la radiación cósmica está formada, en su mayor parte, de mesotrones; sin embargo, en la actualidad se admite que una ínfima parte de

dicha componente debe consistir de protones, neutrones y acaso de alguna otra partícula neutra más penetrante, no identificada todavía.

La componente *blanda* de la radiación se engendra en un proceso de segundo orden (el primero es la formación de mesotrones), que, según lo dicho antes, cabe esquematizar en la forma siguiente: Cuando un electrón (positivo o negativo) de gran energía—engendrado por la desintegración o impacto de mesotrones—pasa muy cerca de un núcleo atómico, se produce la emisión de rayos  $\gamma$ , los cuales, a su vez, por "materialización" en presencia de núcleos pesados, engendran dos electrones; éstos, a su vez, si pasan muy cerca de núcleos atómicos, pueden originar más rayos  $\gamma$ ; ellos, a su vez, nuevos pares electrónicos, y así sucesivamente, en un proceso de *multiplicación en cascada* muy rápido. Como la energía del electrón primitivo se va subdividiendo, el fenómeno alcanza un máximo, pues llega un momento en que los fotones y electrones serán incapaces de continuarlo. La existencia real de "reveladores" de gran extensión (hasta más de 100 metros cuadrados), descubierta por el francés P. Auger y colaboradores, ha sido demostrada por Lovell y Wilson con dos cámaras de condensación provistas de un dispositivo especial que sólo actúa cuando un gran número de electrones atraviesa simultáneamente ambas cámaras. En esta clase de "reveladores" se cree intervienen más de un millón de electrones, correspondiendo a energías de  $10^{15}$  eV o aún mayores. La interpretación teórica de los "reveladores" ha sido hecha, de una parte, por Oppenheimer, y de otra, por Bethe y Heitler, tomando por base el fenómeno de "materialización"; en concordancia con la teoría, la aparición de "reveladores" es más frecuente en la alta atmósfera que al nivel del suelo.

Los fenómenos a que da lugar la radiación cósmica, a través de la atmósfera terrestre y bajo el agua o la superficie del planeta, son tan complejos, sin embargo, que aún exigirán muchos esfuerzos de todo orden para su esclarecimiento completo. En la actualidad se proyectan vuelos estratosféricos en aviones o globos especiales, equipados con cámaras de Wilson y contadores Geiger muy ligeros, a fin de explorar la alta atmósfera. Con lo dicho bastará para dar una idea de las dificultades extraordinarias que han de superar los experimentadores y el interés especialísimo de las futuras investigaciones.

¿Es posible utilizar, en forma aprovechable, la gran energía de la radiación cósmica?

Varias veces ya, en el curso de estas páginas, nos hemos referido al enorme poder penetrante y gran energía de la radiación cósmica. Ambas magnitudes están ligadas, sin duda alguna, entre sí; pero habiendo fracasado—por inaplicable—la fórmula tan utilizada para la radiación  $\alpha$ , se imponía la medida directa de la energía correspondiente a la radiación cósmica. La cámara de Wilson resolvió, una vez más, la dificultad. En presencia de un campo magnético intenso, perpendicular a la trayectoria de las partículas, éstas describen arcos de círculo, cuyo radio puede determinarse fotografiando la estela que las partículas producen en la cámara. La teoría permite deducir, con toda sencillez, que el producto del campo magnético por el radio de curvatura en cuestión mide la *cantidad de movimiento* (producto de la masa por la velocidad) de la partícula. En fin, conocidas la masa y la carga de esta última, será posible calcular la velocidad y, por tanto, la energía. Tratándose de los procesos en cascada ordinarios, o de los *excepcionales* que intervienen en el efecto Auger, la energía total se obtendrá sumando las correspondientes a cada una de las estelas. De esta suerte se ha logrado averiguar que la *energía media* de las partículas primarias de la radiación cósmica vale  $\sim 10^{10}$  eV, y la energía mínima,  $\sim 2 \cdot 10^9$  eV. Entre ambos valores existe un espectro energético continuo, habiendo también partículas cuya energía alcanza  $10^{15}$  eV o más.

Ya indicamos en otro lugar que ninguna otra radiación posee energías de este orden, pues ni aun "desmaterializando" los núcleos de uranio (el elemento estable más pesado) se alcanzan valores tan inmensos. Ciertamente que en este aspecto la radiación cósmica no es comparable con nada; pero en cambio, por lo que a *intensidad* se refiere, las cosas varían. Por intensidad de una radiación se entiende la energía que transporta por segundo a través de un centímetro cuadrado. En el caso de los rayos cósmicos, su medida podrá lograrse midiendo el número de *pares iónicos* que engendra en el aire desde su entrada en la atmósfera hasta el nivel del suelo. Estas medidas han sido llevadas a cabo mediante la cámara de ionización y operando a diversas alturas (desde la superficie terrestre hasta cerca del límite de la atmósfera). La representación gráfica en un sistema de coordenadas cartesianas, tomando en *ordenadas* el número de iones por

segundo y centímetro cúbico de aire (referido a condiciones normales) y en *abscisas* las alturas correspondientes, expresadas en metros de agua, permite averiguar, por integración gráfica, el número de iones que se busca. En fin: multiplicando este número por el potencial, en voltios, necesario para producir un *par iónico* en el aire, se obtiene la intensidad media de la radiación cósmica.

Pues bien: en lo que a la intensidad se refiere, los rayos cósmicos se hallan muy por debajo de la radiación solar. Como se sabe, la intensidad de esta última vale, aproximadamente, dos calorías por minuto y centímetro cuadrado de la superficie terrestre; teniendo en cuenta el valor de la caloría,  $4,186 \cdot 10^7$  erg., se deduce con facilidad que la energía por centímetro cuadrado y segundo procedente del Sol es de  $1,4 \cdot 10^6$  erg. En cambio, tratándose de la radiación cósmica, las medidas de ionización indican que la energía es de  $2,5 \cdot 10^9$  eV, o bien (multiplicando por  $1,6 \cdot 10^{-12}$ , valor del electrón-voltio),  $4 \cdot 10^{-3}$  erg. En resumen: la intensidad de la radiación solar es unos *300 millones de veces mayor* que la correspondiente a la radiación cósmica.

A base de lo anterior, es fácil imaginar *si será o no posible utilizar en forma aprovechable* la gran energía de la radiación cósmica. En el estado actual de nuestros conocimientos, dicha utilización no parece realizable, pues si la energía solar—enormemente más intensa—no ha sido casi utilizada hasta ahora directamente por el hombre, a menos que se descubra algún proceso *cumulativo* especial, el aprovechamiento de la energía cósmica parece en la actualidad irrealizable. Acaso llegue un día, es cierto, en que explosiones nucleares, como las descubiertas por Auger y sus continuadores, puedan ser utilizadas para *iniciar* grandes procesos energéticos; mas, sin excluir tal posibilidad u otras que puedan surgir, la energía de la radiación cósmica no es por ahora utilizable.

Con todo, los estudios de la radiación cósmica prosiguen con renovado ardor, por las numerosas e importantísimas cuestiones que plantea. Así, el origen de la radiación misma suscita problemas de gran interés para la Astrofísica y la Cosmología. De otra parte, las enormes frecuencias o pequeñísimas longitudes de onda que en la radiación cósmica intervienen, abren perspectivas extraordinarias a la física nuclear, en conexión con el principio de *incertidumbre*, formulado hace años por el gran físico alemán W. Heisenberg.