

CIEN AÑOS DE RAYOS CÓSMICOS

MANUEL AGUILAR BENÍTEZ DE LUGO*

* Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Director del Departamento de Investigación Básica del CIEMAT

“Todos los hombres, por naturaleza, ansían conocer”

Aristóteles (384 ac–322 ac)

RESUMEN

Los rayos cósmicos bombardean constantemente la superficie de nuestro planeta. Proceden de distintas regiones del Universo, son acelerados por mecanismos no totalmente comprendidos y alcanzan energías que superan en varios órdenes de magnitud las que se consiguen en los más potentes aceleradores de partículas.

Desde su descubrimiento en 1912 por el físico austriaco V.F. Hess y hasta el descubrimiento del anti-protón en 1955, en un acelerador de partículas, la radiación cósmica ha sido el instrumento científico más importante para avanzar en el estudio de las propiedades de las partículas subatómicas o elementales. En los últimos años asistimos a un renovado interés en el estudio de la radiación cósmica, utilizando sistemas de detección de dimensiones y complejidad creciente.

En este trabajo se describirán los hitos más importantes del estudio de la radiación cósmica, una selección de las técnicas empleadas y algunos resultados relevantes.

INTRODUCCIÓN

¿Qué son los rayos cósmicos? La respuesta a esta cuestión es, en principio, sencilla. Esta denominación engloba todo tipo de partículas de materia y radiación que llega a la tierra procedente del espacio exterior, del

sol, de cuerpos celestes en nuestra galaxia o de otras galaxias. Esta definición genérica permite incluir la radiación electromagnética en todas sus longitudes de onda, los neutrinos, las ondas gravitacionales y, finalmente, los rayos cósmicos eléctricamente cargados. Estos son los electrones, positrones, muones y núcleos atómicos, que van desde el núcleo de hidrógeno, el protón, hasta el de hierro y serán el objeto principal de este trabajo.

Es innegable que casi todo lo que conocemos acerca del universo procede del estudio de la radiación electromagnética a diversas frecuencias y muy especialmente en el rango visible del espectro. La disciplina científica que se ocupa del estudio de esta componente de la radiación electromagnética es la Astronomía, una ciencia milenaria que se ha desarrollado progresivamente y de manera muy notable desde el siglo XVI. El descubrimiento de la radiación de fondo de microondas y sus anisotropías, de los pulsares y pulsares binarios, de la existencia de fuentes emisoras de rayos X, de la expansión acelerada del Universo, son algunos hitos destacados de la actividad realizada en este campo de la investigación en las últimas décadas.

El estudio de los neutrinos procedentes del sol, o producidos como resultado de las colisiones de protones procedentes del espacio exterior con la atmósfera, ha tenido importancia crucial para entender los mecanismos de generación de energía en el interior de las estrellas. Por otra parte, estos estudios han sido

decisivos para poner de manifiesto que los neutrinos son partículas de masa no nula, una constatación de gran relevancia para la Física de Partículas Elementales.

El estudio de las ondas gravitacionales progresa con lentitud, dada la dificultad de su experimentación y la complejidad de su fenomenología, pero se espera que en el futuro tenga relevancia extraordinaria en Cosmología. La observación directa de las ondas gravitacionales permitirá verificar que el gravitón tiene masa nula y espín igual a 2, verificar que las fuerzas que ejercen son perpendiculares a la dirección de movimiento, confirmar la existencia de agujeros negros y comprobar la predicción de que la colisión de agujeros negros genera violentas pulsaciones en la curvatura del espacio-tiempo.

Como veremos más adelante, el estudio de la componente cargada de la radiación cósmica, los denominados rayos cósmicos, ha sido determinante para la Física de Partículas Elementales, aunque desde el punto de vista astrofísico ha propiciado, hasta la fecha, más preguntas que respuestas.

En los últimos años se ha desarrollado una nueva disciplina científica, la Astrofísica de Partículas, frontera entre la Física de Partículas Elementales, la Astrofísica de Altas Energías y la Cosmología, que aborda cuestiones fascinantes, entre ellas:

1. ¿De qué está hecho el Universo? ¿Qué es la materia oscura? ¿Qué es la energía oscura?
2. ¿Tiene el protón vida media finita o es infinitamente estable?
3. ¿Cuáles son las propiedades de los neutrinos? ¿Qué papel juegan en la evolución cósmica?
4. ¿Qué nos dicen los neutrinos acerca del interior del Sol y de la Tierra, y acerca de las explosiones de supernovas?
5. ¿Cuál es el origen de los rayos cósmicos? ¿Qué aspecto tiene el cielo a energías extremas?
6. ¿Qué nos van a enseñar las ondas gravitacionales acerca de los procesos cósmicos violentos y acerca de la gravedad?

y que, en su faceta experimental, se concentra en el estudio de la información contenida en los rayos cósmicos,

también denominados mensajeros celestes. Algunas de estas cuestiones serán examinadas brevemente en este trabajo.

EL DESCUBRIMIENTO DE LOS RAYOS CÓSMICOS

Hacia 1785 el físico e ingeniero francés C.A. Coulomb (1736–1806), **Figura 1**, trataba de medir con balanzas de torsión la magnitud de las atracciones / repulsiones entre cargas eléctricas dispuestas en pequeñas esferas conductoras montadas sobre soportes aislantes. En el curso de estas medidas, Coulomb observó que la esferas se descargaban sin razón aparente. A pesar de la precariedad de las medidas, las leyes de atracción entre cargas eléctricas derivadas por Coulomb fueron aceptadas, aunque quedase pendiente una explicación rigurosa del origen de las descargas. La explicación aventurada por Coulomb, responsabilizando a las colisiones de moléculas de aire con las esferas, resultó poco convincente y fue desechada posteriormente con argumentos de la teoría cinética de gases. El físico y químico británico M. Faraday (1791–1867), **Figura 2**, descubridor entre otros fenómenos de la inducción electromagnética, introdujo el concepto de ionización y también especuló sobre las causas posibles de los fenómenos de descarga observados por Coulomb. En cualquier caso, hasta finales del siglo XIX y como consecuencia del progreso en el desarrollo de instrumentación, no se retomaron las investigaciones sobre la causa de las descargas en las esferas de Coulomb. Este renovado interés estaba, de



Figura 1. C.A. Coulomb (1736–1806)

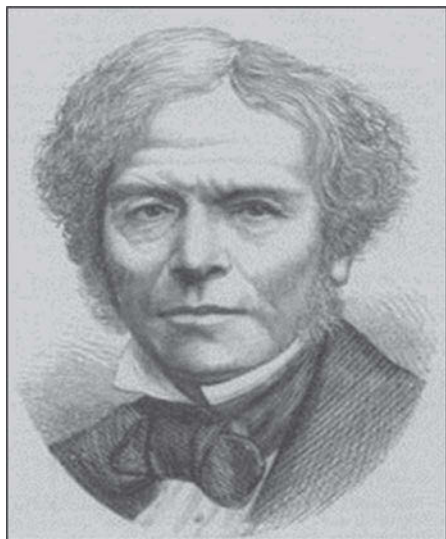


Figura 1. M. Faraday (1791–1867)



Figura 4. C. T. R. Wilson (1869–1959)

hecho, motivado por el descubrimiento de la radioactividad en 1896 por el físico francés A.H. Becquerel (1852–1908), **Figura 3**, Premio Nobel de Física en 1903 compartido con M. Sklodowska Curie (1867–1934) y P. Curie (1859–1906). Los físicos alemanes J. Elster y H. Geitel y el británico C. T. R. Wilson (1869–1959), **Figura 4**, Premio Nobel de Física en 1927, por la invención de la cámara de niebla en 1911, compartido con A. Compton (1892–1962), postularon que un agente, aún no identificado, provocaba la ionización del aire haciéndolo conductor eléctrico.

La noción de ionización, anterior a las investigaciones mencionadas, se refería a un fenómeno de natu-

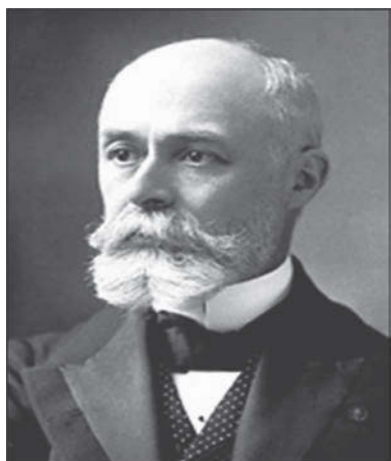


Figura 3. A.H. Becquerel (1852–1908)

raleza desconocida que permitía a la materia neutra disociarse en componentes con cargas eléctricas opuestas y que se había observado estudiando el comportamiento de los gases en dispositivos con electrodos cargados eléctricamente. Desde 1897 se sabía que la componente negativa estaba formada por electrones, las partículas que el físico británico J. J. Thomson (1856–1949), Premio Nobel de Física en 1906, acababa de descubrir. Es tal vez apropiado recordar que, a principios del siglo XX, muchos científicos tenían reticencias para admitir que los átomos pudiesen descomponerse en componentes más elementales e incluso algunos aún dudaban de la propia existencia de los átomos.

Una vez admitida la hipótesis de que la ionización era la causa de la conductividad eléctrica del aire quedaba por identificar su origen. Afortunadamente, en la segunda mitad del siglo XIX se habían descubierto distintos tipos de radiación capaces de atravesar la materia y provocar en gases fenómenos de ionización. Los rayos catódicos, descubiertos en 1859 por el matemático y físico alemán J. Plücker (1801–1868) y posteriormente identificados por Thomson como corrientes de electrones, con reducido poder de penetración, no parecían candidatos verosímiles. Los rayos X, descubiertos por W. Röntgen (1845–1923), Premio Nobel de Física en 1901, parecían una opción posible. La radioactividad, descubierta, como ya se ha mencionado, por Becquerel y estudiada, entre otros, por los Curie y por E. Rutherford (1871–1937), **Figura 5**,



Figura 5. E. Rutherford (1871–1937)

Premio Nobel de Química en 1908, ofrecía nuevas posibilidades. Rutherford sugirió que las distintas variedades de radiación descubiertas (a, b, g) podían atravesar la materia e ionizar el aire, motivando a investigadores de su entorno, entre ellos a Wilson, a detectar la presencia de materiales radioactivos en las proximidades de sus instrumentos de medida.

Un instrumento pionero desarrollado por Wilson en 1901 para estas exploraciones fue la célebre cámara de ionización, **Figura 6**, que permitía medir la pérdida de

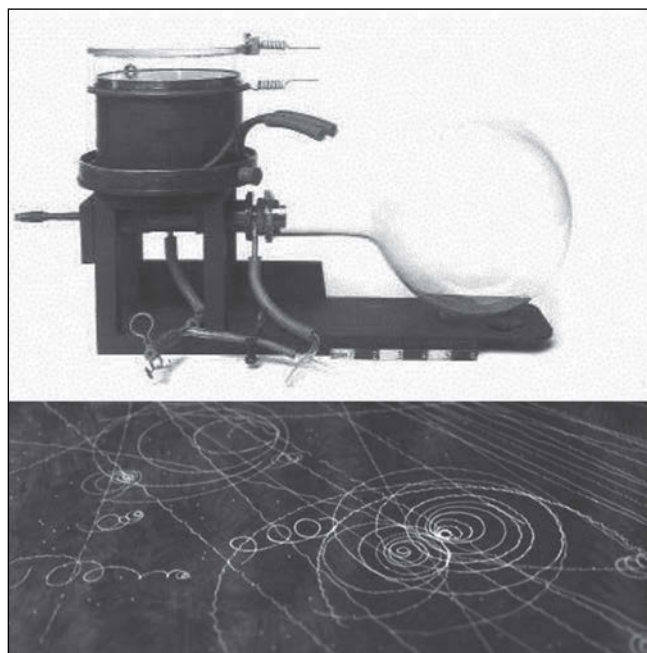


Figura 6. Cámara de Wilson

potencial entre dos electrodos con ayuda de un electrómetro y deducir el número de iones formados en el proceso de ionización. Posteriormente, T. Wulf y W. Kohlhörster desarrollarían instrumentación más avanzada que permitiría realizar medidas más precisas con diferentes configuraciones operativas. Inicialmente, estas medidas confirmaron que las descargas se producían espontáneamente en presencia de materiales radiactivos, aunque, posteriormente, resultó evidente que el fenómeno de ionización persistía incluso en ausencia de este tipo de sustancias. La conclusión era que existía una radiación de fondo que presumiblemente tenía su origen de la radioactividad del suelo.

En 1901, Wilson aventuró que la ionización espontánea podría deberse a una radiación penetrante de origen cósmico, pero no llegó a proponer un programa experimental para comprobar esta hipótesis. Otros investigadores emprendieron diversas campañas de medidas para tratar de aclarar el origen de las observaciones, detectando una cierta, aunque ambigua, dependencia con la altitud.

Un primer paso, aunque insuficiente, apuntando en la buena dirección lo realizó el científico suizo A. Gockel (1860–1927), **Figura 7**, quien, en 1910, realizó diversas ascensiones a 1100, 1700, 1900 y 2800 m con cámaras de ionización a bordo de globos



Figura 7. A. Gockel (1860–1927)



Figura 8. V.F. Hess (1883–1964)

sonda. Las medidas realizadas en las proximidades del lago de Zürich y, posteriormente, cerca de Berna exhibían fluctuaciones importantes que no permitían extraer conclusiones fiables. En cualquier caso, Gockel aventuró que *“la radiación debía proceder bien de la atmósfera o de un cuerpo celeste otro que la tierra”*.

Sería finalmente el físico austriaco V.F. Hess (1883–1964), **Figura 8**, quien, en 1911 y 1912, realizaría los experimentos cruciales que pondrían de manifiesto de forma concluyente la existencia de una



Figura 9. V.F. Hess a bordo de un globo sonda (1912)

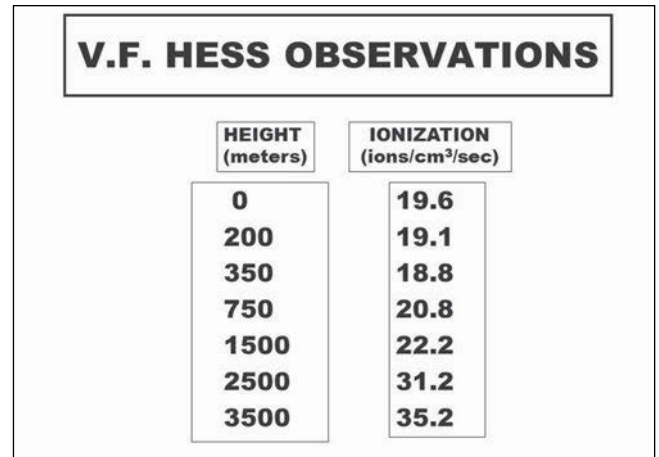


Figura 10. Medidas de ionización en función de la altitud realizadas por V.F. Hess

radiación procedente del espacio exterior. Hess utilizó simultáneamente varios electros copios y realizó, en una primera fase, hasta 7 ascensiones (una coincidente con un eclipse de sol) a bordo de globos sonda que llegaron hasta una altitud de 4800 m, **Figura 9**. Las medidas precisas señalaban sin ambigüedad que la ionización disminuía entre 1000 y 2000 m para, a continuación aumentar rápidamente con la altitud, **Figura 10**.

Hess concluía en su célebre artículo publicado en *Physik, Zeitschrift, XIII, 1912*, lo siguiente: *“Los resultados de estas observaciones parecen poder interpretarse admitiendo sencillamente que una radiación con gran poder de penetración procede de la parte superior de la atmósfera y, aunque progresivamente*



Figura 11. W. Kolhörster (1887–1946)

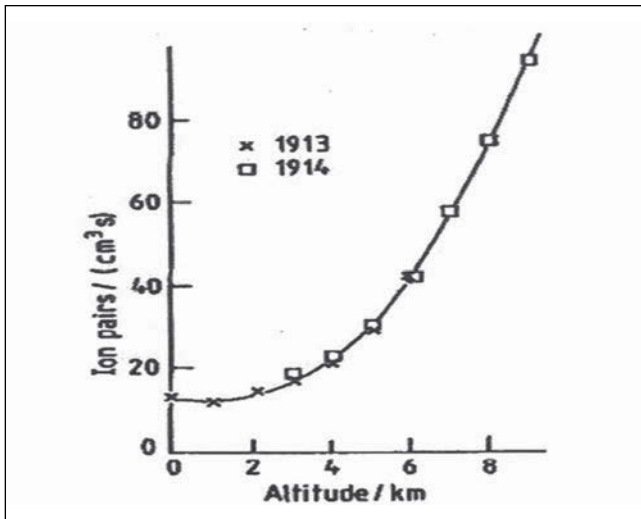


Figura 12. Medidas de ionización en función de la altitud realizadas por W. Kolhörster

atenuada por ésta, produce, incluso en las zonas más bajas, una parte de la ionización observada en las cámaras cerradas. La intensidad de esta radiación parece estar afectada por pequeñas variaciones aleatorias”.

Los resultados obtenidos por Hess fueron confirmados en el año 1914 por el físico alemán W. Kolhörster (1887–1946), **Figura 11**, que consiguió ascender hasta 9600 m. A esta altitud el incremento observado en la ionización era un factor 8 en relación con la medida en superficie, **Figura 12**.

Una vez establecida la existencia de una radiación procedente del espacio exterior aún quedaban numerosas cuestiones por aclarar en relación con su naturaleza. En particular debía tratarse de una radiación de muy alta energía y gran poder de penetración para poder atravesar una atmósfera de 100 km de espesor. ¿Procedía de la parte superior de la atmósfera, del sistema solar, del espacio interestelar, etc? Las medidas realizadas durante los años 1910–1914 no parecían ser suficientes para establecer un patrón bien definido y eran incapaces de validar las explicaciones propuestas, muchas de ellas bastantes exóticas. Desgraciadamente, la Primera Guerra Mundial interrumpió las investigaciones en marcha que no se reanudarían hasta los años 20.

En la década de los años 20 el célebre físico norteamericano R. A. Millikan (1868–1953), **Figura 13**,

Premio Nobel de Física en 1923 por su trabajo sobre la carga elemental de electricidad y el efecto fotoeléctrico, entró en la escena de los rayos cósmicos. Con la ayuda de importantes recursos materiales construyó electrómetros muy precisos que le permitieron realizar en California y diversos países andinos espectaculares campañas de medidas continuas de la ionización en función de la altitud, presión y temperatura. Algunos datos se obtuvieron con sondas que llegaron a alcanzar 15000 m de altitud. Estas medidas confirmaron las realizadas por Hess y Kolhörster y concluyeron que el origen de la radiación observada no se encontraba en la atmósfera de la tierra.

Como resultado de una campaña de prensa tendenciosa, que bautizó la radiación cósmica procedente del espacio exterior como rayos de Millikan, se generó una agria polémica entre Hess y Millikan. En un artículo publicado en *Physik, Zeitschrift* en 1926, Hess expresaría con rotunda claridad su punto de vista:

“En lo que concierne a la publicación de Millikan, ya mencionada, querría hacer notar que Millikan hace un relato acerca del descubrimiento de los rayos cósmicos que podría fácilmente ser malinterpretado.

La determinación reciente debida a Millikan y colaboradores sobre el alto poder de penetración de los rayos cósmicos ha brindado una oportunidad a distintas revistas científicas americanas como “Science” y “Scientific Monthly” para introducir el término “Rayos de Millikan”. El trabajo de Millikan es solo una confirmación y ampliación de los resultados obtenidos por



Figura 13. R.A. Millikan (1868–1953)

Gockel, Kohlhorster y yo mismo entre 1910 y 1913 utilizando globos sonda para la medida de estos rayos. Rechazar reconocer nuestro trabajo es un error y no está justificado.”

En 1936 la Academia Sueca reconoció el trabajo pionero de V. F. Hess concediéndole el Premio Nobel de Física por el descubrimiento de los rayos cósmicos, nombre que había propuesto años antes Millikan. Hess compartió el galardón con el físico estadounidense C. D. Anderson (1905–1991) que en 1932 había descubierto el positrón, la antipartícula del electrón, estudiando precisamente los rayos cósmicos.

Una vez consensuado el origen no atmosférico de la radiación cósmica, quedaban por resolver cuestiones esenciales. ¿Eran los rayos cósmicos partículas neutras o cargadas?, ¿Procedían de un fuente única o de un proceso difuso?, ¿Cómo obtenían su energía?. Millikan sugirió que los rayos cósmicos eran el resultado de la formación de núcleos complejos a partir de protones y electrones primarios. Este proceso de formación de núcleos complejos se suponía que tenía lugar en todo el Universo, liberando la energía de enlace en forma de radiación γ con longitudes de onda del orden de 10^{-4} – 10^{-5} nm. En la hipótesis de que la radiación cósmica fuese neutra, ésta no debería ser afectada por el campo magnético terrestre. Esta propuesta fue contestada por diversos físicos teóricos, entre ellos A. Compton, **Figura 14**, Premio Nobel de Física por el descubrimiento del efecto que lleva su



Figura 14. A. Compton (1892–1962)

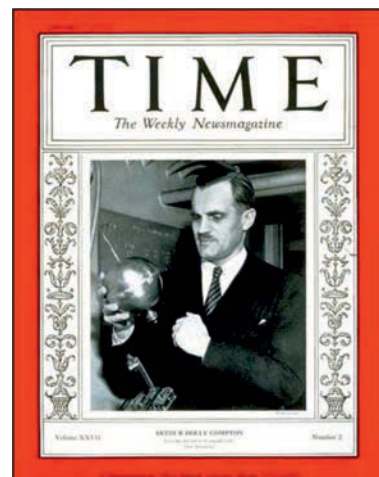


Figura 15. Portada de Time Magazine (31 diciembre 1932)

nombre. Compton demostró, en un estudio geográfico de los rayos cósmicos basado en medidas realizadas por diversos grupos, que la intensidad de la radiación cósmica dependía de la latitud magnética y concluyó que los rayos cósmicos eran predominantemente partículas cargadas (protones, electrones o núcleos atómicos). La polémica científica entre Millikan y Compton llegó a su punto álgido en el congreso de la Asociación Americana para el Avance de las Ciencias en 1932 y fue portada del New York Times y Time Magazine, **Figura 15**.

El párrafo siguiente, extraído del artículo “*Millikan replica vehementemente a Compton en la disputa sobre rayos cósmicos*”, firmado por W. Lawrence en el New York Times del 31 de diciembre de 1932, revela la intensidad y pasión del debate científico:

“En una atmósfera sobrecargada con drama, en la que el elemento humano no estaba en absoluto ausente, los dos protagonistas presentaron sus puntos de vista con la vehemencia y el fervor de aquellos debates teóricos en épocas pasadas cuando hombres instruidos disputaban acerca del número de ángeles que podían bailar sobre el extremo de una aguja. El Dr. Millikan particularmente roció su conferencia con observaciones directamente dirigidas al ingenio científico de su antagonista. Obviamente hubo frialdad entre los dos hombres al terminar el debate.”

A pesar de la intensa actividad investigadora en rayos cósmicos durante los años 20, era evidente que su avance estaba limitado por las prestaciones de la instrumentación disponible. Aunque las cámaras de

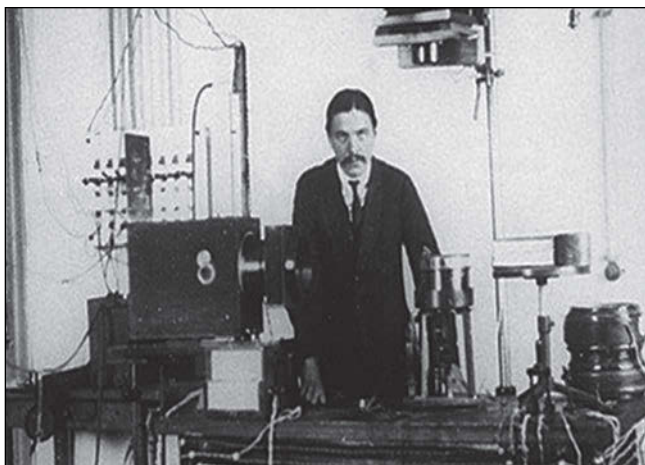


Figura 16. D. Skobelzyn (1892–1990)

ionización eran cada vez más sensibles y fiables, no permitían decidir si la ionización observada se debía a partículas neutras o cargadas. Dos desarrollos instrumentales novedosos, el contador de Geiger–Müller y la cámara de niebla, serían esenciales para el avance de la disciplina.

El desarrollo de dispositivos experimentales basados en contadores de Geiger–Müller, gracias a los trabajos pioneros de W. Bothe, Premio Nobel de Física en 1954 por la invención del método de coincidencias, Kohlhörster y Rossi, no solo tuvo un impacto enorme en la forma de investigar los rayos cósmicos sino que están en el origen del desarrollo industrial de componentes básicos de ordenadores, con las consecuencias conocidas para otras disciplinas científicas y para la sociedad. Como se ha insistido en numerosas ocasiones, los desarrollos científicos aparentemente más alejados de la realidad cotidiana pueden dar lugar a aplicaciones y desarrollos técnicos formidables.

La invención de la cámara de niebla o cámara de Wilson constituye un hito extraordinario en el desarrollo de la física nuclear y de rayos cósmicos, permitiendo medir las principales propiedades de las partículas (dirección, velocidad, impulsión y signo de la carga eléctrica). Está, por ejemplo, en el origen del descubrimiento del neutrón en 1932, y Rutherford consideró que se trataba “*del más original y maravilloso instrumento de toda la historia de la Ciencia*”.

D. Skobelzyn, **Figura 16**, fue pionero en el estudio de la radiación cósmica con cámaras de niebla inser-

tadas en imanes. Gracias a sus investigaciones pudo, por fin, concluirse que la ionización espontánea de gases, observada inicialmente en los experimentos de Gockel, Hess y Kohlhörster en 1911–1914, se debía a partículas de alta energía, cargadas eléctricamente, que atraviesan los instrumentos e ionizan a su paso de forma aleatoria átomos y moléculas.

Aunque a finales de los años 20, gracias fundamentalmente al desarrollo instrumental, se había llegado a la conclusión de que los rayos cósmicos eran partículas cargadas muy energéticas, quedaba por desentrañar la naturaleza y el origen de la radiación que penetra en la atmósfera. Los trabajos pioneros de Rossi apuntaban a que la radiación cósmica tenía dos componentes: una que puede absorberse con un lámina de plomo de 10 cm de espesor y otra que es capaz de atravesar hasta 1m de plomo (equivalente a 10 km de aire). Experimentos posteriores, en particular los realizados por C. D. Anderson, S. Neddermeyer y P. M. S. Blackett, llegaron a identificar rayos cósmicos con energías de hasta 20 GeV. El espectro medido de la impulsión o cantidad de movimiento obedecía a una ley de potencia.

Los estudios de los clichés fotográficos obtenidos en cámaras de Wilson a principios de los años 30 pusieron de manifiesto, en numeroso casos, la presencia de varias trazas simultáneas de partículas cargadas. Estos sucesos se denominaron “*cascadas*”. Su descubrimiento, así como el desconocimiento de su naturaleza, generó considerable perplejidad y creciente actividad experimental.

Como suele suceder con frecuencia en el campo de la investigación científica, la búsqueda de respuestas a cuestiones previamente formuladas suele desembocar en el descubrimiento de nuevos fenómenos. El estudio detallado de la radiación cósmica cargada con una cámara de Wilson inmersa en un campo magnético, condujo a C.D. Anderson en 1932 al descubrimiento del positrón, el primer ejemplo de antipartícula y un hito extraordinario en la historia de la física. Por este descubrimiento Anderson recibió en 1936 el Premio Nobel de Física.

El descubrimiento del positrón validaba la teoría cuántica del electrón desarrollada en 1926 por el físico británico P.A.M. Dirac (1902–1984), **Figura 17**,

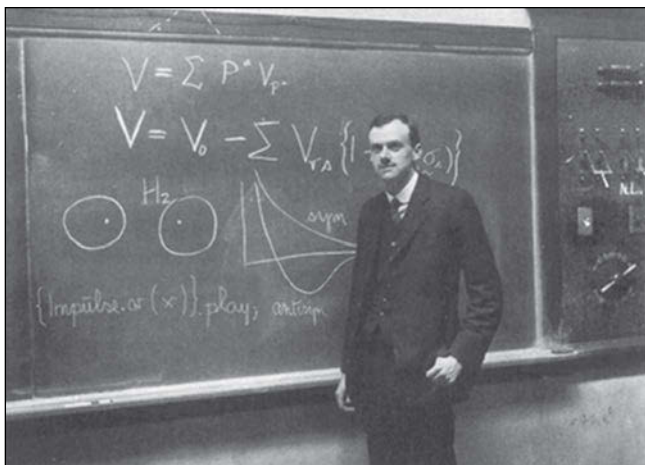


Figura 17. P.A.M. Dirac (1902–1984)

Premio Nobel de Física en 1933 compartido con el físico austriaco E. Schrödinger (1887–1961).

Dirac predijo que para cada partícula debería existir una copia, antipartícula, con idénticas propiedades estáticas (masa, vida media, espín, ...) y algunas con signo cambiado (carga eléctrica, determinados números cuánticos). Al descubrimiento del positrón en 1932 ya mencionado, siguió en 1955 el descubrimiento del antiprotón en el Bevatrón del Laboratorio Nacional de Berkeley (LBNL) por un equipo dirigido por O. Chamberlain y E. Segré, Premios Nobel de Física en 1959.

La predicción de Dirac acerca de la existencia de antipartículas, una para cada partícula, ha sido exhaustivamente verificada en experimentos realizados en aceleradores de partículas. Sin embargo, desde el descubrimiento en 1964 de la violación de la simetría CP en la desintegración de partículas *extrañas*, los mesones K^0 y anti- K^0 , en un experimento realizado en el Laboratorio Nacional de Brookhaven (BNL) por un equipo de investigadores dirigido por J.W. Cronin y V.L. Fitch, Premios Nobel de Física en 1980, se sabe que algunas propiedades son ligeramente diferentes, del orden del uno por mil (10^{-3}) en el caso de las partículas mencionadas.

La relevancia de este descubrimiento es extraordinaria, ya que podría constituir uno de los ingredientes de la explicación basada en las leyes de la microfísica, formuladas por A. Sacharov, **Figura 18**, en 1967, para explicar la aparente evolución asimétrica del Universo

surgido del Big Bang hace cerca de 13.700 millones de años. Las medidas realizadas hasta la fecha no revelan la existencia de trazas de antimateria cósmica primaria, una forma de materia que, de acuerdo con la teoría del Big Bang, debería haber tenido igual abundancia en los primeros instantes del Universo. A este respecto es interesante recordar un párrafo del discurso de Dirac con ocasión de la recepción del Premio Nobel en 1933:

“Debemos considerar más bien un accidente que la tierra (y presumiblemente todo el sistema solar) contenga una preponderancia de electrones negativos y protones positivos. Es bastante posible que para otras estrellas ocurra lo contrario, estas estrellas estarían construidas principalmente de electrones positivos y protones negativos. Las dos clases de estrellas deberían mostrar exactamente los mismos espectros, y no habría manera de distinguirlas con los actuales métodos astronómicos”

La búsqueda de reliquias de antimateria cósmica primaria es uno de los ambiciosos objetivos de los experimentos que estudian los rayos cósmicos fuera de la atmósfera terrestre, desde satélites y otras plataformas espaciales.

El descubrimiento del positrón confirmaba la teoría cuántica del electrón formulada por Dirac y marcaba el inicio del desarrollo de la Electrodinámica Cuántica (QED), al tiempo que se convertía en el instrumento teórico para explorar en detalle los mecanismos que intervienen cuando una partícula energética cargada atraviesa una determinada cantidad de materia. Esta herramienta parecía indispensable para profundizar en



Figura 18. A. Sacharov (1921–1989)

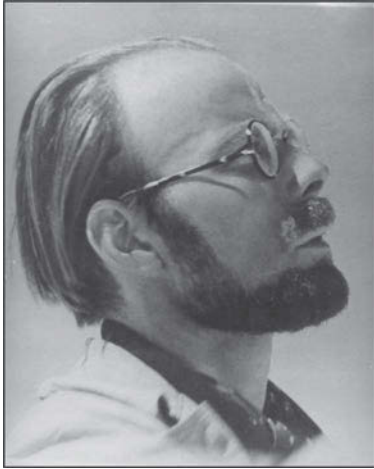


Figura 19. P. Auger (1899–1993)

el conocimiento del fenómeno denominado “*cascadas*”, al que ya nos hemos referido, y de la naturaleza de las partículas con gran poder de penetración.

Las investigaciones llevadas a cabo en la década de los años 30 permitieron avanzar, al menos cualitativamente, en la comprensión de los procesos que tienen lugar cuando una partícula neutra, el fotón, o cargada, el electrón o el protón, atraviesan la atmósfera. Cuando un fotón atraviesa materia no genera ionización, pero sí se produce el efecto fotoeléctrico (el fotón es absorbido y se libera y eyecta un electrón) y sufre la difusión Compton (el fotón sufre una difusión y pierde parte de su energía que libera a un electrón que escapa). Cuando un electrón atraviesa materia ioniza los átomos que encuentra a su paso y también irradia fotones (radiación de frenado o *Bremsstrahlung*) y produce pares electrón-positrón. Para otras partículas cargadas, por ejemplo el protón, la radiación de frenado se diluye debido a la dependencia con la masa ($1/m^2$). Las “*cascadas*” inducidas por fotones y electrones se denominan electromagnéticas y las inducidas por el protón u otras partículas cargadas que interactúan a través de la interacción fuerte se denominan hadrónicas.

A finales de la década de los 30 existía consenso acerca de la predominancia de partículas cargadas, mayoritariamente positivas, en la radiación cósmica, sin excluir una no desdeñable presencia de fotones y electrones. También se pensaba que la radiación cósmica no tenía su origen en el sistema solar. Las altas energías medidas en algunos rayos cósmicos



Figura 20. Observatorio del Pic du Midi de Bigorre

planteaban el problema de los mecanismos de aceleración y sugerían un posible origen galáctico o, incluso, extra-galáctico.

Aunque desde 1933, gracias a las investigaciones de Rossi, se conocía la existencia de “*cascadas*” inducidas por los rayos cósmicos, el estudio sistemático de estos fenómenos se inicia en 1938 por el físico francés P. Auger (1899–1993), **Figura 19**, y colaboradores. Los experimentos realizados en el Pic du Midi de Bigorre, Pirineos franceses, **Figura 20**, y en el Laboratorio Jean Perrin de la Jungfrauch, Alpes suizos, **Figura 21**, entre otros sitios, pusieron de manifiesto la existencia de “*cascadas*” formadas por una gran densidad de partículas que, simultáneamente llegaban a una superficie extensa y que eran el resultado de la interacción de una partículas primaria con las



Figura 21. Observatorio Jean Perrin de la Jungfrauch



Figura 22. R. Armenteros (1922–2004), G. Charpak (1924–2010) y J. Prentki (1920–2009)

moléculas atmosféricas. Auger desarrolló algoritmos para determinar la energía de la radiación primaria y, en 1939, anunció que algunas de las “*cascadas*” observadas alcanzaban energías del orden de 10^{15} eV.

Como ya hemos señalado, el estudio de los rayos cósmicos tuvo una importancia crucial en el desarrollo de la física de partículas elementales o física de altas energías. Al descubrimiento del positrón en 1932 por Anderson, utilizando una cámara de niebla, siguió el descubrimiento del muón en 1937 por Anderson y Neddermeyer, utilizando una técnica similar, el descubrimiento del pión en 1947 por Powell (1903–1969), Premio Nobel de Física en 1950, utilizando emulsiones nucleares, y el descubrimiento de las partículas extrañas en 1947 por un equipo dirigido por Rochester, Butler y Blackett (1897–1974), Premio Nobel de Física en 1948, en el que figuraba el físico español Rafael Armenteros (1922–2004), **Figura 22**, utilizando también una cámara de niebla.

El Congreso sobre rayos cósmicos celebrado en 1953 en Bagnères de Bigorre, cerca del Pic du Midi, fue al mismo tiempo un evento memorable para realzar los resultados sobresalientes obtenidos en esta disciplina científica pero, también, una ocasión para señalar inequívocamente el nuevo rumbo que, en el futuro, debía seguir la física de altas energías. L. Leprince-Ringuet, Director de la célebre École Polytechnique de París, uno de cuyos equipos de investigación se había distinguido trabajando en el Pic du Midi en los años

50, escribía en 1982, a propósito del Congreso de Bagnères, lo siguiente:

“El Congreso de Bagnères de Bigorre en 1953, en mi opinión, ha tocado a muerto por los rayos cósmicos y es el propio Powell quien, en su discurso de clausura ha dicho: “Señores, de ahora en adelante estamos invadidos, estamos sumergidos, son los aceleradores””.

Aunque es innegable que la llegada de los aceleradores y de las cámaras de burbujas quitó protagonismo a la experimentación en física subatómica (búsqueda de nuevas partículas elementales) con rayos cósmicos, cámaras de niebla y emulsiones nucleares, el estudio de los rayos cósmicos ha mantenido su interés y actualidad.

En 1961, el experimento dirigido por J. Linsley (1925–2002), **Figura 23**, en *Volcano Ranch* en New Mexico detectó “*cascadas*” formadas por N partículas ($5 \times 10^5 < N < 10^8$) distribuidas en una superficie de 10^5 m² poniendo de manifiesto la existencia de rayos cósmicos primarios con una energía de 10^{18} eV, no encontrando evidencia de anisotropía en la dirección de llegada ni estructura en el espectro de energía de los rayos cósmicos primarios hasta las mayores energías observadas. En 1962, Linsley y colaboradores registraron una cascada formada por 5×10^{10} partículas deduciendo un valor para la energía de la partícula primaria de $1,0 \times 10^{20}$ eV. A estos rayos cósmicos de ultra-alta energía se les ha denominado a veces “*cosmic bullets*” (“*balas cósmicas*”). El experimento en *Volcano Ranch* marca el inicio de un programa ambicioso para el estudio de los rayos cósmicos de



Figura 23. J. Linsley (1925–2002)

muy alta energía con nuevos detectores y mayores superficies instrumentadas.

¿QUÉ CONOCEMOS ACERCA DE LOS RAYOS CÓSMICOS?

En la **Figura 24** se presenta el flujo de rayos cósmicos en función de la energía en el intervalo comprendido entre 10^8 y 10^{21} eV. El flujo medido tiene una pronunciada dependencia con la energía, abarca 30 ordenes de magnitud y alcanza energías macroscópicas del orden de 5×10^{20} eV, unos 16 J (equivalente a la energía cinética de una pelota de tenis a la velocidad de 100 km/hora).

Es apropiado señalar que ningún instrumento ha conseguido producir hasta la fecha partículas con energías superiores a las energías extremas de los rayos cósmicos. Cuando el acelerador LHC (*Large Hadron Collider*) del CERN (Centro Europeo de Investigación Nuclear, Ginebra, Suiza) funcione a pleno rendimiento en el año 2015 se producirán colisiones entre haces de protones de 7 TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12}$ eV) y la energía total en el sistema centro de masas protón-protón será de 14 TeV. Esto es equivalente a

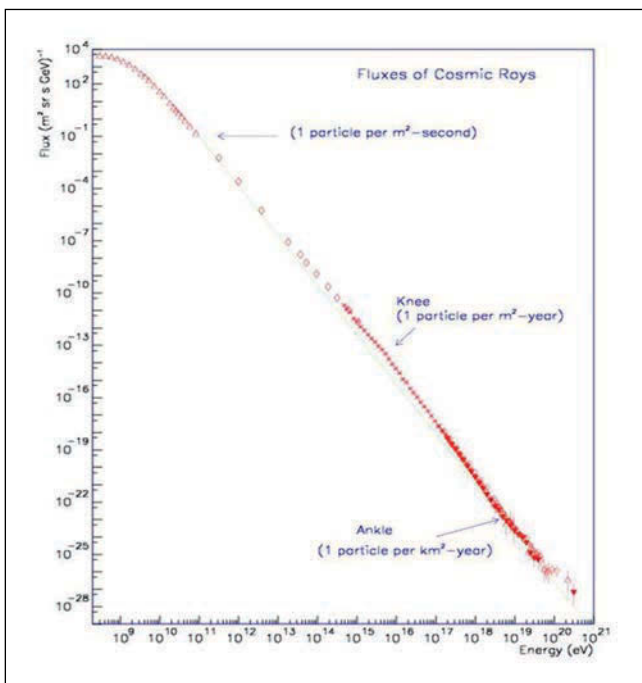


Figura 24. Flujo de los rayos cósmicos cargados en función de la energía

hacer colisionar un haz de protones de 10^{17} eV, esto es unos 3 ordenes de magnitud inferiores a los rayos cósmicos más energéticos detectados hasta la fecha, con un blanco fijo.

La dependencia del flujo con la energía presenta una estructura que, en la región 10^{11} – 10^{20} eV, puede parametrizarse como una ley de potencias ($dN(E)/dE \propto E^{-\gamma}$) con varios cambios del índice espectral g (pendiente). El primero ocurre alrededor de 3×10^{15} eV, se le denomina “*knee*” (rodilla) y la pendiente cambia de $\gamma \approx 2,7$ a $\gamma \approx 3,0$, el segundo tiene lugar alrededor de 2×10^{17} eV, se le denomina “*second knee*” (segunda rodilla) y la pendiente cambia de $\gamma \approx 3,0$ a $\gamma \approx 3,1$, y el tercero sucede alrededor de 3×10^{18} eV, se le denomina “*ankle*” (tobillo) y la pendiente cambia de $\gamma \approx 3,1$ a $\gamma \approx 2,7$. El flujo integrado por encima de 10^{19} eV es del orden de 1 partícula/año/100 km^2 de superficie. El amplio espectro de energías observado en el flujo de partículas que llega a la tierra sugiere una variedad de las posibles fuentes y de factores diversos como el viento solar y el campo magnético terrestre.

La densidad de energía del flujo de rayos cósmicos en el medio interestelar es comparable al de otras energías en el espacio profundo: la densidad de energía de los rayos cósmicos es, en promedio, del orden de $\sim 1 \text{ eV/cm}^3$, similar a la densidad de energía de la luz visible procedente de las estrellas, $\sim 0,3 \text{ eV/cm}^3$, a la densidad de energía galáctica magnética, $\sim 0,25 \text{ eV/cm}^3$, o a la densidad de energía de la radiación del fondo cósmico de microondas (CMB), $\sim 0,5 \text{ eV/cm}^3$.

Los rayos cósmicos de ultra-alta energía, por encima de $\sim 10^{18}$ eV, representan la materia en el estado de máxima desviación de equilibrio térmico encontrado en el universo y pueden poner de manifiesto la existencia de partículas exóticas formadas en la fase inicial del Universo o sugerir fenómenos con fundamento físico no estándar, esto es no descrito por el Modelo Estándar de Partículas Elementales e Interacciones. Probablemente también constituyen algunas de las raras muestras de material extra-galáctico que es posible detectar de manera directa.

La distribución de los rayos cósmicos es isotropa. Esto se debe a que los campos magnéticos galácticos y extra-galácticos curvan la dirección de llegada de los

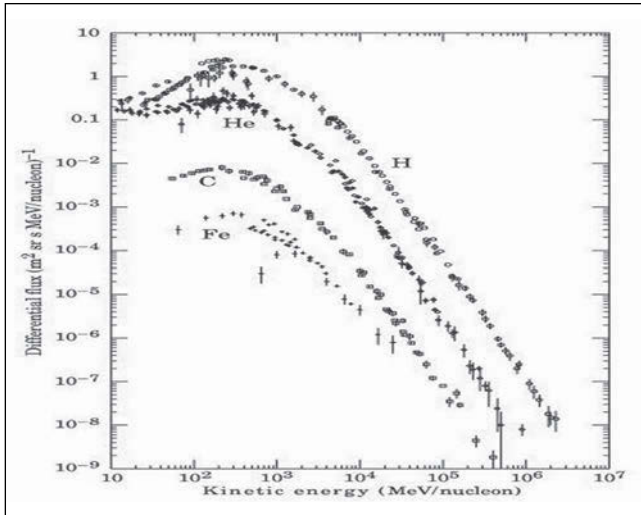


Figura 25. Flujo de los núcleos atómicos cósmicos en función de la energía

rayos cósmicos. Este hecho dificulta la identificación de las fuentes primarias.

A pesar de la intensa actividad investigadora realizada desde el descubrimiento de los rayos cósmicos hace 100 años, persisten importantes cuestiones en busca de respuesta. Por ejemplo: ¿Cuál es la composición?, ¿Cuál es el origen?, ¿Cuáles son los mecanismos de aceleración?, ¿Existe un valor máximo para la energía?

La composición y abundancia química de los rayos cósmicos proporciona importante información acerca de su origen y de los procesos de propagación desde las fuentes a la tierra. La composición se conoce relativamente bien hasta una energía del orden de 1 TeV, aunque no su dependencia temporal. Aproximadamente el 98% de las partículas cósmicas son núcleos atómicos y el 2% son electrones. De los núcleos, el 87% son protones, el 12% son núcleos de helio y el 1% restante son núcleos pesados, **Figura 25**. La comparación entre la distribución de las abundancias relativas de los diferentes elementos en los rayos cósmicos y en el sistema solar revela que no son tan distintas, **Figura 26**. Ambas distribuciones muestran picos correspondientes al carbono, nitrógeno, oxígeno y grupo del hierro, lo que podría indicar que las partículas que forman los rayos cósmicos han sido aceleradas a partir de material con parecida composición química y abundancias a las que hay en el sistema solar.

En relación con la posible existencia o no de un valor máximo para la energía de la radiación cósmica primaria que llega a la atmósfera terrestre, existe un límite teórico derivado en 1966 por K. Greisen, V. Kuzmin y G. Zatsepin (el llamado efecto “*GZK Cut-Off*”), basado en las interacciones entre la radiación cósmica primaria (2.7 K) y la radiación del fondo cósmico de microondas. El cálculo cinemático revela que, por ejemplo, la colisión de un protón de 10^{20} eV con un fotón CMB de 10^{-3} eV produce una energía en el sistema centro de masas del orden de varios cientos de MeV. Al ser la sección eficaz de producción de piones suficientemente grande, en estas interacciones se producirán piones reduciéndose la energía de la radiación primaria. Independientemente de cual sea esta energía, el cálculo revela que tras propagarse por el espacio interestelar una distancia de 100 Mpc ($\approx 3 \times 10^8$ años luz) la energía será inferior a 10^{20} eV. La observación de un rayo cósmico con energía superior a este valor implicaría por lo tanto que ha viajado menos de 100 Mpc. Esta distancia corresponde a un valor del corrimiento hacia el rojo (“*redshift*”) de 0,025, pequeño en comparación con el tamaño del universo. De acuerdo con el conocimiento actual acerca de posibles entornos susceptibles de generar mecanismos de aceleración para alcanzar energías del orden de 10^{20} eV el número de fuentes posibles es limitado, como ya veremos más adelante.

La existencia de rayos cósmicos de muy alta energía es especialmente relevante para la astronomía

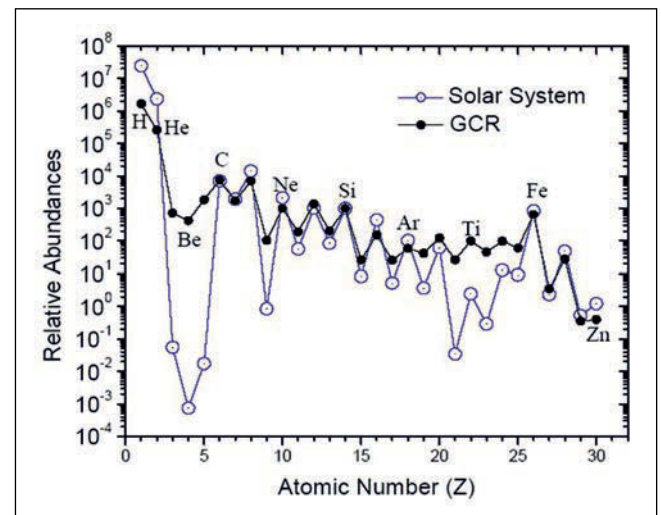


Figura 26. Abundancias relativas de los núcleos en los rayos cósmicos y en el sistema solar

de rayos cósmicos procedentes de fuentes cercanas. La deflexión de un protón de energía 5×10^{19} eV debida al campo magnético galáctico ($\sim 2 \mu\text{G}$, $1 \text{G} = 10^{-4}$ Tesla) y a los campos magnéticos intergalácticos ($\leq 10^{-9} \mu\text{G}$) es de unos pocos grados y, en principio, parece posible localizar las fuentes de procedencia. Volveremos sobre este tema al describir brevemente los resultados de algunos experimentos construidos para el estudio de los rayos cósmicos de ultra-alta energía.

¿QUÉ DESCONOCEMOS O CONOCEMOS INSUFICIENTEMENTE ACERCA DE LOS RAYOS CÓSMICOS?

Como se ha comentado en la sección anterior, en las últimas décadas se ha almacenado un robusto conjunto de medidas que permiten conocer el espectro de rayos cósmicos cargados (sin distinción de carga eléctrica y masa) en un amplio intervalo de energías (cerca de 13 ordenes de magnitud) en el que el flujo varía en casi 30 ordenes de magnitud. El conocimiento experimental de la composición nuclear de los rayos cósmicos y su dependencia con la energía decrece al aumentar ésta. Para energías superiores a aproximadamente 10^{18} eV los datos son limitados y no permiten extraer conclusiones fiables acerca de tres cuestiones básicas:

- ¿Cómo se aceleran los rayos cósmicos hasta alcanzar las más altas energías?
- ¿De dónde proceden los rayos cósmicos?
- ¿Cuál es la composición de los rayos cósmicos?

La primera teoría acerca del proceso de aceleración de rayos cósmicos se debe a Fermi y data de 1949. Conceptualmente la teoría desarrollada por Fermi es relativamente sencilla y consiste en admitir que en entornos astrofísicos la aceleración tiene lugar cuando la energía en movimiento a gran escala macroscópica (ondas de choque o turbulencias en plasmas, objetos magnéticos compactos rotando, etc) se transfiere a partículas individuales. Se trata de un escenario del tipo “*Bottom-Up*” que supone que todas las partículas cargadas se aceleran en entornos astrofísicos.

En concreto, la teoría de Fermi establece que el proceso de aceleración es consecuencia de sucesivas

colisiones estocásticas de las partículas individuales con plasmas magnéticos en movimiento. Este mecanismo, conocido como “*Mecanismo de Fermi de Segundo Orden*”, predice de forma natural una ley de potencias para el espectro de energías, aunque el valor del índice espectral depende de detalles locales del modelo y no es capaz de derivar una expresión universal para los rayos cósmicos procedentes de todas direcciones. El mecanismo, por otra parte, resulta lento e ineficiente para alcanzar las muy altas energías observadas. Una versión más eficiente del modelo de Fermi, conocido como “*Mecanismo de Fermi de Primer Orden*”, consiste en suponer la existencia de una potente onda de choque generada en un entorno astrofísico magnetizado que se propaga en el espacio interestelar. Esta versión del modelo predice un índice espectral único igual a 2, que es independiente de detalles sobre el entorno local. El modelo requiere la presencia de ondas de choque intensas, cuya existencia parece verosímil en las posibles fuentes de rayos cósmicos.

Gracias a los trabajos de Ginzburg y Ptuskin, desde mediados de la década de los 70 se considera que los remanentes de supernovas son los candidatos preferidos para ser fuentes de rayos cósmicos en la región de energías que se extiende hasta $\sim 3 \times 10^{15}$ eV (“rodilla”). Las explosiones de las supernovas serían el motor que produce rayos cósmicos de alta energía. Sin embargo, no parece haber acuerdo acerca del mecanismo preciso para la generación de rayos cósmicos en el intervalo de energías que va desde la primera “rodilla” hasta el “tobillo”, esto es desde $\sim 3 \times 10^{15}$ eV



Figura 27. E. Fermi (1901-1954)

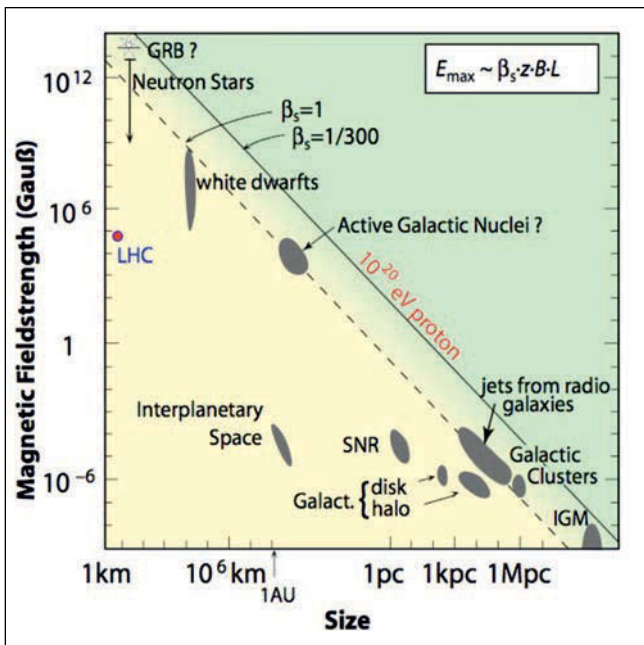


Figura 28. Diagrama de Hillas

hasta $\sim 3 \times 10^{18}$ eV. Una clase de modelos, denominados “*Fireball*”, identifican este mecanismo con el fenómeno de radiación sincrotrón, mientras que otra clase de modelos, denominados “*Cannon Ball*”, apuestan por el efecto Compton inverso. Hasta la fecha la polémica entre los partidarios de estos dos posibles escenarios no se ha zanjado de forma convincente. Por otra parte, aunque mucho se ha argumentado acerca del posible origen extra-galáctico (núcleos galácticos activos) de los rayos cósmicos con energías superiores al denominado “tobillo”, $\sim 3 \times 10^{18}$ eV, tampoco parece haber consenso en torno a esta cuestión.

En relación con la naturaleza y localización de entornos posibles para la aceleración de las partículas y núcleos cósmicos, la expresión $E_{max} \sim b_s z B L$, derivada en el contexto del “*Mecanismo de Fermi de Primer Orden*”, relaciona la máxima energía que puede alcanzar un rayo cósmico con la velocidad de la onda de choque, la carga eléctrica, el campo magnético y la dimensión de la región magnetizada en la que se desarrolla el proceso de aceleración. En la **Figura 28** se presenta la localización de posibles fuentes en función de su tamaño y de la intensidad del campo magnético. Este diagrama, denominado diagrama de Hillas, indica que los objetos celestes situados por debajo de la línea continua (de trazos) no pueden acelerar protones (hierro) a 10^{20} eV e ilustra la dificultad

de identificar posibles fuentes para suministrar energía a los rayos cósmicos por encima de la región del “tobillo”.

Aparte de las supernovas, desarrollos teóricos recientes proponen nuevos escenarios para explicar la existencia de rayos cósmicos de ultra-alta energía ($E > 10^{19}$ eV), entre los cuales caben destacar los modelos “*Top-Down*” (desintegración o aniquilación de partículas super-masivas o reliquias cosmológicas como podrían ser los defectos topológicos o los monopolos magnéticos, la aceleración en eventos catastróficos, los estallidos de rayos gamma, etc).

El análisis detallado de los temas esbozados en esta sección va más allá del ámbito divulgativo de este trabajo. En cualquier caso, parece bastante evidente que 100 años después del descubrimiento de los rayos cósmicos, el origen de éstos sigue siendo en buena medida una incógnita, con un nivel de incertidumbre que crece con la energía. La solución a las cuestiones planteadas (fuentes, composición, mecanismos de aceleración y propagación) va a exigir más y más difícil trabajo experimental y desarrollos teóricos adicionales.

PROYECTOS EN CURSO: UNA SELECCIÓN

En esta sección se ha realizado una selección, hasta cierto punto arbitraria, de dos clases de proyectos de investigación en rayos cósmicos en dos áreas de actividad bien distintas. Una clase está formada por experimentos que estudian los rayos cósmicos a muy alta energía, donde los flujos son pequeños (inferiores a 1 partícula/m²/año para energías superiores a 10^{16} eV) y se necesitan extensas superficies instrumentadas. Otra clase está formada por experimentos que estudian los rayos cósmicos a energías intermedias, donde los flujos son elevados (superiores a 10 partículas/m²/día para energías inferiores a 10^{14} eV) y la instrumentación es de dimensiones moderadas y puede instalarse en globos sonda, satélites y otras plataformas espaciales.

La primera categoría incluye, como instalación de referencia, el proyecto, que se desarrolla en el *Observatorio Pierre Auger Sur* en Malargüe (Mendo-

za, Argentina), y su objetivo prioritario es el estudio de los rayos cósmicos de muy alta energía con el fin de establecer si hay un valor máximo para la energía de los rayos cósmicos que llegan a la tierra, así como la identificación de sus posibles fuentes de procedencia. En cierto sentido se trata de un programa de experimentación clásico, aunque con instrumentación avanzada y redundante, en la línea de los trabajos pioneros de J. Linsley y colaboradores en los experimentos en *Volcano Ranch* en New Mexico (EEUU) y de G. Zatsepin y colaboradores en los experimentos en las montañas Pamir en Tajikistan (Asia Central).

La segunda categoría, en la que destaca el proyecto AMS (*Alpha Magnetic Spectrometer*) a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS), estudia la dependencia temporal y energética de los flujos de partículas elementales y de los distintos núcleos atómicos de origen cósmico, busca señales producidas por la posible aniquilación de partículas candidatas a formar parte de la dominante materia oscura del Universo (supersimétricas o de Kaluza–Klein) y trata de identificar antipartículas y anti-núcleos cósmicos primarios que, de acuerdo con la teoría del Big Bang, deberían haber existido en los primeros instantes de la vida del universo en idéntica proporción que las correspondientes partículas y núcleos. En general, estos instrumentos se han construido basándose en las tecnologías utilizadas en los experimentos de física de partículas elementales en aceleradores, pero miniaturizadas y adaptadas a las muy exigentes condiciones del entorno espacial.

EXPERIMENTOS EN OBSERVATORIOS EN SUPERFICIE

La propuesta conceptual para la construcción de una gran instalación científica para la realización de medidas de gran precisión estadística de los rayos cósmicos de muy alta energía se debe a J.W. Cronin y A.A. Watson y se remonta a 1995, **Figura 29**. La idea original era construir dos grandes observatorios (*Observatorios Pierre Auger*), cada uno de ellos con una superficie instrumentada de aproximadamente 3000 km^2 , uno en el hemisferio Norte y otro en el hemisferio Sur. Este gran despliegue instrumental permitiría coleccionar, en cada observatorio, unos 30 rayos cósmicos con energías superiores a 10^{20} eV por



Figura 29. J.W. Cronin y A.A. Watson

año y medir su energía y dirección de llegada con precisión y separar los neutrinos y fotones de los hadrones primarios. El diseño conceptual se basaba en una configuración híbrida, con detectores de partículas en superficie y un conjunto de varios telescopios con detectores de fluorescencia en cada uno de los dos observatorios. Desde 2004 opera el *Observatorio Pierre Auger Sur*, **Figura 30**, con 1600 detectores de superficie y 24 telescopios. La construcción del *Observatorio Pierre Auger Norte*, presumiblemente en el estado de Colorado, está aún pendiente de aprobación.

Los detectores de partículas utilizados en el *Observatorio Pierre Auger Sur* se basan en el efecto



Figura 30. Detector de superficie y telescopio de fluorescencia del Observatorio Pierre Auger Sur (Malargüe, Argentina)

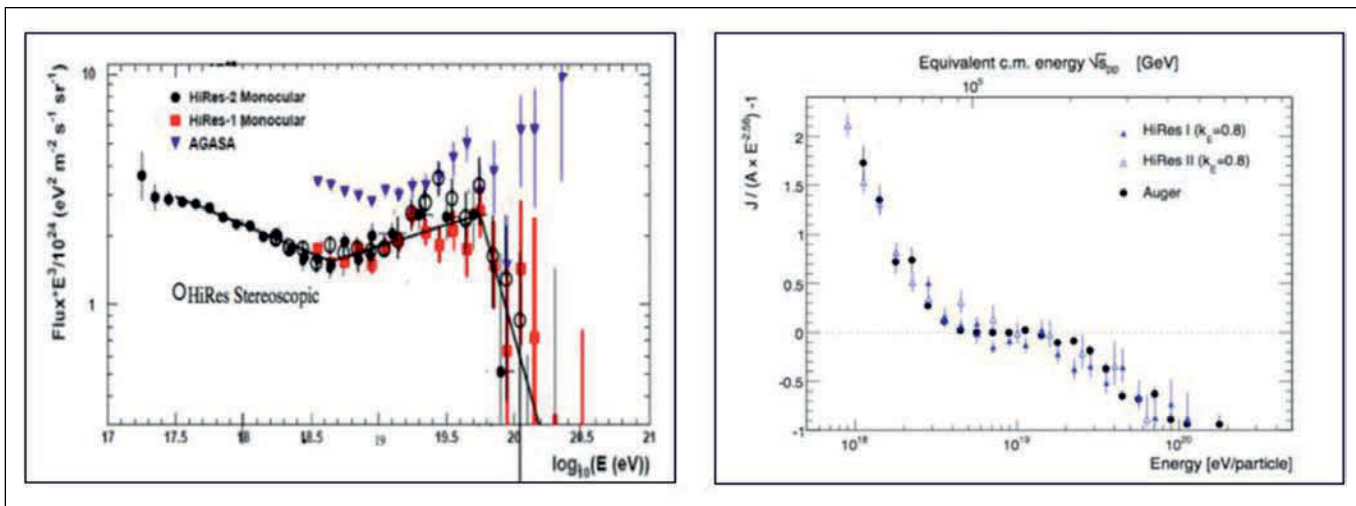


Figura 31. Comparación de los espectros de muy alta energía medidos por varios experimentos

Cherenkov y son contenedores cilíndricos de 12000 litros de agua purificada de 1,2 m de altura y 3,5 m de diámetro, cada uno equipado con 3 fotomultiplicadores, dispuestos en una configuración hexagonal. Estos detectores, similares a los ya utilizados en la matriz de 12 km² ubicada en Haverah Park, Reino Unido, en la década de los 70, permiten obtener información sensible a la composición de los rayos cósmicos. La dirección del eje de la “cascada”, identificada con la dirección del rayo cósmico primario, se reconstruye a partir de la medida de los tiempos de llegada de señales en al menos tres detectores no colineales, pudiéndose obtener precisiones entre 1° y 5°. La distribución lateral de las señales permite determinar el núcleo de la “cascada”, a partir del cual puede determinarse el tamaño de la misma y la energía del rayo cósmico primario.

Los telescopios de fluorescencia utilizados en el *Observatorio Pierre Auger Sur* se basan en la emisión de luz por efecto de la desexcitación de las moléculas de nitrógeno de la atmósfera, previamente excitadas por el paso de partículas cargadas. La primera implementación de esta técnica se debe al trabajo pionero realizado a mediados de la década de los 80 por el grupo promotor del experimento *Fly's Eye* en el desierto Dugway Proving Grounds, a 100 km de Salt Lake City (Utah, EEUU). En lugar de realizar un muestreo con numerosos detectores de partículas colocados en una determinada configuración matricial, el detector de fluorescencia hace un seguimiento de la trayectoria de la “cascada” y mide la energía disipada

en la atmósfera, por las partículas que la forman, en un calorímetro de aire de más de 10 toneladas. Con esta técnica, el cielo se observa por multitud de ojos segmentados utilizando fotomultiplicadores. Conviene señalar que la luz emitida es tan débil que solo es observable en noches sin luna y sin nubes. En 1991, el experimento *Fly's Eye* observó un rayo cósmico de $3,2 \times 10^{20}$ eV.

Otros experimentos para el estudio de los rayos cósmicos de muy alta energía utilizan detectores de partículas basados en contadores de centelleo (*AGASA*, *Akeno Giant Air-Shower Array* en Akeno, Japón) o configuraciones mixtas (Yakutsk en Siberia). *AGASA*, que opera desde 1991, ha instrumentado 100 km² de superficie con 110 detectores de partículas y 27 detectores para identificación de muones. En 2003 detectó el rayo cósmico más energético observado hasta la fecha, $3,3 \times 10^{20}$ eV.

La reconstrucción de la energía y dirección de los rayos cósmicos primarios con las dos tecnologías (detectores de superficie y detectores de fluorescencia) viene afectada por errores sistemáticos diferentes. La complementariedad de las medidas realizadas con dos procedimientos distintos es una de las grandes ventajas de los sistemas híbridos.

Desde el año 1998, la instalación *HiRes* (*High Resolution Fly's Eye Experiment*), en Dugway, Utah, que es una extensión del proyecto *Fly's Eye*, registra datos de rayos cósmicos de muy alta energía. Desde el

año 2007, el proyecto *Telescope Array* en el desierto de Millard, Utah, acumula datos de rayos cósmicos utilizando una configuración híbrida con una matriz de detectores de centelleo y técnicas fluorescentes.

Las medidas realizadas en el *Observatorio Pierre Auger Sur* han contribuido a dilucidar la cuestión acerca de la existencia de un valor límite para la energía de los rayos cósmicos y confirmado la propuesta ya mencionada (“*GZK Cut-Off*”), **Figura 31**, zanjando las discrepancias entre los resultados obtenidos por *HiRes* (observación del *GZK Cut-Off*) y *AGASA* (no observación del *GZK Cut-Off*).

Con los datos acumulados hasta la fecha no es posible establecer inequívocamente una correlación entre las posibles fuentes sugeridas por las medidas direccionales de rayos cósmicos de muy alta energía realizadas en *Auger* y *HiRes* y la cartografía de núcleos galácticos activos (AGNs). En *Auger* (hemisferio Sur) se observa una correlación del 38 ± 7 % mientras que en *HiRes* (Hemisferio Norte) no hay evidencia de correlación, **Figura 32**. Es evidente la necesidad de datos adicionales para dar una respuesta fiable a la posible correlación entre la región de origen de los rayos cósmicos y la localización de fuentes bien establecidas mediante observaciones astronómicas y/o astrofísicas.

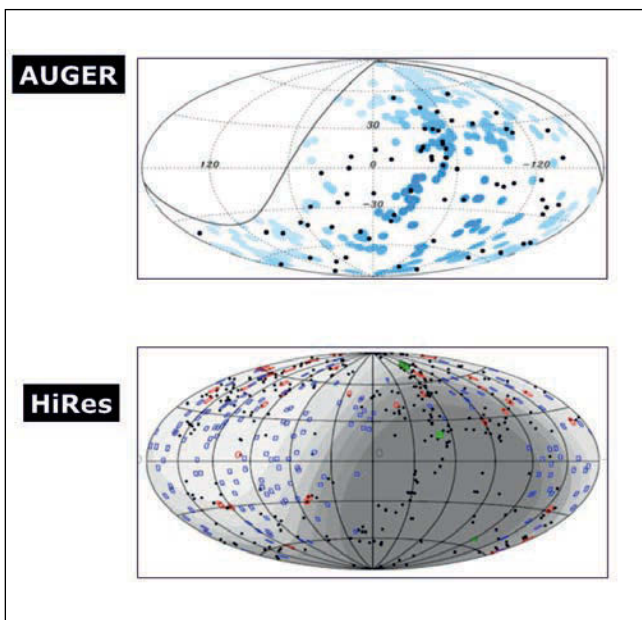


Figura 32. Correlaciones con AGNs medidas en el Observatorio Pierre Auger Sur y en HiRes

EXPERIMENTOS EN OBSERVATORIOS ESPACIALES

Una de las dificultades que presenta el estudio de la radiación cósmica cargada con instrumentación desplegada en la superficie terrestre, como es el caso de las instalaciones mencionadas en la sección precedente, es la existencia de la atmósfera que está en el origen de la formación de las “*cascadas*” extensas en aire.

Para altas energías el rayo cósmico primario se fragmenta en multitud de partículas o núcleos secundarios, a partir de cuya detección se reconstruyen las propiedades de la partícula o núcleo cósmico primario. Es posible, utilizando la distribución espacial de los secundarios y la propia evolución espacial de las “*cascadas*”, realizar una determinación razonable de la energía y, en algunos casos, de su naturaleza (núcleos ligeros frente a núcleos pesados). Lo que resulta inviable es hacer una medida de la carga eléctrica con su signo. En el caso de los rayos cósmicos de muy alta energía, el flujo es extremadamente reducido, siendo necesario instrumentar grandes superficies de detección con las inevitables limitaciones en lo que a prestaciones se refiere. De momento no hay propuestas experimentales alternativas.

Para energías menores, los flujos son significativamente más elevados y es posible diseñar instrumentación de tamaño reducido que pueda desplegarse a bordo de globos sonda, satélites y otras plataformas espaciales evitando así los problemas derivados de la existencia de atmósfera y haciendo en principio posible la determinación directa de la energía, dirección, masa y carga eléctrica. Esta posibilidad requiere inevitablemente disponer de una configuración magnética. La intensidad del campo magnético así como el volumen magnetizado e instrumentado para la medida precisa de coordenadas de trayectorias definen el intervalo de energías accesibles en las opciones espaciales.

Obviamente, el limitado rango de energías que este tipo de instrumentación permite estudiar restringe los objetivos científicos que estos programas de investigación permiten abordar.

La idea de enviar al espacio un detector magnético con este fin se remonta a 1974 y se debe a L. Alvarez



Figura 33. El instrumento BESS

(Premio Nobel de Física en 1968) y G. Smoot (Premio Nobel de Física 2002).

Diversas han sido las iniciativas experimentales en este sector de la investigación en rayos cósmicos. Como ilustración de la diversidad y ambición de las actividades en curso en esta disciplina científica reseñamos tres proyectos:

- 1) El experimento con el instrumento BESS (*Balloon Borne Experiment with Superconducting Spectrometer*) que, a bordo de globos sonda, ha permanecido en el espacio a altitudes próximas a 40 km y limitados tiempos de exposición (1–3 ascensiones de 1 día de duración por año) desde el año 1993, **Figura 33**.

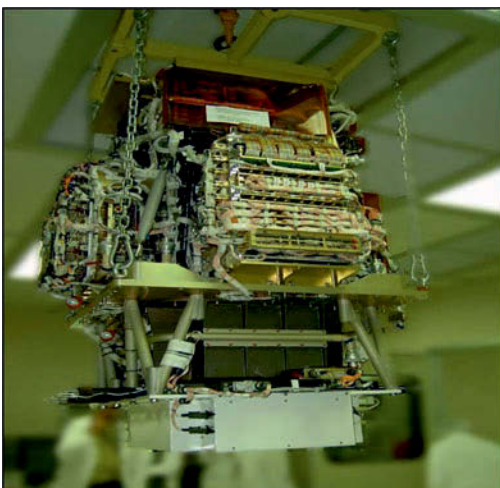


Figura 34. El instrumento PAMELA



Figura 35. El instrumento AMS-02 instalado en la Estación Espacial Internacional

- 2) El experimento con el instrumento PAMELA (*Payload for Antimatter Exploration and Light Nuclei Astrophysics*), acoplado al satélite ruso Resus-DK1 para la observación terrestre y puesto en órbita por el cohete Soyuz TM2 lanzado el 15 de junio de 2008 desde la base de Baikonur, **Figura 34**.
- 3) El experimento con el instrumento AMS-02 (*Alpha Magnetic Spectrometer*) enviado al espacio el 16 de mayo de 2011 desde el Kennedy Space Center, en la misión espacial STS-134 realizada por el trasbordador Endeavour e instalado en la Estación Espacial Internacional el 19 de mayo de 2011, **Figura 35**.

Los experimentos BESS, AMS-01 (el experimento precursor de AMS-02 en vuelo precursor a la estación espacial MIR a bordo del trasbordador Discovery en 1998) y PAMELA han realizado medidas del cociente de los flujos de los núcleos de Helio y anti-Helio, **Figura 36**, obteniendo límites superiores en un limitado intervalo de energías.

El experimento PAMELA ha realizado medidas precisas del cociente de los flujos de protones y anti-protones y de positrones y electrones, **Figura 37**. Estas medidas tienen relevancia en la búsqueda de señales que puedan clarificar la naturaleza de la materia oscura. La situación actual es bastante confusa, ya que en el caso del cociente de los flujos de antiprotones y protones los modelos fenomenológicos explican su

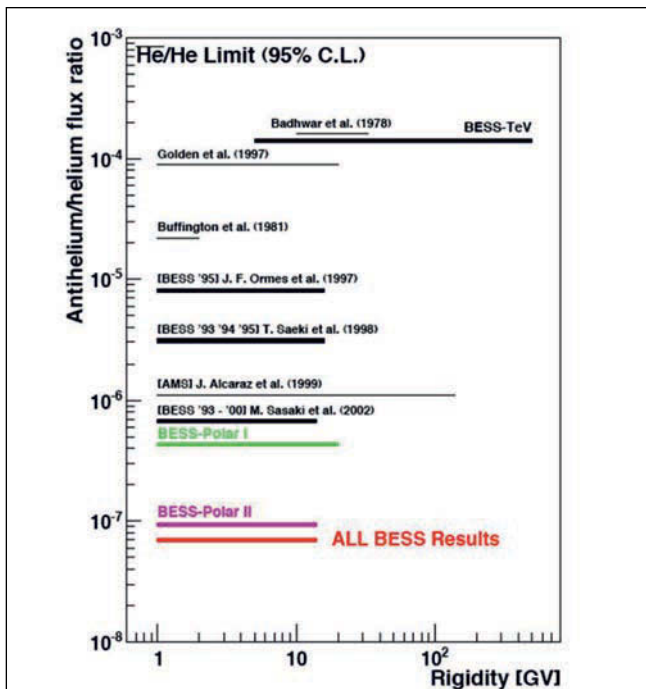


Figura 36. Compilación de medidas del cociente de los flujos antihelio / helio

dependencia con la energía, mientras que en el caso leptónico se observa una incompatibilidad significativa. Parece necesario extender el intervalo de energías estudiado, uno de los objetivos del experimento AMS-02.

Los tres experimentos (BESS, PAMELA y AMS-02) están diseñados y construidos como detectores de partículas. A la vista del interés de los datos coleccionados por PAMELA y habida cuenta de la instrumentación más avanzada desarrollada para AMS-02 (inclusión de un detector de radiación de transición y de un contador Cherenkov, un detector de trayectorias de mejores prestaciones que permite medir la rigidez hasta 2100 GV en lugar de 740 GV, etc), el mayor tamaño (7500 kg en lugar de 480 kg) y la muy superior aceptación geométrica de AMS-02 (4500 cm²sr en lugar de 21 cm²sr), no parece arriesgado augurar un programa científico de notable relevancia para AMS-02.

Para terminar esta sección parece apropiado mencionar un ambicioso proyecto espacial, JEM-EUSO (*Extreme Universe Space Observatory on the Japanese Experiment Module*), que aspira a colocar un instrumento en la Estación Espacial Internacional para

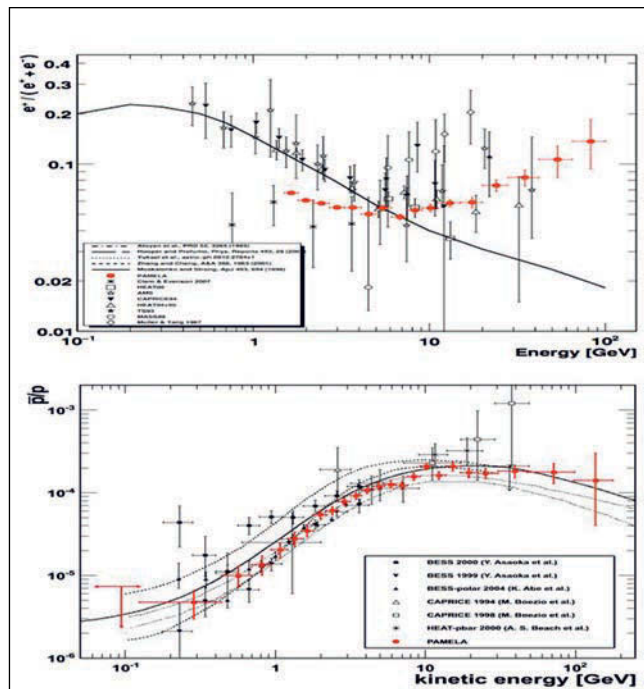


Figura 37. Compilación de medidas del cociente de los flujos $e^+/(e^+ + e^-)$ y p^-/p^+

el estudio de los rayos cósmicos de muy alta energía. La idea de JEM-EUSO es construir un telescopio espacial de fluorescencia que pueda medir rayos cósmicos y almacenar más de 1000 sucesos con energías superiores a 7×10^{19} eV en 3-5 años de operación. El telescopio refractivo de JEM-EUSO utilizará una cámara digital extremadamente rápida, multi-*pixelizada*, de gran apertura y con un gran campo de visión ($\pm 30^\circ$). Dispondrá de dos lentes de Fresnel curvadas y un plano de difracción para observar las trayectorias fluorescentes producidas en el rango ultravioleta (330-400 nm) con una resolución temporal de 2,5 ms y una resolución espacial de 0,75 km. La superficie focal estará formada por 6000 fotomultiplicadores con cerca de 200.000 *pixels*. El objetivo es enviar el telescopio JEM-EUSO al espacio, a bordo de uno de los vehículos de carga HTV, en un cohete japonés H-IIB antes del año 2015.

ALGUNAS APLICACIONES DEL ESTUDIO DE LOS RAYOS CÓSMICOS

Aunque, desde el punto de vista científico, el objetivo último de la investigación en rayos cósmicos es conocer cómo y dónde se producen y aceleran, cuál

es su dependencia temporal con la energía y su composición y cómo se propagan y confinan en el espacio interestelar, la medida precisa de los flujos de partículas y núcleos de origen cósmico tiene un interés añadido en el contexto de los vuelos tripulados de larga duración. Su conocimiento es prioritario para determinar las dosis recibidas por las tripulaciones y diseñar métodos de protección de las mismas. Las medidas que realizará AMS-02 en los próximos años serán relevantes en este contexto como también lo ha sido la actividad de I+D relacionada con el desarrollo de bobinas superconductoras que permitirían fabricar habitáculos para las tripulaciones blindados a la radiación.

Por otra parte, el estudio de cómo estos flujos se ven afectados por variaciones del viento solar y su posible influencia en el proceso de formación de nubes es un tema de indudable interés en climatología. Desde el siglo XIX existen indicios de que los ciclos térmicos del sol podrían ser un factor determinante en las oscilaciones climáticas de la tierra.

Para esclarecer la posible relación entre la variación en el flujo incidente de rayos cósmicos sobre la atmósfera y el proceso de formación de nubes, la colaboración CLOUD (*Cosmic Leaving Outdoor Droplets*) propuso en el año 2000 realizar un experimento en el CERN que tiene como objetivo estudiar la relación entre los rayos cósmicos y la formación de núcleos de condensación (iones pesados, partículas de aerosol, gotas minúsculas y cristales de hielo), profundizar en el conocimiento de los mecanismos microfísicos que hacen que los rayos cósmicos modifiquen las propiedades de los núcleos de condensación y simular los efectos de la radiación cósmica sobre las propiedades de aerosoles y nubes en las cambiantes condiciones atmosféricas (presión, temperatura).

El experimento en cuestión consiste en una cámara de Wilson de gran tamaño (3m de diámetro, 3,7 m de altura), operando a una presión de 1–1,3 bar, **Figura 38**, expuesta a un haz de π^+ de 3,5 GeV/c producidos en el Síncrotrón de Protones del CERN que simularán la radiación cósmica. CLOUD dispone de un sistema de luz ultravioleta, opera en un campo eléctrico (+50 kV, -50 kV), tiene sistemas de aislamiento y regulación térmica y enfriamiento y mezcla de gases. El sistema de gases permite inyectar muestras de



Figura 38. El instrumento CLOUD

aire/H₂O, NH₃, SO₂ en la cámara de Wilson equipada con numerosos instrumentos de análisis para la medida de la concentración y tamaño de aerosoles. CLOUD inició su andadura en el año 2009 y los primeros resultados ponen de manifiesto que la formación de aerosoles en la parte baja de la atmósfera no se debe exclusivamente a ácido sulfúrico, agua y amoníaco sino que hay vapores adicionales cuyo origen, natural o humano, es preciso averiguar así como su influencia en el proceso de formación de nubes. Esta previsto que este experimento continúe tomando datos en los próximos 2–3 años.

PERSPECTIVAS

En este trabajo se ha tratado de esbozar el camino recorrido en la física de los rayos cósmicos desde que en 1912 V.F. Hess descubriese su existencia. Tras la interrupción de actividades ocasionada por la Primera Guerra Mundial, en las décadas de los años 20 y 30 se acumuló, gracias al desarrollo espectacular de la instrumentación y muy en particular de la cámara de Wilson, evidencia significativa acerca de su procedencia, más allá de las capas altas de la atmósfera, y de su naturaleza. Se trata de partículas o núcleos atómicos con gran poder de penetración, alta energía y preponderancia de cargas eléctricas positivas. También se ha reseñado la importancia crucial de la experimentación con rayos cósmicos para el desarrollo de la física de partículas elementales con anterioridad a la llegada de los grandes aceleradores a principios de la segunda mitad del siglo XX y resumido el conjunto de cuestiones que siguen a la espera de una respuesta rigurosa.

En este trabajo se ha puesto especial énfasis en los desafíos que plantea el estudio de los rayos cósmicos de ultra-alta energía y seleccionado algunos experimentos en curso, en laboratorios en superficie y en entornos espaciales, para ilustrar la vitalidad de esta disciplina científica. Para terminar, se ha descrito brevemente un proyecto de investigación que trata de establecer una conexión entre la variación del flujo de rayos cósmicos y la formación de nubes, un tema de indudable interés en climatología.

Por otra parte, como se ha mencionado en este trabajo, los rayos cósmicos seguirán siendo una sonda de enorme relevancia para progresar en el conocimiento de la estructura última de la materia, la composición en materia-energía del universo y la cuantificación de la aparente asimetría en materia-antimateria del universo.

AGRADECIMIENTOS

El autor de este trabajo quiere agradecer a la Dra. María Isabel Josa Mutuberria y a Carlos Díaz Ginzo, del Departamento de Investigación Básica del CIEMAT, la lectura cuidadosa del texto, así como numerosas sugerencias, y la inestimable ayuda en la preparación de las figuras.

REFERENCIAS

Este trabajo está inspirado en una conferencia pronunciada por el Prof. J.W. Cronin en la Fundación

BBVA el 11 de abril 2011 dentro del Ciclo de Conferencias de Astrofísica y Cosmología “*La Ciencia del Cosmos, La Ciencia en el Cosmos*”.

Los libros:

1. “*Quand le ciel nous bombarde, qu’est ce que les rayons cosmiques*”, Michel Crozon, Vuibert (2005),
2. “*Cosmic Rays and Particle Physics*”, Thomas K. Gaisser, Cambridge University Press (1990)
3. “*Astroparticle Physics*”, Claus Grupen, Springer (2005)

constituyen una excelente y pedagógica introducción a los rayos cósmicos.

Otros artículos consultados para este trabajo han sido:

1. J.W. Cronin, *Reviews of Modern Physics*, Vol 71, No.2, S165 (1999)
2. J.W. Cronin, *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* 138, 465 (2005)
3. M. Nagano and A.A. Watson, *Reviews of Modern Physics*, Vol 72, No.3, 689 (2000)
4. X.Bertou, M. Boratav and A. Letessier-Selvon, *International Journal of Modern Physics A*, Vol. 15, No. 15 (200) 2181-2224
5. S. Yoshida and H. Dai, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 24 (1998) 905-938
6. P. Bhattacharjee and G. Sigl, *Physics Reports* 327 (2000) 109-247
7. A. Dar and A. De Rújula, *Physics Reports* 466 (2008) 179-241
8. K. Nakamura et al, *Review of Particle Physics*, Particle Data Group, *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 37 (2010) 075021