

Rayos Cósmicos



“Yo he visto cosas que no creeríais... He visto rayos C brillar en la oscuridad cerca de la puerta de Tannhäuser...”

(I've seen things you people wouldn't believe... I watched C-beams glitter in the dark near the Tannhäuser Gate...)

(Monólogo final del replicante Roy Batty en *Blade Runner*)



EDITA

Fundación española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT)

DIRECCIÓN

Marián del Egido Rodríguez

AUTOR

Francisco Barradas Salas

COORDINACIÓN

Rosa M^a Martín Latorre

GESTIÓN

Isabel Tarancón Santana

ILUSTRACIÓN

Curro Oñate / WEARBEARD

MAQUETACIÓN

a.f. diseño y comunicación

IMPRESIÓN

Editorial MIC

Depósito legal M-41839-2018

Nipo 057-18-083-8

e-Nipo 057-18-084-3

Síguenos en

Agradecimientos del autor

Un abrazo grande a los Teletubbies (*who love each other very much*) por todo su apoyo y especialmente a Valle, que sigue siendo una niña, por escucharme y por hablar libremente y despertarme de mis sueños dogmáticos.

Gracias a los que se atrevieron a leer una versión preliminar de esta publicación y a contarme su experiencia: Pablo, Paloma, Valle y Belén.

Gracias a Curro por las discusiones, a Marta *the Doctor* por señalar el camino y a Rosa por su esfuerzo y su paciencia.

A Blanca y a Manuel, para que sigan preguntando (me) por los rayos cósmicos. And to Belén, *Light of my life...*

P. B.

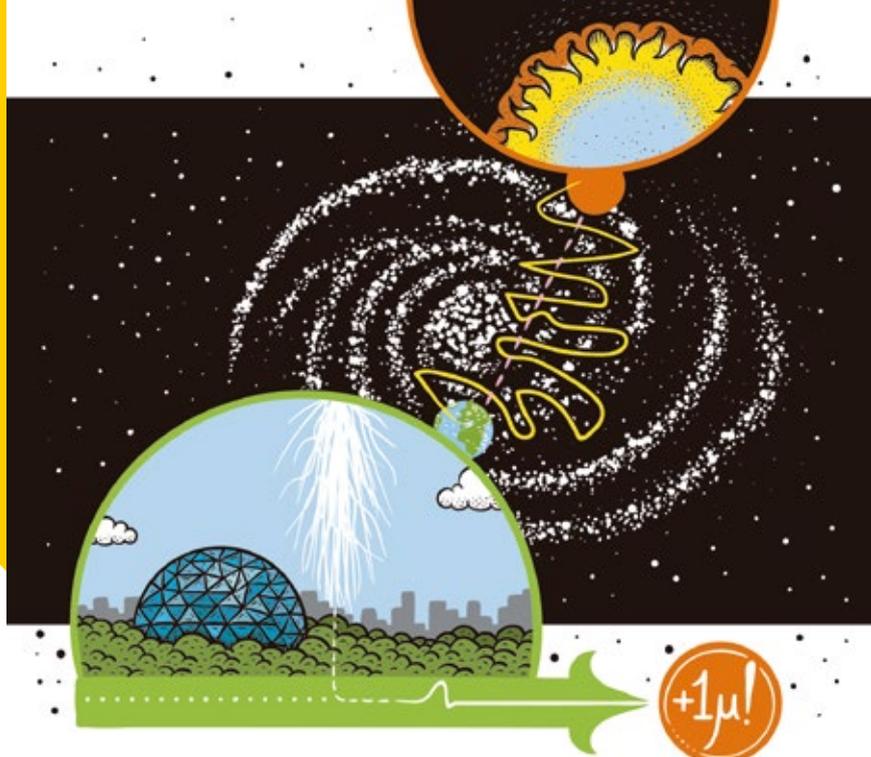


Figura 0 Un protón es acelerado en un resto de supernova y viaja por nuestra galaxia como parte de lo que llamamos rayos cósmicos primarios. Se tropieza con la estratosfera terrestre y da lugar a una cascada de partículas que forman parte de los rayos cósmicos secundarios. Al final, una de estas partículas, un muón (μ), pasa por nuestro detector y lo registramos (+1 μ !)

Rayos Cósmicos

Imagina...

Hace muchos años, en un resto de **supernova** situado en la otra punta de nuestra galaxia, un protón es acelerado hasta casi la velocidad de la luz por una **onda de choque**.

Después de recorrer una distancia inmensa guiado por los campos magnéticos, el protón choca con el núcleo de un átomo en la estratosfera terrestre dando lugar a una cascada de partículas que viajan hacia la superficie a toda velocidad.

Una de ellas, un **muón (μ)** creado a unos 15 km de altura, por encima de donde vuelan los aviones de pasajeros, entra en el Museo unas 50 millonésimas de segundo más tarde, atraviesa nuestro detector y queda registrado en el contador (+1 μ !)

En este cuaderno veremos lo fácil que es construir un aparato para observar las trazas que dejan esas partículas cósmicas y también interpretaremos las medidas de otros detectores caseros, aprendiendo por el camino sobre la física de partículas, la teoría de la relatividad y las leyes del azar.

Además, hablaremos de lo que tienen en común los destellos de luz que “ven” los astronautas con los ojos cerrados, el posible descubrimiento de nuevas cavidades en las pirámides de Egipto, algunos riesgos de volar en avión o viajar a Marte, ciertas mutaciones y fallos informáticos aparentemente inexplicables, la formación de las nubes, el carbono - 14 y la astrofísica de ultra alta energía:

Son los **rayos cósmicos**.



Rayos Cósmicos

I. Origen, composición y aceleración

La astrofísica de los rayos cósmicos no es una ciencia de laboratorio. No podemos hacer experimentos en condiciones controladas, sino que casi siempre hay que conformarse con recoger observaciones que luego intentaremos hacer encajar en una historia coherente: un *modelo científico*.

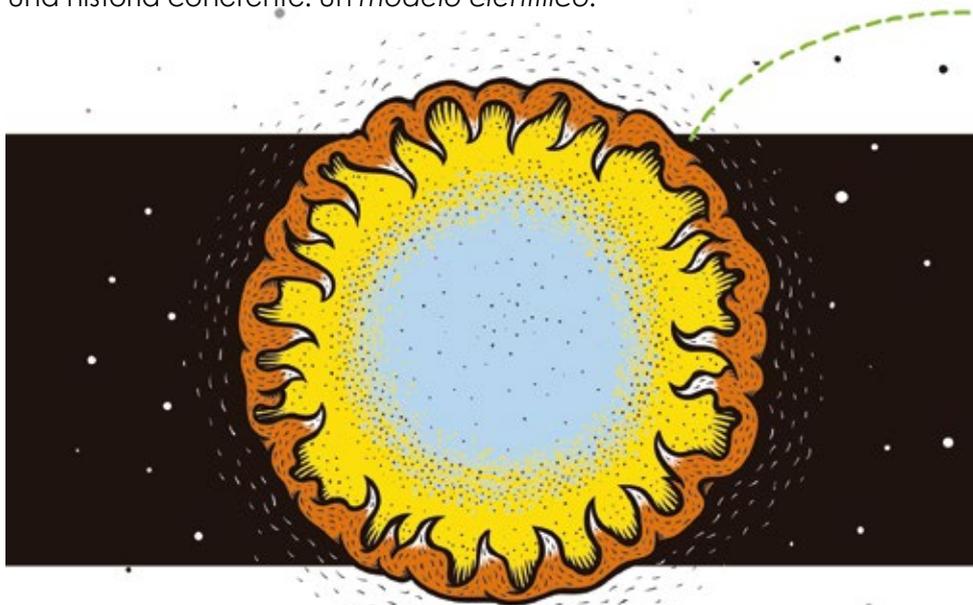


Figura 1 Después de su aceleración en un resto de supernova, una partícula cargada se va moviendo en espiral (rojo) siguiendo las líneas del campo magnético galáctico (verde).

Así, observando las partículas que llegan a la Tierra desde el exterior –los **rayos cósmicos primarios**– y las que se crean en la atmósfera a partir de ellas –los **rayos cósmicos secundarios**– hemos ido construyendo un modelo basado en las leyes de la física y en lo que sabemos sobre las estrellas y las galaxias.

Según este modelo, los rayos cósmicos primarios son partículas subatómicas aceleradas hasta alcanzar altas energías y velocidades cercanas a la máxima posible, la de la luz en el vacío (unos 300 000 km/s).

En los rayos cósmicos primarios se encuentran todas las partículas cargadas estables, entre las que dominan los protones, con algo menos del 90%, seguidos de los núcleos de helio (o *partículas alfa*) con cerca del 9 %. El resto son núcleos atómicos más pesados producidos en las estrellas más un pequeño porcentaje de otras partículas, sobre todo electrones.

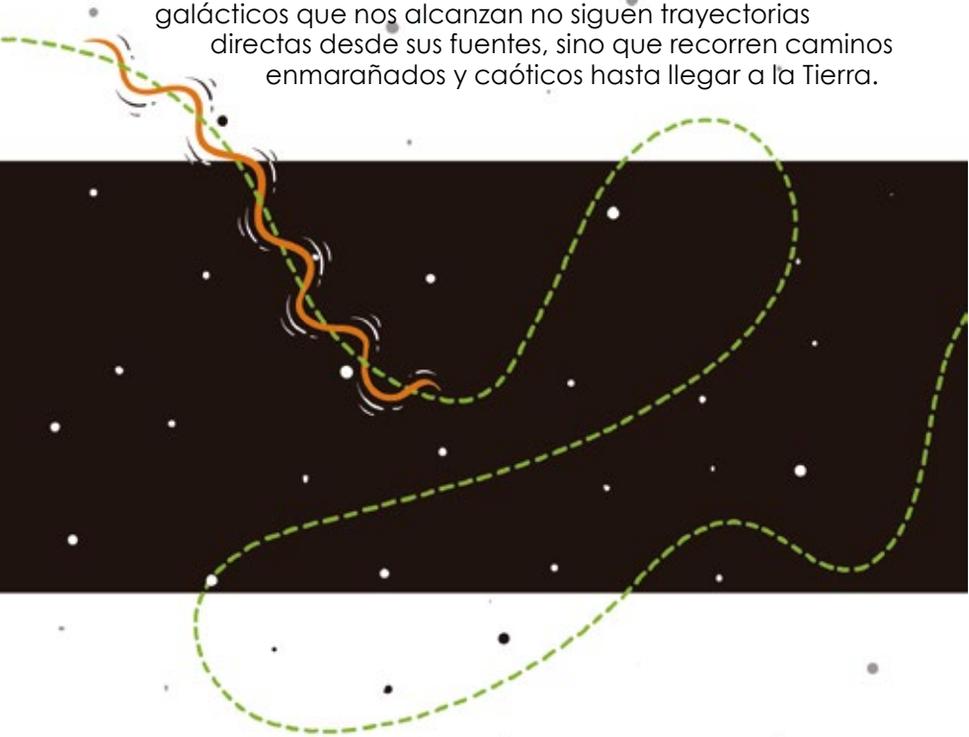
Sus energías van desde unos 10^{10} J (1 GeV = 10^9 eV; ver glosario para los términos en negrita) hasta cien mil millones de veces más, del orden de 10 J (10^8 TeV = 10^{20} eV). Este último valor es decenas de millones de veces mayor que el de un protón acelerado en el LHC del CERN y comparable a la energía cinética que gana una manzana al caer desde un árbol, aunque concentrada en un volumen enormemente más pequeño (unas 10^{40} veces menor).

Aparte de las partículas de baja energía asociadas con los destellos solares, los rayos cósmicos proceden de fuera del sistema solar. Si vinieran del Sol, su intensidad no sería casi la misma de noche y de día, que es lo que sucede...

La gran mayoría de los rayos cósmicos que detectamos provienen de nuestra galaxia, aunque hoy sabemos con bastante seguridad que aquellos pocos con energías mayores que 10^{18} eV llegan desde fuera de ella.

Se cree que los rayos cósmicos galácticos han sido acelerados sobre todo al rebotar una y otra vez en los **campos magnéticos** de las ondas de choque que se forman en los restos de supernovas.

Una vez aceleradas, las partículas cargadas se mueven por la galaxia donde nacieron conducidas por los campos magnéticos que la atraviesan (ver figura 1). Estos campos no tienen una distribución espacial ordenada, por lo que los rayos cósmicos galácticos que nos alcanzan no siguen trayectorias directas desde sus fuentes, sino que recorren caminos enmarañados y caóticos hasta llegar a la Tierra.



Hay una excepción: la pequeña fracción de rayos cósmicos con las energías más altas se ven menos afectados por los campos magnéticos y siguen trayectorias menos retorcidas que, además, pueden llevarlos fuera de su galaxia de origen.

Para estos rayos cósmicos extragalácticos no existe aún un modelo que funcione bien. En julio de 2018 se obtuvieron pistas que indican que algunos de ellos son acelerados en agujeros negros supermasivos en el centro de galaxias activas, pero no pueden descartarse otros procesos exóticos, algunos de los cuales ni siquiera podemos imaginar ahora.

Para pensar...

Muchos dibujos sugieren que los rayos cósmicos primarios llegan preferentemente "desde arriba". ¿Es eso cierto? Más en general: si los rayos cósmicos primarios son acelerados en restos de supernova u otros objetos distribuidos por toda la Galaxia y luego siguen caminos extraordinariamente retorcidos hasta que se tropiezan con la Tierra, ¿es de esperar que lleguen más desde alguna dirección particular, por ejemplo "desde arriba" o incluso del centro de la Galaxia, donde la densidad estelar es mayor?

Solución en el capítulo 2



Rayos Cósmicos

2. Las partículas elementales

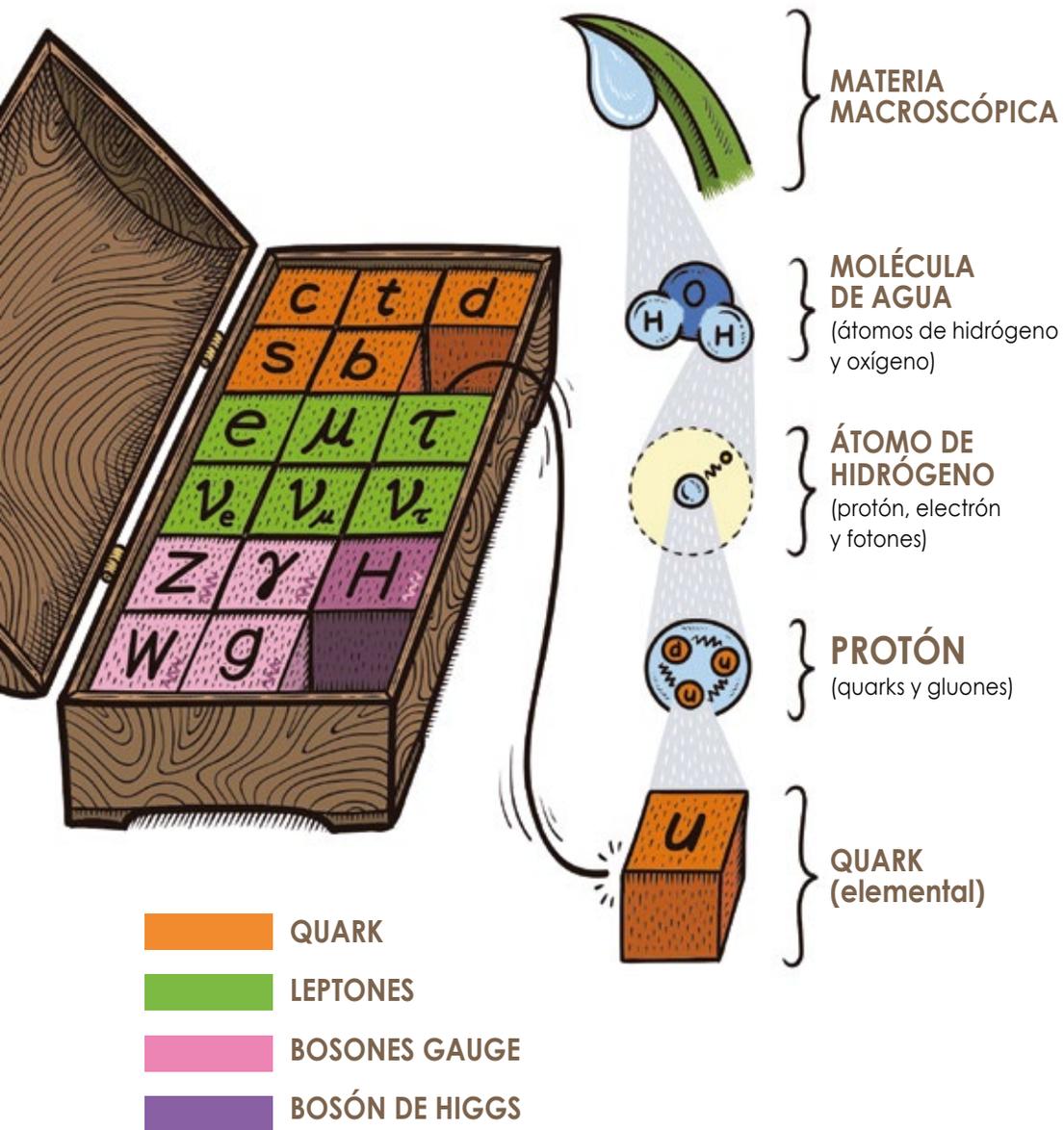


Figura 2 Las partículas elementales (izquierda) con sus interacciones y los sucesivos niveles de estructura que se pueden construir a partir de ellas (derecha), desde partículas subatómicas como el protón hasta la materia macroscópica ordinaria. En el glosario se incluye una tabla más completa.

La materia ordinaria está compuesta por los quarks (u) y (d), los gluones (g) que los mantienen unidos formando protones y neutrones, los electrones (e) y los fotones (γ) que ligan los electrones a los átomos. Los gluones y fotones, que son bosones gauge, se representan mediante pequeñas ondas en la figura.

Una de las preguntas más básicas de la ciencia es ¿de qué está hecho todo? ¿Hay algún conjunto de “piezas básicas” que permitan “construir” el Universo?

La respuesta moderna está en la figura 2: un pequeño conjunto de partículas elementales, aparentemente sin estructura: los **quarks** y los **leptones** y las interacciones entre ellas (electromagnética, gravitatoria, fuerte y débil) con sus partículas asociadas (los **bosones gauge**) más el **bosón de Higgs** permiten explicar bastante bien nuestras observaciones y experimentos, a excepción de la gravedad.

Así por ejemplo, los protones de los rayos cósmicos que llegan hasta la Tierra están compuestos por quarks unidos por la interacción fuerte, “transmitida” por los gluones (según una metáfora típica, los quarks se mantienen unidos intercambiando gluones entre ellos).

Un átomo de hidrógeno está formado por un protón y un electrón unidos por la interacción electromagnética (asimilable al intercambio de fotones, según la misma metáfora). Los átomos pueden agruparse de distintas maneras, por ejemplo en moléculas; así, dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno forman una molécula de agua.

Finalmente, llegamos a nuestro mundo macroscópico en el que una gota de agua resulta de la unión –no muy fuerte– de unas 10^{21} (un uno seguido por 21 ceros) moléculas de agua.

Las partículas no son bolitas

A pesar de que los dibujos y nuestro lenguaje nos lleven a verlo así, las partículas son objetos enormemente alejados de nuestra experiencia cotidiana. Para empezar, en determinadas circunstancias se comportan como ondas y no como “bolitas”. Lo cierto es que muchos físicos afirman que los objetos fundamentales de la física no son las partículas, sino los *campos cuánticos*.

Un ejemplo especialmente importante del comportamiento no intuitivo de las partículas elementales es su inestabilidad: muchas de ellas se transforman espontáneamente en otras. Por ejemplo, los muones sobreviven un tiempo medio de dos millonésimas de segundo antes de transformarse en otras partículas también elementales y que por tanto no formaban parte de los muones: electrones y neutrinos. Se representa así:



Para pensar...

Según el punto de vista ingenuo (clásico): ¿Qué se esperaría obtener de una colisión de dos protones, teniendo en cuenta que están compuestos por quarks y gluones? Ayuda: ¿Qué sucede si hacemos chocar violentamente dos relojes uno contra otro?

Los rayos cósmicos han sido un instrumento crucial para el estudio de la estructura de la materia: en ellos se descubrieron algunas partículas elementales, como los *muones* y los *positrones*. Estos últimos, llamados también *antielectrones* fueron el primer ejemplo de *antimateria*. Sabemos hoy que a cada partícula material le corresponde una antipartícula con iguales características, excepto porque sus cargas (por ejemplo, la eléctrica) son opuestas.



Rayos Cósmicos

3. los Rayos Cósmicos en la atmósfera

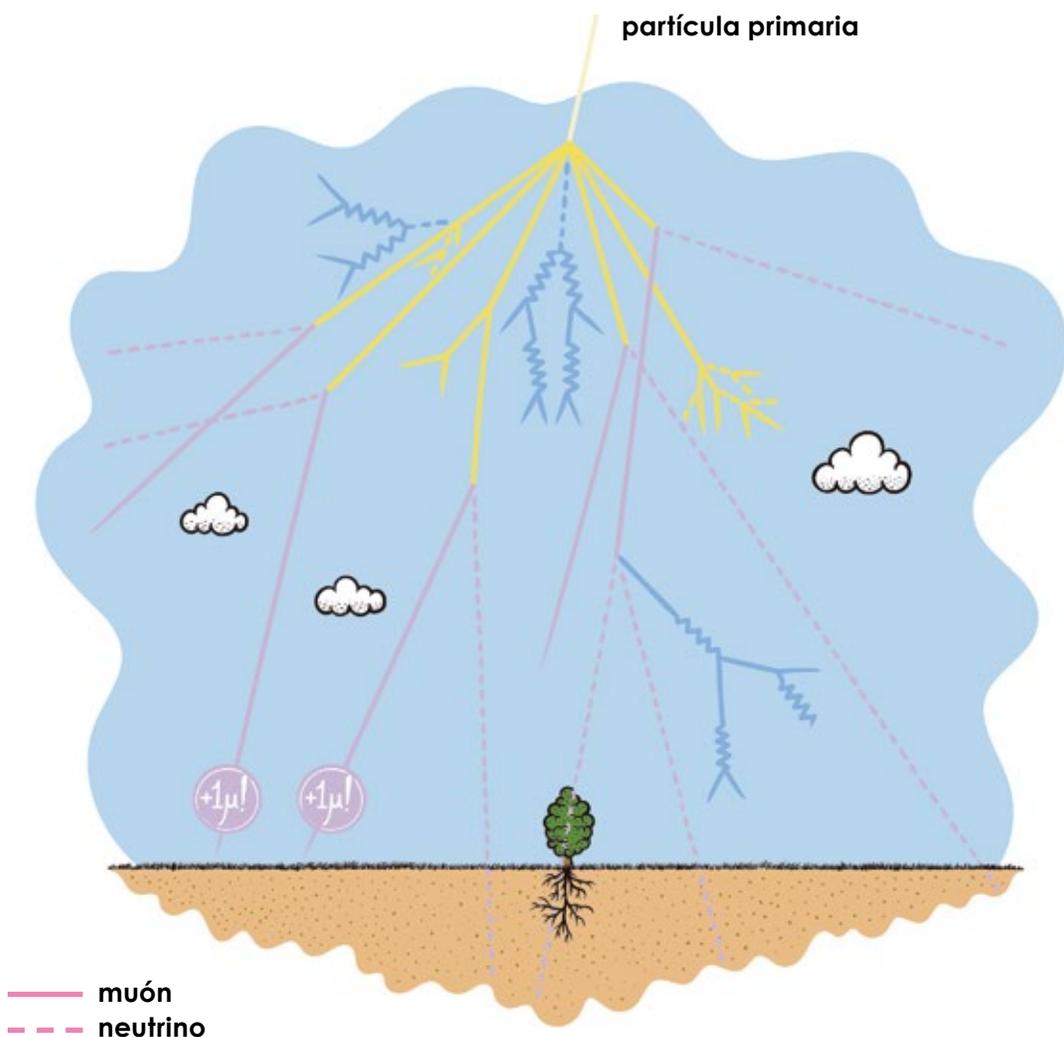


Figura 3 **Cascada de rayos cósmicos secundarios que se desarrolla al colisionar una partícula de los rayos cósmicos primarios con el núcleo de un átomo de la alta atmósfera. A la superficie llegan sobre todo neutrinos (ν , que penetran en el interior de la Tierra con gran facilidad) y muones (μ).**

Cuando un rayo cósmico primario, por ejemplo un protón, se tropieza con la Tierra, lo primero que se encuentra es la atmósfera. Allí, a una altura media de unos 15 km se produce una colisión con un núcleo atómico, de la que salen muy a menudo un protón o un neutrón y decenas de otras partículas subatómicas de alta energía, especialmente *piones* y *kaones*, iniciando así una *cascada atmosférica*. Con mucha menor frecuencia, el producto pueden ser otras partículas, hasta las más pesadas, como *Higgs* o *quarks top*.

Todas estas part3culas son inestables y se desintegran con unos tiempos medios de vida muy cortos, de modo que a la superficie llegan principalmente los descendientes de esos piones y kaones, que son en su mayor3a muones y neutrinos.

Los neutrinos son indetectables sin medios profesionales. Sin embargo, los muones pueden "verse" con m3todos caseros como los que se describen en el cap3tulo 5.

Estudiar los rayos c3smicos primarios es muy dif3cil, pues hay que llevar a cabo experimentos a gran altitud. Esto puede hacerse mediante globos aerost3ticos que suban hasta varias decenas de kil3metros de altura o, mejor a3n, en sat3lites que orbiten a varios cientos de kil3metros (como el detector AMS ubicado en la estaci3n espacial internacional ISS). Estos detectores son por fuerza peque3os, con 3reas de no m3s de unos pocos metros cuadrados. Como adem3s la frecuencia de llegada de los rayos c3smicos m3s energ3ticos es muy baja (del orden de una part3cula de m3s de 10^{15} eV por metro cuadrado y a3o), acumular suficientes casos para su estudio lleva mucho tiempo.

Una soluci3n es estudiar las cascadas en grandes experimentos en la superficie terrestre (como Auger, con m3s de 1600 detectores que cubren un 3rea de 3000 km² en La Pampa). Su objetivo es reconstruir la direcci3n y energ3a as3 como otros detalles sobre la naturaleza de los primarios. Para lograrlo se realizan simulaciones de las cascadas teniendo en cuenta las leyes de la f3sica y se comparan con las observaciones.

Se puede ver una de estas simulaciones en:

https://masterclass.icecube.wisc.edu/es/icetop/midiendo_rayos_cosmicos

Soluci3n al reto del cap3tulo 1

Isotrop3a de los rayos c3smicos primarios

A su llegada a la Tierra, los rayos c3smicos llegan casi perfectamente por igual desde cualquier direcci3n. Esto parece algo muy raro si vienen de nuestra galaxia, pues 3sta tiene forma de disco fino y mucho m3s denso en el centro.

¿No deber3an llegar m3s rayos c3smicos desde la direcci3n del centro de la Galaxia y menos desde la periferia y las direcciones perpendiculares al disco? Si como es muy probable, sus fuentes son objetos localizados, como las estrellas (y no por ejemplo, masas difusas de gas), esto s3lo puede suceder si los caminos que siguen hasta la Tierra han dado tantas vueltas y son tan retorcidos que al llegar ya no tienen ninguna relaci3n con la direcci3n en la que est3 la fuente. Algo as3 le ocurre a la luz en un banco de niebla muy denso: las gotitas de agua dispersan la luz en todas direcciones y los rayos de luz "pierden la memoria" de su fuente, por lo que s3lo se ve una masa difusa y no, por ejemplo, las farolas o el Sol.

Para pensar...

Los muones se crean a una altura media de 15 km, su vida media es de unas 2.2 millon3simas de segundo ($2.2 \cdot 10^{-6}$ s) y la mayor3a viajan casi a la velocidad de la luz.

Calcular la distancia media que podr3an recorrer, como mucho, en ese tiempo y a la vista del resultado responder a esta pregunta: ¿c3mo es posible que a nivel del mar siga habiendo muchos muones?

Soluci3n en el cap3tulo 4



Rayos Cósmicos

4. Relatividad especial

El comportamiento de los muones de los rayos cósmicos secundarios es una de las mejores maneras de acercarse a la relatividad especial, que constituye uno de los pilares de la física actual.

Los muones son inestables, es decir, se desintegran espontáneamente en otras partículas. Medir su tiempo de **vida media** (τ) en el laboratorio es relativamente sencillo: los muones se frenan en un bloque de material y se espera hasta que aparezca un electrón, que es producto y señal de su desintegración. El resultado estadístico de las medidas es $\tau = 0,0000021969811$ s

Por otro lado, la velocidad de una partícula con masa –como el muón– tiene como límite inalcanzable la velocidad de la luz en el vacío $c = 299\,792\,458$ m/s (este es uno de los resultados fundamentales de la relatividad especial, con un respaldo empírico impresionante). Los datos experimentales indican, además, que la velocidad media de los muones cósmicos cerca de su nacimiento es de más del 99 % de la velocidad de la luz.

Arturo Duperier

El físico español Arturo Duperier, exiliado en el Reino Unido tras la Guerra Civil española, fue clave en la confirmación experimental de que los muones de los rayos cósmicos secundarios se crean a una altitud media de unos 16 kilómetros.

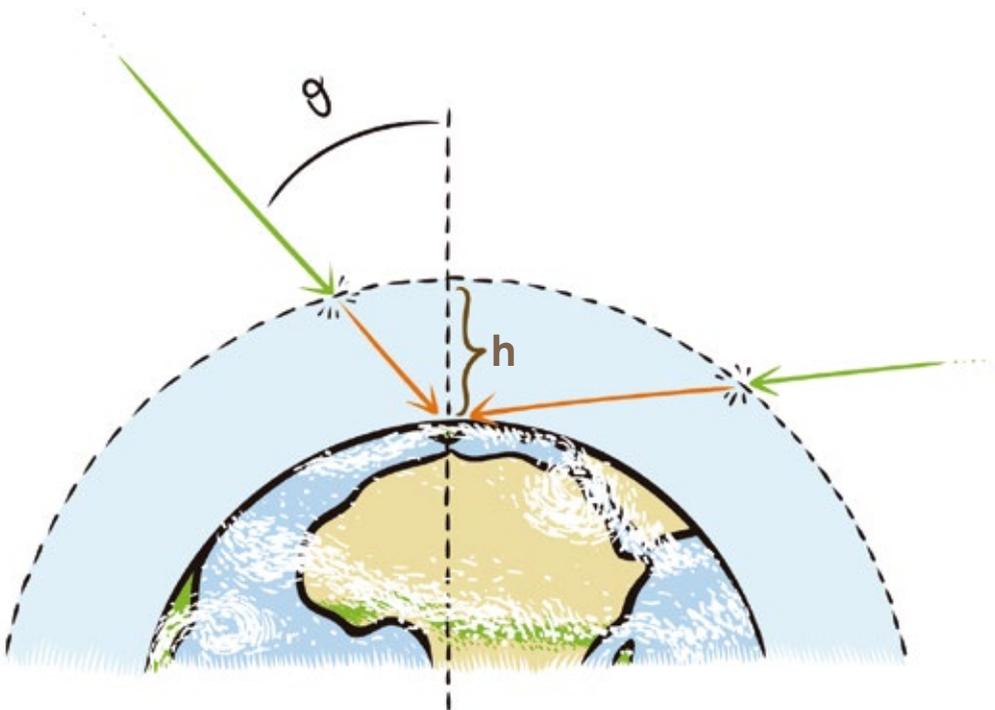


Figura 4 **Modelo simplificado para la propagación de los muones en la atmósfera terrestre.** En verde el protón primario y en naranja los muones secundarios. θ es el ángulo con la vertical y h la altura a la que se producen los muones.

Esto significa que, en promedio, no podrán recorrer más de unos
 $c \cdot \tau \approx 300\,000\,000 \text{ m/s} \cdot 0,000002 \text{ s} \approx 600 \text{ m}$

¡Resulta que muy pocos muones de los que se han creado a 15 km deberían alcanzar la superficie! **Y sin embargo, hay un flujo de aproximadamente 1 muón por cm^2 y por minuto.**

Es cierto que sólo estamos usando promedios, de modo que algunos muones se crearán más abajo o tendrán vidas más largas. Sin embargo, al hacer los cálculos rigurosamente el resultado es que sólo debería llegar del orden de un muón por cada mil millones de los creados en la alta atmósfera. Por el contrario, el resultado experimental es que sobrevive ¡uno de cada veinte!

La explicación está en la *dilatación temporal* de la relatividad especial, según la cual el tiempo en los relojes en movimiento (y por reloj se entiende cualquier sistema que mida el paso del tiempo) transcurre a un ritmo más lento que el medido en los relojes en reposo. Este efecto crece con la velocidad de las partículas.

Se ha obtenido para la vida media de los muones en reposo el valor $\tau \approx 0,000002 \text{ s}$. Ahora bien, al hacer medidas con muones cósmicos estamos viendo partículas que se mueven respecto a nosotros típicamente al 99,98 % de la velocidad de la luz en el vacío. Para ese valor, dice la relatividad especial que observaremos que el “reloj interno” de los muones, el que les dice cuándo han de desintegrarse, va unas 50 veces más lento que el del laboratorio. Es decir, nosotros mediremos para los muones con esas energías típicas una vida media de $T \approx 50 \tau$ (y más a mayores energías), lo que implica que las partículas podrán recorrer distancias unas 50 veces mayores, lo suficiente como para que muchos muones puedan sobrevivir a las decenas de kilómetros que hay hasta la superficie terrestre.

Desde luego, el punto de vista del muón (que se ve a sí mismo en reposo y mediría $\tau \approx 0,000002 \text{ s}$) es igualmente válido que el nuestro, con lo que para él serán nuestros relojes los que atrasan.

Para avanzar, necesitamos un modelo simple de la propagación de los rayos cósmicos secundarios en la atmósfera (figura 4) a partir de un protón primario (verde) que interacciona con la atmósfera a una altitud h . Ignoramos los detalles y suponemos que el resultado final es un muón (naranja) que se mueve aproximadamente desde el mismo punto y en la misma dirección.

Para pensar

¿Cómo es que casi sólo hay muones verticales en la superficie si los rayos cósmicos llegan por igual en todas direcciones. Pista: observar la Fig. 4 y buscar qué diferencia la dirección vertical de, por ejemplo, la horizontal en lo que respecta a los muones.

Solución al reto del capítulo 3

En una indicación más de que las partículas no son bolitas, la colisión de dos protones, compuestos por quarks y gluones puede dar (y da, como se ve continuamente en el LHC) otras partículas elementales, como muones, electrones, neutrinos, etc. que no estaban en los protones antes del choque.

Según la relatividad especial, la energía de esos protones (que es mayoritariamente cinética), puede transformarse en otras partículas, incluso de mayor masa que las de partida, siempre que no se violen las leyes de conservación de la física. Aquí no hay más remedio que citar la ecuación de Einstein:

$$E = mc^2$$

Solución en el capítulo 5

5. Cómo detectar Rayos Cósmicos

Cualquiera que disponga de una modesta cantidad de dinero puede construir el detector más sencillo de toda la física de partículas: una cámara de niebla.

Este instrumento no es más que una caja herméticamente cerrada en la que hay una atmósfera de aire y vapor de alcohol. El fondo de la caja se mantiene muy frío, a decenas de grados bajo cero, por ejemplo con hielo seco.

En estas condiciones, cerca de la base de la caja se forma una capa en la que el vapor de alcohol está tan frío como para condensarse en líquido, pero no lo hará sin un "empujón". Esa perturbación exterior es, en este caso, el paso de una partícula cargada con suficiente energía: por ejemplo un muón de los rayos cósmicos secundarios.

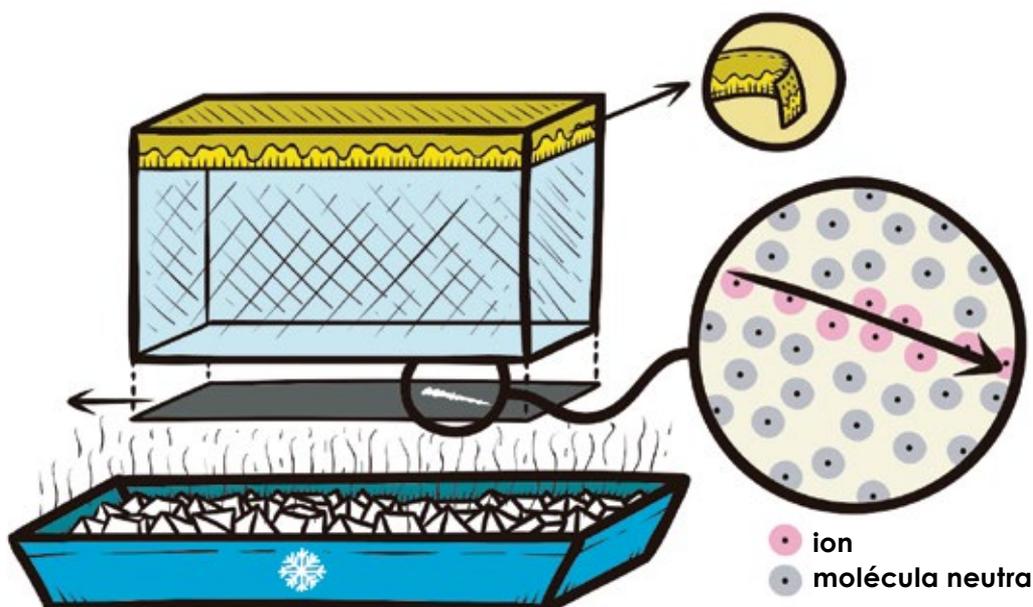


Figura 5A **Cámara casera de niebla.** Se encontrarán instrucciones para construir una en: <https://scool.web.cern.ch/classroom-activities/cloud-chamber>

o

<http://www.scienceinschool.org/es/2010/issue14/cloud>

El muón va "golpeando" a las moléculas de alcohol a su paso y dejando un rastro de iones alrededor de los cuales crecen las gotitas que forman una traza. **¡El paso de una partícula elemental deja una estela visible a simple vista, como las de los aviones a reacción!**

Así que cuando veas trazas en una cámara de niebla como la del Museo Nacional de Ciencia y Tecnología, vuelve a la figura 0 y piensa que todo pudo empezar en una supernova en la otra punta de la galaxia...

Otro detector aún suficientemente sencillo como para poder construirlo en casa, pero que ya permite hacer medidas, está basado en *tubos Geiger* (ver figura 5B).

El principio de la detección (que es bastante general) se parece mucho al de la cámara de niebla: el paso de la partícula ioniza un medio y deja un rastro que se puede detectar de alguna manera. En este caso son electrones e iones que se mueven cada uno hacia el electrodo de signo contrario. Ese movimiento da lugar a una corriente eléctrica que se registra en un contador como signo del paso de una partícula: **+1 μ !**

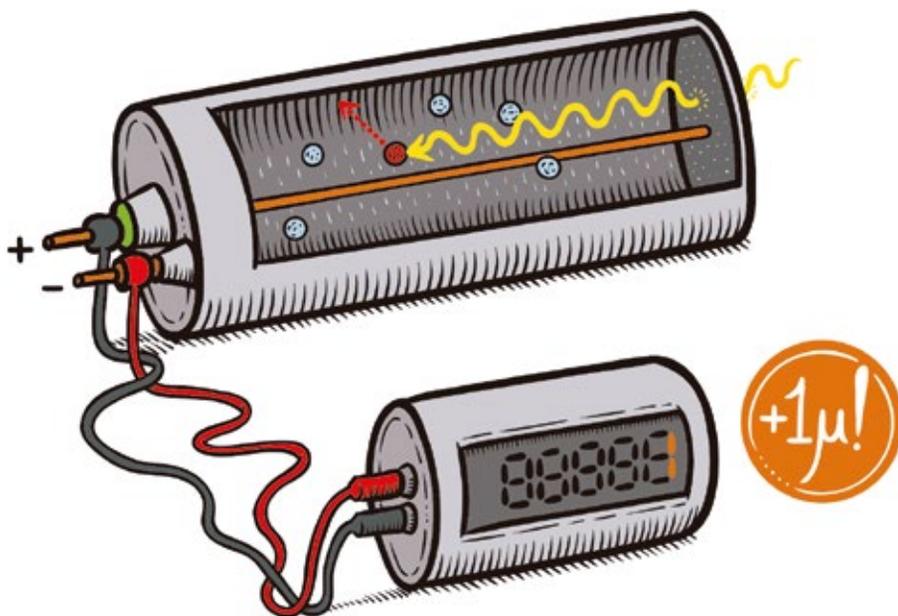


Figura 5B El tubo Geiger es un contenedor lleno de gas. El de la figura tiene dos electrodos que son el cuerpo metálico y un cable central entre los que hay una diferencia de potencial elevada. Cuando lo atraviesa una partícula se producen iones positivos y electrones que viajan hacia los electrodos de signo opuesto, generando una corriente que puede medirse (+1 μ !)

En la exposición del MUNCYT sobre Arturo Duperier se puede ver uno de estos aparatos en funcionamiento. Este detector proporciona un registro temporal del paso de cada partícula para tres direcciones del espacio (vertical, horizontal e inclinada 45° respecto a la vertical).

Para pensar

Hablamos de detectar rayos cósmicos, pero ¿qué seguridad hay de que un registro determinado del detector o una traza en la cámara de niebla tenga ese origen cósmico? Para responder, piensa en si los detectores descritos son sensibles a la identidad exacta u origen de las partículas o más bien sólo a algunas características físicas más sencillas.

6. Investigamos los Rayos Cósmicos

Con un detector como el de la exposición del MUNCYT sobre Arturo Duperier hay dos cosas que se pueden estudiar con facilidad: el intervalo de tiempo que hay entre la detección de un rayo cósmico (*un evento*) y el siguiente, y la variación del flujo de muones con el ángulo del detector respecto a la vertical.

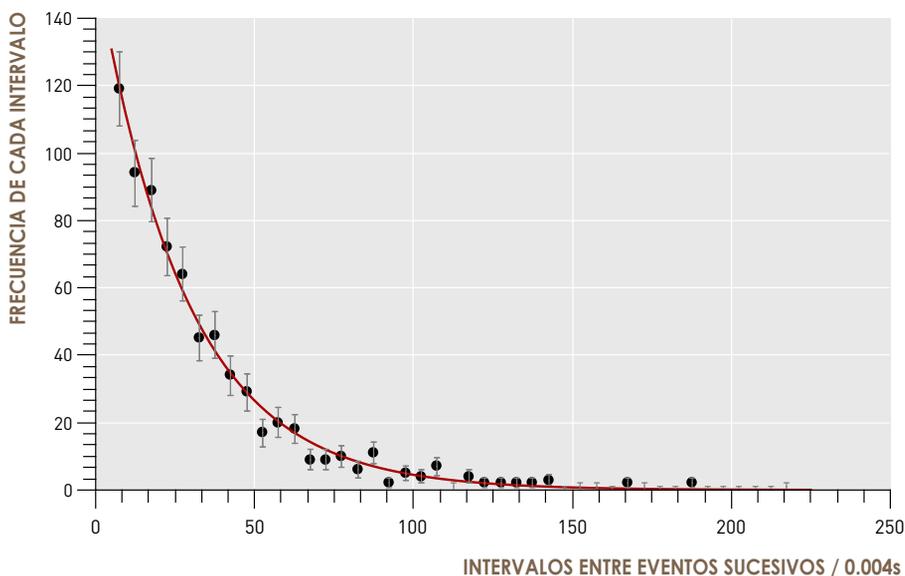


Figura 6A Elaboración propia: distribución de los intervalos de tiempo entre dos rayos cósmicos sucesivos que se registran en el detector. Se muestra una curva exponencial a la que se ajustan los datos experimentales, que aparecen con unas barras verticales (“de error”) que indican la incertidumbre en la medida.

No hay manera de predecir cuándo vamos a detectar un muón; se trata de un evento *aleatorio* con una probabilidad de que suceda por unidad de tiempo aproximadamente constante (el ritmo promedio al que caen los muones varía poco). Además, la llegada de una partícula al detector es independiente de la llegada de la siguiente (o la anterior).

Puede parecer sorprendente que este proceso que sucede al azar esté sometido a leyes matemáticas precisas, pero así es. La distribución de los intervalos de tiempo entre dos eventos consecutivos se ajusta bien a una función matemática sencilla: la exponencial que aparece en la figura 6A junto con datos experimentales obtenidos con un detector casero como el del Museo.

Una gráfica de este tipo se obtiene también, por ejemplo, si nos dedicamos a medir los intervalos de tiempo entre la caída de dos gotas de lluvia sucesivas en un chubasco o la llegada de llamadas a un *call centre*: aunque sucedan a un ritmo constante de 200 gotas por segundo o 40 llamadas por hora, ni las gotas ni las llamadas son igualmente espaciadas; el momento exacto en que suceden es aleatorio y también tiene una distribución que es exponencial con buena aproximación.

La experiencia indica que en nuestros detectores caseros prácticamente no se detecta ningún evento cuando están orientados para medir en la dirección horizontal ($\theta = \pm 90^\circ$), mientras que en la vertical ($\theta = 0^\circ$) hay un claro máximo, tal como se ve en la figura 6B. ¿Pero no habíamos quedado (páginas 8 y 12) en que los rayos cósmicos llegaban por igual en todas direcciones?

Solución al reto del capítulo 4

La relatividad especial y la variación del flujo de muones con el ángulo del detector respecto a la vertical.

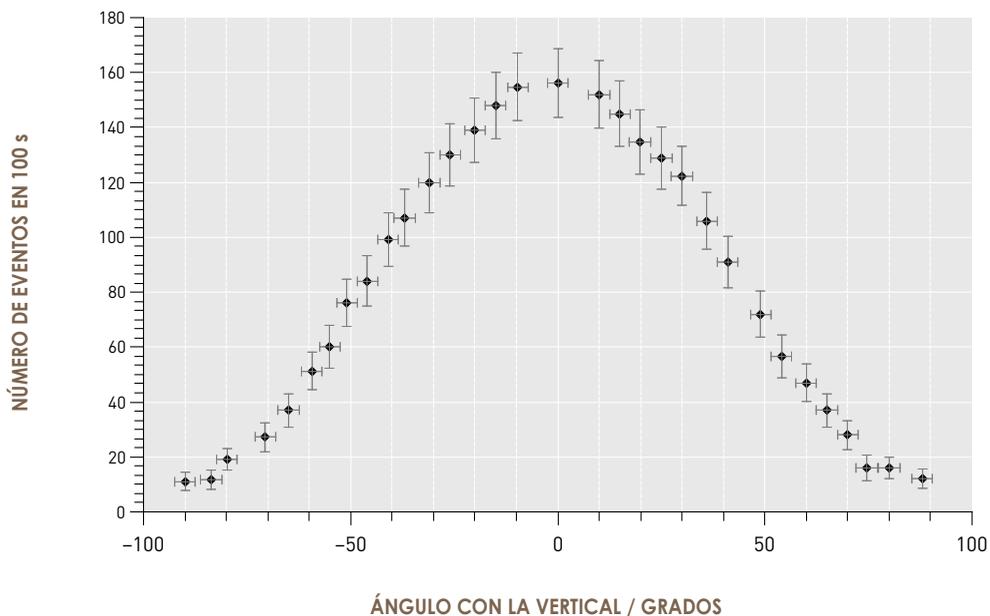


Figura 6B : **Elaboración propia: variación típica del flujo de rayos cósmicos respecto al ángulo con la vertical (θ).**

La explicación se encuentra en la inestabilidad de los muones: la diferencia entre los que viajan hacia la superficie horizontalmente y los que lo hacen verticalmente es la longitud de su recorrido (ver la figura 4). Cuanto más largo sea el trayecto, más tiempo habrán tenido las partículas para desintegrarse espontáneamente por el camino: por eso hay tan pocos muones horizontales.

Solución al reto del capítulo 5

En la cámara de niebla hay trazas de distintas características que dependen del tipo de partícula que la atraviesa y que permiten una identificación al menos aproximada. Sin embargo, en el otro detector, basado en tubos Geiger, todas las cuentas son iguales: se registra el paso de partículas cargadas con suficiente energía como para alterar el medio sensible (ionizar un gas en nuestro caso) sin que importe si, por ejemplo, son muones o electrones ni si su origen es cósmico o no. Aún más, en estos detectores electrónicos hay ruido: señales falsas que no se corresponden con el paso de ninguna partícula. Eso sí, en muchas ocasiones, el diseño del detector permite afinar más. Por ejemplo, las paredes de los tubos Geiger impiden el paso de las partículas alfa de la radiactividad natural. Además, nosotros sólo registramos una cuenta cuando haya dos señales casi simultáneas en dos tubos cercanos, lo que limita el ruido y filtra con más probabilidad los rayos cósmicos que buscamos.

Reto final

Si nos limitamos a los muones de energías más altas, ¿habrá tanta diferencia entre los flujos de muones verticales y los horizontales?



7. los Rayos Cósmicos y nosotros

¿Te parece una historia extraña la que hemos contado? ¿Alejada de tu “vida cotidiana”?

A muchos humanos no solo no nos molesta esa extrañeza, sino que nos estimula (difícilmente habría ciencia sin misterio...) Sin embargo, no está de más ver que los rayos cósmicos no son algo ajeno a nuestras vidas, tal y como muestran algunas noticias que se han podido leer en los medios de comunicación (nota: todos los *url* que aparecen en esta publicación han sido comprobados y son correctos en septiembre de 2018):

1. **Mutaciones aleatorias en el ADN:** Los rayos cósmicos, como otras radiaciones ionizantes, son capaces de producir cambios en el ADN. Estas mutaciones existen desde siempre y muy probablemente forman parte de los mecanismos de la selección natural, pero también pueden dar lugar a enfermedades: <https://www.technologyreview.es/s/7267/las-radiaciones-cosmicas-podrian-mutar-el-adn>
2. **Fallos informáticos:** de la misma manera que pueden producir daños en el ADN o en otras moléculas biológicas, serán capaces de afectar a otros materiales, en particular a los dispositivos electrónicos, en los que podrían provocar fallos: http://www.abc.es/ciencia/abci-particulas-espacio-externo-pueden-bloquear-movil-201702200905_noticia.html
3. **Riesgos profesionales de ser auxiliar de vuelo o piloto:** Basta un sencillo contador Geiger, para comprobar que el nivel de radiación cósmica en los vuelos comerciales –que alcanzan unos 10 000 metros de altitud– es unas veinte veces mayor que en la superficie. Además de las mutaciones mencionadas en el punto 1, ya se han podido asociar los rayos cósmicos con un riesgo más elevado de cataratas. Esto se tiene en cuenta en las normas sobre la salud laboral de las profesiones citadas. Ver <http://www.rtve.es/noticias/20170510/pasajeros-avion-sufren-riesgo-cada-vez-mayor-radiacion-espacial/1543801.shtml>
4. **Riesgos de un viaje a la Luna o a Marte:** la Tierra está protegida de las partículas primero por el viento solar y sus campos magnéticos, luego por el campo magnético terrestre y finalmente por su atmósfera. En un viaje interplanetario y en la estancia posterior, estos factores pueden disminuir o desaparecer dando lugar a serios problemas que habrá que resolver: <https://danielmarin.naukas.com/2018/01/03/la-radiacion-y-los-viajes-tripulados-a-marte-barrera-infranqueable-o-riesgo-asumible/>
5. **Destellos en los ojos cerrados de los astronautas:** Muchos astronautas describen haber visto fogonazos de luz con los ojos cerrados: cuando un rayo cósmico primario de alta energía impacta contra las paredes de la nave se producen secundarios que penetran en la cabeza de los astronautas dando lugar a esos destellos de los que nos habla, por ejemplo, Antonio Martínez Ron en “¿Qué ven los astronautas cuando cierran los ojos?” accesible desde el blog del autor: <http://www.fogonazos.es/2009/06/que-ven-los-astronautas-cuando-cierran.html>
6. **Búsqueda de cavidades desconocidas en las pirámides, volcanes, etc.:** Los materiales densos, como la piedra o las rocas, absorben más muones que el aire, por eso, una atenuación menor de la esperada del flujo de muones cósmicos al atravesar un objeto podría indicar la existencia de una cavidad en el material: https://elpais.com/elpais/2017/11/01/ciencia/1509537816_384789.html, <https://www.scienceinschool.org/es/2013/issue27/muons>, https://elpais.com/elpais/2015/01/30/ciencia/1422612275_345543.html, <https://vimeo.com/243085434>, Muons in the Cathedral: <https://youtu.be/-LTuclSqRYQ>, La sombra de la Luna en rayos cósmicos: <https://danielmarin.naukas.com/2011/11/17/la-sombra-de-la-luna-en-rayos-cosmicos/>
7. **El carbono – 14 y los rayos cósmicos:** este isótopo radiactivo del carbono que se usa para la datación de muestras es producido por los rayos cósmicos al chocar con los átomos de nitrógeno – 14 de la atmósfera: <https://culturacientifica.com/2015/09/24/ciencia-express-el-carbono-14-y-los-rayoscsmicos/>

8. **Seguridad del LHC:** Cuando el gran colisionador de hadrones del CERN (LHC) se puso en marcha en 2008 se pudieron oír voces que auguraban la creación de agujeros negros con funestas consecuencias. Que esos choques de protones no son tan peligrosos lo demuestra la cantidad de interacciones diarias -incluso con energías mucho mayores que las que se dan en el LHC- que tienen lugar entre protones de los rayos cósmicos y otros atmosféricos: ver https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2008/10oct_lhc, <http://igfae.usc.es/gaes/outreach/es%20la%20tierra%20un%20lugar%20seguro.pdf>, y un resumen del documento que el CERN se vio obligado a elaborar: <http://environmental-impact.web.cern.ch/environmental-impact/Objects/LHCSafety/LSAGSummaryReport2008-es.pdf>
9. **Los rayos cósmicos, la formación de las nubes y el cambio climático:** aunque aún no hay seguridad, se está estudiando la posibilidad de que los iones que van creando los rayos cósmicos a su paso por la atmósfera sirvan como núcleos de condensación para la formación de nubes y que este mecanismo tenga impacto en el clima global de la Tierra: <http://www.europapress.es/ciencia/habitat-y-clima/noticia-rayos-cosmicos-tambien-producen-alteraciones-clima-20171220103149.html>. Sin embargo, este impacto parece ser pequeño: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017JD026844>

8. Para saber más

Hay muy pocas fuentes sencillas y fiables en castellano. Quizá la principal sea este libro:

Los rayos cósmicos. Las energías más extremas del universo. Manuel Masip. RBA 2016 (Colección "Un paseo por el cosmos" que se vendió en los kioscos de prensa).

A continuación, una selección de páginas web en las que se puede ampliar información, empezando por una del autor:

<https://www.educa2.madrid.org/web/fbarradas/cosmics>

(Nota: todos los url han sido comprobados y son correctos en septiembre de 2018)

Ver también (en inglés): **Imagine the Universe. Cosmic Rays.** (NASA, 2017, 2013).

https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/cosmic_rays1.html

<https://helios.gsfc.nasa.gov/cosmic.html>

Sobre partículas elementales, una introducción muy accesible se encuentra en:

<http://www.particleadventure.org/spanish/index.html>

<http://www.particleadventure.org/>

Para una tabla detallada de partículas fundamentales y subatómicas ver, por ejemplo:

https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Tabla_de_part%C3%ADculas

Pablo García Abia, físico experimental de partículas del CIEMAT compara los muones con las gotas de lluvia aquí:

Llueven muones a cántaros, https://youtu.be/vD_TPZmr18M

Tres vídeos que muestran cómo hacer una cámara de niebla casera, el último de ellos en español:

<https://youtu.be/xky3f1aSkB8>

<https://youtu.be/szcboZhB6Yc>

<https://youtu.be/IAYZkpinKyU>

Finalmente, un vídeo clásico sobre un experimento para mostrar la dilatación temporal en muones de los rayos cósmicos:

Time Dilation: An Experiment With Mu Mesons 1962 PSSC; David Frisch, James Smith, MIT Physics
<https://youtu.be/3CeQXsliGp8>



Rayos Cósmicos

9. Glosario

Supernova Las estrellas están calientes y emiten luz gracias a la fusión nuclear de los materiales que las componen (inicialmente hidrógeno y helio, que luego se van convirtiendo por fusión en elementos más pesados). Cuando en las estrellas más masivas se agotan todos los combustibles para la fusión, su temperatura cae y la presión ya no es capaz de soportar el propio peso de la estrella, que se encoge brutalmente hasta "rebotar" en un núcleo muy pequeño. Este rebote produce una **onda de choque**, una perturbación de temperatura y presión muy elevadas que se expande a gran velocidad. Una supernova es capaz de brillar durante unos días más que los cien mil millones de estrellas de una galaxia como la nuestra.

Muón Es una partícula elemental muy parecida al electrón pero con una masa unas doscientas veces mayor. Los muones no existen en la materia ordinaria, sino que se crean en procesos de alta energía; los conocemos por los rayos cósmicos o por los experimentos en aceleradores.

10^{-10} (Notación científica) Los científicos necesitan a menudo utilizar números muy grandes o muy pequeños. Dado que escribir, por ejemplo, la velocidad de la luz en el vacío (c) como aproximadamente 300 000 000 m/s no es muy cómodo, se abrevia así: $3 \cdot 10^8$ m/s donde el exponente "8" es el número de ceros que siguen al 3. Si usamos algunos decimales más, el valor de c sería 299 800 000 m/s, en notación científica $2.998 \cdot 10^8$ m/s. Para los números muy pequeños se hace algo muy similar mediante potencias negativas de diez. Así por ejemplo $0.00001 = 10^{-5}$ y $0.00007 = 7 \cdot 10^{-5}$, con el 7 en la 5ª posición después de la coma decimal.

eV (unidades de energía) Si pudiéramos usar una pila de un voltio para acelerar un electrón (que es la partícula elemental con la carga más pequeña que existe de forma libre) este ganaría la energía que se define como 1 eV (un electronvoltio). Esta unidad, aunque normal en los procesos atómicos, es demasiado pequeña para nuestra vida diaria y por eso se usan otras. Por ejemplo, una manzana mediana al caer desde un metro de altura ganará una energía de aproximadamente 1 J (un julio), que equivale a unos $6 \cdot 10^{18}$ eV. El rayo cósmico de mayor energía que se ha medido tiene decenas de J (del orden de 10^{20} eV), comparable a la de un balón de fútbol golpeado en un partido, pero concentrada en un objeto subatómico.

Campos magnéticos A estas alturas, ya parece intuitivamente aceptable decir que un imán modifica de alguna forma el espacio que lo rodea, como se pone de manifiesto al ver que es capaz de atraer a distancia a ciertos objetos. Podemos llamar "campo magnético" a ese "algo" que produce el imán (y otras fuentes, como corrientes eléctricas, etc.), a esa modificación que se extiende de manera continua por todo el espacio (aunque se vaya debilitando muy deprisa al alejarnos de la fuente). Una característica muy importante de los campos magnéticos es que pueden cambiar la dirección del movimiento de las partículas cargadas, aunque no pueden acelerarlas directamente.

Bosones gauge Son un tipo especial de partículas elementales asociadas con las interacciones – electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil– que afectan a los *quarks* y *leptones*. Hay una analogía, peligrosa pero que tiene un grano de verdad, según la cual el mecanismo de estas interacciones (que incluyen pero no se limitan a las fuerzas entre partículas) es el intercambio de *bosones gauge*. Por ejemplo, el fotón es el *bosón gauge* de la interacción electromagnética, por lo que un electrón (con carga negativa) se mantendría electromagnéticamente unido al núcleo (con carga positiva) gracias a estar intercambiando sin cesar fotones con él. Uno de los motivos por los que esta analogía falla es porque las partículas no son "bolitas" clásicas, sino manifestaciones de los campos cuánticos.

Campo cuántico La imagen que tantos de nosotros tenemos de las partículas como objetos localizados en el espacio, digamos "bolitas", incluso cuando se refina para tener en cuenta que las partículas elementales no parecen tener ningún tamaño (y serían más bien "puntos") es manifiestamente incorrecta. Aunque al detectar las partículas sí parecen estar localizadas (un electrón produce un destello en una pantalla, un muón deja una traza en una cámara de niebla

como la estela de un avión...), hay otros fenómenos que exigen que consideremos que en cierto modo la partícula está extendida por todo el espacio, es decir, que es un campo (ver campo magnético más arriba). Así, en lugar de imaginar los electrones como "puntitos", podríamos asimilarlos a un mar, el campo electrónico. Este mar es capaz de oscilar de varias maneras, por ejemplo transportando energía de un sitio a otro. Un tipo de oscilación muy especial del mar sería la formación de una gotita claramente reconocible que nos moja, asimilable a un electrón localizado que se detecta en una pantalla. De la misma manera, los *bosones de Higgs* creados en los experimentos del LHC surgirían al "sacudir" o excitar el campo de Higgs, y los fotones serían el resultado de una excitación especial localizada del campo electromagnético y así con el resto de partículas elementales.

PARTÍCULAS E INTERACCIONES ELEMENTALES

PARTÍCULAS "MATERIALES": quarks y leptones

Quarks

u (<i>up</i>) d (<i>down</i>)	c (<i>charm</i>) s (<i>strange</i>)	t (<i>top</i>) b (<i>bottom</i>)
--------------------------------------	--	---

Leptones

e (<i>electrón</i>) ν_e (<i>neutrino electrónico</i>)	μ (<i>muón</i>) ν_μ (<i>neutrino muónico</i>)	τ (<i>tau</i>) ν_τ (<i>neutrino tautónico</i>)
--	--	---

BOSONES GAUGE: asociados a las interacciones fundamentales

BOSÓN DE HIGGS: asociado al campo de Higgs

γ (*fotón*): interacción electromagnética

H

g (*gluones*): interacción fuerte

W[±], Z: interacción débil

Composición en quarks de algunas partículas subatómicas (no elementales) mencionadas en el texto. (Una barra sobre un símbolo denota que se trata de una antipartícula)

p (protón): *uud*
n (neutrón): *udd*

π^+ (pión positivo): *u \bar{d}*
K⁻ (kaón negativo): *s \bar{u}*

Vida media Muchas partículas elementales (y también partículas subatómicas compuestas por ellas) son intrínsecamente inestables. Un electrón es, por lo que sabemos, eterno. Sin embargo, si tenemos un muón en el laboratorio, se desintegrará espontáneamente, es decir, al cabo de un tiempo imprevisible en cada caso individual, desaparecerá y en su lugar se encontrarán otras partículas (electrones y neutrinos casi siempre). Aunque la vida de una partícula inestable no está definida, si se hace la estadística de un número muy elevado, se puede introducir una cantidad, la vida media, que sí está bien definida y es característica de esa especie. La vida media no es exactamente la media aritmética, pero este detalle no es importante aquí.

E = mc² En nuestra vida diaria, la masa de una pelota en movimiento y su energía (la causante del daño que hace en los choques, por ejemplo) parecen completamente diferentes. Sin embargo, el mundo subatómico y los objetos muy energéticos –que se mueven a gran velocidad– nos obligaron a reconsiderar esta distinción. Por ejemplo, la energía de dos partículas elementales, como un electrón y un positrón que chocan y desaparecen (recordemos que las partículas no son "bolitas" ni "puntitos", sino campos cuánticos) reaparecerá en forma de otras partículas que no estaban contenidas dentro de las primeras y que pueden ser un par de fotones (¡sin masa pero con energía!) o de muones, chorros de partículas compuestas por quarks (que tienen más masa que los electrones iniciales), etc. Es lo que se hace cada día en aceleradores como el LHC: tomar partículas, incrementar su energía cinética y hacerlas chocar para estudiar los productos de las colisiones. En la colisión se convierte parcialmente la energía de las partículas en masa, es decir, se convierte en otras partículas con masa (y también con energía cinética). La expresión $E = mc^2$, es algo así como la tasa de conversión de energía "E" en masa "m": una energía E/c^2 puede transformarse en una masa "m".

Solución final

Según se menciona en las páginas 13 y 14, el factor de dilatación temporal de las partículas (que es de aproximadamente 50 para un muón típico de los rayos cósmicos secundarios) crece con la energía. Es decir, desde nuestro punto de vista, la vida media de las partículas más energéticas se prolonga tanto que muchas más pueden sobrevivir al viaje más largo de las que llevan trayectorias horizontales. El flujo de muones muy energéticos para ángulos muy alejados de la vertical disminuye poco; mucho menos de lo que muestra la figura 6B.

