

# Los Rayos Cósmicos.

Roberto de la Fuente Alvarez

En el presente artículo se recogerán los aspectos más importantes de este interesantísimo campo de la Astrofísica. Para ello me he basado en dos artículos encontrados en Internet, sobre todo en el primero, que he tomado como base:

- «Los Rayos Cósmicos Galácticos», de Gustavo E. Romero y Jorge A. Combi, del Instituto Argentino de Radioastronomía (IAR), Revista de divulgación «CIENCIAHOY», Volumen 8, N°48, Septiembre/Octubre 1998.
- «Rayos Cósmicos, Las partículas más energéticas de la naturaleza», F.Arqueros, Revista de la UNED, «A Distancia», primavera 1994.

Aunque se trata de un hecho perfectamente comprobado, seguramente muchas personas se sorprenderían si supieran que constantemente se encuentran sometidas al bombardeo de partículas de muy alta energía. A La Tierra llegan, cada segundo, aproximadamente diez mil partículas, que con velocidades cercanas a la de la luz golpean cada metro cuadrado de las capas superiores de la atmósfera. Concretamente, a nivel del mar, cada una de nuestras manos extendidas de forma horizontal es atravesada por una de estas partículas, en promedio, una vez por segundo. Estas partículas son los rayos cósmicos, cuyo origen ha intrigado a los científicos desde comienzos de siglo. ¿Qué son estos rayos que llegan desde el cosmos? ¿Cómo son acelera-

dos? ¿Dónde se originan? La utilización combinada de radiotelescopios y satélites con detectores de rayos gamma está produciendo evidencias directas de que las partículas son aceleradas en las gigantescas ondas de choque que causan las estrellas a explotar. Estas explosiones, conocidas como supernovas, son los eventos más violentos que ocurren en la galaxia.

## RESEÑA HISTÓRICA

Los primeros indicios sobre la existencia de los rayos cósmicos surgieron con el siglo. Durante la década previa a la Primera Guerra Mundial, varios científicos entre los cuales se encontraba E. Rutherford, quien por esos años trabajaba en Montreal, estaban interesados en el fenómeno de la ionización. Un átomo se ioniza cuando, al perder un electrón, adquiere carga positiva. La ionización, o proceso por el cual el átomo se ioniza, puede estudiarse por medio de un instrumento llamado electroscopio. Este aparato consta de dos láminas metálicas móviles que se separan debido a la fuerza de repulsión electrostática generada por los iones depositados sobre ellas. Estudios con electroscopios mostraron que la ionización ocurre aun en recipientes cerrados, o incluso aislados por medio de láminas de plomo. Rutherford y sus colaboradores observaron que, asimismo, cuando se coloca el electroscopio dentro de una caja de 5 toneladas de plomo, se pro-

ducen unos 6 iones por segundo por cada centímetro cúbico. Algo llega desde fuera y arranca los electrones de sus átomos. El efecto fue atribuido a una radiación extremadamente penetrante que fue llamada «radiación ionizante», cuyo origen se supuso inicialmente vinculado a la radiactividad terrestre.

Si la Tierra era la responsable por las ionizaciones observadas, entonces los experimentos realizados a cierta altura sobre su superficie deberían mostrar una disminución del número de ionizaciones por unidad de volumen. En 1910, se realizaron medidas en la torre Eiffel (altura: 330m) que mostraban una clara caída en la ionización de 6 a 3,5 eventos por centímetro cúbico por segundo. La cuestión parecía resuelta, al menos en lo que respecta al origen de la radiación. Sin embargo, en 1912, Víctor Hess, que trabajaba como físico en Viena, realizó una serie de mediciones durante ascensiones en globo que mostraron que, después de una disminución inicial, la radiación ionizante aumentaba espectacularmente su intensidad con la distancia a la superficie de la Tierra. A una altura de 9km, se producen más de 80 iones por centímetro cúbico por segundo. La conclusión parecía ser clara: la radiación ionizante proviene del cielo y no de la Tierra. En 1936, Victor Hess recibió el Premio Nobel de Física por el descubrimiento de los rayos cósmicos. La expresión «rayos cósmicos» la in-

rodujo por R. Millikan a mediados de la década de 1920, para denotar la componente de radiación ionizante originada fuera de la Tierra. Millikan y sus colaboradores realizaron gran cantidad de experimentos muy precisos en lagos situados a diferentes alturas sobre el nivel del mar y concluyeron que los rayos cósmicos no provienen de ninguna dirección

Durante las décadas de 1930 y 1940, nuevas tecnologías posibilitaron notables avances en el conocimiento experimental de los rayos cósmicos. El uso de cámaras de niebla, que permiten determinar trayectorias aproximadas y distinguir entre diferentes tipos de partículas, posibilitó estudiar la composición de los rayos cósmicos. Se estableció que las partí-

trumentos a bordo de estos globos revelaron que la mayoría de los rayos cósmicos son núcleos de hidrógeno (llamados también protones) y núcleos de helio (usualmente denominados partículas alfa). Los electrones forman apenas un 1% del flujo total de rayos cósmicos que llegan a la Tierra. Partículas más pesadas que el helio son, tam-



particular del cielo; arriban de todas partes. Esta circunstancia sugiere que el origen del fenómeno no es local (o sea, propio del sistema solar), sino que está relacionado, probablemente, con escalas de distancia mucho mayores, tal vez tan grandes como toda la galaxia.

culas detectadas en la superficie de la Tierra son, en realidad, productos de la interacción de rayos cósmicos primarios, de origen extraterrestre, con átomos de las capas superiores de la atmósfera. Para detectar la radiación original, es necesario colocar los detectores a grandes alturas, por encima de los 17km. Esto se logra por medio de globos estratosféricos no tripulados. Estudios con ins-

bién, escasas. Los rayos no son entonces una forma particularmente energética de radiación electromagnética, como sucede por ejemplo con los rayos gamma, sino que están constituidos por partículas materiales. Esta afirmación es probablemente cierta, hasta energías de  $10E15$  eV (electrónVolt).

## FUENTES Y MECANISMOS DE ACELERACIÓN

La distribución de los rayos cósmicos primarios con la energía (aquello que los astrónomos denominan el «espectro de la radiación») puede describirse utilizando una expresión matemática llamada ley de potencia, que tiene la forma  $N(E)=KE^{-p}$ . Esto significa que el número de partículas  $N$  con energía  $E$  es igual a una cierta constante ( $K$ ) multiplicada por el valor de esa misma energía elevada a una dada potencia negativa  $-p$  (o, lo que es equivalente, dividida por la energía elevada a una potencia positiva  $p$ ). Las observaciones indican que el valor de  $p$  es aproximadamente igual a 2,6, por lo cual el número de partículas disminuye muy rápidamente al aumentar la energía. A energías mayores que  $10E15eV$ , el espectro se hace aún más «empinado». Este cambio puede estar indicando una diferenciación en el origen de las partículas: las más energéticas, que son muy escasas, parecen tener un origen diferente (y tal vez, hasta una composición también distinta) del grueso de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra.

¿Cuál es el origen de la gran mayoría de los rayos cósmicos que llegan hasta nosotros? Sabemos que el Sol acelera partículas y que su actividad magnética reduce la cantidad de radiación cósmica que penetra en el sistema solar. Estos efectos, sin embargo, sólo tienen importancia a bajas energías y son despreciables por encima de  $1GeV$  (GigaelectrónVolt: mil millones de electrónVolt). La fuente de los rayos cósmicos debe estar, por lo

tanto, más allá de los dominios del Sol. Unas consideraciones muy sencillas, basadas sólo en las cantidades de energía involucradas, pueden darnos una pista para seguir.

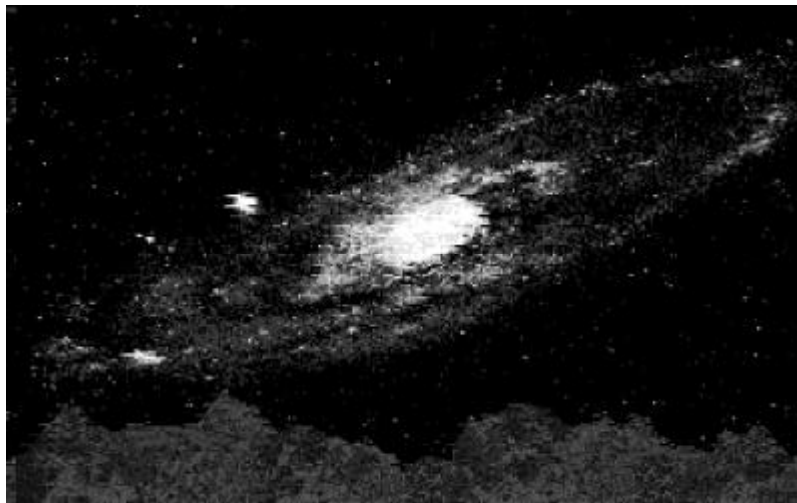
La densidad de energía (cantidad de energía por unidad de volumen) de los rayos cósmicos en la proximidad de la Tierra, determinada por sondas espaciales, es de  $2eV$  por centímetro cúbico, o sea aproximadamente  $3 \times 10E12 erg/cm^3$  (un ergio es la energía necesaria para dar vuelta esta página); llamemos a esta cantidad  $E$ . Supongamos ahora que estos rayos cósmicos llenen nuestra galaxia, tal como lo sugiere el hecho de no observarse ninguna dirección privilegiada de llegada de estos. El volumen de la galaxia es, aproximadamente, de unos  $2,5 \times 10E67 cm^3$ . Como las partículas pierden energía al moverse en el campo magnético de la galaxia, podemos estimar su vida media (o sea, el tiempo durante el cual tendrán energía suficiente como para que las consideremos rayos cósmicos), que resulta ser de unos 20 millones de años (llamemos a este lapso  $t$ ). La potencia necesaria entonces para generar todos estos rayos cósmicos es  $P = e \times V / t = 1,2 \times 10E41 erg/s$ . Esta enorme cantidad de energía liberada por segundo en la galaxia sólo puede producirse en la explosión de estrellas masivas, a través de eventos conocidos como Supernova Tipo II.

Estas gigantescas explosiones liberan unos  $10E51 erg$  cada una y, como se estima que en promedio explota una de estas estrellas

cada 50 años, la potencia media liberada es de unos  $6,3 \times 10E41 erg/s$ . Por tanto, si el 20% de la energía liberada por las supernovas fuese transformada en rayos cósmicos, estas explosiones podrían causar la existencia de la radiación cósmica. Estas consideraciones, si bien nos sugieren dónde, no nos dicen cómo las partículas pueden ser aceleradas. La respuesta a esta última pregunta parece estar relacionada con un mecanismo físico propuesto por Enrico Fermi (destacado físico nuclear italiano) a finales de la década de 1940. Para entenderlo, pensemos en una analogía muy sencilla. Supongamos que tenemos una pequeña pelota perfectamente elástica y que la arrojamamos contra una pared rígida. Si los efectos del rozamiento son despreciables, la pelota simplemente invertirá su velocidad en el choque y volverá hacia nosotros con el mismo impulso con que la arrojamamos. Ahora, imaginemos que la pared se acerca a nuestra posición. Si volvemos a arrojar la pelota, esta ganará ve-



locidad en el choque y volverá a nosotros con una energía mayor que aquella con la cual la arroja- mos. Este exceso de energía le es transferido por la pared. Si a nues- tras espaldas hay otra pared que también avanza hacia nosotros, la pelota pasará sobre nuestras ca- bezas, rebotará en esta segunda pared, ganará nuevamente ener- gía, y saldrá una vez más hacia la primera pared. El proceso se re- petirá y la pelota irá ganando cada vez más energía, hasta que las paredes se detengan o la pe- lota se vuelva tan energética que atra- viese alguna de las paredes y escape (en el lenguaje de los astrofísicos, la pared se termina volvien- do «transparente» para la pelota).



Algo similar a lo que acabamos de describir con esta analogía pue- de estar sucediendo en las explo- siones de las supernovas. Cuan- do la estrella explota, se forma una onda de choque que avanza por el medio interestelar. Esta onda barre el material que hay en el espacio circundante (mayoritariamente hidrógeno neutro), formando una cáscara de materia y amplificando el campo magnético detrás de ella. Las par- tículas liberadas por la explosión, así como otras que pueden ser in- yectadas después por otras estre- llas, son desviadas por las turbu- lencias del campo magnético, en forma similar a como lo hacían las paredes rígidas con la pelota. El campo magnético turbulento en las regiones anterior y posterior al frente de la onda, cumplen el

papel de las paredes de nuestro ejemplo. El proceso, sin embar- go, es más efectivo debido a que las partículas ganan energía extra, cada vez que cruzan el frente de choque de la explosión (la ener- gía de toda partícula que cruza el frente se incrementa debido a la discontinuidad que este introdu- ce en las variables que caracteri- zan al medio en que se propaga). Cuando las partículas se hacen

suficientemente energéticas, esca- pan de la región donde se encuen- tran los restos de la supernova (llamados «remanentes de supernova» por los astrónomos) y se difunden por el espacio con- vertidas en rayos cósmicos. Cál- culos precisos muestran que este proceso permite acelerar protones hasta energías de unos  $10^{15}$  eV y que el espectro resultante tiene forma de ley de potencia, exacta- mente como se lo observa.

#### TÉCNICAS EXPERIMENTA- LES

*Uno de los primeros objetivos experimentales ha sido la caracte- rización de la radiación cósmica que llega a la Tierra. La energía de esta radiación varía en muchos ór-*

*denes de magnitud ( $10^7$ - $10^{20}$  eV) y por tanto, es necesario emplear diversos métodos experimenta- les dependiendo del intervalo de energía en estudio. Para energías inferiores a  $10^5$  eV (1 PeV) es posible la detección directa del núcleo primario. Para ello se transporta en globo o a bordo de satélites los dispositivos de de- tección que en ocasiones consti- tuyen verdaderos laboratorios con un peso de varias toneladas.*

*Las técnicas emplea- das son similares a las de los experi- mentos de física nu- clear y de partículas elementales. Se pro- voca la interacción del rayo cósmico con un medio mate- rial conocido y se estudian las caracte- rísticas de los pro- ductos resultantes.*

*Uno de los métodos es el de las emulsiones anterior- mente mencionado, otros, más sofisticados, reconstruyen las trayectorias de las partículas que se crean en la colisión lo que per- mite medir la dirección del rayo cósmico primario. Entre los pri- meros satélites cabe destacar la serie que con el nombre genéri- co de Proton puso en el espacio la Unión Soviética, el primero de los cuáles, Proton-1, fue lanza- do en Julio de 1965. Entre los experimentos en globo se pue- den mencionar los que la cola- boración JACEE (EEUU - Ja- pón) lleva realizando desde 1979.*

Los primeros datos pusieron de manifiesto que el número de rayos cósmicos primarios es tanto menor cuanto mayor sea la energía de éstos y por tanto,

a muy altas energías el ritmo de llegada es tan lento que las técnicas de detección directa resultan inviables. Por ejemplo, para detectar unos mil rayos cósmicos con energías superiores a 1 PeV sobre una superficie de 10 m<sup>2</sup> se necesitaría más de un año. Se han desarrollado paralelamente una serie de técnicas de detección indirecta basadas en la observación de la cascada atmosférica de partículas empleando detectores instalados sobre la superficie terrestre. Estas técnicas permiten cubrir un amplio margen de energía que va desde 10<sup>11</sup> a 10<sup>20</sup> eV. Si la energía del rayo cósmico primario es superior a 10<sup>14</sup> eV, la componente electromagnética de la cascada puede ser detectada a nivel del suelo. A energías inferiores se puede detectar sin embargo la luz producida por efecto Cherenkov por las partículas de alta energía de la cascada. Los métodos basados en detectores sobre la superficie terrestre pueden ocupar físicamente áreas muy extensas y por tanto tienen una eficiencia mucho mayor que los detectores a bordo de globos o satélites. Sin embargo, tienen como desventaja que la caracterización del primario a partir de los datos de la cascada atmosférica es muy difícil.

*Como ya se ha mencionado, el experimento pionero en la detección de los electrones de la cascada atmosférica fue realizado por Auger y, posteriormente, perfeccionado por el grupo de Rossi al final de los años 50. El dispositivo consiste en una disposición bidimensional (matriz) de detectores de partículas cargadas. Hoy día se suelen emplear láminas de un plástico centelleador con un área típica del orden de 1 m<sup>2</sup>. Cuando un electrón de la cascada atraviesa*

*uno de estos plásticos una pequeña parte de su energía se emplea en excitar algunas de sus moléculas que inmediatamente se desexcitan emitiendo un breve flash de luz. Esta luz es detectada por un dispositivo fotoeléctrico muy sensible, fotomultiplicador, que es capaz de producir una señal eléctrica de muy corta duración. Empleando un dispositivo electrónico suficientemente rápido se puede además medir el instante de tiempo en que el electrón atravesó el plástico con una precisión del orden de 10<sup>-9</sup> s (ns). Estos detectores, por tanto, son capaces de medir la densidad superficial del disco de partículas de la cascada de donde se puede deducir la energía del rayo cósmico primario. Por otro lado, la comparación de los tiempos de llegada de las partículas a los diferentes contadores permite medir la inclinación del disco (ver fig. 2 y fig. 6) obteniendo de este modo la dirección de cada rayo cósmico primario individualmente. A diferencia de los telescopios convencionales, estos dispositivos detectan rayos cósmicos provenientes de todas las direcciones del cielo siendo posteriormente, al analizar los datos, cuando se determina el ángulo con el que cada primario llegó a la Tierra. Con este tipo de detectores se consigue una resolución angular típica del orden de 0.5 grados que si bien es muy modesta comparada con la de cualquier telescopio abre la posibilidad de explorar el cielo en busca de las partículas más energéticas que existen en la naturaleza.*

Se han construido muchas matrices de centelleadores que se encuentran en la actualidad repartidas por todo el mundo. Se pueden citar como ejemplo la matriz CASA en Utah (EEUU) y el ex-

perimento HEGRA (High Energy Gamma Ray Array) que se encuentra instalado a una altitud de 2200 metros sobre el nivel del mar en el Observatorio del Roque de los Muchachos en la isla canaria de La Palma.

Estos dispositivos ocupan un área comprendida entre 10<sup>4</sup> y 10<sup>5</sup> m<sup>2</sup> y pueden detectar rayos cósmicos en el rango de 50 TeV a 10 PeV. Por otro lado, han estado funcionando durante muchos años detectores como los de Haverah Park en Inglaterra, Yakutsk en la antigua URSS, Volcano Ranch en Nuevo Méjico, y el detector Sydney en Australia que han detectado rayos cósmicos de hasta 10<sup>20</sup> eV. El área que cubren estos detectores es de cerca de 20 km<sup>2</sup> excepto el último mencionado cuya superficie es de 200 km<sup>2</sup>.

Existe un método alternativo para la detección de la cascada basado en la observación de la luz Cherenkov de las partículas de alta energía que se emite en la misma dirección en que se mueven éstas. Empleando la imagen corpuscular de la luz podemos imaginar a esta radiación como un disco de fotones viajando en la dirección del cósmico primario de forma similar al disco de electrones de la componente electromagnética y, por tanto, también se puede observar la cascada empleando simplemente fotomultiplicadores que detecten directamente el frente de luz Cherenkov. Una ventaja de detectar los fotones Cherenkov en lugar de los electrones es que los primeros vienen concentrados en un disco más fino que los segundos y, por tanto, se puede medir con mayor precisión el instante de



dirección en que llegó el rayo cósmico con un error inferior a 0.1 grados.

*La radiación Cherenkov de la cascada puede ser también detectada mediante un telescopio reflector. Estos telescopios Cherenkov no necesitan espejos de gran precisión pues la resolución angular está limitada de antemano por la dispersión de las partículas en la cascada, sin embargo, para poder tener suficiente sensibilidad es necesario que la superficie recolectora de luz sea muy grande. El flash de luz Cherenkov producido por cada rayo cósmico individual dura sólo unos pocos*

*fotomultiplicadores. Recientemente este observatorio ha construido otro aún mayor (11 metros) que entrará en funcionamiento próximamente. En el experimento HEGRA se encuentran funcionando dos telescopios Cherenkov de un total de cinco que serán instalados en un corto plazo de tiempo.*

*Al atravesar la atmósfera, las partículas de la cascada producen la excitación e ionización de las moléculas de aire. Al desexcitarse emiten luz de fluorescencia que a diferencia de la radiación Cherenkov es emitida en todas direcciones. Si nuestros ojos tuvieran suficiente sensibilidad podríamos ver la entrada de los rayos cósmicos en la atmósfera de forma similar a la de un meteorito, aunque a mucha mayor velocidad. Existe un detector instalado en Utha llamado Fly's Eye consistente en una disposición de 880 fotomultiplicadores que observan cada uno una dirección del cielo. Este Ojo de Mosca permite detectar la llegada de rayos cósmicos de muy alta energía ( $10^{17}$  eV) mediante la observación de toda la cascada. Su eficiencia es muy alta ya que puede cubrir un volumen de atmósfera de muchos kilómetros cúbicos.*

El desarrollo de estas técnicas experimentales ha permitido llevar a cabo un estudio sistemático de las propiedades de los rayos cósmicos que llegan a la Tierra.

*En primer lugar, se ha observado que la mayor parte son núcleos atómicos. Su composición química, es decir, las abundan-*

llegada a cada detector y así obtener mayor precisión en la medida de la dirección del rayo cósmico primario. En el experimento HEGRA se ha instalado una matriz de fotomultiplicadores que funciona según este principio y que permite tomar datos en combinación con la matriz de centelleadores. En las fig. 4 y 6, se muestra la señal observada por este detector al paso de una cascada iniciada por un rayo cósmico cuya energía debió ser de aproximadamente 400 TeV. La intensidad de luz Cherenkov detectada en cada fotomultiplicador ha permitido localizar la posición del eje de la cascada y estimar la energía del rayo cósmico primario. Además, la medida del instante de llegada de los fotones a cada detector ha permitido reconstruir la

*nanosegundos y por tanto, tiene que ser detectado con fotomultiplicadores de respuesta muy rápida. Frente a las matrices de centelleadores, los detectores de radiación Cherenkov tienen la ventaja de que funcionan sólo en total oscuridad (noche sin Luna). Por otro lado, a diferencia de las matrices de contadores, el telescopio solo detecta los rayos cósmicos que llegan en la dirección en la que está apuntando. Ultimamente se está extendiendo el empleo combinado de varios telescopios instalados en el mismo observatorio con el fin de detectar la luz simultáneamente en varias posiciones de la cascada. El telescopio Cherenkov más grande del mundo ha sido desde hace muchos años es el que se encuentra en el observatorio de Whipple en Arizona (EEUU) que tiene un diámetro de 10 metros y detecta la luz con una cámara formada por 109*

*cias relativas de los distintos elementos, es muy similar a la del sistema solar, de forma que la mayor parte de los rayos cósmicos son protones (núcleos de H) y partículas alfa (núcleos de He) encontrándose también núcleos de número atómico intermedio entre los que destacan los de C, N y O y elementos pesados entre los que predominan los núcleos de Fe. Se ha detectado además la presencia de una pequeña proporción de electrones y de fotones gamma. También se ha puesto de manifiesto que el flujo de rayos cósmicos disminuye muy rápidamente con la energía E, siguiendo una ley  $E^{-\text{gamma}}$ . Hasta energías de 1 PeV, gamma tiene un valor de 2.7 aproximadamente haciéndose esta disminución más brusca a energías superiores (gamma en torno a 3). Finalmente, los pocos rayos cósmicos observados con energías comprendidas entre  $10^9$  y  $10^{20}$  eV parecen indicar que el espectro es más plano en esta zona, es decir, que esta brusca disminución cesa.*

Se ha estudiado también la dependencia del flujo de rayos cósmicos con la dirección de llegada a la Tierra observándose que existe básicamente isotropía a excepción de ciertas anomalías que afectan solo a los rayos cósmicos de baja energía y que pueden ser explicadas como un efecto del campo magnético terrestre. Esto significa que los rayos cósmicos nos llegan con igual probabilidad desde todas las direcciones del espacio lo que puede explicarse teniendo en cuenta que son partículas cargadas y por tanto, al moverse en el seno de los diversos campos magnéticos cósmicos, están sometidos constantemente a fuerzas que los desvían de sus tra-

vectorias. La estructura de estos campos es altamente irregular y como consecuencia se pierde toda la información acerca de la dirección de las fuentes cósmicas que las emitieron. Por otro lado, estos campos magnéticos pueden mantener confinados a los rayos cósmicos, de forma que para un campo y una región del espacio dados existe un rango de energías por debajo del cual ningún núcleo puede escapar. Este límite es tanto más alto cuanto mayor sea la intensidad del campo magnético y mayor el volumen ocupado. En realidad no se trata de un límite estricto de energía sino que la probabilidad de escapar es tanto mayor cuanto mayor sea la energía del núcleo. Esta propiedad permite explicar que el flujo de rayos cósmicos sea fuertemente decreciente con la energía.

---



---



---

#### PEQUEÑO GLOSARIO

**Año luz:** distancia recorrida por la luz en un año (aproximadamente,  $10E18\text{cm}$ ).

**Electrón:** partícula elemental de carga negativa y masa unas dos mil veces menor que la del protón. Ocupa los niveles orbitales de los átomos.

**Electrón-voltio (eV):** energía que adquiere un electrón cuando atraviesa una diferencia de potencial eléctrico de un voltio.

**Ión:** átomo que perdió o ganó electrones y adquiere, consecuen-

temente, carga eléctrica. El ión de un átomo de hidrógeno es, directamente, un protón.

**Medio interestelar:** es el medio que ocupa el espacio entre las estrellas que forman la galaxia. Está formado fundamentalmente por hidrógeno, con una densidad que varía entre 0,01 y 1 átomo por centímetro cúbico.

**Notación exponencial:**  
 $10E1=10$ ;  $100=10E2$ ;  
 $1000=10E3$ ; etc.  $0,1=10^{-1}$ ;  
 $0,01=10^{-2}$ ;  $0,001=10^{-3}$ ; etc.

**Nube interestelar:** es una región limitada del espacio donde la densidad es mucho mayor que la del medio interestelar. Valores típicos son del orden de 10-100 átomos por centímetro cúbico.

**Onda de choque:** es una discontinuidad en la presión y la densidad de un medio originada por una liberación brusca de energía. Las bombas al explotar y los aviones al romper la barrera del sonido, producen ondas de choque. También es el caso de las estrellas, cuando explotan en el medio interestelar.

**Protón:** partícula elemental de carga positiva que forma parte de los núcleos atómicos.

**Rayo gamma:** radiación electromagnética de energía mayor que 1MeV ( $=10E6\text{eV}$ ).

**Radiotelescopio:** instrumento diseñado para recibir y registrar señales de radio provenientes de objetos astronómicos.