

OS RAIOS CÓSMICOS

Carlos Pajares*
Universidade de Santiago
de Compostela

INTRODUCCIÓN

Os raios cósmicos son partículas elementais (protóns, neutróns, electróns, fotóns, neutrinos...) e núcleos atómicos que inciden na superficie terrestre en tódalas direccións e con moi diferentes enerxías. Moitas persoas sorprenderíanse se soubesen que agora mesmo os están golpeando ou atravesando partículas. En efecto, arredor de mil partículas por metro cadrado e por segundo baten contra a atmosfera da Terra. Afortunadamente, moitas delas son absorbidas antes ó toparen co aire da atmosfera, de tal maneira que os raios cósmicos non son perigosos. De tódolos xeitos, son a orixe do 10 % da exposición á radioactividade a que estamos sometidos de forma natural.

Inicialmente pensouse que proviñan de desintegracións espontáneas na superficie da Terra, pero en 1912 Victor Hess e o seu axudante, ascenderon nun globo ata 5000 metros e comprobaron cos seus contadores que a frecuencia desta misteriosa radiación aumentaba

coa altura, e que case toda viña de arriba, co que se establecía a súa orixe extraterrestre. Outros experimentos posteriores demostraron pronto que tal radiación non só era extraterrestre, senón tamén extrasolar na súa maior parte. O nome de radiación cósmica ou raios cósmicos deullo Millikan en 1925 e axiña foi utilizado pola comunidade científica.

Aproximadamente o 98 % destas partículas teñen unha enerxía entre 1 e 10 Gev (1 Gev = 10^9 ev) e nunha pequena fracción é meirande; algúns ata superan os 10^{20} ev (16 joules). No estudo de raios cósmicos, debido á grande enerxía que posúen algúns deles, utilízanse as unidades de enerxía seguintes: Tev = 10^3 Gev = 10^{12} ev, Pev (peta-ev) = 10^3 Tev = 10^6 Gev = 10^{15} ev, Eev (Exa-ev) = $10^3 \cdot$ Pev = 10^6 Tev = 10^9 Gev = 10^{18} ev. As enerxías alcanzadas polas partículas ou núcleos atómicos dos aceleradores actuais ou dos que están hoxe en día en fase de construción son inferiores ás enerxías máis altas detectadas dalgúns raios cósmicos. En efecto, a enerxía maior acadarase no

* Catedrático de Física Teórica.

LHC (gran colisionador de hadróns) que entrará en funcionamento no 2005 no Centro Europeo de Física de Partículas (CERN) de Xenebra. Neste acelerador para colisións Pb contra Pb alcanzarase a enerxía da orde de 10^{18} ev inferior en dúas ordes de magnitude á detectada en varios sucesos de raios cósmicos.

O estudo dos raios cósmicos supuxo grandes avances no coñecemento da Física de Partículas Elementais. Así, permitiu, entre outros, o descubrimento de partículas tan importantes como o positrón, o muón e o pión. En 1939, Pierre Auger observou cómo detectores de partículas na superficie terrestre separados varios metros de distancia rexistraban sinais simultáneos; descubriu daquela as cas-

cadras atmosféricas, que son grupos dunha extensión considerable formados por partículas secundarias producidas cando un raio cósmico de grande enerxía interacciona coa atmosfera. Debido a esta acción recíproca prodúcese partículas de menor enerxía que actúan cada unha co aire producindo pola súa vez novas partículas de menor enerxía. O proceso continúa ata que as partículas xeradas non teñen enerxía abonda como para producir novas. Así se orixina a cascada atmosférica.

O estudo das cascadas atmosféricas –intentando coñece-lo mecanismo e o obxecto cósmico capaz de acelerar partículas ata acadar nalgúns casos enerxías tan enormes como 10^{20} ev, e o desenvolvemento e composición das ditas cascadas– pode botar luz en dous

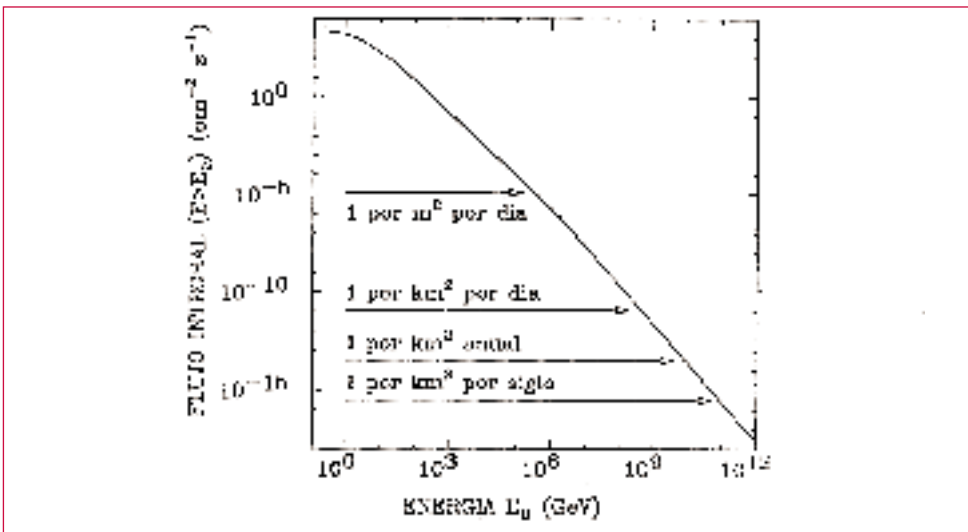


Figura 1. Fluxo integrado de raios cósmicos de enerxía superior a E_0 con ángulos cenitais inferiores a 33 graos. As frechas indican o fluxo noutras unidades.

dominios da Física aparentemente diferentes: a Astrofísica e a Física de Partículas Elementais; dominios diferentes, se ben se vai demostrando que están tan unidos que é imprescindible o coñecemento dun para afondar no outro.

A ORIXE DOS RAIOS CÓSMICOS

O número de partículas por unidade de área, tempo, ángulo sólido e enerxía, é dicir, a densidade de fluxo de partículas, diminúe coa enerxía, como $E^{-\gamma}$ cun expoñente $\gamma \approx 2.7$ que aproximadamente non varía coa enerxía, segundo se ilustra na figura 1. As enerxías dos raios cósmicos son moito máis grandes cás térmicas dos obxectos que coñecemos do Universo, polo que as partículas deben adquirirla súa enerxía mediante algún outro tipo de proceso.

O estudio detallado dos mecanismos de aceleración de partículas en Astrofísica é moi complexo pero a maioría dos modelos están baseados nun principio estocástico sinxelo proposto por E. Fermi en 1949, que explica o decrecemento do fluxo coa enerxía, exposto anteriormente. A idea é simple: o espazo interestelar dunha galaxia está constituído por partículas e núcleos de moi baixa densidade sometidos ó campo magnético da galaxia, é dicir, un plasma no que se producen movementos como turbulencias ou fronte de onda de choque. Cando unha partícula entra nunha rexión onde hai un plasma en repouso, a súa

traxectoria cúrvase e sae desa rexión con practicamente a mesma velocidade e enerxía aínda que nunha dirección diferente (fig. 2). Se o plasma está en movemento, a partícula terá máis enerxía que ó entrar; o conxunto do plasma transfírelle unha minúscula fracción da súa enerxía. Se o proceso se repite un gran número de veces, as partículas poden chegar a adquirir enerxías moi superiores á inicial. É o mesmo que sucede se lanzamos unha pelota contra unha superficie: se esta está parada, a pelota sae coa mesma enerxía aínda que pode cambia-la súa dirección; sen embargo, se a superficie ten unha velocidade, por exemplo, se é unha raqueta que movemos, a pelota adquire unha velocidade superior en cada impacto, pois estes só se producen na traxectoria de avance da raqueta. Se a superficie é irregular, a pelota rebota en direccións aleatorias. Estamos entón nunha situación análoga ó mecanismo de Fermi de aceleración de partículas por un plasma.

Se en cada 'choque' se aumenta a enerxía unha cantidade relativa $\xi = \Delta E / E$, ó cabo de n choques obterase unha enerxía E_n .

$$E_n = E_0 (1 + \xi)^n \quad (1)$$

onde E_0 é a enerxía inicial da partícula. Se lle chamamos P_{esc} á probabilidade de escape da partícula da rexión onde é acelerada debido a un choque, a probabilidade de permanecer na rexión de aceleración despois de n choques é $(1 - P_{\text{esc}})^n$. Así, a proporción de

partículas aceleradas a enerxías máis grandes ca E , N , será:

$$N \alpha \sum_{m=1}^{\infty} (1-P_{\text{esc}})^m = (1-P_{\text{esc}})^n / P_{\text{esc}} \quad (2)$$

onde a última igualdade se obtén tendo en conta que é a suma dunha progresión xeométrica infinita de razón $1 - P_{\text{esc}}$.

Substituíndo o valor de n obtido da fórmula (1)

$$n = \ln(E / E_0) / \ln(1 + \xi) \quad (3)$$

na fórmula (2) obtense

$$N \alpha (E / E_0)^{-\gamma} / P_{\text{esc}} \quad (4)$$

onde

$$\gamma = \ln(1 / (1 - P_{\text{esc}})) / \ln(1 + \xi) \approx P_{\text{esc}} / \xi \quad (5)$$

Desta maneira vemos que o mecanismo de Fermi explica o comportamento coa enerxía do fluxo de raios cósmicos.

Este mecanismo actúa só durante o tempo de permanencia dos raios cósmicos na galaxia, o que limita o número de interaccións co plasma e polo tanto a enerxía máxima alcanzable. A enerxía máxima de aceleración nun plasma de lonxitude L e campo magnético B obtense igualando o radio de xiro no campo magnético B correspondente á lonxitude L do acelerador cósmico.

$$E_{\text{max}} \sim \beta c Ze B L \quad (6)$$

onde c é a velocidade da luz, Ze é a carga da partícula acelerada e $\beta = v/c$ é a velocidade da onda de choque no plasma medida en termos de c .

A relación (6) é unha das razóns pola que se cre que raios cósmicos con enerxías superiores a 10^{17} ou 10^{18} ev teñen unha orixe extragaláctica, dado que na galaxia B e L teñen un valor limitado non suficiente para acadar, de acordo coa fórmula (6), enerxías tan altas. Para enerxías inferiores crese que os raios cósmicos se orixinan nas supernovas. Hai unha razón poderosa para pensalo así: a enerxía necesaria para mante-la subministración de raios cósmicos observada é só lixeiramente menor cá media de enerxía cinética liberada polas tres explosións de supernova que adoitan rexistrarse cada século.

Cando unha estrela de gran masa se colapsa sobre si mesma debido á forza gravitatoria, as rexións exteriores da estrela explotan a velocidades de dez mil quilómetros por segundo. Tamén cando unha anana branca se desintegra por enteiro nunha explosión de fusión nuclear libérase unha cantidade similar de enerxía. En ámbolos tipos de supernova o material expulsado expándese a velocidades supersónicas, orixinando unha forte onda de choque no medio. Esas ondas de choque aceleran as partículas do material a través do que se expanden. Debido a que estas partículas en xeral teñen carga, seguirán traxectorias moi complicadas polos campos magnéticos interestelares (ver figura 2). Por esta razón, as direccións que toman non nos dan información ningunha sobre a fonte emisora. A observación da radiación de sincrotón emitida por restos de supernovas, así como o estudio de

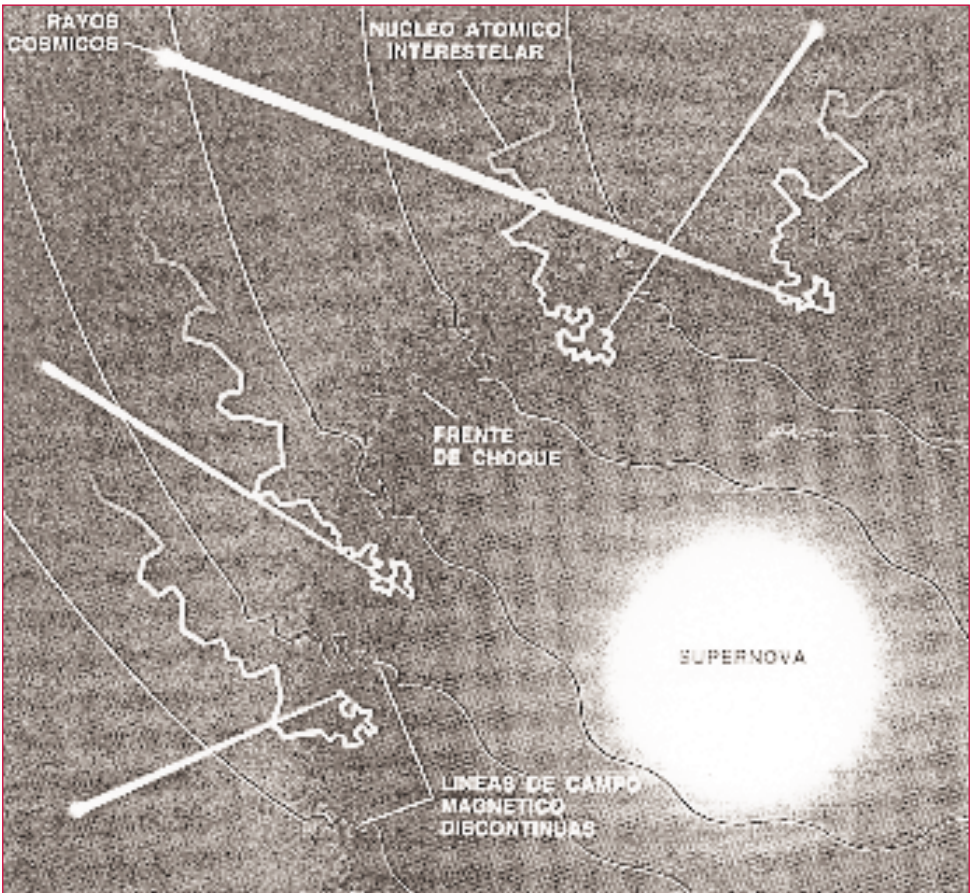


Figura 2. Mecanismo de Fermi de aceleración de partículas.

fontes puntuais de radiación gamma identificadas con restos de supernova realizados polo detector EGRET instalado a bordo do Observatorio Compton de Raios Gamma, confirman que as supernovas se comportan como aceleradores de raios cósmicos.

Os raios cósmicos de enerxía superior a 10^{20} ev teñen un interese

especial. En principio, á dita enerxía deberían interaccionar cos fotóns da radiación de fondo de microondas que son os fotóns residuais provenientes dos primeiros instantes do Universo. Ó expandirse e arrefriarse o Universo, arrefecen os fotóns e a súa lonxitude de onda aumenta. O seu espectro de frecuencias é o da radiación do corpo

negro correspondente a unha temperatura de 2.7 K, temperatura actual dos fotóns que corresponde ós moi quentes do universo primitivo. Esta baixa temperatura implica que estes fotóns teñan unha pequenísima enerxía da orde de 10^{-3} ev. A pesar disto, a enerxía total da colisión entre o raio cósmico (sexa un protón ou un núcleo) e o fotón abonda para que se produza un fenómeno resoante (producción dunha resonancia, a chamada Δ^+) e polo tanto que a probabilidade de colisión á dita enerxía sexa grande. Debido a isto, os raios cósmicos con tal enerxía non poden propagarse a distancias superiores a 50 Megapersecs ($1\text{Mpc} = 3$ millóns de anos luz). Por esta razón, o fluxo de raios cósmicos, aínda que fosen extragalácticos, debería diminuír drasticamente a 10^{20} ev. É o chamado corte GZK, iniciais correspondentes ós nomes do americano K. Greisen e os rusos G. T. Zapsepin e V. A. Kuz'min que independentemente propuxeron o citado corte en 1966.

Nos últimos anos, gracias a diversas colaboracións internacionais, fóronse detectando sucesos de raios cósmicos con enerxías superiores a 10^{20} ev, de tal maneira que se empeza a cuestionar a existencia do corte GZK. A aceleración de partículas a enerxías superiores a 10^{20} ev é un problema astrofísico importante pois son moi poucos os obxectos coñecidos a distancias inferiores a 50 Mpc capaces de producilas.

Se estas partículas tan enerxéticas non se desviasen excesivamente, o cal é

razoable dada a súa gran cantidade de movemento e a súa relativa proximidade (proceden de distancias inferiores a 50 Mpc), poderían permitirla identificación dos obxectos astrofísicos que as orixinan. Uns posibles candidatos son a agrupación de galaxias ou os chamados núcleos de galaxias activas, que son obxectos compactos de gran luminosidade que se subministran de enerxía mediante a succión de materia por un burato negro no núcleo dunha galaxia. Alternativamente, poderán non vir de direccións predeterminadas e simplemente as orixes destes raios cósmicos indicannola distribución de obxectos superviventes doutras etapas na evolución do Universo. Hai diversas especulacións sobre a orixe das ditas partículas elementais de gran masa, de existencia necesaria dentro das teorías que unifican as distintas forzas do Universo. Outra especulación fai responsable da súa orixe a estrutura do baleiro. Podería pasar que o baleiro, estado de máis baixa enerxía, fose un baleiro relativo, é dicir, un mínimo de enerxía relativo e non absoluto. Este baleiro relativo podería desintegrarse noutro de máis baixa enerxía producindo unha enorme cantidade de enerxía en forma de partículas.

Estas especulacións, aínda que hipotéticas, sinalannola grande importancia do estudio dos raios cósmicos de moi alta enerxía. Por iso hai diversos proxectos en marcha relacionados coa investigación das súas orixes. En especial, deseñouse o chamado proxecto

Auger ó que nos referiremos máis adiante.

FERVENZAS ATMOSFÉRICAS

Como dixemos anteriormente, cando un raio cósmico bate con núcleos de aire da atmosfera produce partículas secundarias que volven chocar producindo unha segunda xeración; estas pola súa vez chocan de novo e así, sucesivamente, producen un efecto multiplicativo que finaliza ó non teren enerxía suficiente as partículas dunha xeración para producir no choque cos núcleos de aire novas partículas. As diversas xeracións forman unha fronte en forma de disco de poucos metros de espesura e centos de metros de radio. É o que constitúe unha ferverza atmosférica (*air shower* en inglés). A enerxías máis altas as ferverzas poden chegar a conter un billón de partículas estendidas en varios quilómetros de radio.

Na figura 3 podemos ver un modelo simplificado de ferverza. Unha partícula cunha enerxía E choca cun núcleo de aire producindo dúas partículas que pola súa vez coliden e producen cada unha outras dúas, e así sucesivamente ata que se alcanza unha enerxía pequena E_0 , non suficiente para poder producir novas partículas. Á distancia X_m entre o primeiro choque e onde se produce o número máximo de secundarias chámasele profundidade máxima da ferverza. Chamándolle λ ó percorrido libre medio da partícula, é dicir, o que realiza antes de volver inte-

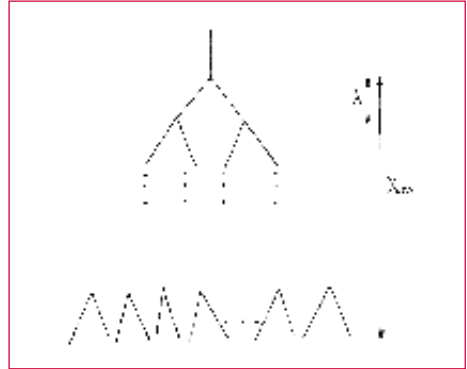


Figura 3. Exemplo simplificado de ferverza atmosférica.

raccionar, m ó número de pasos e n ó número de partículas producidas, temos

$$X_m = m\lambda, \quad E = n E_0, \quad n = 2^m \quad (7)$$

Destas tres ecuacións obtemos:

$$X_m = \lambda \log (E / E_0) / \log 2 \quad (8)$$

que nos indica que a profundidade da ferverza aumenta logaritmicamente coa enerxía.

Se en lugar dun protón, incidise un núcleo con A protóns e neutróns á mesma enerxía E , en primeira aproximación poderíamos considerar que inciden A protóns e neutróns cada un cunha enerxía E/A . Neste caso, a profundidade máxima sería

$$X_m^A = \lambda \log (E / A E_0) / \log 2 \quad (9)$$

É claro que $X_m^A < X_m$, é dicir, a profundidade máxima dunha cascada é maior no caso de que sexa orixinada por un protón que por un núcleo, como cabería esperar. En efecto, a enerxía E disíspase máis axiña polo choque dun núcleo que polo dun protón, porque

nun núcleo xa hai unha división inicial, cada protón ou neutrón do núcleo leva unha enerxía E/A se a enerxía total é E .

O da figura 3 é un modelo moi simplificado dunha ferverza atmosférica real, pero moi útil para describir algunhas das súas propiedades. En particular, describe cualitativamente o comportamento da profundidade máxima da ferverza coa enerxía e co número atómico, permitíndonos distinguir polo tanto se o raio cósmico primario é un protón ou un núcleo, se previamente coñecemos-la enerxía de incidencia.

No primeiro choque prodúcense fundamentalmente pións. Os pións neutros π^0 desintégranse case que ó momento en dous fotóns, pois teñen unha vida media moi curta. Os pións cargados (π^+ , π^-) poden volver chocar ou desintegrarse. Como estes pións de primeira xeración levan moita velocidade, a súa vida media será maior debido á dilatación temporal e, polo tanto, poderá percorrer maiores distancias antes de se desintegrar e terá máis posibilidades de volver chocar. Son as sucesivas xeracións de pións cargados que ó levaren menor velocidade, terán unha vida media menor e poderanse desintegrar fundamentalmente en electróns, positróns, muóns e neutrinos, mediante as desintegracións:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu}$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}$$

A dilatación temporal, e en particular o aumento da vida media dunha partícula que se move con velocidade v respecto a un observador en repouso $r = r' / \sqrt{1 - v^2/c^2}$, é unha consecuencia trivial, aínda que espectacular, da Teoría da Relatividade, que ten unha comprobación clara nos raios cósmicos. Así, por exemplo, a vida media dun muón é de 2.2 millonésimas de segundo. Con esta vida media sería imposible que os muóns producidos nas ferverzas atmosféricas chegasen á Terra porque se desintegrarían antes (percorrerían menos de 1 quilómetro). Sen embargo, esa vida media é a medida por un observador que estivese en repouso respecto ó muón. Como os muóns producidos en ferverzas levan unha gran velocidade, a vida media é moito maior, de modo que poden chegar á superficie terrestre e ser detectados por un sinxelo contador. Así, por exemplo, un muón que leva unha velocidade tal que $v/c = 0.9993$, ten unha vida media 27 veces maior percorrendo á mesma velocidade máis de 25 quilómetros antes de se desintegrar, chegando deste xeito á superficie terrestre. Alguén podería quedar abraiado polo feito paradoxal de que aparentemente o muón chega ou non á superficie terrestre dependendo de se o observador está na Terra ou viaxa nun sistema de referencia con velocidade nula con respecto ó muón. Este aparente paradoxo non é tal, xa que para este observador o espacio se contrae, co que o muón ten que percorrer menos distancia e alcanza desta maneira a superficie terrestre. Noutras palabras, o feito físi-

co de chegar á Terra o muón é apreciado polos dous observadores, o que se move canda o muón e o que está en repouso. Sen embargo, cada observador mide diferentes intervalos de tempo e distancias espaciais.

Segundo o dito anteriormente, dentro da ferverza, á parte de pións hai fundamentalmente fotóns, electróns, positróns, muóns e neutrinos. Os fotóns de alta enerxía, ó interaccionar cos núcleos de aire, producen case exclusivamente pares electrón-positrón. Os electróns e positróns emiten pola súa vez fotóns por radiación de freado (*bremstrahlung*). O percorrido libre medio é aproximadamente o mesmo en ámbolos casos. Os muóns tamén emiten a radiación de freado pero cun percorrido libre moitísimo maior, co que se pode considerar que poden atravesar toda a atmosfera sen perder enerxía. Os neutrinos son partículas neutras de masa nula ou practicamente nula que só experimenta a forza débil. Debido a isto, poden atravesalo planeta Terra sen case interaccionar. Os muóns e os neutrinos constitúen a compoñente penetrante das ferverzas atmosféricas.

Se a partícula incidente é un protón ou un núcleo, os fotóns, os electróns e os positróns das desintegracións dos pións só producen case exclusivamente fotóns, electróns e positróns, é dicir, subcadeas electromagnéticas que acompañan os muóns e neutrinos. O contido de muóns reflicte se a partícula incidente é un protón ou un núcleo, xa que neste último

caso haberá proporcionalmente máis muóns.

Se a partícula incidente é un fotón ou un electrón ou positrón prodúcese unha ferverza puramente electromagnética que só contén fotóns, electróns e positróns.

Ata aquí describímo-las propiedades xerais das ferverzas atmosféricas, considerando fundamentalmente as verticais, é dicir, as producidas por raios que inciden con baixos ángulos cenitais. Recentemente, nunha colaboración de físicos da Universidade de Santiago de Compostela co premio Nobel J. Cronin, propúxose a detección de cascadas horizontais ^{(1) (2)}, é dicir, as de altos ángulos cenitais, como ferramenta útil para localizar neutrinos de moi altas enerxías. En efecto, as ferverzas horizontais teñen que atravesar unha cantidade de atmosfera unhas trinta veces superior ós raios cósmicos verticais; polo tanto, a maior parte da ferverza é absorbida e só sobreviven as partículas penetrantes, isto é, os muóns e neutrinos. Diversos experimentos proxectados, como o citado proxecto Auger, están deseñando os detectores para que sexa posible a localización destas ferverzas horizontais.

DETECCIÓN DE RAIOS CÓSMICOS

A detección de raios cósmicos realízase con detectores adecuados ós rangos de enerxía que se pretenden localizar. Así, para enerxías ata 1 Pev utilízanse emulsións fotográficas inter-

caladas entre planos de materiais absorbentes que se elevan en globos ou satélites. Sen embargo, como o fluxo de partículas con enerxía superior a unha dada diminúe dramaticamente, aproximadamente nun factor 100, cada vez que aumentamos unha orde de magnitude a enerxía (fig. 1), se queremos detectar raios cósmicos de grande enerxía necesitamos superficies moi grandes.

Para detectar raios cósmicos de enerxías superiores a 1 Pev desenvolveuse a técnica de detección de ferverzas utilizada por Pierre Auger no seu descubrimento de 1939 e anteriormente por Bruno Rossi en 1932. Para isto, o que se fai é situar detectores na superficie terrestre. A escala da superficie utilizada vén determinada polo tamaño da fronte da ferverza, que pode ser de varios quilómetros cadrados para enerxías altas. Por iso se sitúan varios detectores convencionais de partículas distribuídos por unha gran superficie de xeito que poidan reproducir a ferverza utilizando os coñecementos das partículas. Canto máis alta sexa a enerxía do raio cósmico orixinario da ferverza que se quere detectar, máis grande debe ser a superficie efectiva ocupada pola rede de detectores de partículas. Así, por exemplo, a superficie efectiva do experimento AGASA en Akeno (Xapón) –a maior rede de detectores construída– é duns cen quilómetros cadrados e rexistrou ferverzas de enerxía superiores a 10^{19} ev. A rede de detectores do proxecto Auger que se instalará no hemisferio sur, preto de

San Rafael en Mendoza (Arxentina), cubrirá unha superficie de 3000 Km².

Outro método consiste en detectar a fluorescencia do nitróxeno do aire emitida ó pasa-las partículas cargadas da ferverza. Aínda que cada partícula só emite catro fotóns por metro, se a ferverza é moi enerxética pode ter case un billón de partículas cargadas e pódese localizar a grandes distancias en noites escuras despexadas. O experimento *Fly's Eye* (Ollo de mosca), pioneiro neste método, consiste en múltiples espellos; cada un visualiza un campo angular distinto, concentrando a luz nun fotodetector; é semellante ó ollo composto dunha mosca. Parte da luz emitida polos distintos tramos da ferverza é recollida polo espello que visualiza o ángulo sólido correspondente. A cantidade de luz é proporcional ó número de partículas do tramo correspondente. Como se sabe a distancia a que se atopa cada tramo, pódese reconstruí-lo número de partículas en función da profundidade. Esta técnica obtivo resultados que están de acordo cos obtidos mediante redes de detectores. O detector de fluorescencia depende en gran medida das condicións atmosféricas do lugar da súa localización e en particular do grao de absorción e dispersión da luz, que depende da cantidade de partículas en suspensión. O ideal é un sitio excepcionalmente claro, con pouca contaminación luminosa. Isto último implica estar afastados de zonas de gran densidade de poboación, o que polo xeral implica pouca infraestrutura e polo tanto un

maior custo do proxecto de instalación. Cando se decide a situación do detector, elíxese o lugar tendo en conta todos eses factores.

Outra técnica é a baseada na detección de radiación Cherenkov, que leva o nome do científico ruso que a descubriu (polo que foi galardoado co premio Nobel). É a radiación emitida por partículas cargadas ó propagarse nun medio, no noso caso a atmosfera, con velocidade superior á da luz no dito medio. A luz é emitida formando un ángulo coa dirección de movemento da partícula dado por

$$\cos\theta = c/vn \quad (10)$$

onde v e c son as velocidades da partícula e da luz respectivamente e n o índice de refracción do medio. É claro que como $\cos\theta \leq 1$, $vn \geq c$.

Para rexistrala dita radiación utilízanse os telescopios Cherenkov, sensibles á parte óptica do espectro para ferenzas no rango entre 10^{11} e 10^{14} ev.

Na illa da Palma existe un detector hispanoalemán, HEGRA (High Energy Gamma Ray Astronomy) que combina varios telescopios Cherenkov cunha rede de detectores que están nunha superficie de arredor de 40.000 m².

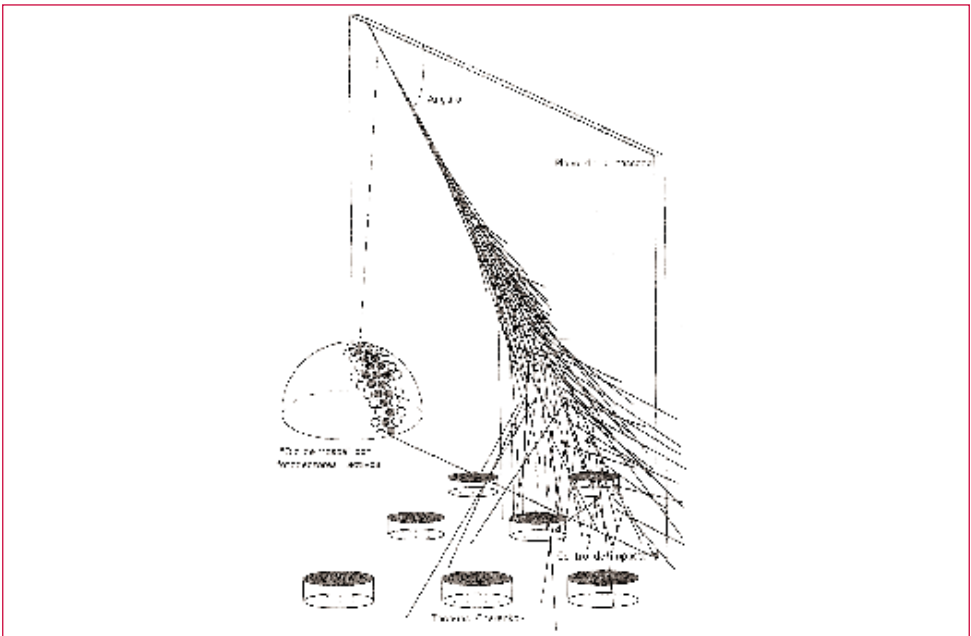


Figura 4. Esquema do proxecto Pierre Auger. Representase o plano que contén a ferenza identificado polo 'ollo de mosca' e os tanques da rede de detectores de partículas. (O esquema non está a escala).

Un dos problemas que teñen os raios cósmicos de moi alta enerxía é a pouca estatística. Así, para fervezas con enerxías superiores a 10^{20} ev, para ter arredor de 30 sucesos anuais necesítase unha superficie efectiva de 3000 Km^2 . O proxecto Auger de colaboración internacional, no que participan institucións de investigación pertencentes a dezanove países, está inicialmente deseñado para construír dous complexos, un en cada hemisferio. Cada un combina unha rede de detectores de partículas a 3000 Km^2 cun detector de fluorescencia do tipo ollo de mosca (ver figura 4). Cada complexo estará a unha latitude próxima a 45° para que cubra a semiesfera celeste do hemisferio correspondente gracias á rotación da Terra.

Cada rede consta de 1500 detectores distribuídos nunha malla hexagonal cunha separación entre eles de 1,5 Km. Cada detector consta dun tanque cilíndrico de auga duns 10 m^2 de superficie por 1,2 m de altura con varios fotodetectores. A intercomunicación entre detectores é fundamental para saber que as partículas detectadas pertencen á mesma ferveza. Por iso cada detector consta dun sistema de radiocomunicación con antenas que lle permiten comunicarse coas seis adxacentes. Para obter un nivel de erros de transmisión baixo a un custo accesible, as estacións deben estar á vista unhas doutras, o que implica que a zona debe ser bastante plana. Para a sincronización entre detectores utilízase a GPS, localización global por satélite, técnica

sinxela que ten equipos xa comercializados. Cada detector terá un panel solar e unha batería para lle subministrar enerxía.

Cada partícula cargada, á velocidade da luz, ó atravesala auga do tanque emite luz Cherenkov que en parte é recollida polos fotodetectores. A cantidade de luz é proporcional á lonxitude da traxectoria. Cada muón, que tipicamente ten unha enerxía superior a 10^9 ev, atravesa o tanque de 1,2 m sen problemas, cada electrón que ten unha enerxía media de 10^7 ev e a súa traxectoria unha lonxitude de 10 cm, emitindo menos luz có muón. Cada fotón, que teñen de media 10^6 ev, aínda dá menos luz. O sinal no tanque en función do tempo permite discriminar entre as diferentes clases de partículas. Cada muón aparece como un pulso moi breve (varios nanosegundos) e intenso, mentres que a luz emitida polos electróns e fotóns aparece en pulsos menos intensos. Desta maneira pódense distinguir facilmente os muóns do resto, o que é fundamental para establecer algunhas características esenciais da ferveza, como discutimos no apartado anterior.

O complexo do hemisferio sur estase a construír preto da cidade de San Rafael, na provincia de Mendoza, na Arxentina. O do hemisferio norte decidiuse instalalo no deserto de Utah, nos Estados Unidos, pero dificultades de financiamento están causando a reconsideración da súa construción ou polo menos da súa localización. O custo de cada complexo anda ó pé dos

6000 millóns de pesetas. Espérase que o do hemisferio sur estea listo para empezar a tomar datos no ano 2002.

Outro detector moi interesante que leva certo tempo operando é Amanda. "Te recuerdo Amanda, la calle mojada...", así comezaba a canción de Víctor Jara que se fixo famosa a finais dos sesenta. Amanda tamén son as siglas –Antartic Muon and Neutrino Array– dun detector de muóns e de neutrinos que detecta os muóns enerxéticos das ferverzas mediante a observación da radiación Cherenkov xerada a gran profundidade no xeo. O detector Amanda está instalado a profundidade, baixo a superficie de xeo. O seu obxectivo é detectar neutrinos de alta enerxía para que, calculando o seu fluxo, se poida inferir qué clase de obxectos poden emitilos.

Os neutrinos, a diferenza doutras partículas, poden atravesala Terra sen a penas interaccionar con materia. Cando un fluxo de varios miles de millóns de neutrinos atravesa a Terra, uns poucos chocan cos núcleos de materia producindo muóns que, ó atravesalo xeo, emiten radiación Cherenkov, que é a detectada en Amanda. É paradoxal que para exploralo cosmos, é dicir, o obxecto cósmico que emite os ditos neutrinos, teñamos que ir debaixo da terra.

EPÍLOGO

Neste artigo de divulgación pretendemos presentar unha visión actual

e accesible dos raios cósmicos, empezando por explicar qué son, describindo a súa detección e incluíndo a mención de proxectos tan importantes en marcha no presente e os deseñados para o futuro próximo. Os raios cósmicos son unha ferramenta de primeira orde en dous campos da Física. Por unha banda, son como uns telescopios especiais que nos axudan a exploralos obxectos cósmicos capaces de orixinar e aceleralas partículas coa enerxía e a composición como as detectadas. Por outra banda, tamén son ferramentas útiles e quizais únicas para explorar algúns dos enigmas da Física de Partículas Elementais. Nun apartado mencionámola estrutura do baleiro, ou as partículas preditas en teorías de unificación das forzas da natureza e non detectadas ata o de agora como fontes posibles dos raios cósmicos ultraenerxéticos. Outros fenómenos dinámicos na Física de Partículas, como a obtención de quarks libres, poden te-la súa tradución en termos de certas propiedades das cascadas dos raios cósmicos. Os raios cósmicos demóstrannos unha vez máis que exploran e coñecen o máis grande do Universo, os obxectos cósmicos, o que ten moito que ver coa exploración e o coñecemento do máis pequeno do Universo. Por iso os raios cósmicos forman parte dunha nova ciencia, a das astropartículas.

O lector que queira coñecer máis sobre o tema pode acudir ás referencias 3 e 4, que son artigos complementarios de divulgación, ou ós libros das refe-

rencias 5 e 7, onde hai capítulos moi accesibles.

REFERENCIAS

1. Parente, G., e E. Zas, *Proceedings of the High Energy Neutrino Workshop*, Venice, 1996, páxs. 435-439.
2. Capelle, K. S., J. Cronin, G. Parente, e E. Zas, *Astroparticle Physics* 8, 1998, páxs. 321-328.
3. Cronin, J., T. K. Gaisser, e S. P. Swordy, *Investigación y Ciencia*, marzo, 1997.
4. Zas, E., *Revista Española de Física*, vol. 10, núm. 2, 1996, 4-10.
5. Gaisser, Thomas K., *Cosmic Rays and Particle Physics*, Cambridge Univ. Press, 1990.
6. Pajares, C. (edit.), *De lo más grande a lo más pequeño del Universo*, Santiago de Compostela, 1996.

