

Rayos C3smicos de Energ3a Extrema

Los rayos c3smicos de energ3a extrema son part3culas subat3micas que llegan a la tierra con energ3as mayores que $\sim 10^{18}$ eV. Su flujo es muy reducido (menos de 1 rayo c3smico por kil3metro cuadrado y por siglo) y son detectados a trav3s de la cascada de part3culas que se produce tras el impacto del rayo c3smico con uno de los 3tomos de la atm3sfera.

La mera existencia de estas part3culas pone a prueba nuestro conocimiento sobre el comportamiento de la materia a energ3as que se encuentran varios 3rdenes de magnitud por encima de las que pueden alcanzarse en los mayores aceleradores de part3culas construidos por el hombre.

A pesar de que en las 3ltimas d3cadas se han logrado enormes avances tanto te3ricos como experimentales en el estudio de los rayos c3smicos, preguntas fundamentales sobre estas part3culas de energ3a extrema contin3an a3n sin respuesta cierta: 3cu3les son sus fuentes?, 3existe una energ3a m3xima?, 3cu3l es su espectro de energ3as?, 3existe una transici3n entre un origen gal3ctico y otro extra-gal3ctico?, 3cu3l es su composici3n?

En la ciudad de Malarg3e, Mendoza, se encuentra el mayor observatorio de rayos c3smicos de energ3a extrema del mundo: El observatorio Pierre Auger. La construcci3n de este observatorio fue realizada por un consorcio de 65 universidades e instituciones de todo el mundo, con un fuerte aporte de parte de nuestro pa3s en infraestructura y recursos humanos. El CONICET emplea actualmente a casi una centena de investigadores, t3cnicos y becarios que trabajan en la operaci3n, an3lisis de datos y desarrollo de mejoras para este observatorio. Contar con este instrumento en nuestro pa3s nos ha permitido permanecer a la vanguardia en este campo de investigaci3n, y realizar desarrollos tecnol3gicos en el 3rea como las telecomunicaciones y gesti3n remota de instrumentos. En este art3culo pretendo mostrar algunos de los motivos por los cuales es interesante estudiar a los rayos c3smicos, para en una futura entrega entrar en algunos detalles de c3mo se los detecta en el Observatorio Pierre Auger.

3Qu3 son exactamente los rayos c3smicos?

Se conoce como "rayos c3smicos" a las part3culas ionizantes provenientes del espacio exterior. El bautismo de esta radiaci3n fue realizado por Robert Millikian en 1925, en una conferencia en la que describ3a los experimentos realizados 14 a3os antes por el fisico austr3aco Victor Hess [1]. En esos experimentos, realizados a bordo de un globo, Hess not3 que los electroscopios que llevaba consigo se descargaban a una tasa que aumentaba con la altura, indicando la existencia de una radiaci3n ionizante que no era de origen terrestre, sino "c3smico". Si bien hoy en d3a referirse a part3culas como "rayos" es considerado poco riguroso, contin3a us3ndose la vieja denominaci3n por costumbre hist3rica. Con el descubrimiento y posterior estudio de los rayos X (1895), los rayos delta (1897), los rayos alfa y beta (1899), y los rayos gama (1903), el t3rmino "rayos" estaba muy presente en el vocabulario acad3mico de principios del siglo XX.

Con el paso del tiempo las mejoras en las t3cnicas experimentales permitieron ampliar constantemente el rango de energ3as en el que los rayos c3smicos pod3an estudiarse. Tras la aparici3n de la t3cnica de emulsi3n nuclear, los rayos c3smicos comenzaron a ser utilizados para el estudio de colisiones nucleares. Esto permiti3 el descubrimiento de nuevas part3culas fundamentales, como los positrones, los muones y los piones, sentando las bases de la fisica de part3culas [2,3,4]. Los experimentos en placas de emulsi3n nuclear permitieron tambi3n establecer que los rayos c3smicos son mayoritariamente n3cleos de 3tomos que van del hidr3geno al hierro.

En 1938, P. Auger y sus colaboradores descubrieron la existencia de las cascadas extendidas de partículas a nivel del suelo utilizando la detección simultánea en centelladores separados por una distancia de 300 m, marcando el nacimiento de la técnica de detección de superficie. A partir de los datos que recogieron hipotizaron que estas cascadas debían estar iniciadas por rayos cósmicos con energías superiores a 10^{15} eV [5]. En 1963, Linsley detectó por primera vez una cascada de partículas generada por un rayo cósmico con energía por encima de los 10^{20} eV, utilizando el arreglo de detectores de superficie ubicado en Volcano Ranch [6] y en 1968 Tanahashi detectó una cascada de 10^{19} eV utilizando un nuevo método: la fluorescencia producida por los átomos de Nitrógeno ionizados durante el pasaje de la cascada de partículas en la atmósfera [7]. Estos dos métodos, el de superficie y el de fluorescencia, son la base del funcionamiento del Observatorio Pierre Auger, donde se utilizan versiones sofisticadas de ambas técnicas en simultáneo.

Nótese que hemos hablado de rayos cósmicos detectados con una energía de más de 10^{20} eV (51 Joules). Para tener una idea, esta es la energía equivalente a la que adquiere una maceta al caer del balcón de un 3^{er} piso. También es equivalente al “saque” de un tenista profesional, o la pelota del mundial “Brazuca” a 55 km/h. ¡Todo concentrado en una única partícula!

La definición de “rayos cósmicos” como “partículas ionizantes provenientes del espacio exterior” rápidamente resultó ser muy amplia. Pronto fue necesaria una clasificación por energías, que permitiera separar a grandes rasgos tanto las técnicas utilizadas en su detección como las teorías sobre sus posibles orígenes. Así, las regiones del espectro se fueron nombrando a medida que aumentaba la energía de las partículas que se detectaban. Esta separación fue por supuesto arbitraria, pero en general se designan como rayos cósmicos de alta energía (*High Energy Cosmic Ray*- HE CR) a aquellos con energía por encima de 10^9 eV (1 GeV), de muy alta energía (*Very High Energy Cosmic Ray* - VHE CR) a aquellos con energía por encima de 10^{12} eV (1 TeV) y de ultra alta energía (*Ultra High Energy Cosmic Ray* - UHE CR) a aquellos con energía por encima de 10^{15} eV (1 PeV).

El rango de energías a las que estas partículas son detectadas sigue evolucionando, de manera que dentro de los UHE CR algunos autores comenzaron a introducir una nueva categoría, la de los rayos cósmicos de energía extrema (*Extreme Energy Cosmic Rays* - EE CR), que corresponde a los eventos con energía por encima de 10^{18} eV (1 EeV). Otros autores utilizan UHE CR para denominar a los rayos cósmicos con energía mayor a 10^{18} eV y reservan EE CR (o EHE CR por *Extremely High Energy Cosmic Ray*) para energías mayores a 10^{20} o incluso 10^{21} eV (1 ZeV). Esta denominación aún se encuentra en evolución.

¿De dónde vienen?

El Sol es la única fuente conocida de rayos cósmicos, aunque sólo puede asociarse a aquellos con energías por debajo de $10^{9.5}$ eV. Por encima de esta energía, los rayos cósmicos ya no presentan una variación noche/día, de manera que su origen debe ser necesariamente extra-solar.

Los campos magnéticos desvían la trayectoria de los rayos cósmicos. El radio de curvatura para un protón de 10^{18} eV en el campo magnético de la galaxia es del orden del ancho de la misma (1 kpc). Esto implica que por debajo de esa energía las partículas quedan confinadas en el disco de la galaxia, viajando eternamente dentro de ella hasta encontrar una molécula con la que interactuar. Es por esto que se cree que la gran mayoría de los rayos cósmicos por debajo de 10^{18} eV recibidos en la Tierra deben tener origen galáctico, probablemente producidos por supernovas u otros objetos aún más energéticos capaces de acelerar partículas hasta estas energías, o como producto del decaimiento de

partículas exóticas aún desconocidas.

Las partículas con energía mayor a 10^{18} eV tienen un radio de curvatura mayor al espesor del disco galáctico y escapan del mismo, por lo que tendrán una probabilidad baja de llegar a nuestro planeta y ser detectadas. Los rayos cósmicos de energía extrema detectados en la Tierra deben entonces tener, al menos en su gran mayoría, un origen extra-galáctico.

A energías extremas, el origen de los rayos cósmicos es desconocido y sólo puede hipotetizarse. Los modelos que intentan explicar la generación de partículas de energía extrema pueden dividirse en dos categorías. La primera, denominada modelos *exóticos* o *top-down* (de arriba hacia abajo), plantea escenarios muy especulativos que implican fenómenos físicos aún desconocidos. La segunda, denominados modelos *astrofísicos* o *bottom-up* (de abajo hacia arriba), plantea escenarios en donde las partículas son aceleradas por algún objeto astrofísico más o menos conocido.

Orígenes Exóticos

Los modelos exóticos se caracterizan por postular la existencia de física aún desconocida: Materia oscura supermasiva, reliquias de la creación del universo [8], defectos topológicos que emiten partículas desconocidas (monopolos magnéticos, cuerdas cuánticas cerradas, etc. [9]). Al decaer o aniquilarse estas partículas producirían fotones, neutrinos, leptones cargados y en menor medida nucleones con energía extremadamente alta, sin la necesidad de un mecanismo de aceleración.

Uno de estos modelos que más se ha desarrollado, es el denominado Z-Burst [10]. En este modelo, neutrinos ultraenergéticos generados por fuentes remotas en el universo (aún desconocidas) se aniquilarían con neutrinos remanentes del Big Bang, generando bosones Z^0 , que al decaer generarían nucleones, piones, fotones y neutrinos, que finalmente serían detectados en la Tierra como rayos cósmicos de energía extrema.

La mayoría de los modelos exóticos fueron creados para evitar el problema de la pérdida de energía que las partículas de energía extrema sufrirían durante su propagación en el medio intergaláctico por la interacción con el fondo de radiación de microondas. Este efecto fue propuesto en 1965 por Greisen, Zatsepin y Kuzmin y es conocido como "efecto GZK".

El efecto GZK predice una fuerte supresión del espectro a energías por encima de 10^{19} eV cuando las fuentes de los rayos cósmicos son muy lejanas. El experimento AGASA [11] reportó no detectar esta supresión en el flujo, por lo que se propuso la hipótesis de que el origen de los rayos cósmicos debía ser "local" y al no existir ninguna fuente local capaz de acelerar partículas a energías tan altas, debían ser producto de decaimientos exóticos.

La motivación para los modelos exóticos fue puesta en duda luego por el experimento Hi-Res [12] que contradiciendo los resultados de AGASA reportó la detección de la supresión del flujo debida al efecto GZK [13], medida que luego fue confirmada por el Observatorio Pierre Auger. Por otra parte, la gran mayoría de los modelos exóticos predicen que una fracción importante de los rayos cósmicos deben ser fotones, en algunos casos hasta el 10 % a 10^{18} eV y 50 % a 10^{20} EeV [14]. Esto tampoco ha sido respaldado por resultados recientes publicados por el observatorio Pierre Auger, que estableció un límite para la fracción de fotones menor al 1% a 10^{18} eV y menor al 21 % debajo 4×10^{18} eV imponiendo fuertes restricciones a estos modelos, pero sin descartarlos definitivamente.

Si bien parece no ser necesario proponer mecanismos exóticos para explicar la procedencia de los rayos

cósmicos hasta el límite GZK, veremos que los modelos astrofísicos tienen serias dificultades para explicar la existencia de rayos cósmicos por encima de este límite. Una revisión exhaustiva de los modelos exóticos puede verse en [15].

Modelos Astrofísicos

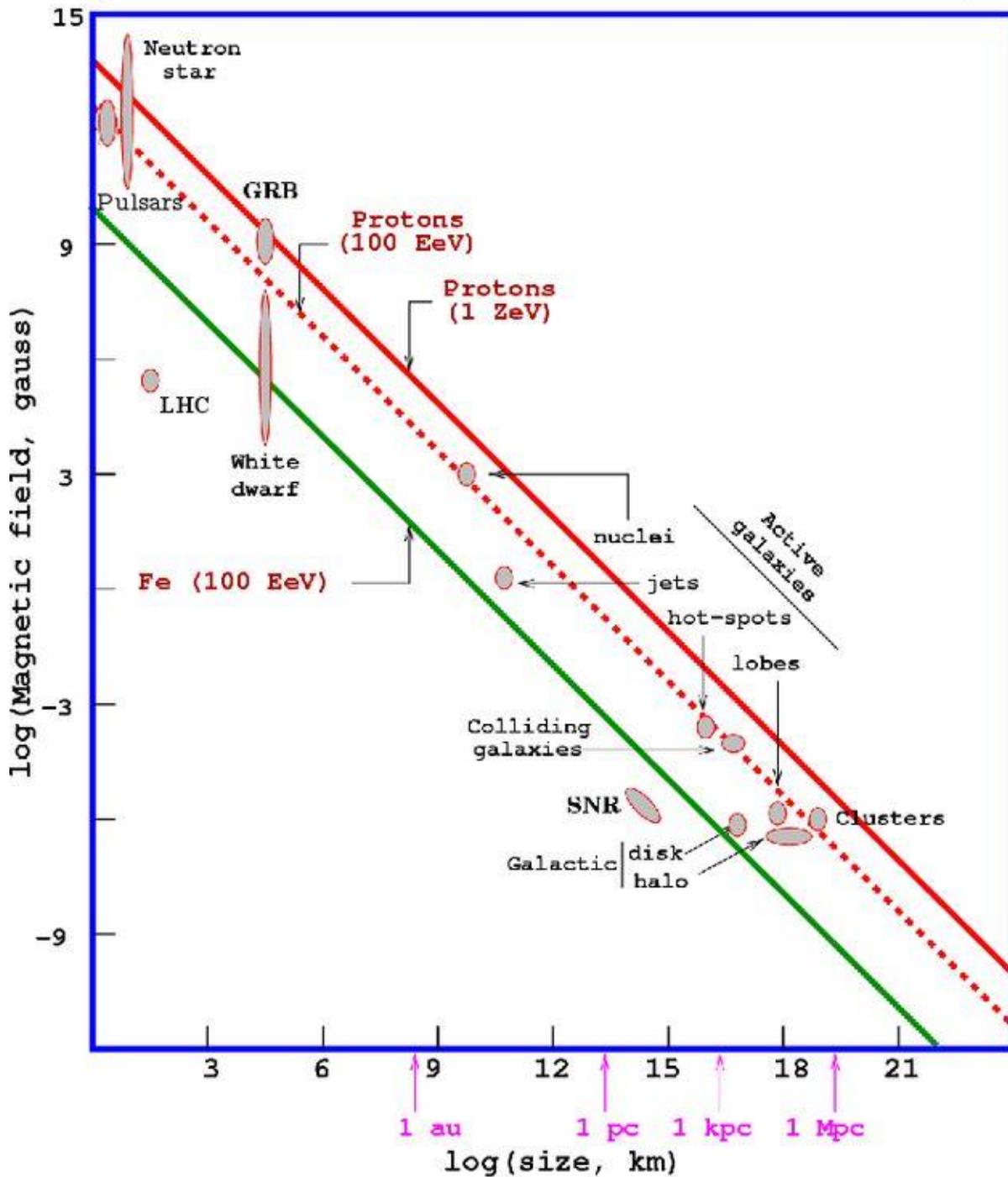
Los modelos astrofísicos plantean la aceleración progresiva de las partículas cargadas en escenarios con campos magnéticos en regiones confinadas del espacio, asociadas a objetos astronómicos más conocidos. El modelo de aceleración en objetos astrofísicos más plausible es el introducido por Fermi en 1949 [16]. En este modelo las partículas son aceleradas aleatoriamente en el campo magnético turbulento de nubes de gas interestelar en movimiento. La eficiencia del proceso varía con el cuadrado de la velocidad de la nube, por lo que se conoce como *mecanismo de Fermi de segundo orden*. Este mecanismo es muy poco eficiente pues la velocidad de la nube es baja comparada con la velocidad de la luz y rápidamente la ganancia en energía es equilibrada por las pérdidas por ionización y radiación de frenado que tienen lugar cuando la partícula cambia su trayectoria.

Una mejora a este mecanismo fue dada por el mismo Fermi, situando la aceleración en una onda de choque de, por ejemplo, una supernova. En este caso, la ganancia de energía aumenta linealmente con la velocidad de la onda de choque, que se mueve mucho más rápido que una nube, volviendo al proceso mucho más eficiente. El proceso es conocido como *mecanismo de Fermi de primer orden*, y es capaz de justificar la aceleración de partículas hasta el orden de 10^{15} eV.

Para acelerar partículas a energías del orden de 10^{18} eV es necesario un campo electromagnético muy intenso, como los que dan origen a las explosiones de rayos gamma (*Gamma Ray Bursts* - GRB). Las estrellas de neutrones binarias, los púlsares, y las supernovas más potentes también poseerían la energía y campos suficientes como para generar esa aceleración.

Los mecanismos de aceleración para llevar partículas muy por encima de los 10^{18} eV aún no están bien establecidos. Sin embargo, es posible utilizar argumentos muy sencillos para caracterizar las posibles fuentes. Hillas [17] consideró que para que una partícula pueda ser acelerada debe primero ser confinada a una región de aceleración. La energía máxima que una partícula con carga Z y velocidad β puede alcanzar en una región de campo magnético B y tamaño L antes de escapar es

$$E_{\max} = \beta Z BL$$



Esta relación es la base de la figura 1, conocida como “el gráfico de Hillas”. Este gráfico muestra que para alcanzar una energía dada es necesario disponer de grandes lugares de aceleración o de grandes campos magnéticos. Sólo unos pocos objetos astrofísicos como las galaxias activas, los puntos calientes de radiogalaxias y objetos compactos como las estrellas de neutrones y las explosiones gamma, satisfacen las condiciones necesarias para acelerar protones hasta 10^{20} eV (esto es, quedan a la derecha de la línea diagonal punteada de la figura 1). Si los rayos cósmicos son núcleos de hierro, las condiciones son un poco menos restrictivas. Describiremos someramente cada uno de estos objetos:

Púlsares ($B \sim 10^{13}$ G, $L \sim 10$ km)

Se cree que los púlsares poseen un campo magnético muy intenso rotando a grandes velocidades. Esto resultaría en una gran fuerza electromotriz que podría acelerar las partículas atrapadas hasta energías muy altas. Sin embargo, la elevada densidad de este tipo de objetos haría que las probabilidades de foto-producción de mesones, fisión foto-nuclear y creación de pares sean muy grandes, con la consiguiente pérdida de energía. Estos efectos además producirían un espectro y una composición que no coincide con los datos experimentales.

GRBs ($B \sim 10^9$ G, $L \sim 10^4$ - 10^5 km)

Las explosiones de rayos gama pueden explicarse por el colapso de estrellas masivas o por captura repentina de masa en agujeros negros o estrellas de neutrones. La onda de choque relativista provocada por la explosión produce en el medio gaseoso circundante la aceleración de los electrones y positrones a energías muy altas, que luego emiten por radiación de frenado y efecto Compton inverso los fotones gamma observados. La potencia calculada de estos eventos es del orden de los 10^{51} erg/s, que sería suficiente para explicar el espectro de rayos cósmicos por encima de 10^{19} eV si la distribución de GRBs fuera uniforme. Sin embargo, estudios recientes indican que éste no es el caso y los GRB son más numerosos a medida que aumenta la distancia. Además, no ha sido posible hasta el momento establecer ninguna correlación entre la información obtenida por el Observatorio Pierre Auger y las posiciones de los GRBs conocidos [18].

AGNs: ($B \sim 10^3$ G, $L \sim 10^{10}$ km)

Se cree que los Núcleos Galácticos Activos albergan agujeros negros supermasivos, una de las fuentes más favorables para explicar el origen de los rayos cósmicos [19]. Si bien la zona central sería capaz de confinar protones de 10^{20} eV, su densidad limita la energía máxima que puede alcanzarse, por lo que las teorías más plausibles indican que la aceleración ocurriría en los jets de partículas que salen del núcleo, donde las partículas son inyectadas con velocidades muy próximas a la de la luz y las densidades son mucho más bajas.

Racimos de Galaxias: ($B \sim 10^6$ G, $L \sim 0.1 - 1$ Mpc)

Debido a su enorme extensión los racimos de galaxias pueden confinar partículas de hasta 10^{20} eV. Sin embargo, la difusión necesaria para la aceleración en este tipo de escenarios implica recorrer distancias tan grandes que la interacción con el fondo de microondas limita la energía máxima a 10^{19} eV.

Puntos Calientes y Lóbulos de Radiogalaxias: ($B \sim 10^3 - 10^4$ G, $L \sim 1$) ($B \sim 10^{-7}$ G, $L \sim 100$ kpc)

En las galaxias tipo Fanaroff-Riley II existen regiones de emisión de sincrotrón, conocidos como "puntos calientes", generados cuando el jet producido por el agujero negro supermasivo del centro de la galaxia interactúa con el medio intergaláctico. El resultado de esta interacción es un frente de choque que acelera las partículas con un mecanismo similar al de Fermi y que amplifica los campos magnéticos. Se cree que la energía máxima que pueden alcanzar estas fuentes en condiciones típicas es del orden de 5×10^{20} eV.

Vemos que los rayos cósmicos de mayor energía detectados en la Tierra hasta el momento están en el límite de la capacidad de aceleración de todas las fuentes conocidas que hemos descrito, y aún se deben comprender cuáles son los mecanismos de inyección y aceleración involucrados. Tampoco está claro cómo es la propagación desde la fuente hasta la Tierra, por lo que el problema de asignar un origen a los rayos cósmicos de energía extrema continúa abierto.

En una futura entrega, veremos cómo el Observatorio Pierre Auger se las arregla para detectar estos intrigantes mensajeros del Cosmos.

Sobre el Autor:

El Dr. Matías Tueros es Dr. en física, y realizó su doctorado mejorando técnicas de análisis y detección en el Observatorio Pierre Auger. Actualmente pertenece a la carrera de investigador del CONICET bajo la dirección del Dr. Gustavo Romero, en el Instituto Argentino de Radioastronomía.

Enlaces de interés:

Observatorio Pierre Auger: www.auger.org.ar

The Oh my god particle: <https://www.fourmilab.ch/documents/OhMyGodParticle/> (en ingles)

Referencias:

- [1] V.F. Hess 1912 *Phys. Zeits.* **13**, p. 1084.
- [2] C.D. Anderson 1933 *Phys. Rev.*, **43**, p. 491.
- [3] S.H. Neddermeyer y C.D. Anderson 1937 *Phys. Rev.*, **51**, p. 884.
- [4] J.C. Street y E.C. Stevenson 1937 *Phys. Rev.*, **52**, p. 1003.
- [5] P. Auger et al. 1939 *Rev. Mod. Phys.*, **11**, p. 288.
- [6] J. Linsley 1963. *Phys. Rev. Lett.*, **10**, p. 146.
- [7] T. Hara et al. 1970 *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.*, **29**, p. 361.
- [8] M. Berezinsky et al. 1997 *Phys. Rev. Lett.*, **79**.
- [9] P. Bhattacharjee 2000 *Phys. Rep.*, **327**, p. 109.
- [10] T. J. Weiler 1999 *Astroparticle Physics*, **11**, p. 303.
- [11] N. Chiba et al. [AGASA Collaboration] 1992 *Nuc. Inst. Meth.*, **A311**, p. 338.
- [12] T. Abu-Zayyad et al. [HiRes Collaboration] 2000 *Nuc. Inst. Meth.*, **A450**, p. 253.
- [13] HiRes Collaboration 2007 *Proc. 30th ICRC (Mérida)*.
- [14] R. Aloisio et al. 2004 *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*,
- [15] P. Bhattacharjee y G. Sigl 2000 *Phys. Rept.*, **327**, p. 109.
- [16] E. Fermi 1949 *Phys. Rev.*, **75**, p. 1169.
- [17] A. M. Hillas 1984 *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **22**, p. 425.
- [18] David Thomas for the Pierre Auger Collaboration 2009 *Proc. 31st ICRC (Lodz)*.
- [19] R. J. Protheroe y A. P. Szabo 1992 *Phys. Rev. Lett.*, **69**, p. 2885.