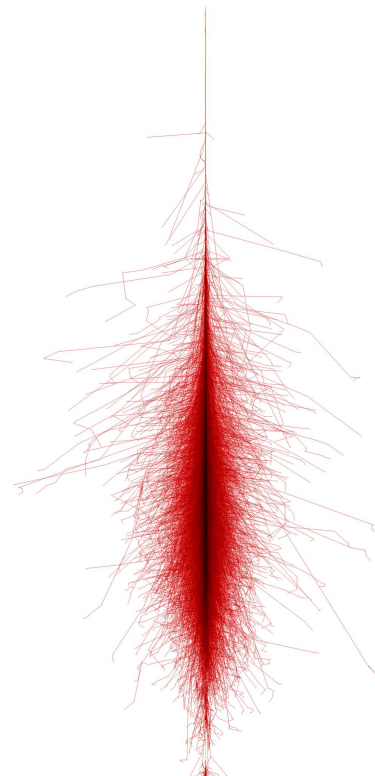
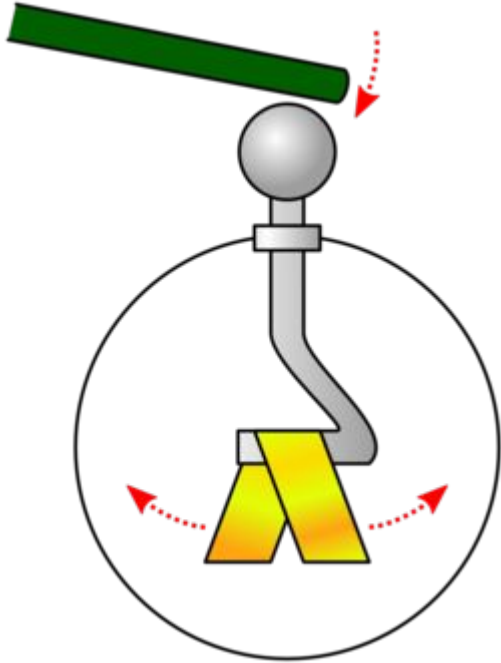


Rayos cósmicos LAGO

Mauricio Suárez Durán
Ecuador, Sept. 2025

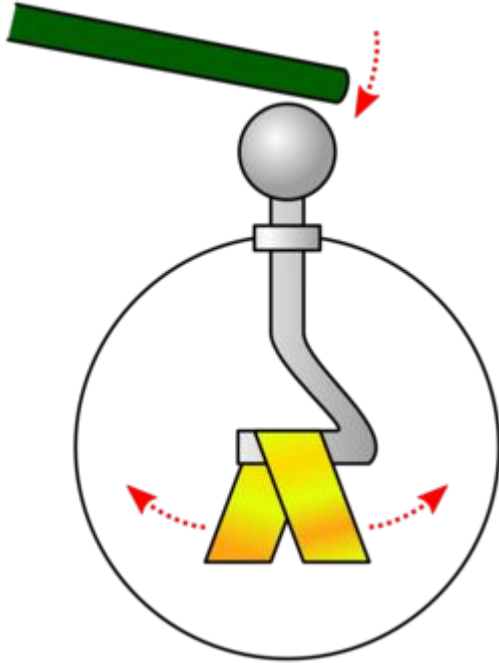


Rayos cósmicos como respuesta radiación “desconocida”



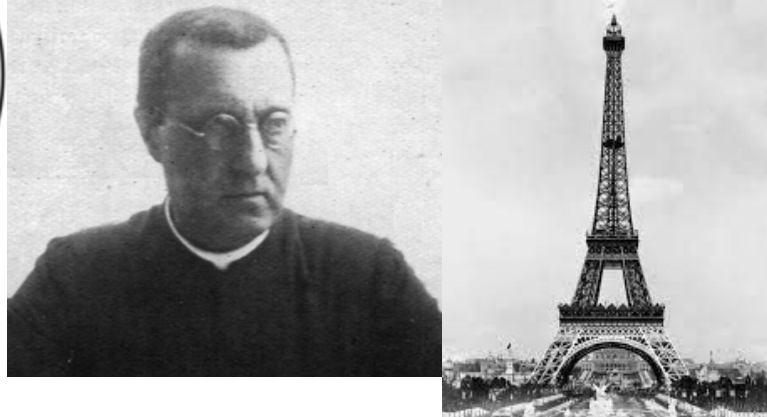
Teoría: entre más lejos de la superficie el espectrómetro se descarga

Rayos cósmicos como respuesta radiación “desconocida”

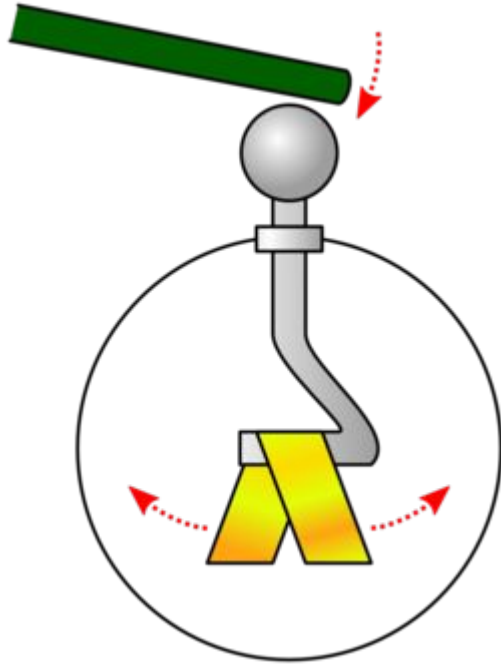


Teoría: entre más lejos de la superficie el espectrómetro se descarga

Realidad: entre más lejos de la superficie, más carga.



Rayos cósmicos como respuesta radiación “desconocida”



Teoría: entre más lejos de la superficie el espectrómetro se descarga

Realidad: entre más lejos de la superficie, más carga



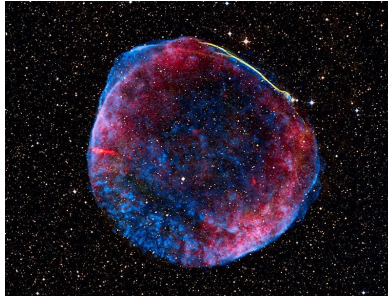
Lo que hoy sabemos y entendemos de los Rayos cósmicos

Lo que sabemos:

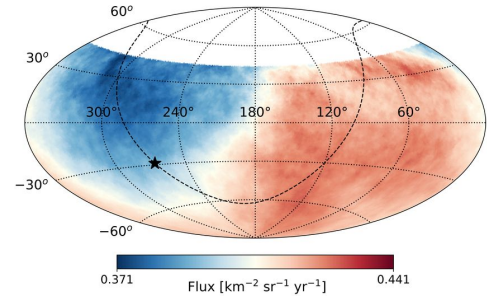
- Su espectro abarca del orden de 14 ordenes de magnitud:



~GeV



~100TeV



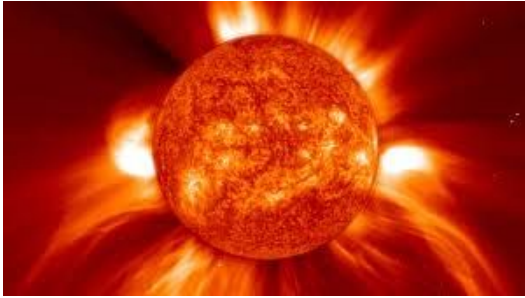
~100EeV



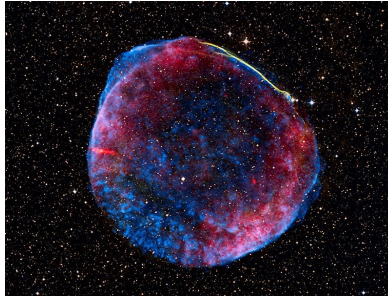
Lo que hoy sabemos y entendemos de los Rayos cósmicos

Lo que sabemos:

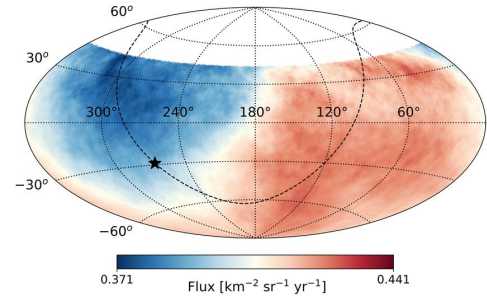
- Su espectro abarca del orden de 14 ordenes de magnitud:



~GeV



~100TeV



~100EeV

- Formado principalmente por núcleos atómicos H a Fe
- Entre más energía menos flujo



¿A qué llamamos un rayo cósmico?

Definición:

Se definen como rayos cósmicos a las partículas, con excepción de los fotones y siendo en su mayoría núcleos atómicos, que se origina fuera del Sistema Solar y llegan a la Tierra o su entorno cercano.



Lo que entendemos: el espectro de rayos cósmicos

Ley de potencias

$$\left(\frac{dN}{dE_p} \right) \propto E_p^\alpha, \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Índice} \\ \text{espectral} \end{array}$$

con α que oscila alrededor de un valor de -3, es decir, el flujo cae tres ordenes de magnitud por decada de energía.

10^8 eV (100 MeV): $1.0 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

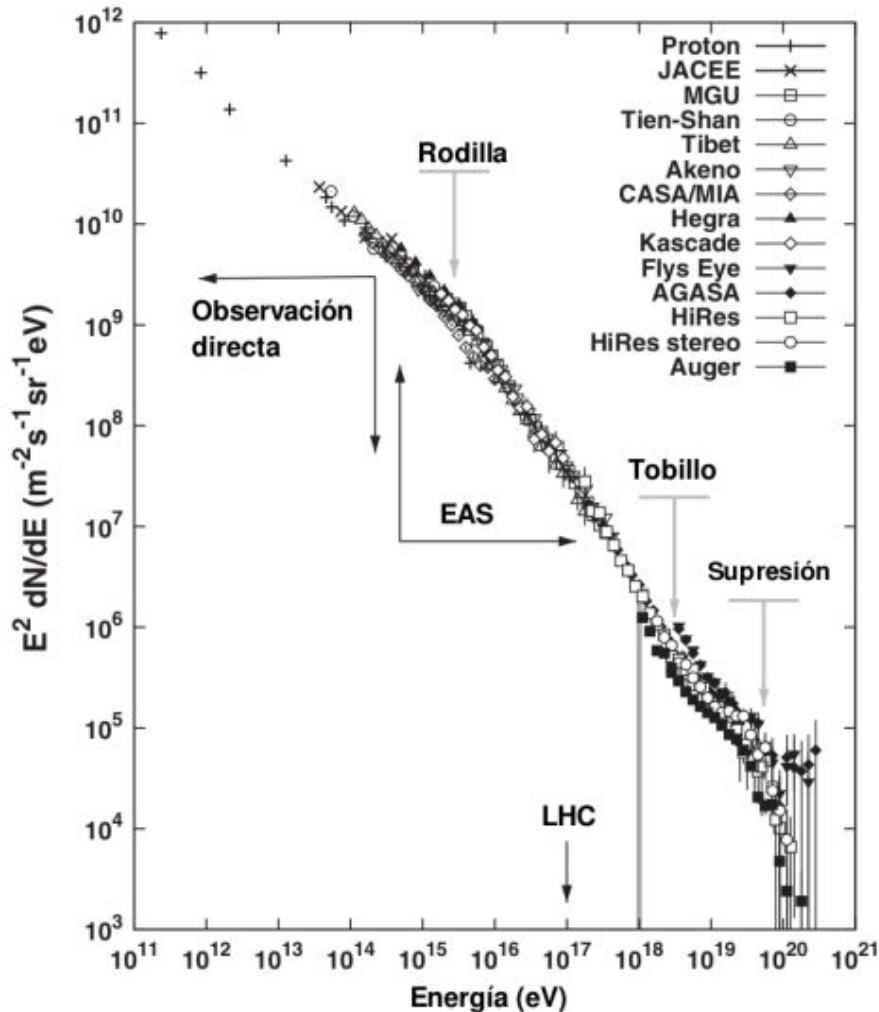
10^{20} eV (100 EeV): $1.0 \text{ km}^{-2} \text{ siglo}^{-1}$



El espectro de rayos cósmicos

Tres regiones, tres valores de α :

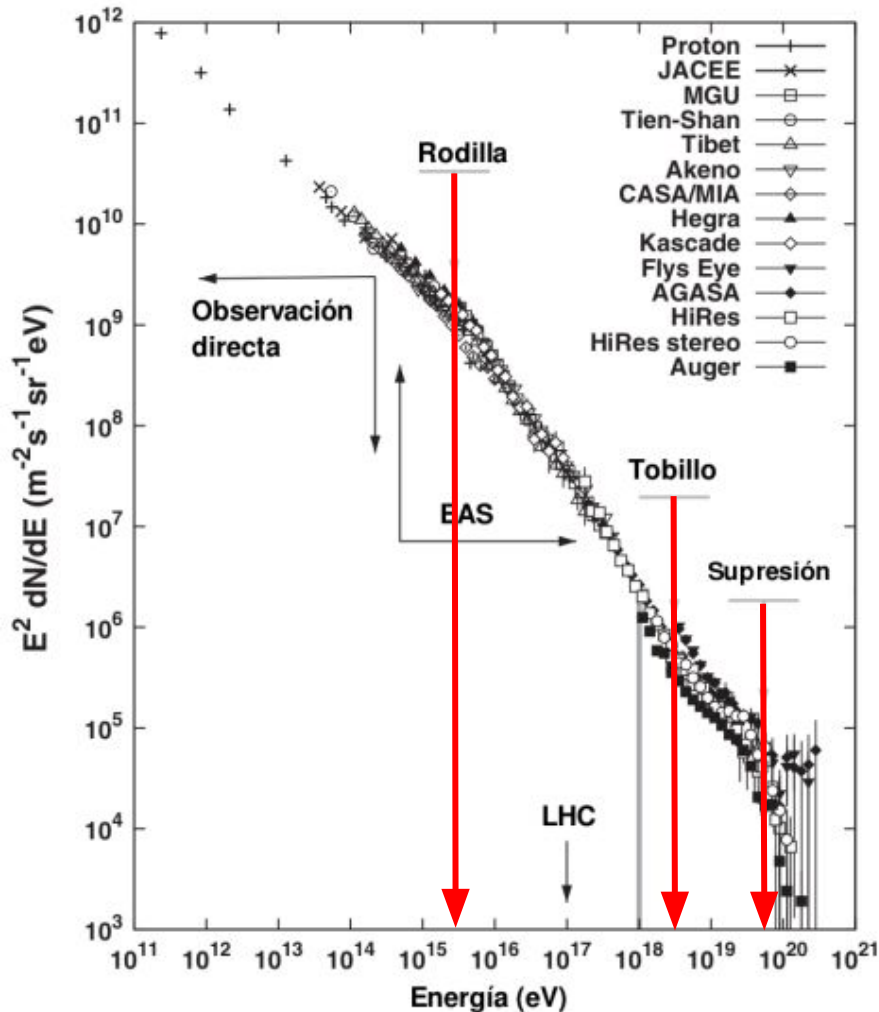
- Rodilla: de -2.7 a -3.0
- Tobillo: de -3.0 a -2.7
- Corte: -4.2



El espectro de rayos cósmicos

Tres regiones, tres valores de α :

- Rodilla: de -2.7 a -3.0
- Tobillo: de -3.0 a -2.7
- Corte: -4.2



El espectro de rayos cósmicos

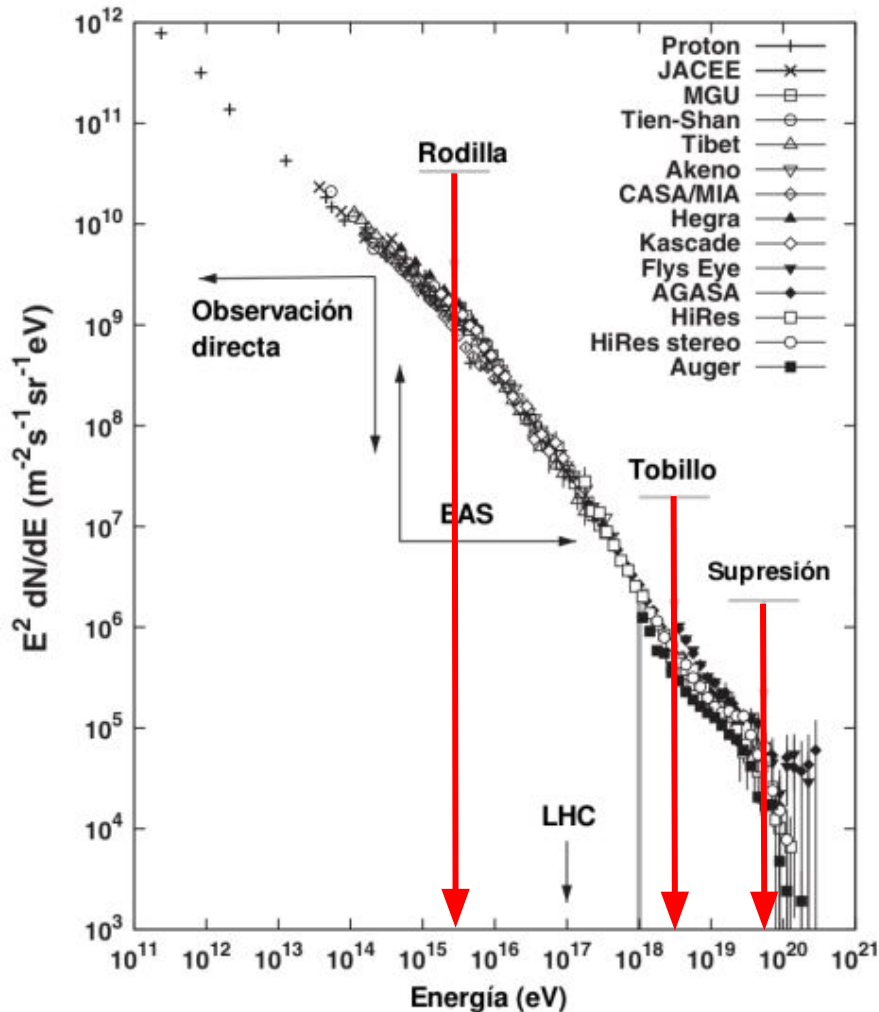
Tres regiones, tres valores de α :

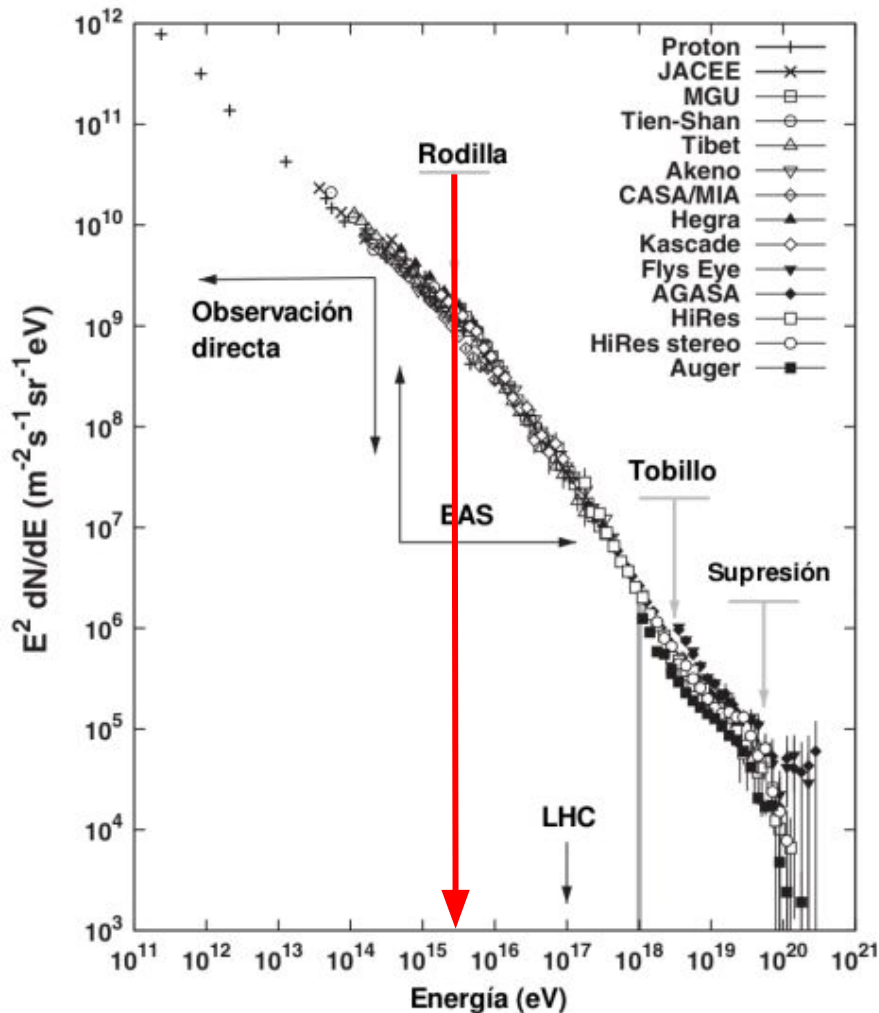
- Rodilla: de -2.7 a -3.0 (2-4 PeV)
- Tobillo: de -3.0 a -2.7 (4 EeV)
- Corte: -4.2 ($E_p > 400$ EeV)

Lo importante:

Cada cambio de α implica cambios en:

- Mecanismo de aceleración
- Composición química
- Interacciones en la propagación

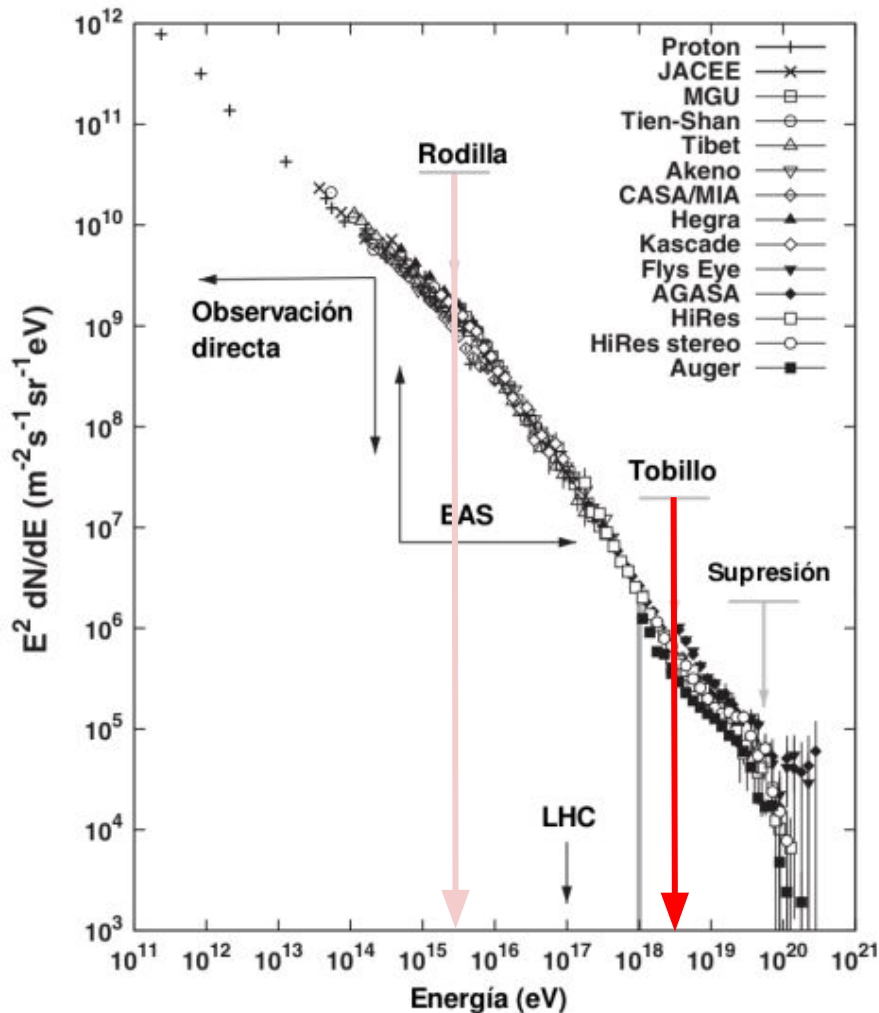




El espectro de rayos cósmicos

La rodilla, de -2.7 a -3.0 (2-4 PeV):

- Cambio en la composición a elementos más pesados



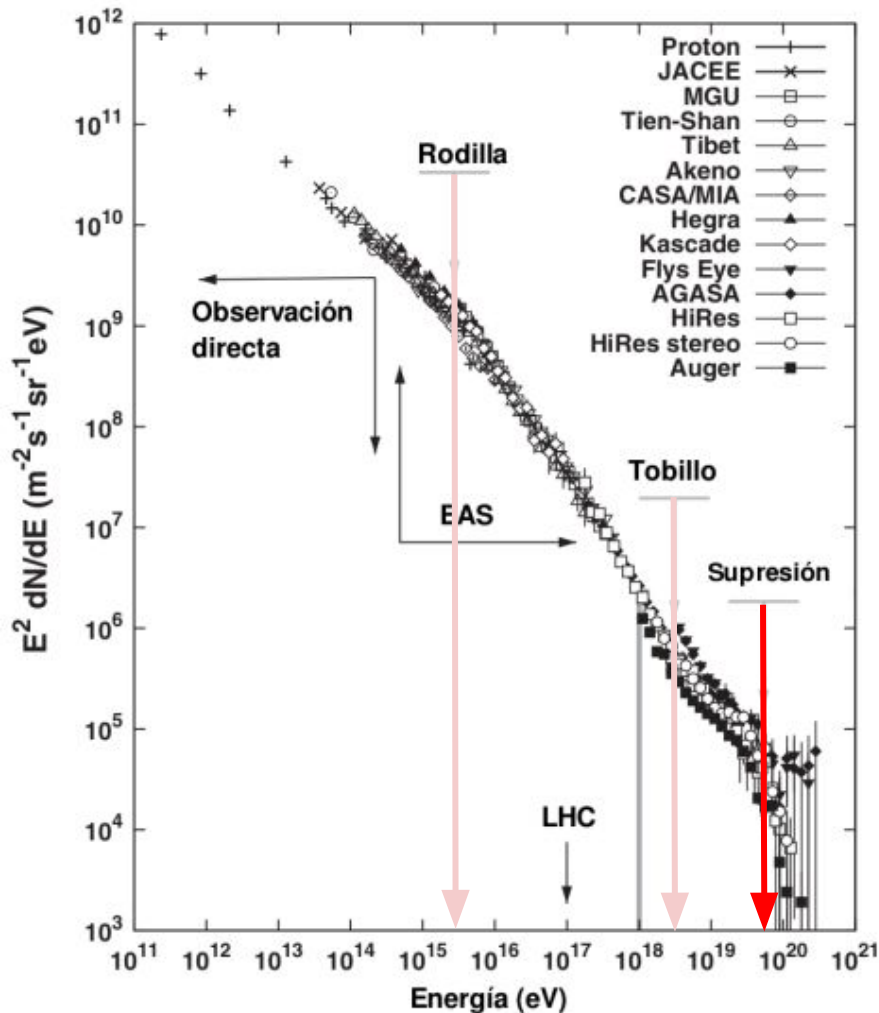
El espectro de rayos cósmicos

La rodilla, de -2.7 a -3.0 (2-4 PeV):

- Cambio en la composición a elementos más pesados

El tobillo, de -3.0 a -2.7 (4 EeV):

- Transición del espectro de RC galácticos a extragalácticos.



El espectro de rayos cósmicos

La rodilla, de -2.7 a -3.0 (2-4 PeV):

- Cambio en la composición a elementos más pesados

El tobillo, de -3.0 a -2.7 (4 EeV):

- Transición del espectro de RC galácticos a extragalácticos.

El corte, de -2.7 a -4.2 ($E_p > 400$ EeV):

- Reducción del flujo de RC debido a la interacción de UHECR con el fondo de radiación.

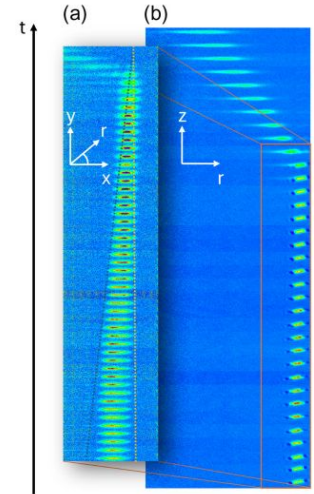


Mecanismos de aceleración: *Bottom-up*

La pregunta clave aquí es, ¿cómo aceleras un protón hasta una energía del orden de 100 EeV, esto es ~ 16 J?

Enrico Fermi:

- Mecanismos no termales
- Mecanismos basados en la interacción de los RC con:
 - Nubes de gas magnetizadas (2do orden)
 - Frentes de choque interestelares (1er orden)

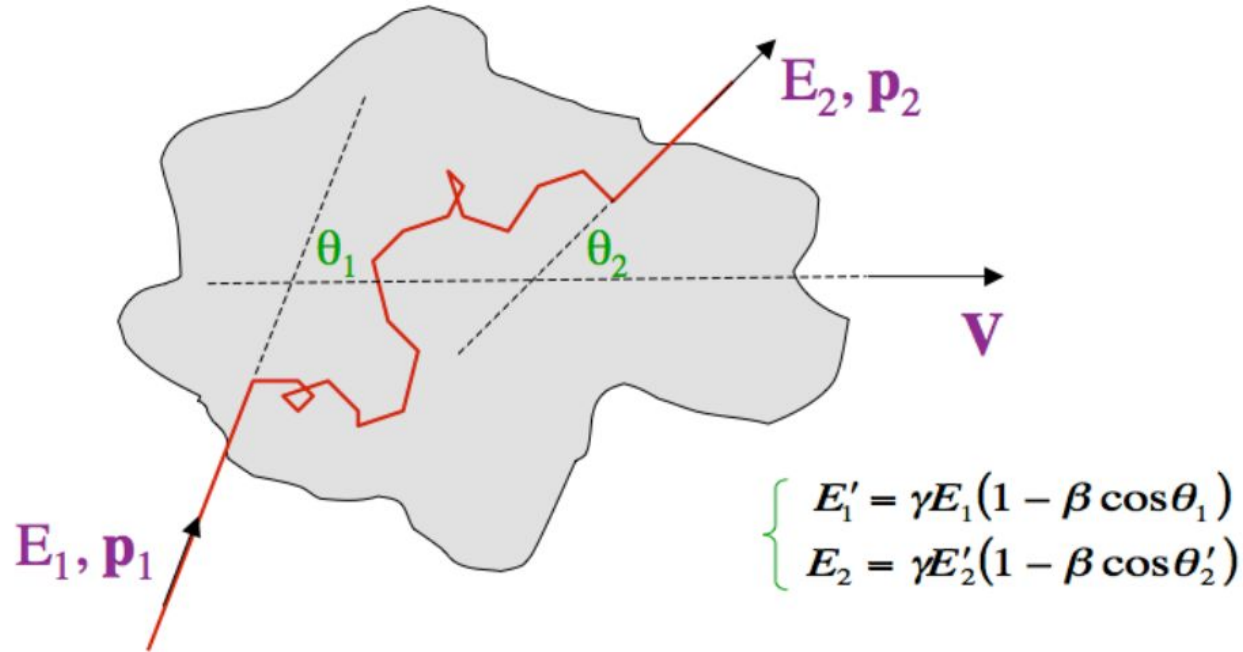


Mecanismo de Fermi

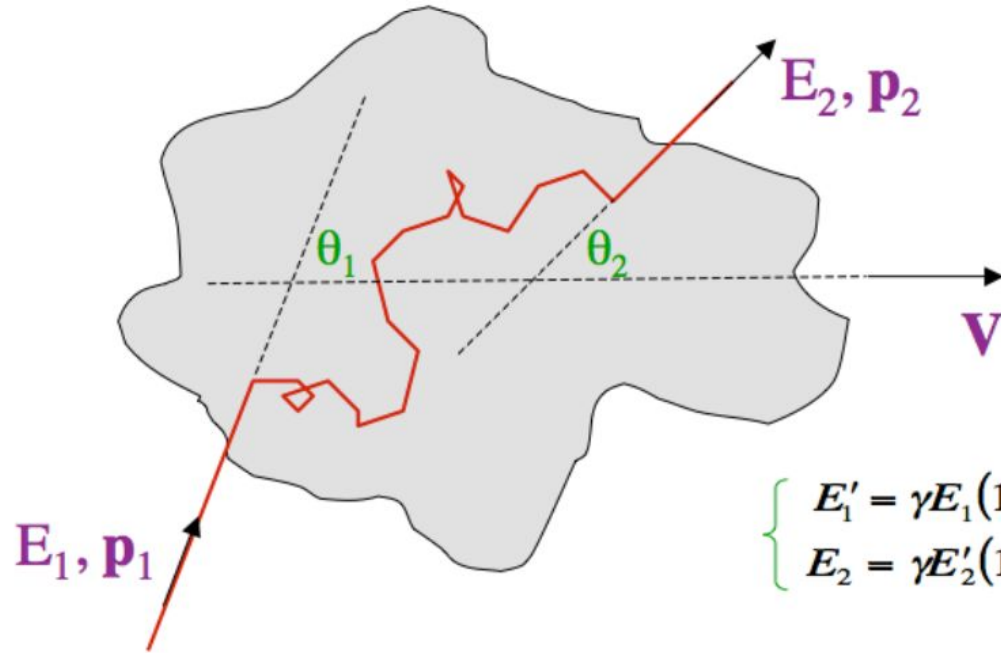
Sea una nube magnética, de las que se encuentran en el medio interestelar:

- Masa $\sim 10^6 M_{\odot}$
- Tamaño ~ 300 ly
- Intensos campo magnéticos al interior (plasma ionizado)

Mecanismo de Fermi



Mecanismo de Fermi



$$\overline{\Delta E} \approx \frac{4}{3} \beta^2 E$$

Mecanismo de segundo orden
($\beta = v_c/c \ll 1$)

$$\begin{cases} E'_1 = \gamma E_1 (1 - \beta \cos \theta_1) \\ E_2 = \gamma E'_1 (1 - \beta \cos \theta'_2) \end{cases}$$

Mecanismo de Fermi de segundo orden $\overline{\Delta E} \approx \frac{4}{3}\beta^2 E$

El tema con este mecanismo a segundo orden es que:

$$E_n = E_0 \left(1 + \frac{\overline{\Delta E}}{E} \right)^2$$

Mecanismo de Fermi de segundo orden $\overline{\Delta E} \approx \frac{4}{3}\beta^2 E$

El tema con este mecanismo a segundo orden es que:

$$E_n = E_0 \left(1 + \frac{\overline{\Delta E}}{E} \right)^2$$

Lo que conlleva a que:

$$\frac{dN}{dE} \approx E_p^\alpha$$

Pero con

$$\alpha \approx \frac{3 \ln(p_e)}{4\beta^2} - 1$$

Mecanismo de Fermi de segundo orden $\overline{\Delta E} \approx \frac{4}{3}\beta^2 E$

El tema con este mecanismo a segundo orden es que:

$$E_n = E_0 \left(1 + \frac{\overline{\Delta E}}{E} \right)^2$$

Lo que conlleva a que:

$$\frac{dN}{dE} \approx E_p^\alpha$$

Es decir, $\alpha < -1$, lo que lo hace ineficiente, no explica los valores medidos de α

Pero con

$$\alpha \approx \frac{3 \ln(p_e)}{4\beta^2} - 1$$



Mecanismo de Fermi de primer orden

Axfor, Lear y Skadron, modifican el mecanismo anterior aplicando a una super nova:

- El material se expulsa a $\sim 10^4$ km/s
- El plasma se mueve a ~ 10 km/s
- Lo que genera una onda de choque que se aleja de la SN

Y luego de hacer la “magia”:

$$\overline{\Delta E} \approx \frac{4}{3} \beta_p E$$

Mecanismo de Fermi de primer orden

Axfor, Lear y Skadron, modifican el mecanismo anterior aplicando a una super nova:

- El material se expulsa a $\sim 10^4$ km/s
- El plasma se mueve a ~ 10 km/s
- Lo que genera una onda de choque que se aleja de la SN

Y luego de hacer la “magia”:

$$\overline{\Delta E} \approx \frac{4}{3} \beta_p E$$

$\sim 10^{10}$ más eficiente
que el 2do orden.



Mecanismo de Fermi de primer orden

$$\overline{\Delta E} \approx \frac{4}{3} \beta_p E$$

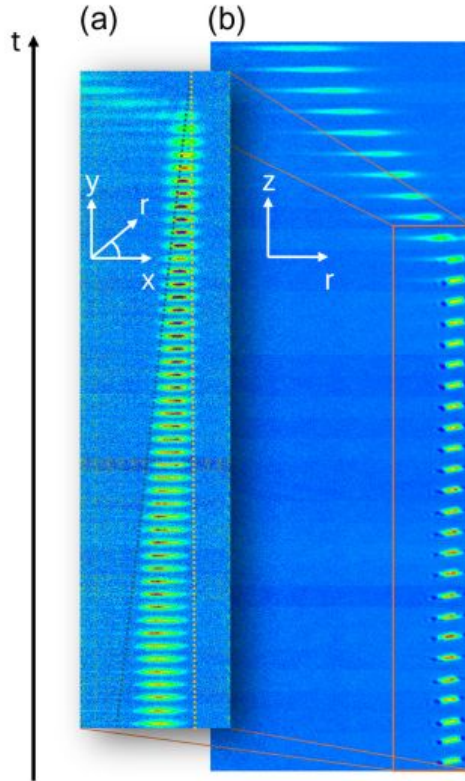
En este caso,

$$\alpha \approx \frac{p_{\text{esc}}}{\overline{\Delta E}/E} - 1$$

Lo que se traduce a $\alpha \sim -2$.

“Estos son modelos sobre-simplificados. Efectos como, por ejemplo, la presión de los rayos cósmicos sobre el frente de choque, hacen que este no sea una función escalón en la densidad sino más bien una transición suave, lo cual dificulta mucho el cálculo y de hecho se trata de un problema aún no resuelto.”

Mecanismo de Fermi para aceleración de rayos cósmicos



PHYSICAL REVIEW LETTERS **135**, 025201 (2025)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

Observation of Fermi Acceleration with Cold Atoms

G. Barontini^{1,*}, V. Naniyil¹, J. P. Stinton¹, D. G. Reid¹, J. M. F. Gunn¹, H. M. Price¹,
A. B. Deb¹, D. Caprioli² and V. Guarrera¹

¹*School Of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Edgbaston, Birmingham B15 2TT, United Kingdom*

²*Department of Astronomy and Astrophysics and E. Fermi Institute, The University of Chicago,
5640 S Ellis Avenue, Chicago, Illinois 60637, USA*

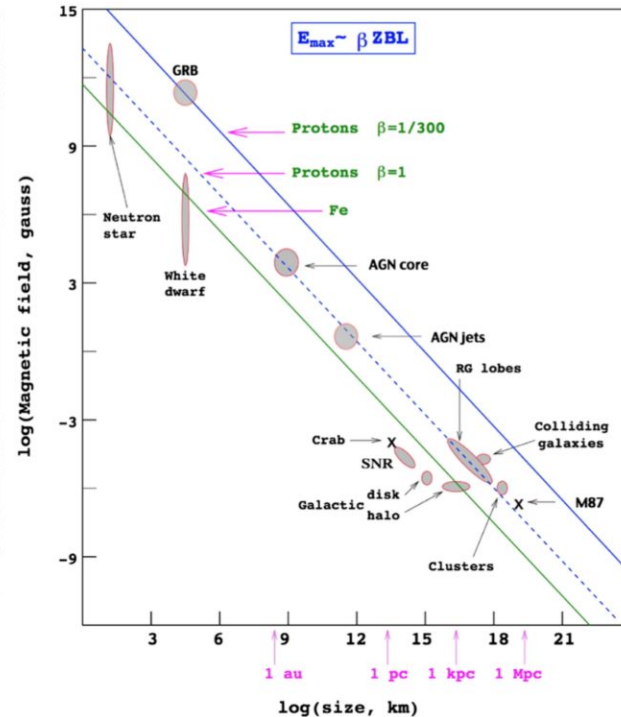
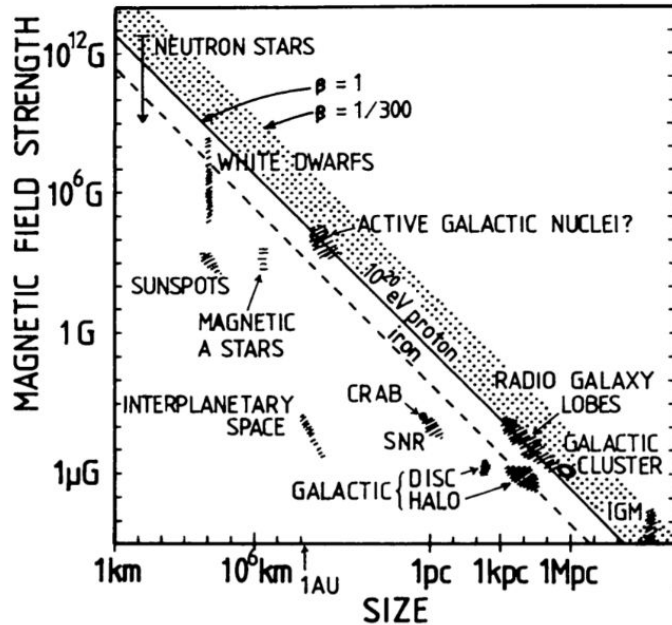
(Received 5 March 2025; accepted 13 May 2025; published 9 July 2025)

Cosmic rays are deemed to be generated by a process known as “Fermi acceleration” in which charged particles scatter against magnetic fluctuations in astrophysical plasmas. The process itself is, however, universal, has both classical and quantum formulations, and is at the basis of dynamical systems with interesting mathematical properties, such as the celebrated Fermi-Ulam model. Despite its effectiveness in accelerating particles, Fermi acceleration has so far eluded unambiguous verifications in laboratory settings. Here, we realize a fully controllable Fermi accelerator by colliding ultracold atoms against engineered movable potential barriers. We demonstrate that our Fermi accelerator, which is only 100 μm in size, can produce ultracold atomic jets with velocities above 0.5 m/s. Adding dissipation, we also experimentally test Bell’s general argument for the ensuing energy spectra, which is at the basis of any model of cosmic ray acceleration. On the one hand, our Letter effectively opens the window to the use of cold atoms to study phenomena relevant for high energy astrophysics. On the other, the performance of our Fermi accelerator is competitive with those of best-in-class accelerating methods used in quantum technology and quantum colliders, but with substantially simpler implementation no fundamental physics limit.

DOI: 10.1103/nrvj-pwy1

Fuentes de rayos cósmicos

Aceleración de RC $\sim$ magnitud de campo magnético



Mecanismos de aceleración: *top-down*

- El tema es que los mecanismos *bottom-up* no explican 100% el flujo observado.
- El observatorio AGASA reportó seis eventos con $E > 10^{20}$ eV
- Los mecanismos *top-down* surgen como mecanismo para explicar el flujo de UHECR.
- Se basan en la inestabilidad de partículas supermasivas ($> 10^{21}$ eV) que decaen en quarks y leptones; éstas se denominan partículas X

Tres condiciones

- Deben decaer en épocas recientes, es decir, para distancias $d \sim 100$ Mpc, para que no se vean demasiado afectadas en su propagación.
- Su masa debe ser del orden de las predichas por la teorías de gran unificación, $M_{\text{GUT}} \sim 10^{25}$ eV.
- Su densidad y ritmo de decaimiento debe ser compatible con el flujo observado de.

El tema es que no se ha encontrado evidencia que permita “acoplar” sus tiempos de vida media con la constante de acoplamiento g .

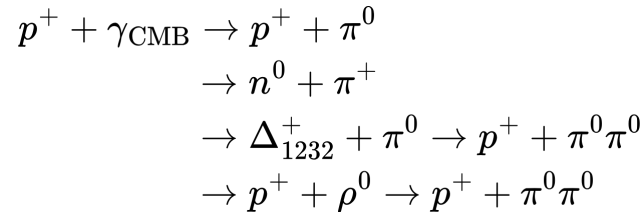
Por otra parte, modelos $X\bar{X} \rightarrow \gamma g Z^0$ predicen que los productos finales deben estar dominados por fotones y neutrinos, pero Auger mide lo contrario.



Propagación de rayos cósmicos

La existencia del fondo cósmico de microondas implica la interacción entre los RC
y γ_{CMB} .

En 1957, Kenneth Greisen, Georgi Zatsepin y Vadim Kuz'min (GZK) propusieron el modelo que explica la interacción de los RC con γ_{CMB} :



Propagación de rayos cósmicos

Es importante tener en cuenta que:

- Por leyes de conservación, existe una energía umbral para que un RC pueda interactuar con algún γ_{CMB} .
- Sin embargo, la observación de un RC con energía mayor a la umbral ($\sim 3 \times 10^{19} \text{eV}$) no invalida el efecto, pero sí implica que la fuente debe ser cercana,
- es decir, el efecto GZK es una supresión en el flujo de RC a energías mayores a las del umbral.

Efecto GZK

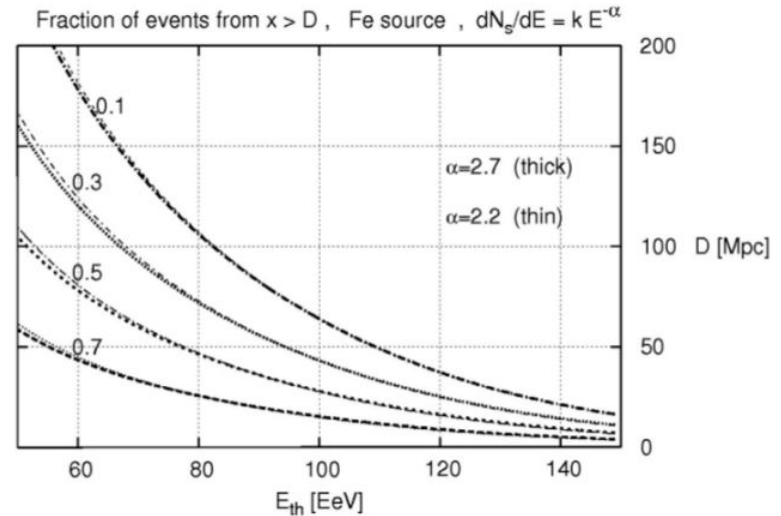
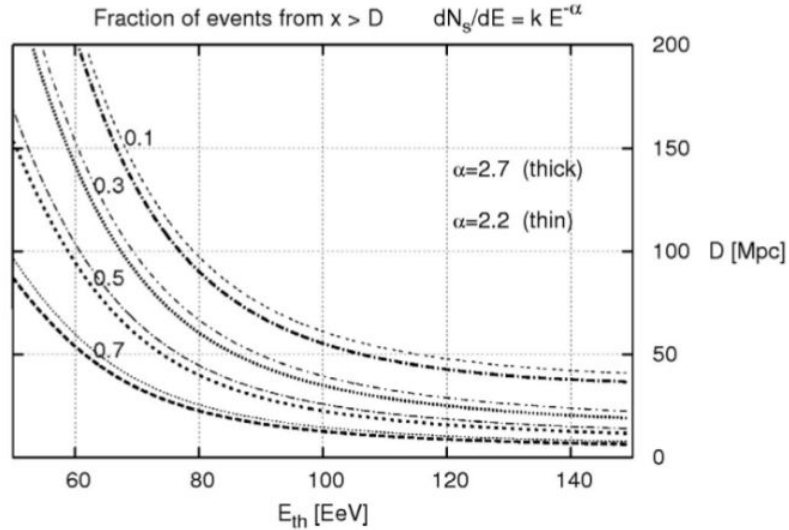
Otro posible canal es la creación de pares vía el proceso de Bethe-Heitler:

$$p^{+} + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow p^{+} + e^{+} + e^{-}$$

Derivandose un umbral menor $\sim 3 \times 10^{18} \text{eV}$.

Esto último explicaría que el tobillo, no es debido a mecanismos de aceleración y/o producción de RC, es causado por un efecto de propagación en un medio no vacío (γ_{CMB}).

Efecto GZK



Fracción de protones (izquierda) o hierros (derecha) que debió ser producida a distancias mayores a D , para que se observen en la Tierra con energías $E_p > E_{th}$.

Gracias