

Física de Astropartículas - 2017

- **Unidad** 01 – Fenomenología de Astropartículas
- **Clase** U01
- **Fecha** 03 y 05 May 2017
- **Cont** Presentación, introducción
- **Cátedra** Asorey
- **Web** <https://github.com/asoreyh/astroparticulas>

Colegas contando algunas experiencias

- Hernán Asorey, hernan.asorey@iteda.cnea.gov.ar
 - Departamento de Física Médica, Centro Atómico Bariloche e Instituto Balseiro (CNEA/CONICET/UNCUYO)
 - Técnicas avanzadas en radioterapia: deposición de dosis y dosimetría tridimensional en TTO IGRT&IMRT de cáncer de pulmón, mama y colon.
 - Instituto de Tecnologías de Detección y Astropartículas (ITeDA), Centro Atómico Constituyentes (CNEA/CONICET/UNSAM)
 - Meteorología Espacial, Muongrafía de Volcanes, Detección de neutrones

Puntos de contacto

- **Las clases:**

- **Miercoles 13:00 a 17:00**
- **Viernes 08:00 a 12:00**
- **Viernes 13:30 a 17:30**

- **La Bibliografía:**

- **Longair**
- **Grieder**
- **Gaiser**

- **La página: clases, guías...**



<https://github.com/asoreyh/astroparticulas>

- **La máquina virtual**
Xubuntu 16.04 en virtualbox

The screenshot shows a GitHub repository page for 'asoreyh/astroparticulas'. The repository is described as a 'Curso de Física de Astropartículas de la Universidad Nacional de San Martín'. It has 3 commits, 1 branch, 0 releases, and 1 contributor. The first commit is by 'asoreyh' (First commit, d0c80d2 9 hours ago). The README.md file contains a night sky image with star trails.

- **Evaluación continua (60%)**
 - Participación en clases
 - Entrega de prácticos
 - Monografía con tema a elección
- **Trabajo final integrador, a definir (40%), ó**
- **Promoción, cumpliendo todas estas condiciones:**
 - Entrega del 100% de los prácticos en tiempo y forma
 - Entrega del 100% de los informes en tiempo y forma
 - Nota Evaluación Continua > 7.9
 - Dispone de un (y sólo un) “comodín” para las entregas

Levante su mano derecha y repita conmigo

- Yo, (su nombre aquí), he entendido claramente las condiciones de promoción, las comprendo en toda su profundidad, lo tendré en cuenta para las entregas,
- Trabajo final y no solicitaré excepciones

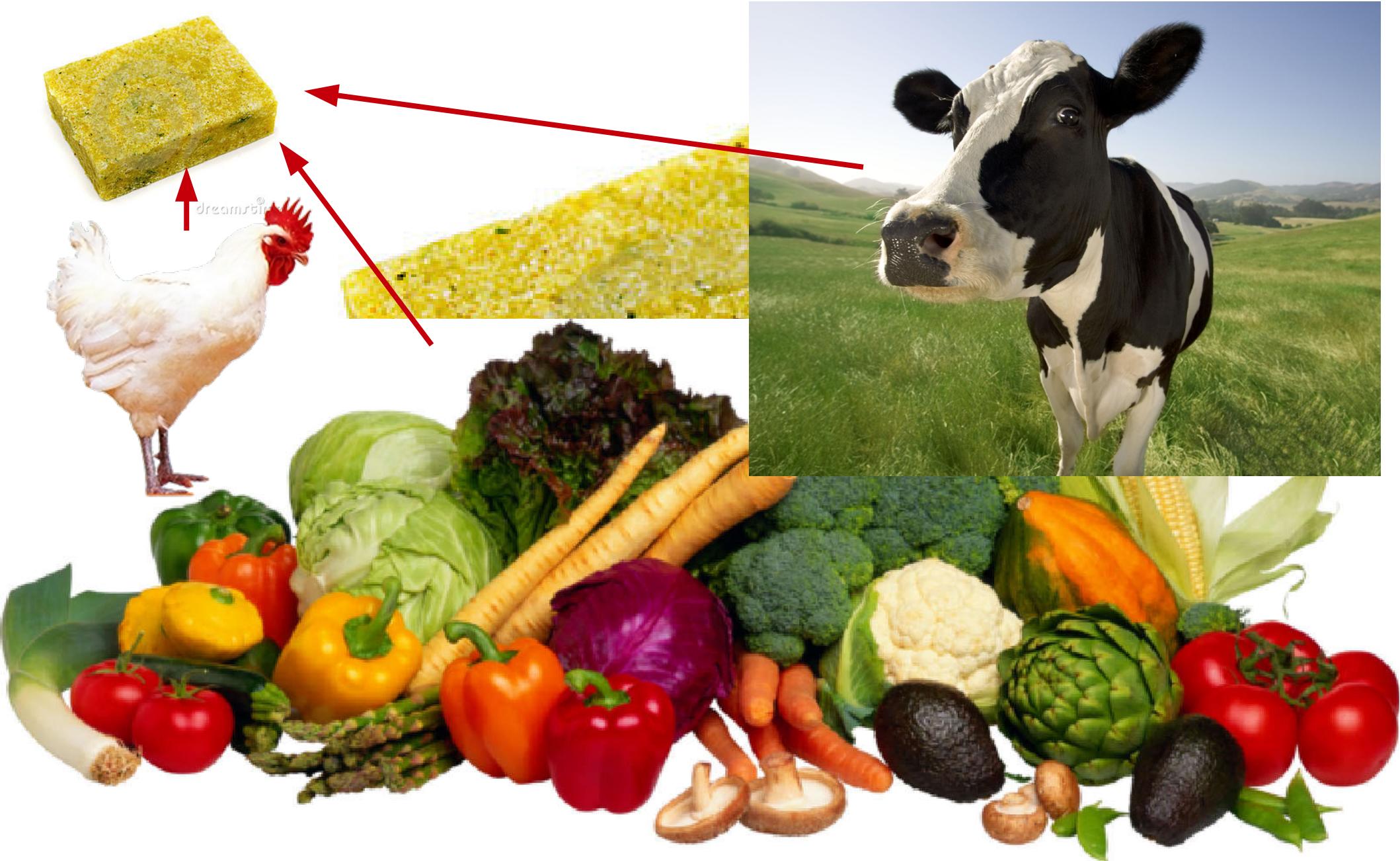
- Promoción, cumpliendo todas estas condiciones:
 - Entrega del 100% de los prácticos en tiempo y forma
 - Entrega del 100% de los informes en tiempo y forma
 - Nota Evaluación Continua > 7.9
 - Dispone de un (y sólo un) “comodín” para las entregas

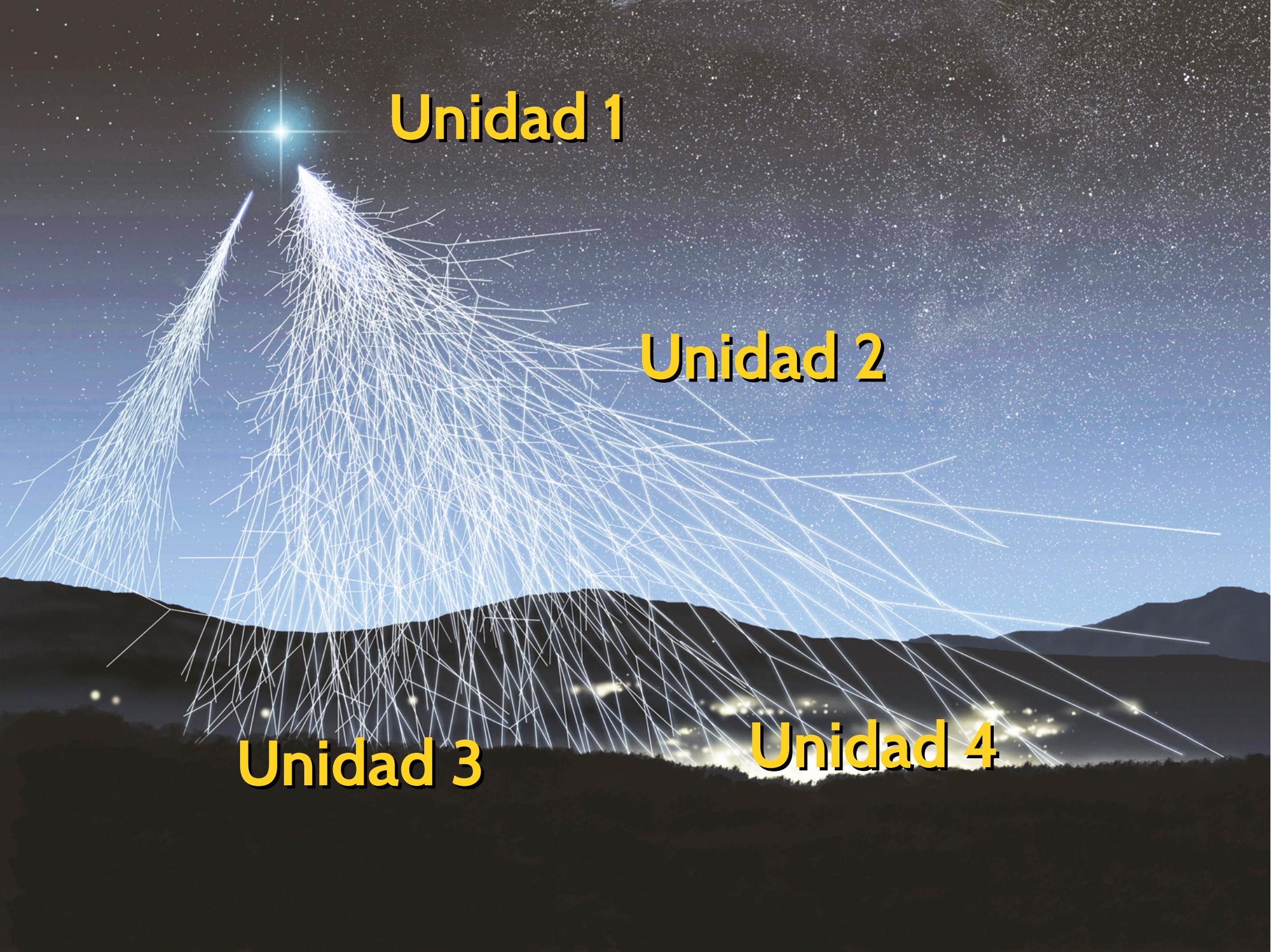


Objetivos

- Que el estudiante adquiera una perspectiva general y moderna de la física de astropartículas y algunas de sus posibles aplicaciones
- Qué es y que no es...

Contenidos: la magia de Knorr™





Unidad 1

Unidad 2

Unidad 3

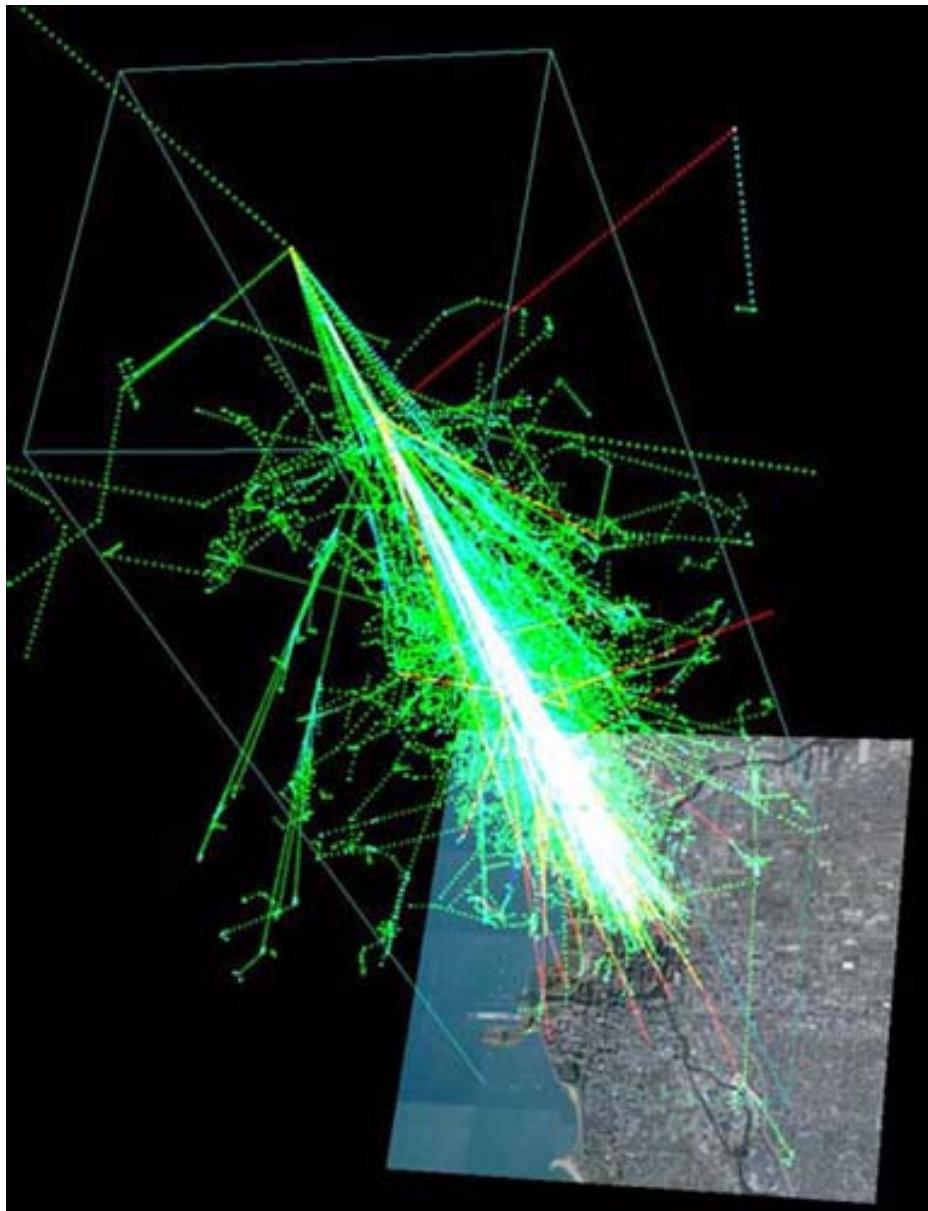
Unidad 4

Unidad 1: Fenomenología de Astropartículas

- Introducción a astrofísica relativista. Mecanismos de producción. Posibles fuentes de astropartículas.
Propagación de rayos cósmicos en el medio intergaláctico e interestelar y sus consecuencias observacionales. Transporte heliosférico y magnetosférico.
- **Laboratorio virtual unidad 1:**
Propagación en el medio intergaláctico con CrPropa.



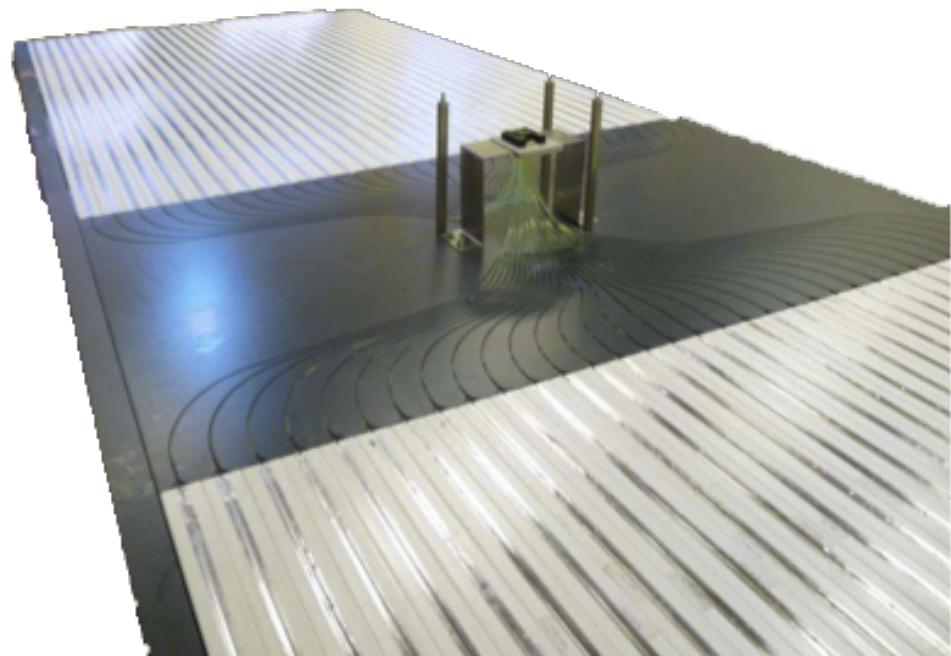
•Unidad 2: Lluvias Atmosféricas Extendidas



- Introducción a interacción de la radiación con la materia. La atmósfera de la Tierra y Marte. Modelos de desarrollo de una EAS. Principales características de las EAS iniciadas por fotones, protones y núcleos pesados. Universalidad. Partículas secundarias y su distribución longitudinal y transversal. Principales observables de las EAS.
- **Laboratorio virtual unidad 2: Simulación de una EAS en CORSIKA.**

• Unidad 3: Técnicas de detección de Astropartículas

- Introducción a técnicas de detección de partículas. Técnicas de detección directa: globos y satélites. Principales observatorios de detección directa. Técnicas de detección indirecta: muestreo longitudinal, lateral y técnica de partícula solitaria. Principales detectores de astropartículas: telescopios de fluorescencia; telescopios Cherenkov; detectores Cherenkov en agua; detección por radio; centelladores; cámaras de placas resistivas; otros detectores. Técnicas de reconstrucción.
- **Laboratorio virtual unidad 3:
Simulación básica de un detector.**



Unidad 4: Aplicaciones y análisis de datos

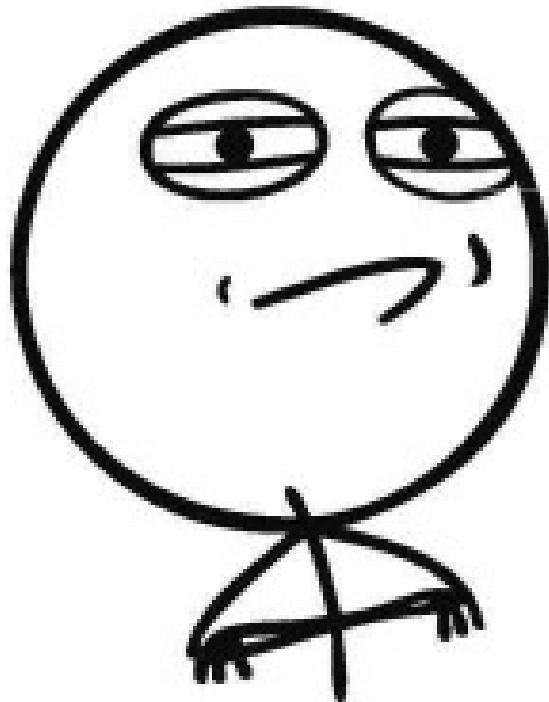


- Introducción al análisis de datos. Astronomía gamma y destellos de rayos gamma. Astronomía de partículas cargadas. Meteorología y clima del Espacio; Radiación en el entorno cercano a la Tierra. Ionización atmosférica; Muongrafía;
- **Laboratorio Virtual Unidad 4: Análisis de datos de meteorología del espacio y del decaimiento del muón en un detector Cherenkov en agua.**

Programación del curso

Sem	Día	Fecha	Aula	Contenidos
1	Miércoles	03/05/2017	Sol-Sol	Astrofísica
1	Viernes	05/05/2017	Edif 35, aula F	Astrofísica
2	Miércoles	10/05/2017	NO HAY	NO HAY
2	Viernes	12/05/2017	NO HAY	NO HAY
3	Miércoles	17/05/2017	Sol-Sol	LAB 1
3	Viernes	19/05/2017	Edif 35, aula F	EAS
4	Miércoles	24/05/2017	Sol-Sol	EAS
4	Viernes	26/05/2017	Nivel Cero	LAB 2
5	Miércoles	31/05/2017	Sol-Sol	Detectores
5	Viernes	02/06/2017	Nivel Cero	Detectores
6	Miércoles	07/06/2017	Sol-Sol	Aplicaciones
6	Viernes	09/06/2017	Nivel Cero	LAB 3 y LAB 4
Entregas de prácticos, informes y monografías en Julio 2017				

CHALLENGE ACCEPTED

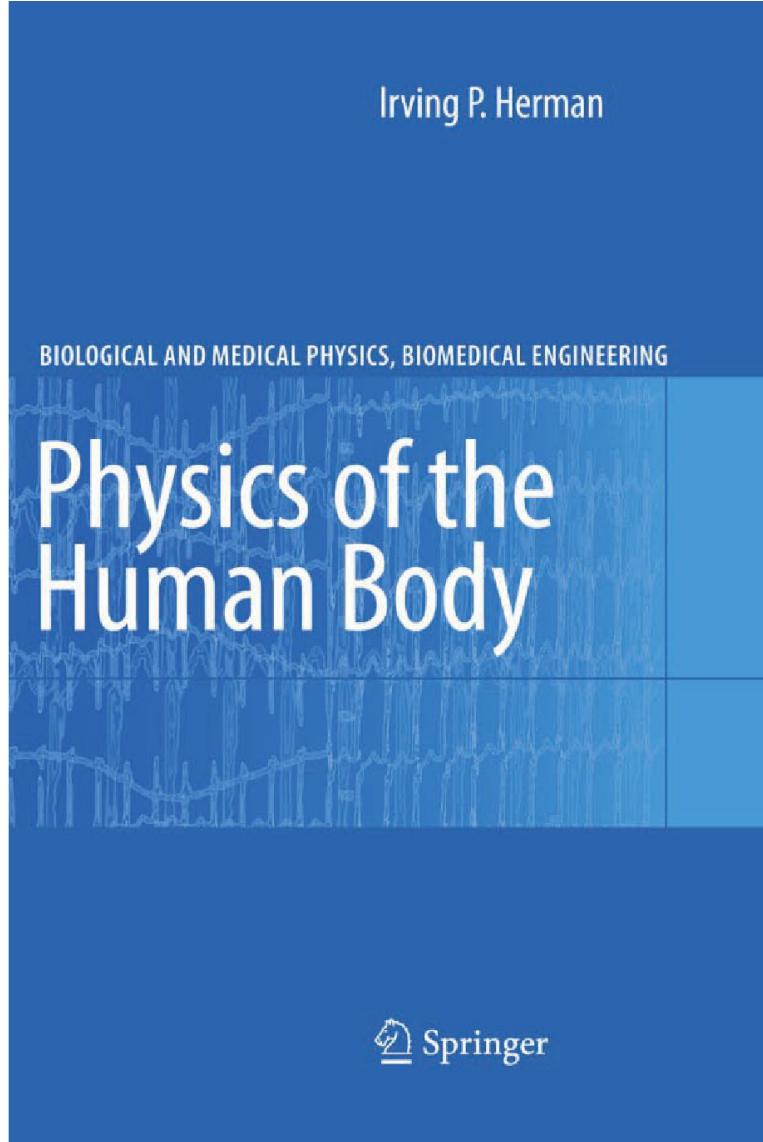


- Prestar mucha atención
- Indicador de tarea

Pero antes unos
disclaimers
generales



jerga, jerga, jerga



Irving P. Herman

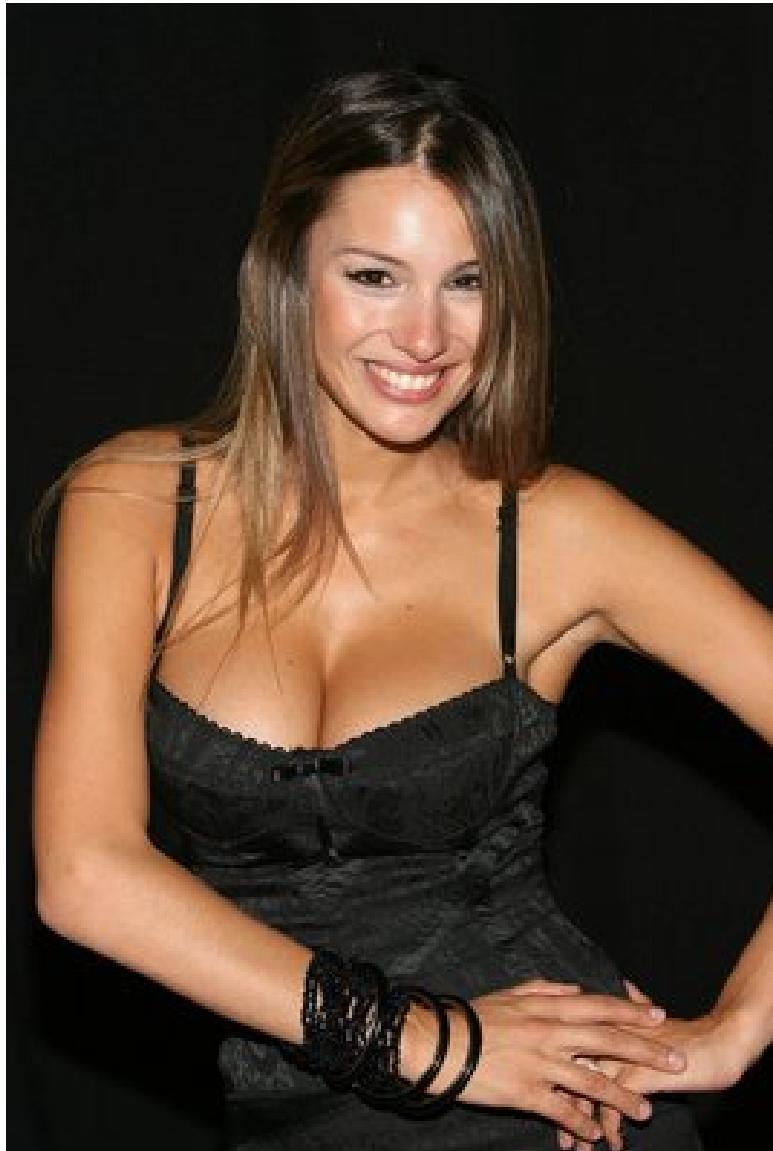
BIOLOGICAL AND MEDICAL PHYSICS, BIOMEDICAL ENGINEERING

Physics of the Human Body

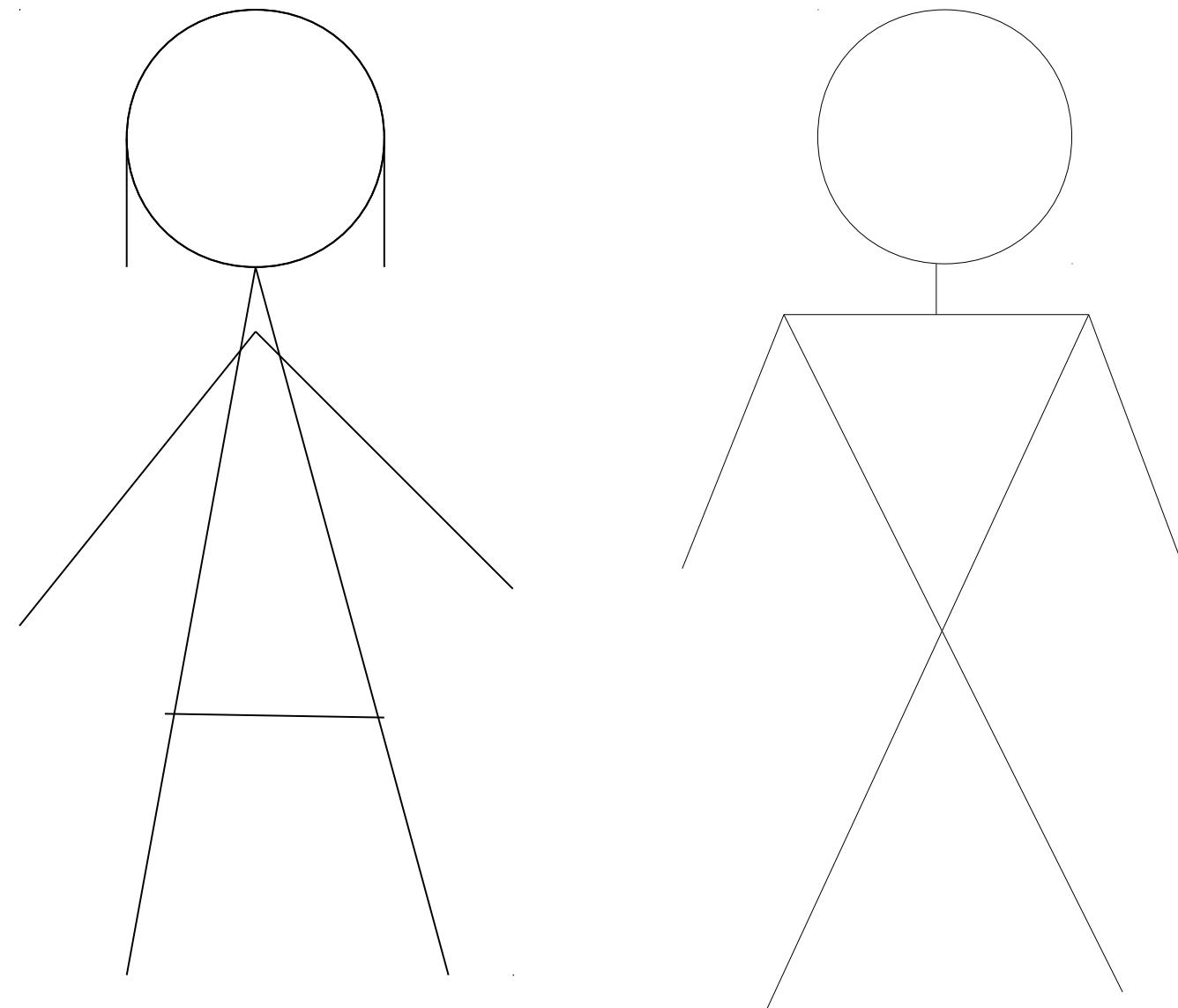
 Springer

- “*Much of the problem we have in comprehending specialists in any field is in understanding their jargon, and not in understanding their ideas. This is particularly true for medicine. Much of medical jargon of interest to us is the terminology used in anatomy, and much of that in anatomy relates to directions and positions*”

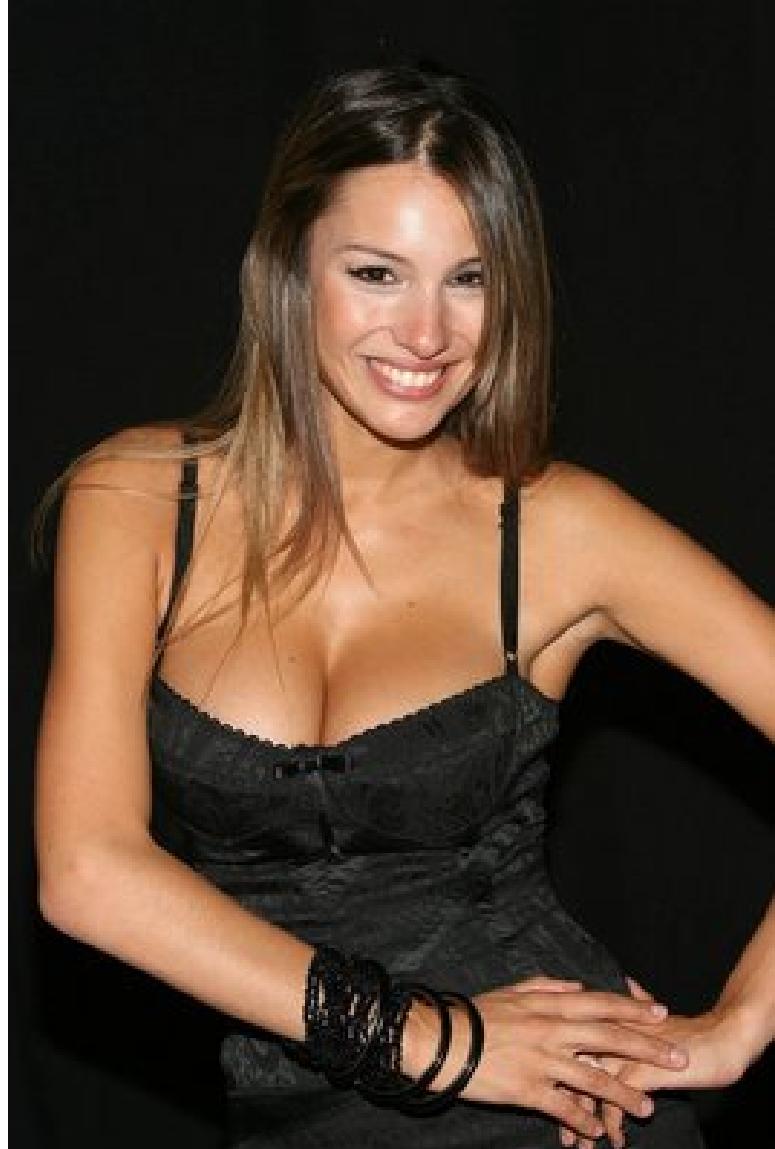
Imaginemos que esta es la “realidad” que queremos representar



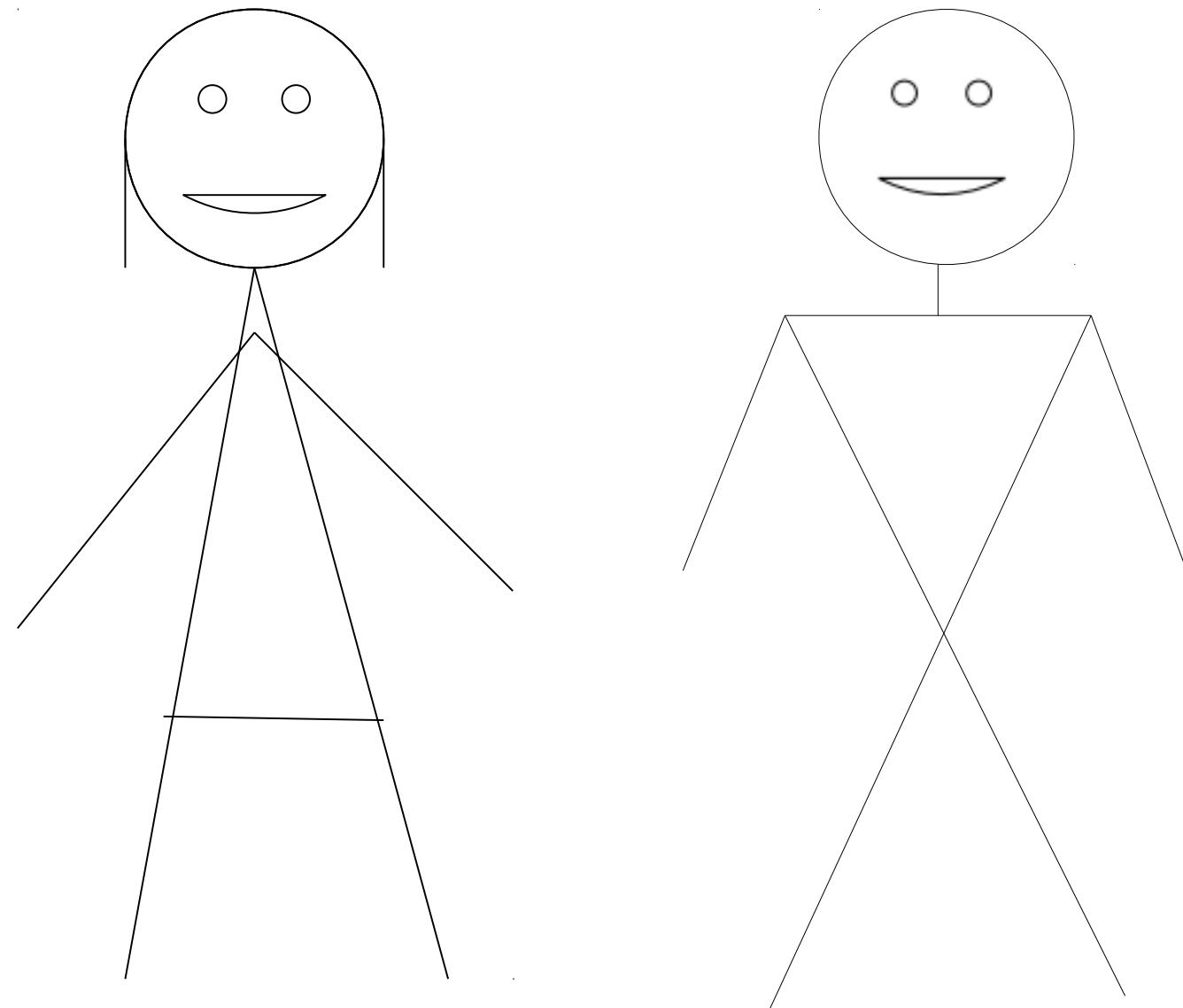
Para ello usamos modelos simplificados..



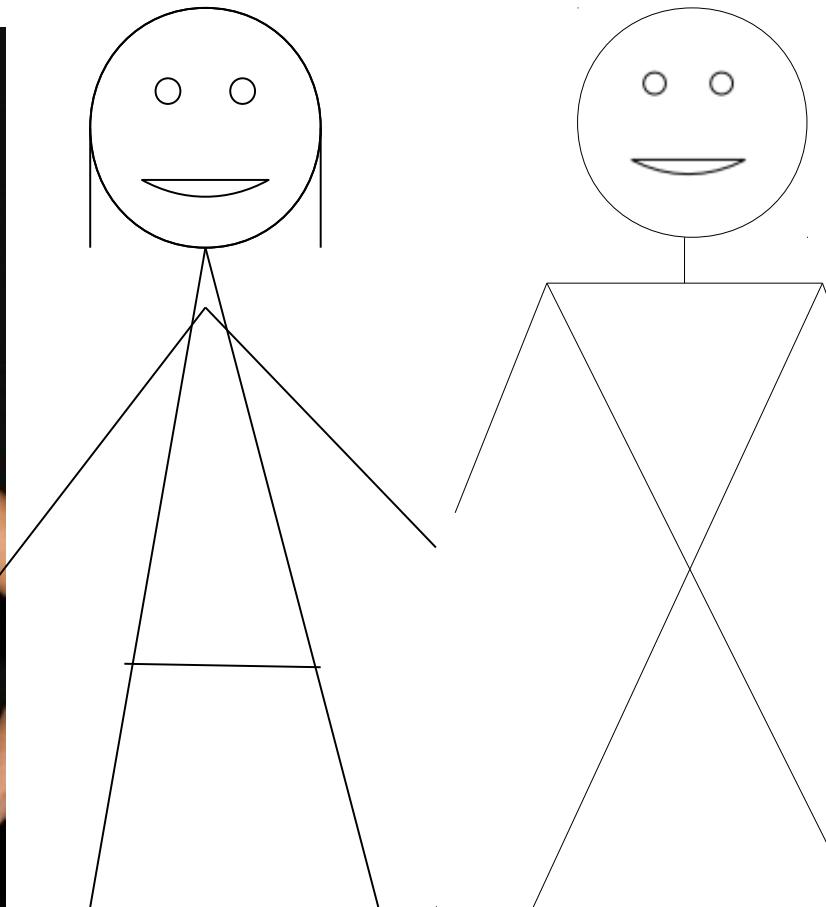
Para mejorar al modelo debemos contrastarlo



Que podrían ser mejorados ...



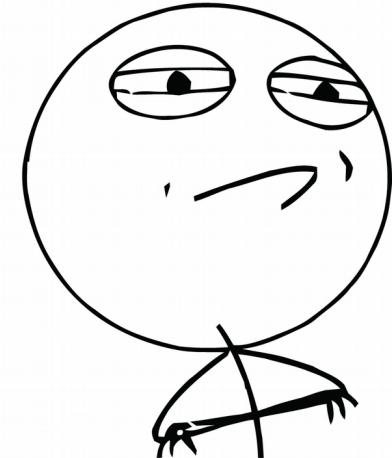
Pero seguro estarán muy lejos de la realidad....
(¡por suerte!)



El Universo extremo

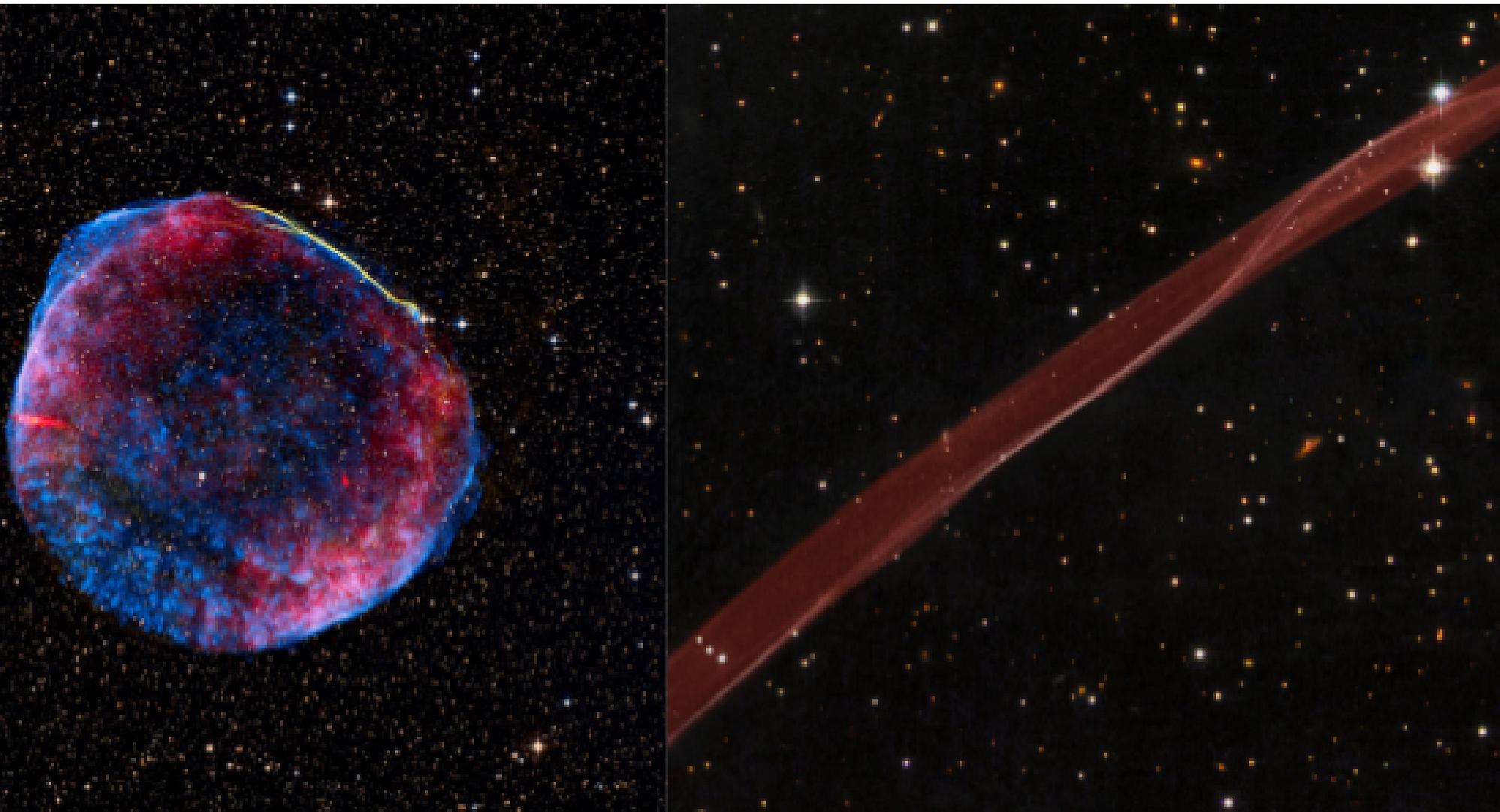
Las Astropartículas son testigos
presenciales de estos eventos del
Universo Extremo

CHALLENGE ACCEPTED

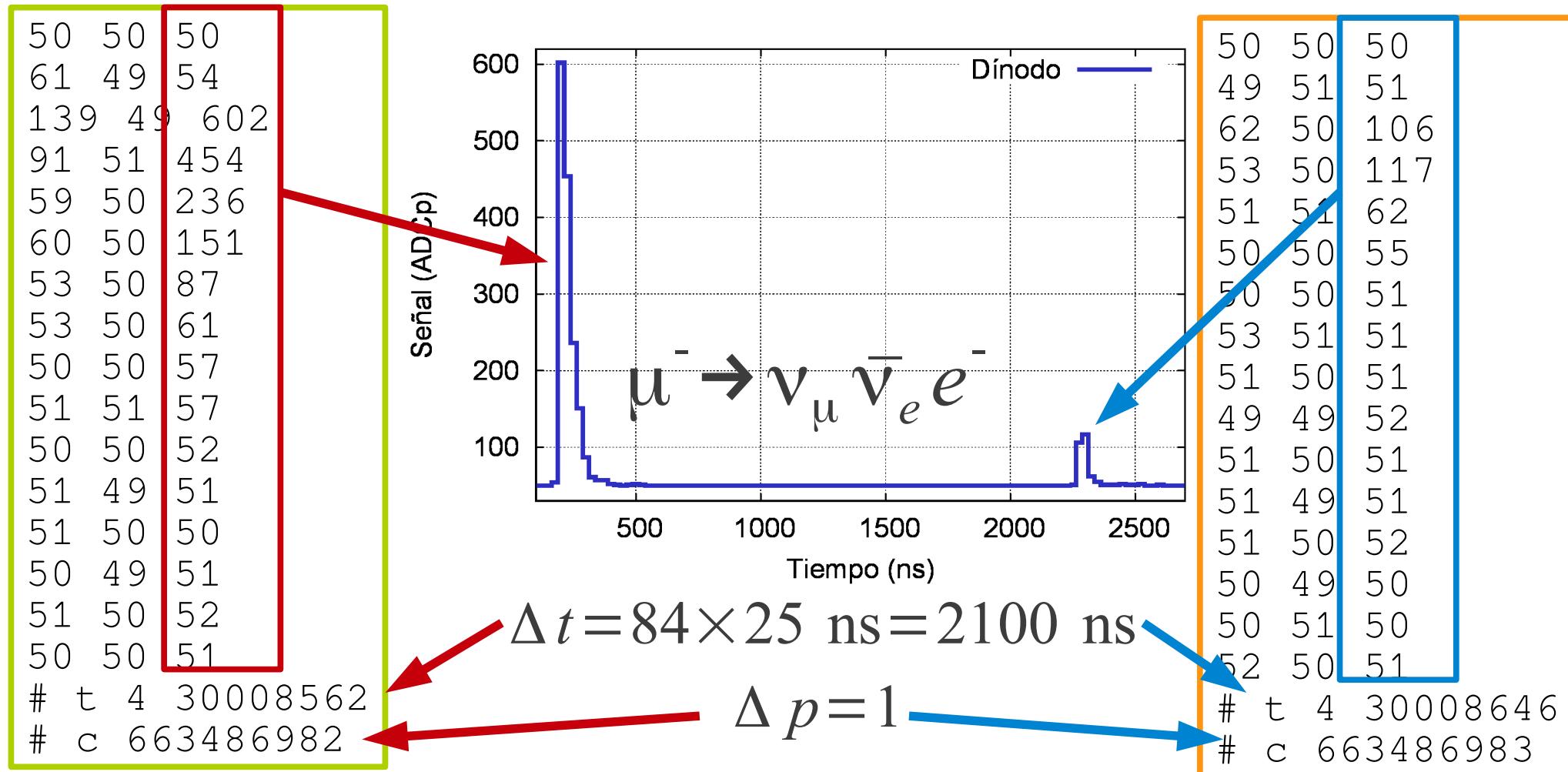


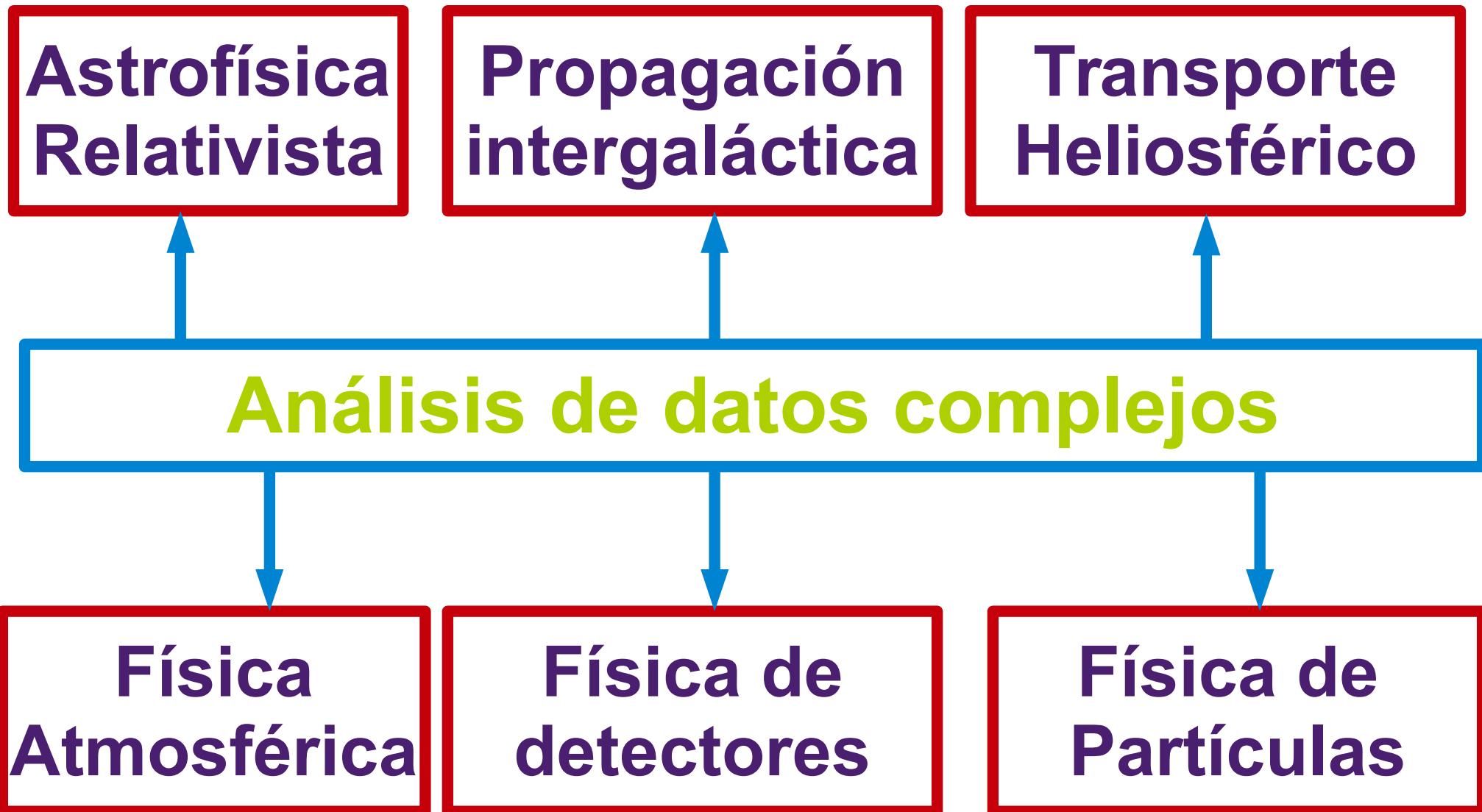
Alcances

- Comienza en un remanente de supernova



- Comienza en un remanente de supernova
- finaliza en el análisis de un archivo de datos





- **El principio de la relatividad**

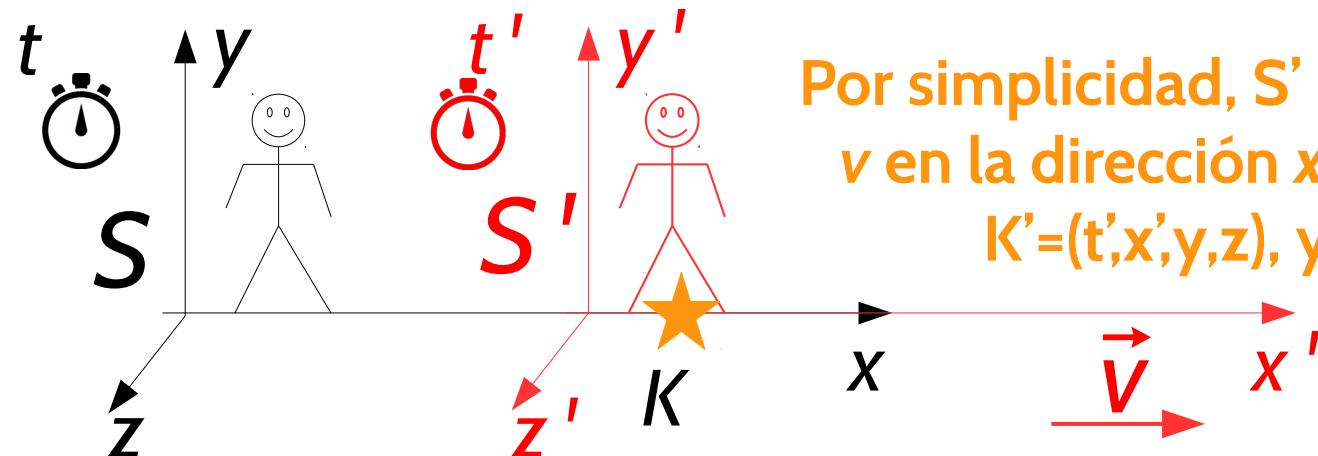
Las leyes que gobiernan los cambios en los estados de los sistemas físicos son iguales para todos los observadores inerciales

- **El principio de la invariancia de la velocidad de la luz**

La luz se propaga en el vacío siempre con la misma velocidad, c , sin importar la velocidad de la fuente emisora de luz

Marco de Referencia

- **Marco de Referencia**
sistema de referencia inercial donde existe la habilidad de medir intervalos temporales mediante un reloj
- Espacio (3D) y tiempo → **espaciotiempo**
- **Evento**
es un punto en el espaciotiempo $K=(t,x,y,z)$

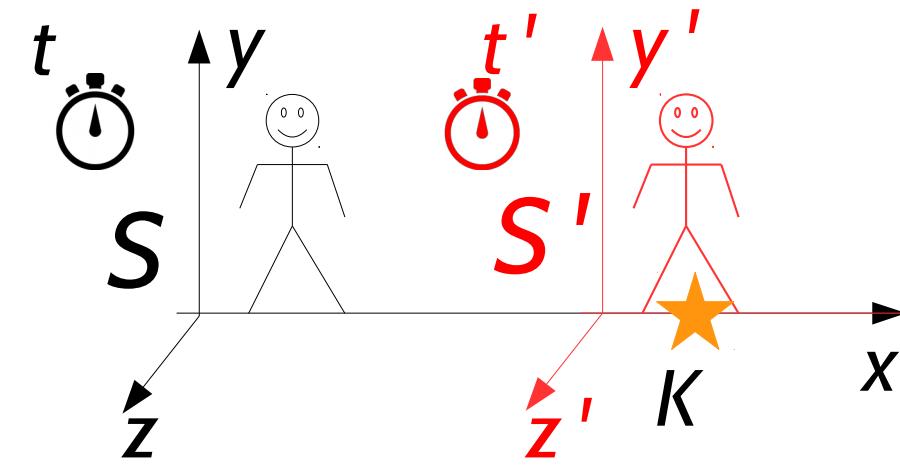


Por simplicidad, S' se mueve con velocidad v en la dirección x , entonces $K=(t,x,y,z)$ y $K'=(t',x',y,z)$, ya que $z'=z$ e $y'=y$

Transformaciones de Lorentz

- Las ecuaciones que transforman dos marcos de referencia, y que verifican ambos postulados, son

Recordar que estas transformaciones son válidas para un sistema S' que se mueve con velocidad v en la dirección x , entonces $K=(t,x,y,z)$ y $K'=(t',x',y,z)$, ya que $z'=z$ e $y'=y$



$$t' = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$$
$$x' = \gamma \left(x - vt \right)$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$

$$\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \beta \equiv \frac{v}{c}$$

Transformaciones de Lorentz (TL ó Λ)

- Grupo de Poincare: Grupo de isometrías del espacio tiempo de Minkowsky
 - Traslación temporal (1)
 - Traslación espacial (3)
 - Rotación espacial (3)
 - Boosts espacial (3)
- Forman grupo frente a la composición de operaciones
 - Hay una isometría “unidad” (no hago nada); existe la inversa (voy y vengo); son asociativas
- Las transformaciones de Lorentz (Λ) son un subgrupo del grupo de Poincare ($C = 0$)
 - Preservan el origen (invariante) → Rotaciones y Boosts

$$x'^\mu = x^\nu \Lambda_\nu^\mu + C^\mu$$

- Transformaciones de Lorentz no rotantes
 - Cambios entre marcos de referencia inertiales
- Quedan definidos por γ de Lorentz.
- Puede demostrarse que un boost en la dirección x puede expresarse

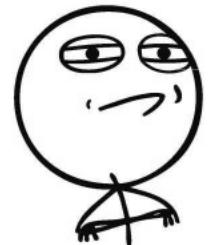
$$\Lambda \equiv \Lambda_{\nu}^{\mu} = \begin{bmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Y luego, $S \rightarrow S'$:
$$\begin{bmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Tareas

- Verificar que lo anterior representa un boost en la dirección x de un sistema S' a un sistema S
- Escribir la transformación Λ para un boost en la dirección z

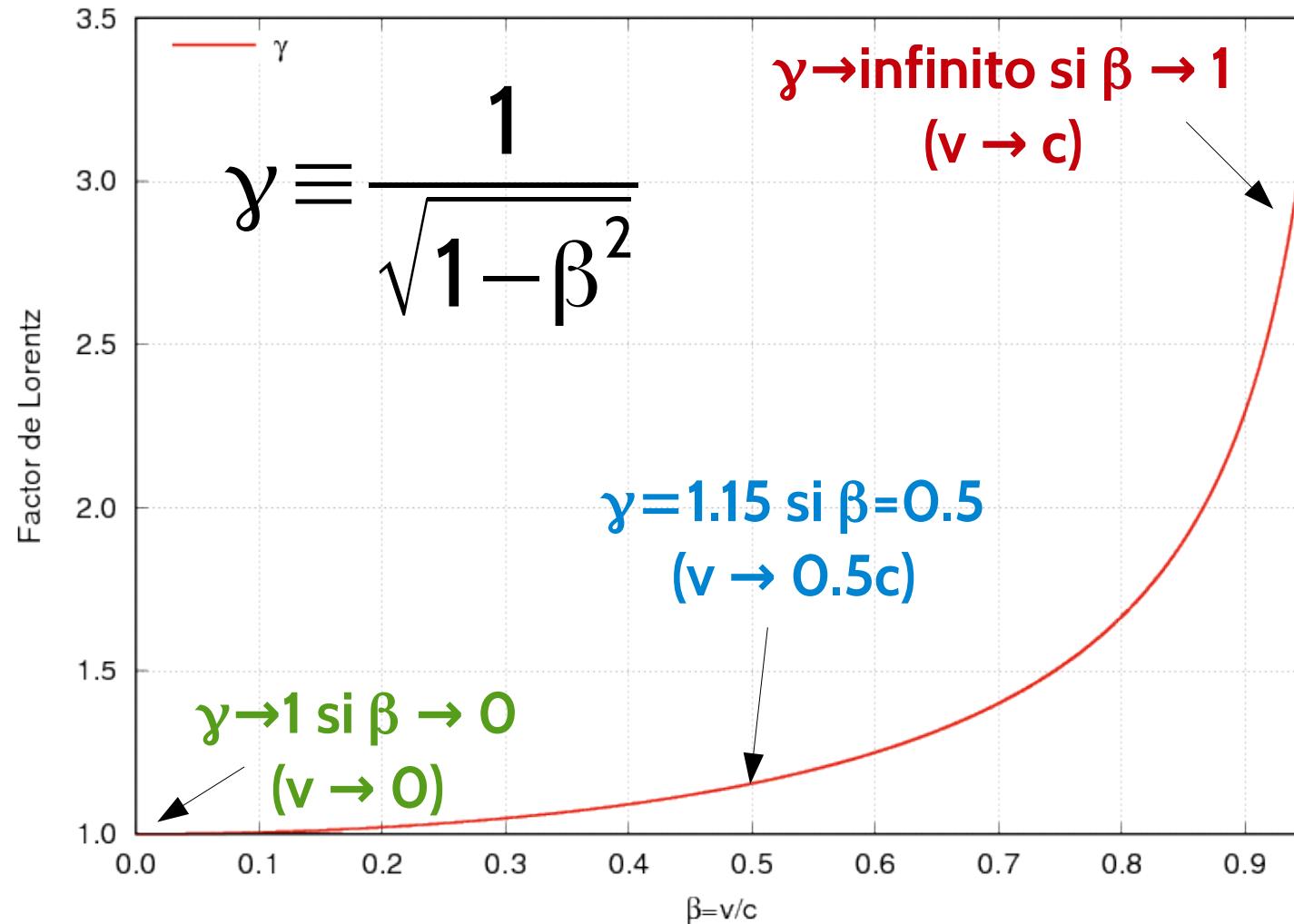
CHALLENGE ACCEPTED

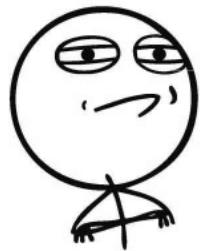


Factor de Lorentz

- Estudiemos la función gamma

CHALLENGE ACCEPTED





Aproximación Newtoniana, $v \rightarrow 0$

- A velocidades bajas respecto a c , $\gamma \rightarrow 1$, las correcciones relativistas son menores, y entonces

$$t' = \gamma \left(t - \frac{1}{c^2} v x \right) \rightarrow t' \simeq t$$

$$x' = \gamma \left(x - v t \right) \rightarrow x' \simeq x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

Si $v \rightarrow 0$, ¡las transformaciones de Lorentz tienden a las transformaciones de Galileo!

Dilatación temporal y Contracción espacial

- El **lapso de tiempo entre dos eventos no es invariante de un observador a otro en distintos marcos de referencia**

$$\Delta t' = \gamma \Delta t \text{ para eventos } \Delta x = 0$$

- La **distancia espacial entre dos eventos no es invariante de un observador a otro en distintos marcos de referencia**

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\gamma} \text{ para eventos } \Delta t' = 0$$



El muón

- Muón: decays into electrons over time produced
of $\tau = 2.2 \mu s$ ($2.2 \times 10^{-6} s$).
 $\bar{\mu} \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$

- Velocidad típica $v = 0.99c \Rightarrow \beta = 0.99$

$$\Rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \rightarrow \boxed{\gamma \approx 7}$$

- Alguno muón decays in $2 \mu s$ (p.ej) \Rightarrow este es en el marco de referencia del muón (t'). $\Rightarrow x' = t' c \beta \approx 594 m \approx x'$

- Esto es una mentira S' : ¿Acabás correspondiente a S ?
yo que $t' = 0 \Rightarrow t = 0$ (por contractioñ temporal)

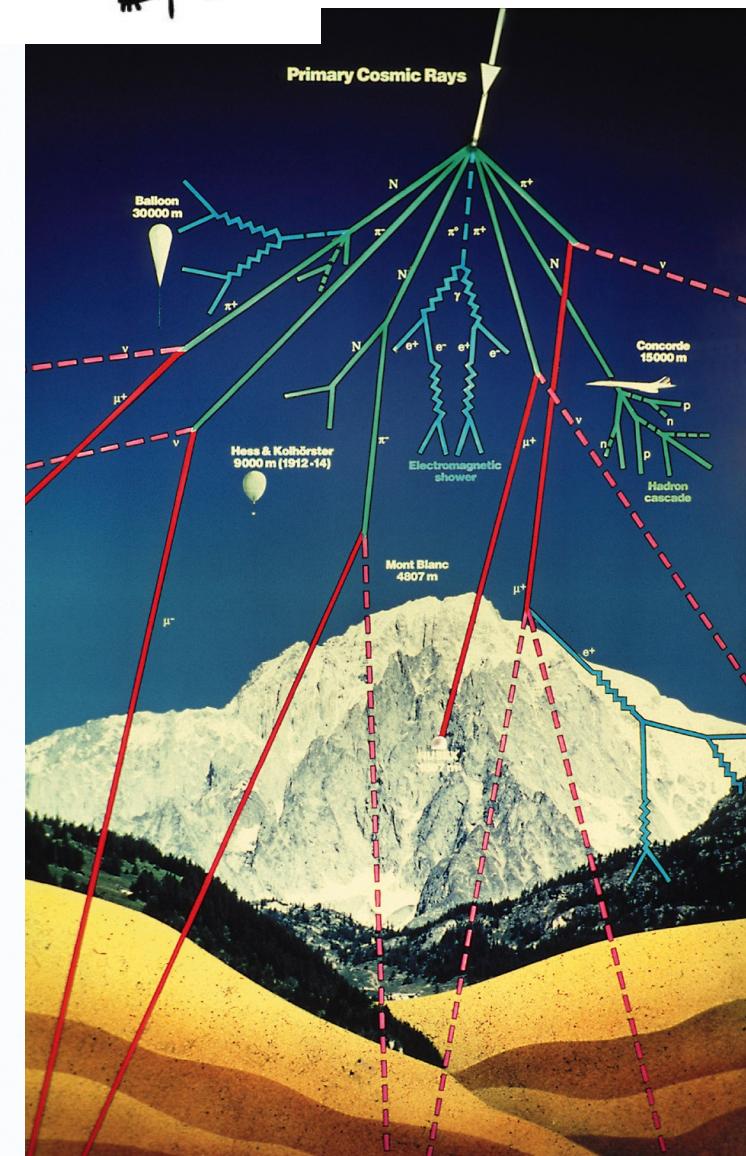
$$x' = x/\gamma \Rightarrow x = x' \cdot \gamma \Rightarrow x = 7 \cdot 594 \mu m \Rightarrow x = 4158 \mu m$$

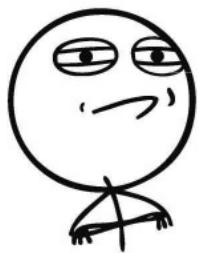
- y el tiempo t ? las cosas serán inconsistentes.

- Antes de decir el muón recorre más de 4 km en nuestro marco de referencia.



Muones producidos en la atmósfera se observan en el terreno





Regla de suma de velocidades

- Sea un objeto en movimiento en el espaciotiempo.
 - El observador en S , mide que el objeto se desplaza a lo largo del eje x con velocidad $u = dx/dt$
 - El observador en S' , verá que el objeto se mueve con velocidad $u' = dx'/dt'$

$$u' = \frac{u - v}{1 - \frac{uv}{c^2}}$$

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

Si $u \ll c \Rightarrow u' \approx u - v$. Si $u = c \Rightarrow u' = c$

Intervalo invariante

- La velocidad de la luz es invariante, entonces:

$$c = \frac{dr}{dt} = \frac{dr'}{dt'} \text{ con } r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \text{ y } r' = \sqrt{x'^2 + y'^2 + z'^2}$$

- Luego, para un fotón: $c \Delta t = \Delta r \rightarrow c^2 (\Delta t)^2 = (\Delta r)^2$

Convención: $\overbrace{c^2(\Delta t)^2 - (\Delta x)^2 - (\Delta y)^2 - (\Delta z)^2}^{\text{intervalo espaciotemporal} \equiv s^2}$

$\overbrace{c^2(\Delta t')^2 - (\Delta x')^2 - (\Delta y')^2 - (\Delta z')^2}^{\text{intervalo espaciotemporal} \equiv s'^2}$

- La invariancia de la velocidad de la luz implica (probar):

$$s^2 = s'^2$$

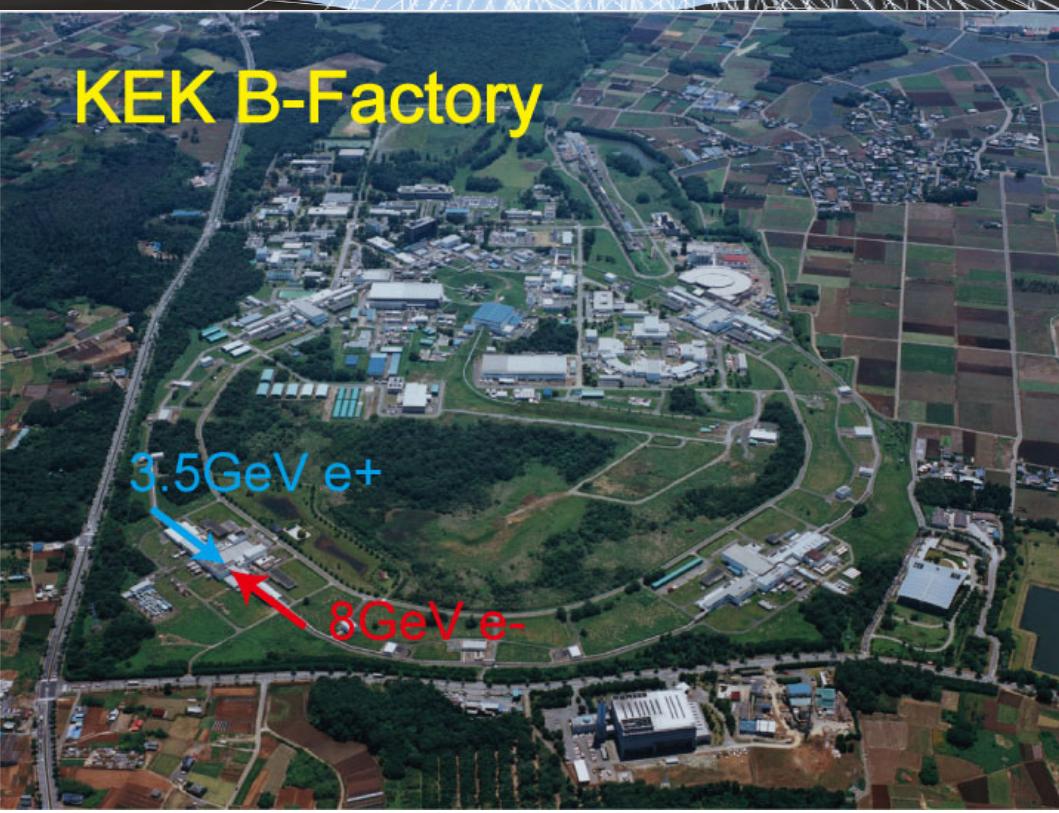
Tiempo propio

- Dado que cada marco de referencia tiene su propio tiempo, **podemos definir un marco de referencia adherido a un objeto en movimiento.**
- **El tiempo de ese marco es el tiempo que “percibe” un observador que se mueve junto con el objeto.**
Llamaremos a este marco “comovil”.
- El tiempo del marco comovil es el tiempo propio: es independiente de las coordenadas.

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 = ds'^2 = c d\tau^2 \quad \text{Tiempo propio}$$

$$\Rightarrow c^2 dt^2 - dr^2 = c^2 d\tau^2 \quad dt = \gamma d\tau$$

KEK B-Factory

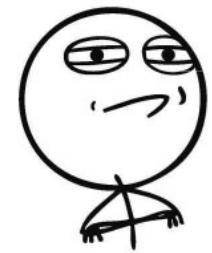


Ejemplo real

- Beam asimétrico
- Colisión e^+/e^-
- $E_+ = 3.5 \text{ GeV}$
- $E_- = 8.0 \text{ GeV}$
- Boost CM:

$$\beta \gamma = \frac{E_- - E_+}{\sqrt{4 E_- E_+}}$$

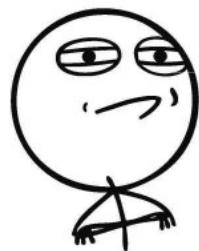
CHALLENGE ACCEPTED



Tareita:

Con los valores dados, calcular la vida media τ de un bosón B en el frame del laboratorio (obtener τ_0 del PDG). Luego, calcular la distancia recorrida en el detector

CHALLENGE ACCEPTED



Otro disclaimer: tensores

- Convención de Einstein en notación covariante
 - Índices latinos, i,j,k... espaciales (1..3),
 - Índices griegos μ,ν,ρ,\dots espaciotemporales (0..3)
- Métrica de Minkowsky (plana)
- Convención de signos usual en partículas, (1,-1,-1,-1).
- La métrica queda

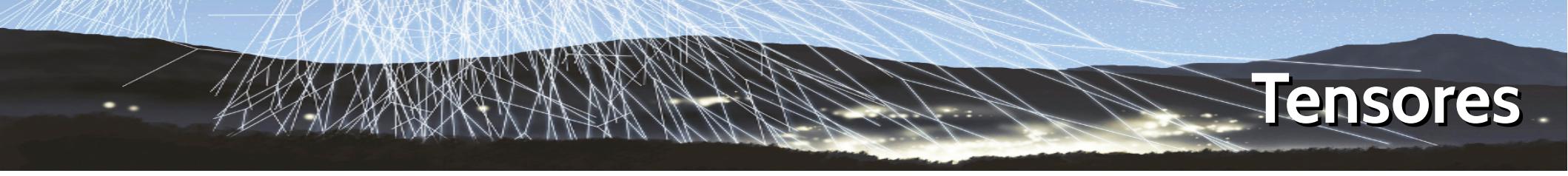
Verificar: $g g^{-1} = \delta_v^\mu$

Verificar: $g_{\mu\nu} \Lambda_\rho^\mu \Lambda_\sigma^\nu = g_{\rho\sigma}$

$$g \equiv g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = g^{\mu\nu} \equiv g^{-1}$$

- Definimos cuadrivector contravariante (**cuadrivector**) a un tensor contravariante de rango 1, que ante una transformación de Lorentz Λ se comporta como:

$$a'^\mu = \Lambda_\nu^\mu a^\nu \quad \text{cuadrivector}$$



Tensores

- Tensores de rango n

- Transforman según n TL

$$F'^{\mu\nu} = \Lambda_{\rho}^{\mu} \Lambda_{\sigma}^{\nu} F^{\rho\sigma}, \quad O'^{\mu\nu\theta} = \Lambda_{\rho}^{\mu} \Lambda_{\sigma}^{\nu} \Lambda_{\tau}^{\theta} O^{\mu\nu\tau}$$

- Hay tensores covariantes

$$F_{\mu\nu} = g_{\mu\rho} g_{\nu\sigma} F^{\rho\sigma}$$

- Y tensores n-covariantes y m-contravariantes

$$F_{\mu}^{\nu} = g_{\mu\rho} F^{\nu\sigma}$$

- Para propiedades generales, ver Cap. 03 Hernández & Núñez

- Los postulados de Einstein implican cambios profundos en la concepción de la Naturaleza.
 - Estos afectan nuestra percepción de distancia y lapso temporal, de espacio y tiempo.
- Las transformaciones de Lorentz indican como transforman las leyes de la física entre dos marcos de referencia iniciales.
 - Son las transformaciones válidas entre marcos de referencia.
- La mecánica Newtoniana es una aproximación válida para velocidades bajas respecto a la velocidad de la luz.
 - ¿Cómo puede ser generalizada?

Diálogo entre dos mundos: dinámica

- Newton: - Un cuerpo sujeto a una fuerza constante F durante un tiempo t tendrá una velocidad $v=(F/m)t$ que aumenta con t
 - Einstein: - Pero Isaac, ¡ $v < c$ siempre!
 - N: ¿Qué? Vos estás equivocado Alberto ¿sino que pasa con mi 2^{da} ley?
- $$\vec{F} = \frac{d \vec{p}}{dt} = \frac{d(m \vec{v})}{dt}$$
- E: ¡Ahh! ¿Pero cuál t estarás usando en tu derivada? ¿En qué marco de referencia?
 - N: ¿Cómo? ¿el tiempo no es absoluto? ¿Acaso t no es el mismo para todos los observadores inerciales?
 - E: Jejejeje... (sonrisa con mirada pícara)

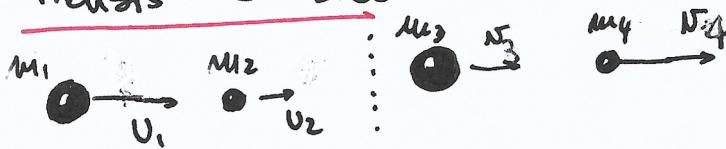


Pasen y vean

Casi si nos

(V es igual, t es igual, para la bocanada de los).

Análisis Clásico



En el marco S, conservación de \vec{p} implica

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_3 v_3 + m_4 v_4 \quad (1)$$

en S'

$$m_1 v'_1 + m_2 v'_2 = m_3 v'_3 + m_4 v'_4 \quad (2)$$

y $v'_3 = v_3 - V$ (2) (vel. relativo entre S y S') \Rightarrow

en S'

$$(m_1 v_1 + m_2 v_2) - (m_1 + m_2) V = m_3 v_3 + m_4 v_4 - ((m_3 + m_4) V) \quad (1)$$

$$\Rightarrow (m_1 + m_2) V = (m_3 + m_4) V \quad y \text{ por todo } V:$$

$$1) \boxed{m_1 + m_2 = m_3 + m_4} \quad \text{Conservación de la masa.}$$

La conservación de la cantidad de movimiento implica la conservación de la masa

Análisis Relativista

Imaginemos que en el marco relativista $\vec{p} = m \vec{v}$ y $\vec{p}' = m' \vec{v}'$ (suponemos que null & Post. I y $m = m'$) \Rightarrow (1) y (2) se mantienen. Considerando (3) por lo relativista:

$$v'_3 = \frac{v_3 - V}{1 - v_3 V/c^2} \quad (3)$$

\Rightarrow reemplazando en (2):

$$m_1 \frac{v_1 - V}{1 - v_1 V/c^2} + m_2 \frac{v_2 - V}{1 - v_2 V/c^2} = m_3 \frac{v_3 - V}{1 - v_3 V/c^2} + m_4 \frac{v_4 - V}{1 - v_4 V/c^2}$$

¿y ahora? V no se cancela, entonces esto equivale (conservación de la cantidad de movimiento) ¡no vale en general! ó tiene que considerar los masas para ajustar.

La definición estándar no se verifica.

Principios de conservación

- En una colisión, el análisis relativista usando la ley de suma de velocidades,

$$u' = \frac{u - v}{1 - uv/c^2}$$

$$u = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2} ,$$

se ve que o bien:

- No se conserva la cantidad de movimiento;
- O bien, la cantidad de movimiento está mal definida en el caso relativista

Clásico: $\vec{p} = m \vec{v}$, Relativística $\vec{p} = ?$

La conservación de p es un principio básico

- Al igual que nos pasó con u , debemos recordar lo que dijo Alberto: al derivar, el tiempo depende del marco de referencia. Antes eso no nos preocupaba:

Clásico: $\vec{p} = \frac{d}{dt}(m\vec{r})$ y $\vec{p}' = \frac{d}{dt}(m\vec{r}')$

Correcto: $\vec{p} = \frac{d}{dt}(m\vec{r})$ y $\vec{p}' = \frac{d}{dt'}(m\vec{r}')$

- Y como todos los marcos son equivalentes, ¡podemos usar el marco comovil!

Cant. de movimiento relativista

$$\vec{p} = m \frac{d\vec{r}}{d\tau}$$

Magia algebráica (como ejercicio)

Definición de \vec{p} : $\boxed{\vec{p} = m \frac{d\vec{r}}{d\tau}}$

Pero ¿qué es $(d\vec{r}/d\tau)$? Recordando:

$$dt = \gamma d\tau \Rightarrow dt/d\tau = \gamma \Rightarrow$$

$$\boxed{\vec{p} = m \frac{d\vec{r}}{d\tau} \cdot \frac{dt}{dt} = m \frac{d\vec{r}}{dt} \frac{dt}{d\tau} = m \vec{v} \gamma}$$

$$\text{Dnde } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad \text{y } \beta = |\vec{v}|/c$$

$$\Rightarrow \boxed{\vec{p} = m \vec{v} \gamma}$$

Definir $\gamma_i = (1-\beta_i^2)^{-1/2}$ y $\beta_i = v_i/c \Rightarrow$

$$\text{En S: } m_1 v_1 \gamma_1 + m_2 v_2 \gamma_2 = m_3 v_3 \gamma_3 + m_4 v_4 \gamma_4$$

En S':

$$m_1 v'_1 \gamma'_1 + m_2 v'_2 \gamma'_2 = m_3 v'_3 \gamma'_3 + m_4 v'_4 \gamma'_4$$

Magia Algebrática (Problema análogo):

$$\boxed{m_1 \gamma_1 + m_2 \gamma_2 = m_3 \gamma_3 + m_4 \gamma_4}$$

Es una cantidad análoga dentro de la C��ebral del punto.

- Con la nueva definición de p ,

$$\vec{p} = m \gamma \vec{v}$$

- aparece una nueva magnitud conservada

$$m \gamma = \frac{m}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{m}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

- m es la masa del objeto
- Notar que si $v > 0$, entonces $m\gamma > m$

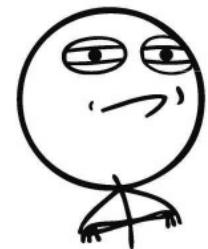
Choque inelástico: $\text{if } m_3 > m_1 + m_2 \text{ !! energía a masa}$

Colisión inelástica

$$\begin{array}{c} u_1 = 0.6c \quad u_2 = 0.8c \\ \bullet \quad \quad \quad \quad \quad \bullet \\ m_1 = 10 \text{ kg} \quad m_2 = 5.625 \text{ kg} \end{array}$$

$$\begin{array}{c} v_3 = ? \\ \bullet \\ m_3 = ? \end{array}$$

CHALLENGE ACCEPTED



$$\text{Claramente tenemos: } m_3 = 15.625 \text{ kg y } v_3 = 0.0170 \cdot$$

Relativamente:

$$\gamma_1 = (1 - \beta_1^2)^{-1/2} = 1.25 \quad y \quad \gamma_2 = (1 - \beta_2^2)^{-1/2} = 5/3$$

$$\Rightarrow p_T^i = \sum p_i^i = \sum m_i \gamma_i u_i = 10 \text{ kg} \cdot 1.25 \cdot 0.6c + 5.625 \text{ kg} \cdot \frac{5}{3} (-0.8c)$$

$$\Rightarrow p_T^f = 7.5 \text{ kgc} - 7.5 \text{ kgc} \Rightarrow p_T^f = 0 \quad \Rightarrow v_3 = 0 \cdot \gamma_3$$

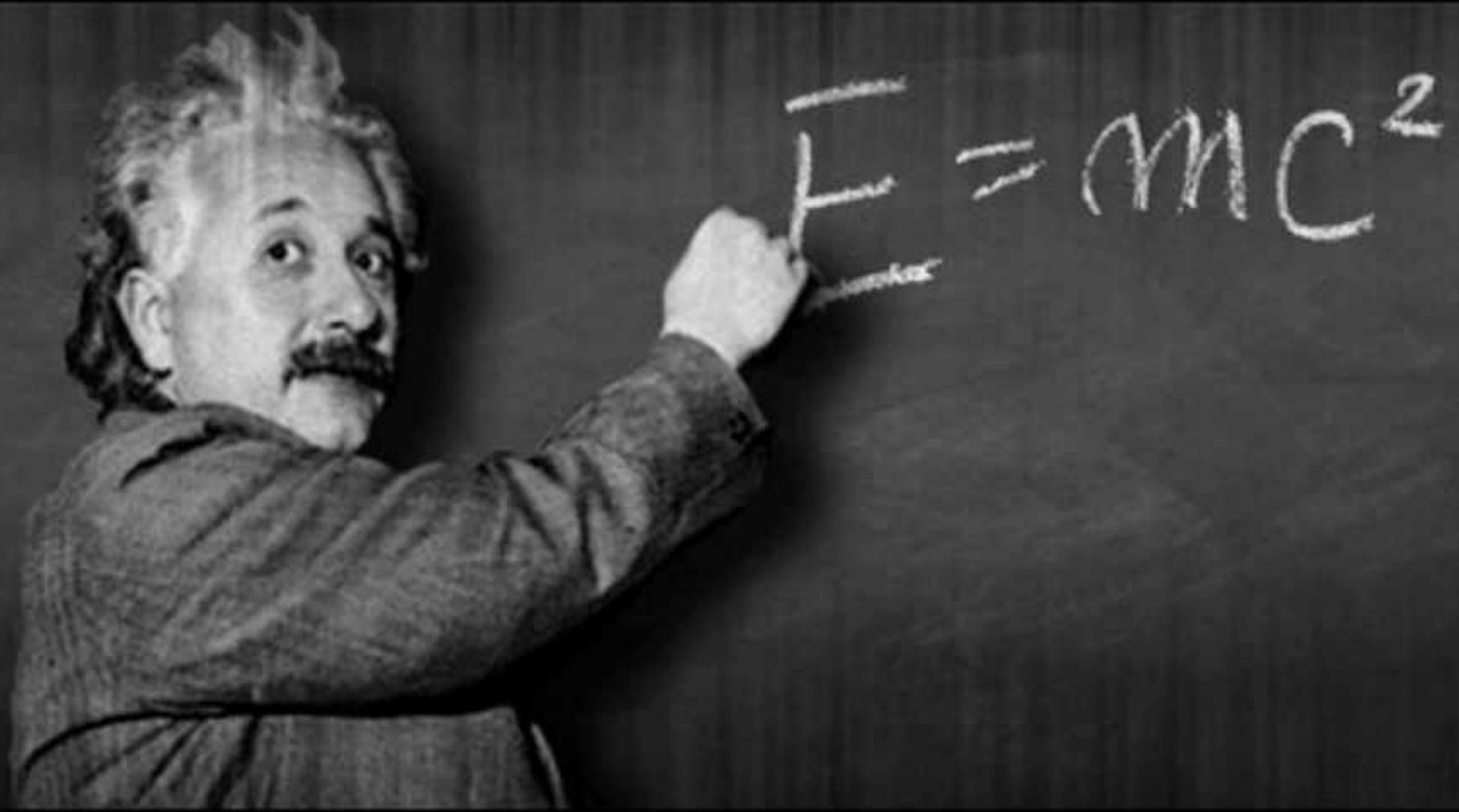
$$\Rightarrow p_f = 0 \quad y \quad \gamma_3 = 1$$

Ansiedad Engen.

$$E_i = \sum m_i \gamma_i c^2 \Rightarrow E_i = E_f \Rightarrow 10 \text{ kg} \cdot 1.25 + 5.625 \cdot \frac{5}{3} = m_3 \gamma_3$$

$$\Rightarrow m_3 = 21.875 \text{ kg} \quad \Rightarrow m_3 > m_1 + m_2 !!!$$

Gracias Isaac, seguí participando....

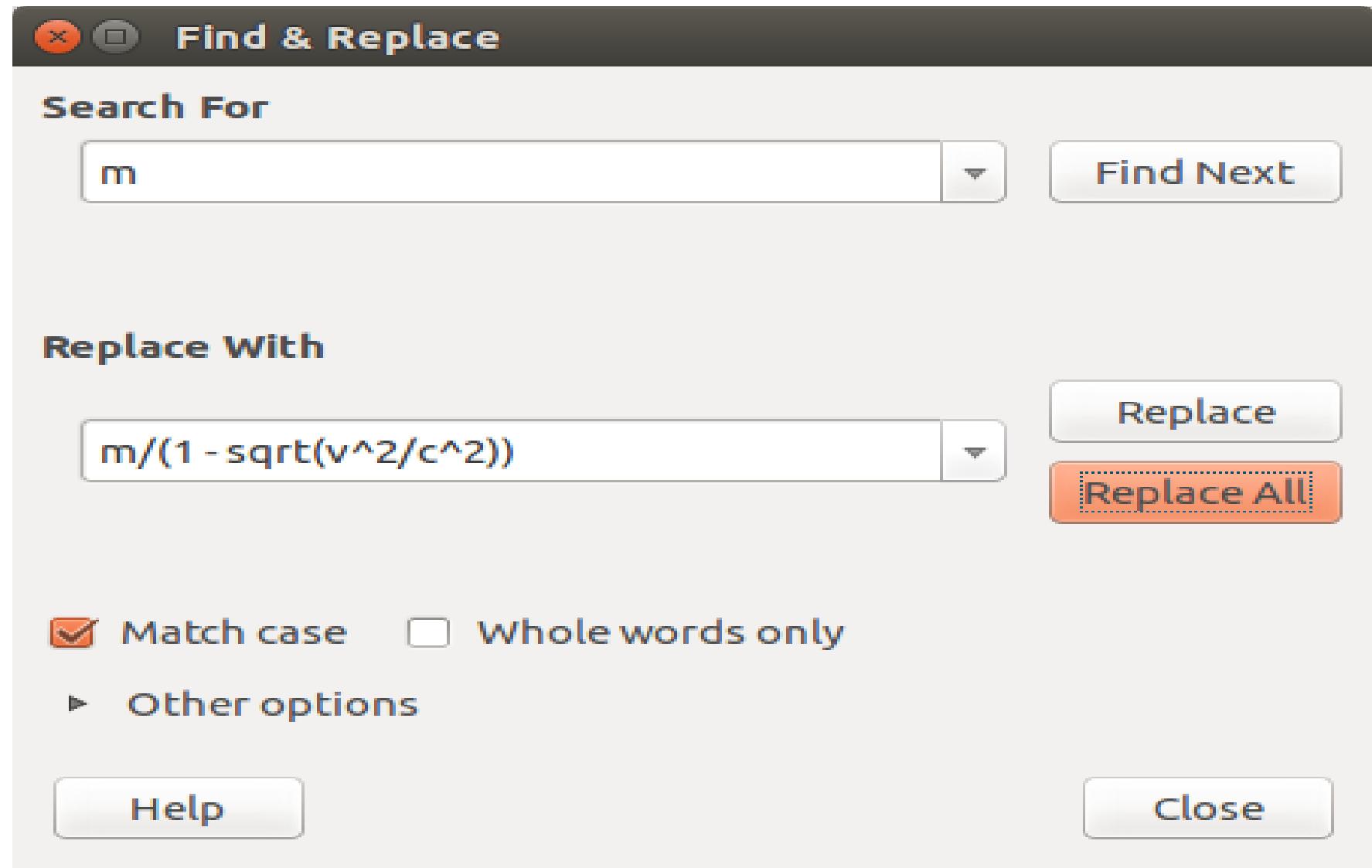


Según Richard Feynmann....

- “*For those who want to learn just enough about it so they can solve problems, that is all there is to the [special] theory of relativity – it just changes Newton’s laws by introducing a correction factor to the mass*”

- Luego:
$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$
- donde
$$m \rightarrow \gamma m = \frac{m}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Al final era tan simple....



Una nueva magnitud conservada

- Hemos visto que al aplicar los principios relativistas y pedir conservación de la cantidad de movimiento relativista, una nueva magnitud conservada aparece:

Energía total

$$E = \gamma m c^2$$

- Y la energía cinética es:

$$E_K \equiv E - m c^2 = (\gamma - 1) m c^2$$

Energía cinética
(en ausencia de otras interacciones)

- $E = \frac{1}{2} m v^2$ es una aproximación válida si $v \ll c$:

Desarrollo en serie

- La Energía total es

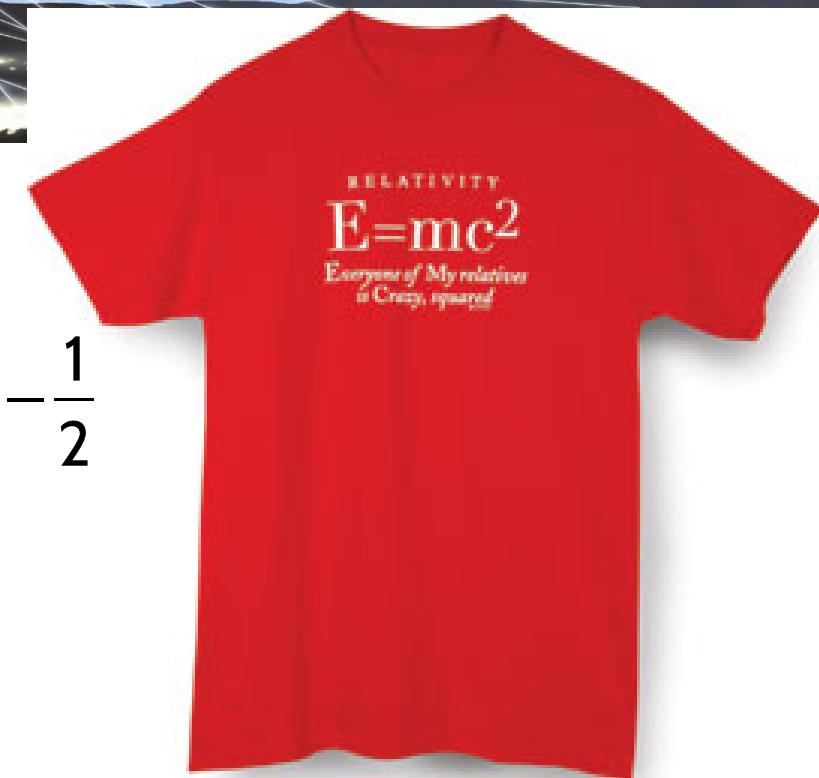
$$E = \gamma mc^2 \Rightarrow E = mc^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{-\frac{1}{2}}$$

- Luego, la famosa fórmula, si $v=0$,

$$E = mc^2$$

- Desarrollemos para $v \rightarrow 0$:

$$E = mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right) \rightarrow E \simeq mc^2 + \frac{1}{2} mv^2$$



CHALLENGE ACCEPTED



Otro *disclaimer*: cos y contras

- Cada vector contravariante (vector) tiene asociado un vector covariante (forma), gracias a la métrica (contra → co)
("el tensor métrico sube y baja índices") $a_\mu = g_{\mu\nu} a^\nu = (t, -r)$
- La transformación inversa co→contra $a^\mu = g^{\mu\nu} a_\nu = (t, r)$
- ¿Cómo transforma ante Λ un vector covariante?

$$a'_\mu = g_{\mu\nu} a'^\nu = g_{\mu\nu} \Lambda_\rho^\nu a^\rho$$

$$a'_\mu = g_{\mu\nu} \Lambda_\rho^\nu g^{\rho\sigma} a_\sigma$$

$$a'_\mu = (\Lambda^{-1})_\mu^\sigma a_\sigma$$

- Ya que:

$$g_{\mu\nu} \Lambda_\rho^\nu \Lambda_\theta^\mu = g_{\rho\theta}$$

$$g_{\mu\nu} \Lambda_\rho^\nu \Lambda_\theta^\mu g^{\rho\sigma} = g_{\rho\theta} g^{\rho\sigma}$$

$$(g_{\mu\nu} \Lambda_\rho^\nu g^{\rho\sigma}) \Lambda_\theta^\mu = \delta_\theta^\sigma$$

$$\Xi_\mu^\sigma \Lambda_\theta^\mu = \delta_\theta^\sigma \rightarrow \Xi_\mu^\sigma = (\Lambda^{-1})_\mu^\sigma$$

Notar: Si
 Λ representa un boost β ,
 Λ^{-1} representa un boost $-\beta$

CHALLENGE ACCEPTED



(covariantes · contravariantes) → invariantes

- Propuesta 1: La composición de dos TL es una TL:

$$a'^\mu = \Lambda^\mu_\nu a^\nu, \quad a'^\rho = \Lambda^\rho_\mu a^\mu$$

$$a'^\rho = \Lambda^\rho_\mu \Lambda^\mu_\nu a^\nu$$

$$a'^\rho = (\Lambda' \Lambda)_\nu^\rho a^\nu$$

$$a'^\rho = \Lambda'^\rho_\nu a^\nu$$

- Propuesta 2: El producto escalar $a \cdot b \equiv a_\mu b^\mu$ es invariante ante transformaciones de Lorentz

$$a' \cdot b' = a'_\mu b'^\mu$$

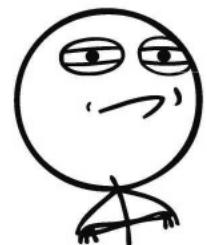
$$a' \cdot b' = (\Lambda^{-1})^\sigma_\mu a_\sigma (\Lambda)_\rho^\mu b^\rho$$

$$a' \cdot b' = (\Lambda^{-1})^\sigma_\mu (\Lambda)_\rho^\mu a_\sigma b^\rho$$

$$a' \cdot b' = \delta_\rho^\sigma a_\sigma b^\rho$$

$$a' \cdot b' = a_\rho b^\rho = a \cdot b$$

CHALLENGE ACCEPTED



Tres invariantes famosos

- Intervalo invariante

$$ds^2 \equiv dx^\mu dx_\mu = d(ct)^2 - (dx)^2 - (dy)^2 - (dz)^2$$

- Derivadas parciales

$$\frac{\partial}{\partial^\mu} \equiv \partial_\mu = \left(\frac{\partial}{\partial t}, \nabla \right) \text{ y } \frac{\partial}{\partial_\mu} \equiv \partial^\mu = g^{\mu\nu} \partial_\nu = \left(\frac{\partial}{\partial t}, -\nabla \right)$$

luego $\partial_\mu \partial^\mu = \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right)$ Operador de D'Alambert

- Cuadrivector Energía-momento: con $E = \gamma m c^2$ y $\vec{p} = \gamma m \vec{v}$:

$$p^\mu = (E/c, \vec{p}) \text{ y } p_\mu = g_{\mu\nu} p^\nu = (E/c, -\vec{p})$$

luego

$$c^2 p^\mu p_\mu = E^2 - (\vec{p} \cdot \vec{c})^2 = m^2 c^4$$

¿y si la partícula no tiene masa?

- ¡No importa, tiene energía y tiene cantidad de movimiento

$$m=0 \rightarrow E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2 \Rightarrow E^2 - (pc)^2 = 0$$

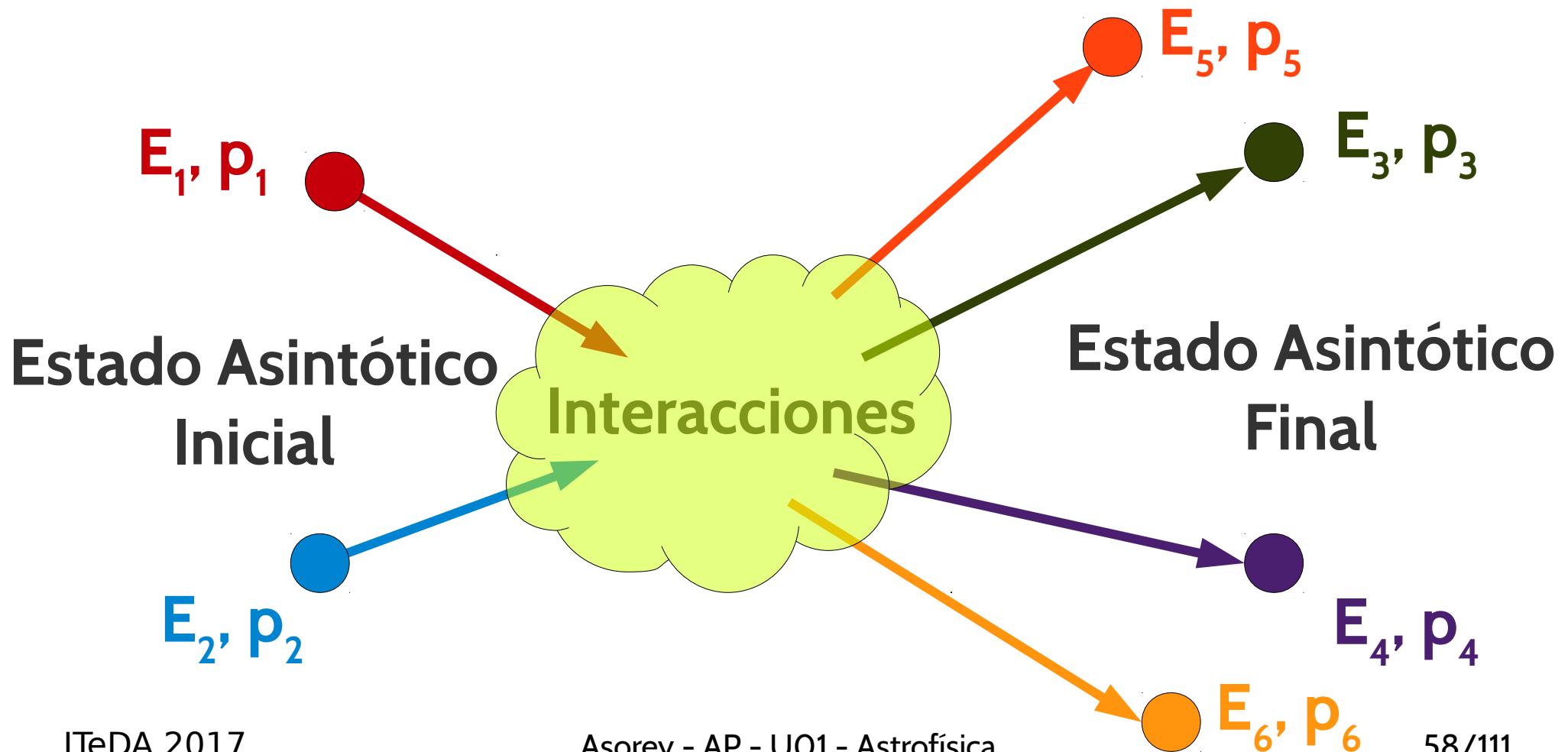
**Cantidad de
movimiento de
partículas sin masa**

$$E = pc$$

- Por ejemplo, un fotón violeta $\lambda = 420 \text{ nm}$
 $\rightarrow E = hc/\lambda = 4.73 \times 10^{-19} \text{ J} \rightarrow p = 1.58 \times 10^{-27} \text{ kg m/s}$
mejor:
 $\rightarrow E = hc/\lambda = 2.95 \text{ eV} \rightarrow p = 2.95 \text{ eV/c}$

¿Cómo funciona la conservación?

- Y todo por pedir que c tiene que tener el mismo valor para todos los observadores inerciales.





Así funciona este circo

- La Energía total se conserva

$$\left. \begin{aligned} E^{\text{inicial}} &= \sum_j^{n^{\text{inicial}}} E_j^{\text{inicial}} & E_j^{\text{inicial}} &= \sum_j m_j \gamma_j c^2 \\ E^{\text{final}} &= \sum_k^{n^{\text{final}}} E_k^{\text{final}} & E_k^{\text{final}} &= \sum_k m_k \gamma_k c^2 \end{aligned} \right\} E^{\text{inicial}} = E^{\text{final}}$$

- La cantidad de movimiento total se conserva

$$\left. \begin{aligned} \vec{p}^{\text{inicial}} &= \sum_j^{n^{\text{inicial}}} \vec{p}_j^{\text{inicial}} & \vec{p}_j^{\text{inicial}} &= \sum_j m_j \gamma_j \vec{v}_j \\ \vec{p}^{\text{final}} &= \sum_k^{n^{\text{final}}} \vec{p}_k^{\text{final}} & \vec{p}_k^{\text{final}} &= \sum_k m_k \gamma_k \vec{v}_k \end{aligned} \right\} \vec{p}^{\text{inicial}} = \vec{p}^{\text{final}}$$

Resumen hasta aquí

- Cantidad de movimiento relativista (correcto siempre):

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$

- Energía relativista (correcta siempre):

$$E = \gamma m c^2$$

- Un nuevo invariante relativista

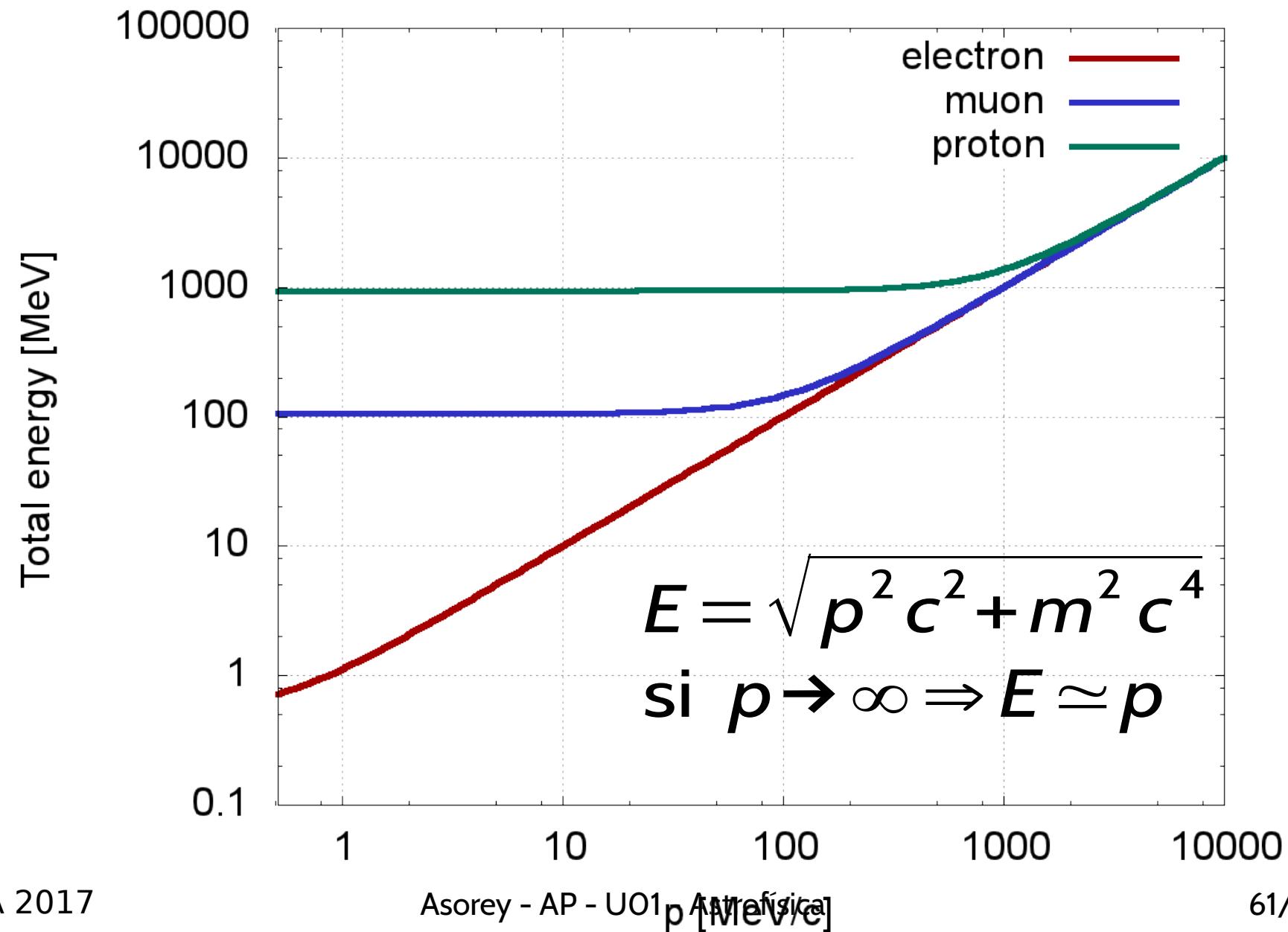
$$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2$$

Invariante
relativista

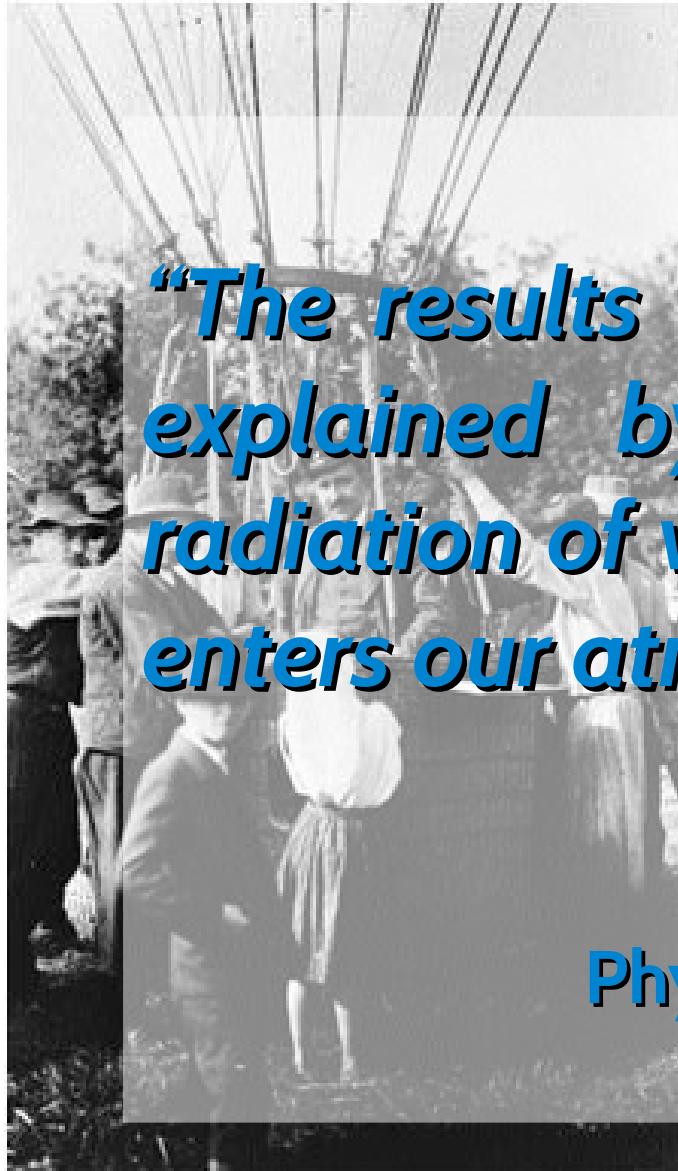
- Una sutileza, es una expresión cuadrática

$$E = \pm \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

Una imagen, mil palabras

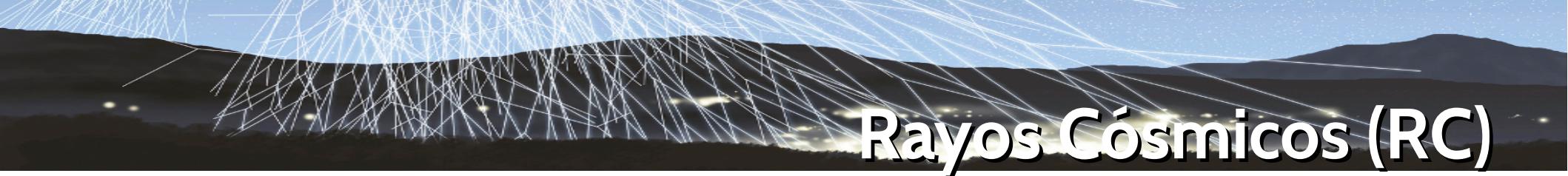


Rayos Cósmicos



The results of my observation are best explained by the assumption that a radiation of very great penetrating power enters our atmosphere from above

Victor Hess
Physikalische Zeitschrift, 13, 1084 (1912)



Rayos Cósmicos (RC)

- Se define:

*Astropartículas
~~Rayos cósmicos~~ ó Primarios*

a las partículas, ~~con excepción de los fotones~~ y siendo en su mayoría núcleos atómicos, que se originan fuera del Sistema Solar y llegan a la Tierra o su entorno cercano.

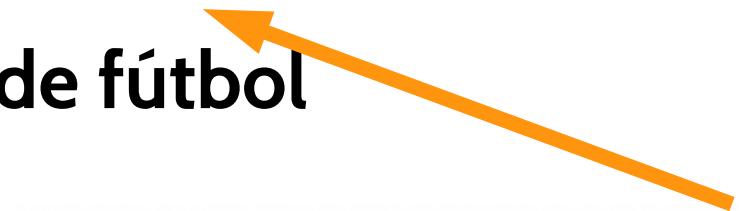
Abreviamos RC (ó RCG para los galácticos)

- Notaremos su energía como E_p .
- Rayos Cósmicos de Ultra-Alta Energía (UHECR),

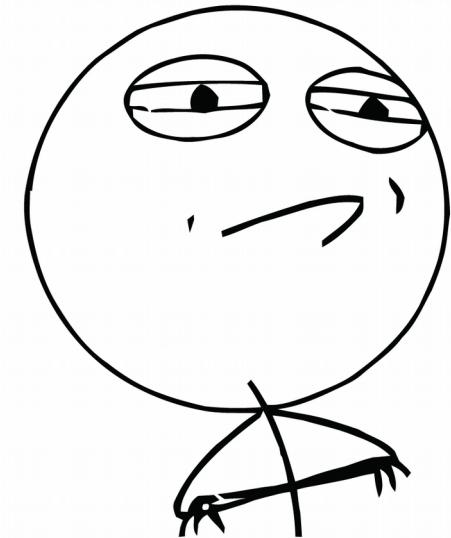
$$E_p \geq 10^{18} \text{ eV} \equiv 1 \text{ EeV}$$

Órdenes de Magnitud

- 1 Protón 100 EeV $\sim 16 \text{ J} \rightarrow E_p = \gamma m_0 c^2 \rightarrow \gamma \sim 10^{11}$
- \rightarrow Un saque de tenis ó un penal de fútbol



CHALLENGE ACCEPTED



Calcule el número total de rayos cósmicos que llegan en todas las direcciones, por año y por km^2 , en el rango

$$10^{16} < E/\text{eV} < 10^{17}$$



Espectro

- Espectro de energía:

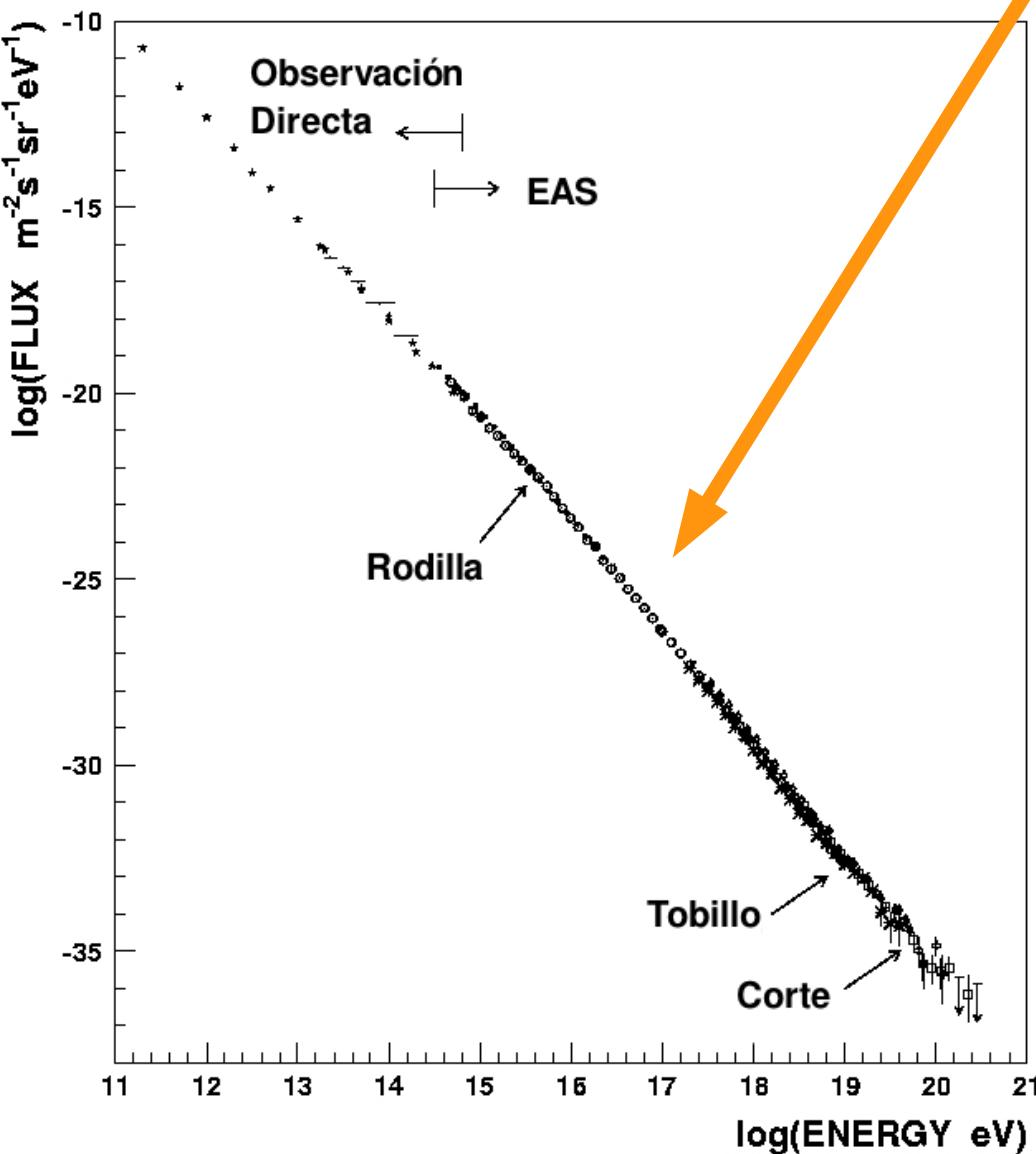
$$j(E) = \frac{dN}{dt \ dA \ d\Omega \ dE}$$

- Unidades

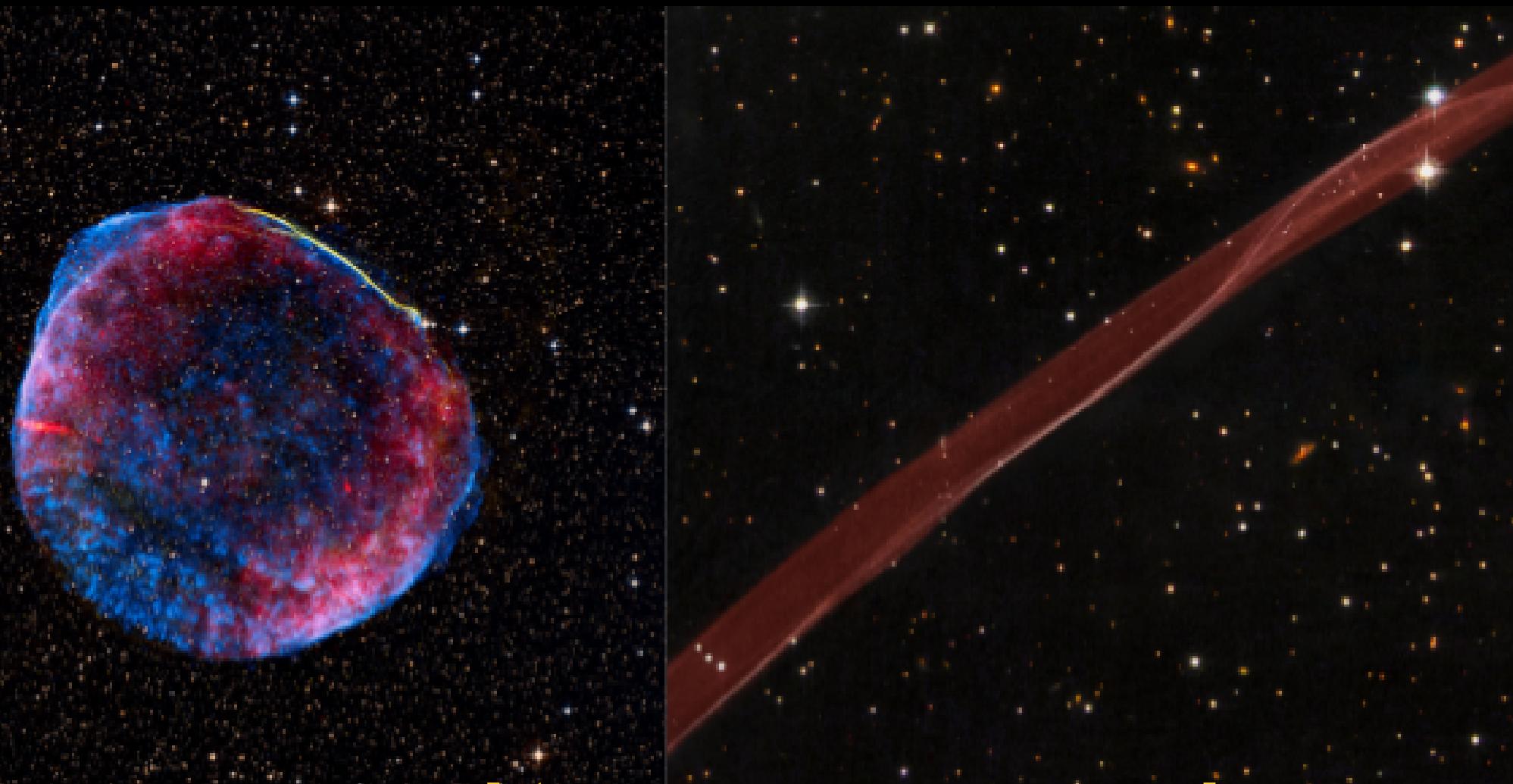
$$[j(E)] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{ s sr eV}}$$

- En general:

$$j(E) = j_0 E^\alpha, \alpha \approx -3$$



Aceleración



**campos eléctricos para acelerar
campos magnéticos para confinar**

Campos electromagnéticos

- Sea una carga q. ¿Cómo hacer para incrementar su energía?

$$E = \gamma m \quad \gamma = (1 - \beta^2)^{-\frac{1}{2}} \quad \vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c}$$

- **Campos magnéticos para confinar y campos eléctricos para acelerar.**

$$f_{\mu} \equiv \frac{dp^{\mu}}{d\tau} = q F^{\mu\nu} u_{\nu}$$

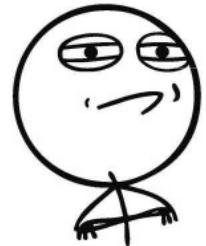
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

$$p^{\mu} = (\gamma mc, p_x, p_y, p_z)$$

$$u_{\mu} = (c, -v_x, -v_y, -v_z)$$

$F^{\mu\nu}$ es el tensor de Maxwell

$$F'^{\rho\sigma} = \Lambda_{\mu}^{\rho} \Lambda_{\nu}^{\sigma} F^{\mu\nu}$$



Radio de giro

- La componente magnética de la fuerza de Lorentz es perpendicular a la dirección de movimiento:

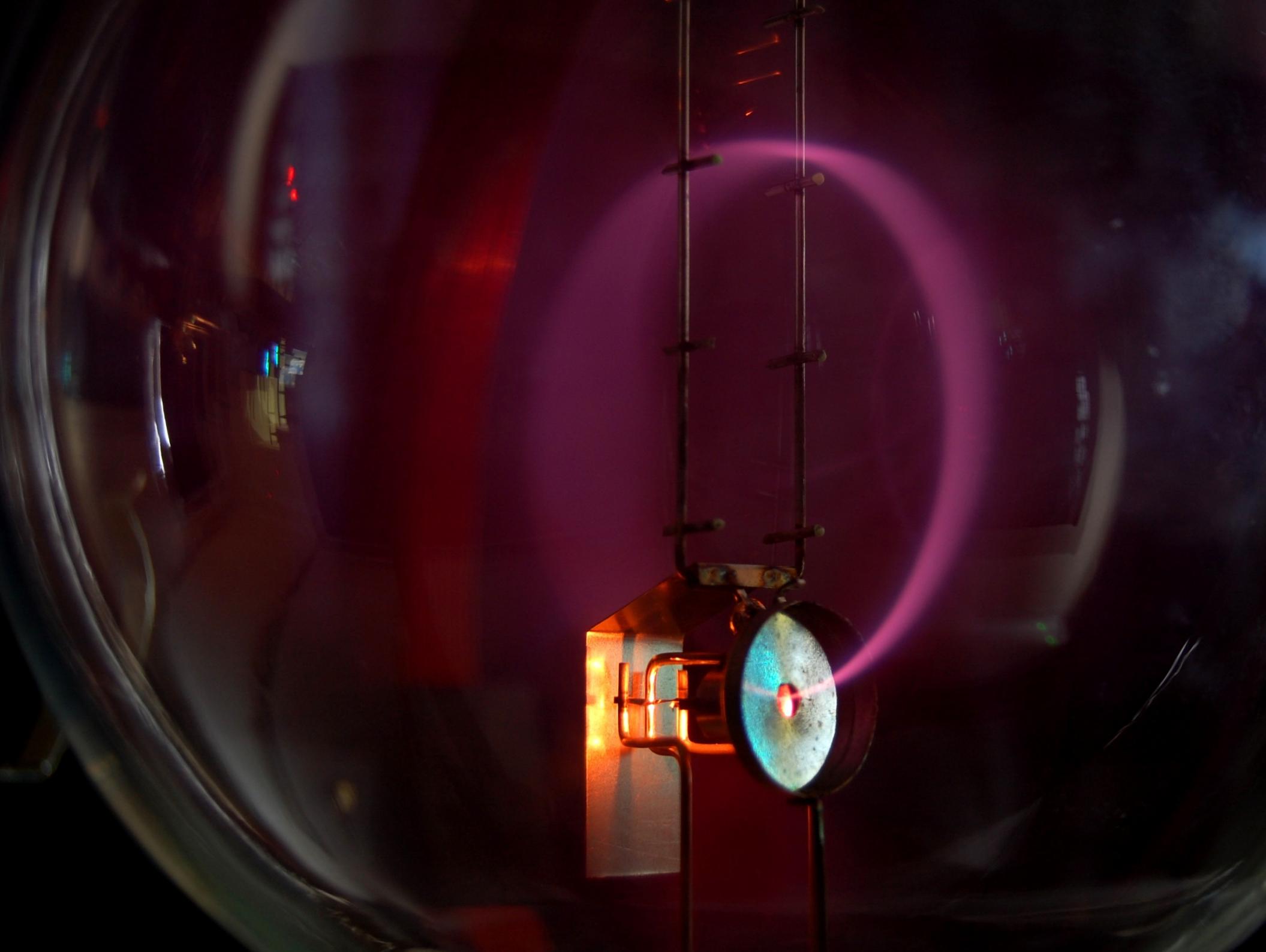
$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

- Movimiento circular, aceleración centrípeta (¡usar γm para el caso relativista! Gracias Feynmann)

$$r_g = \left(\frac{\gamma m}{|q|} \right) \left(\frac{v_{\perp}}{B} \right)$$

- El período es entonces:

$$t_g = \frac{2\pi\gamma m}{|q|B}$$



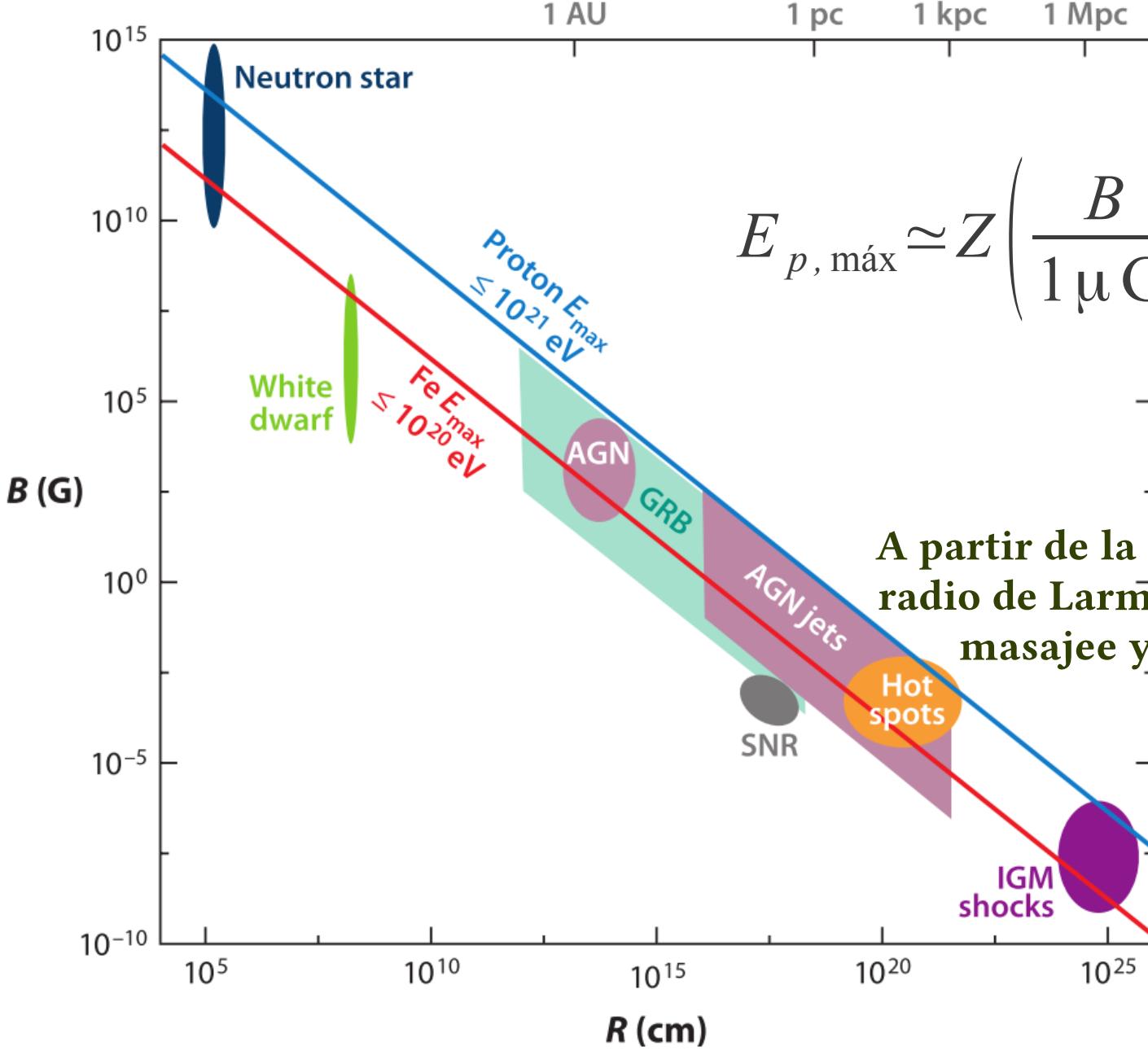
$$\frac{E_p}{\text{EeV}} \sim 300$$

B

R

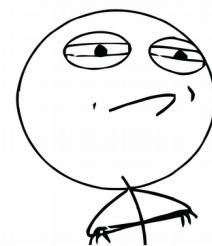
$)^3$

Hillas Plot

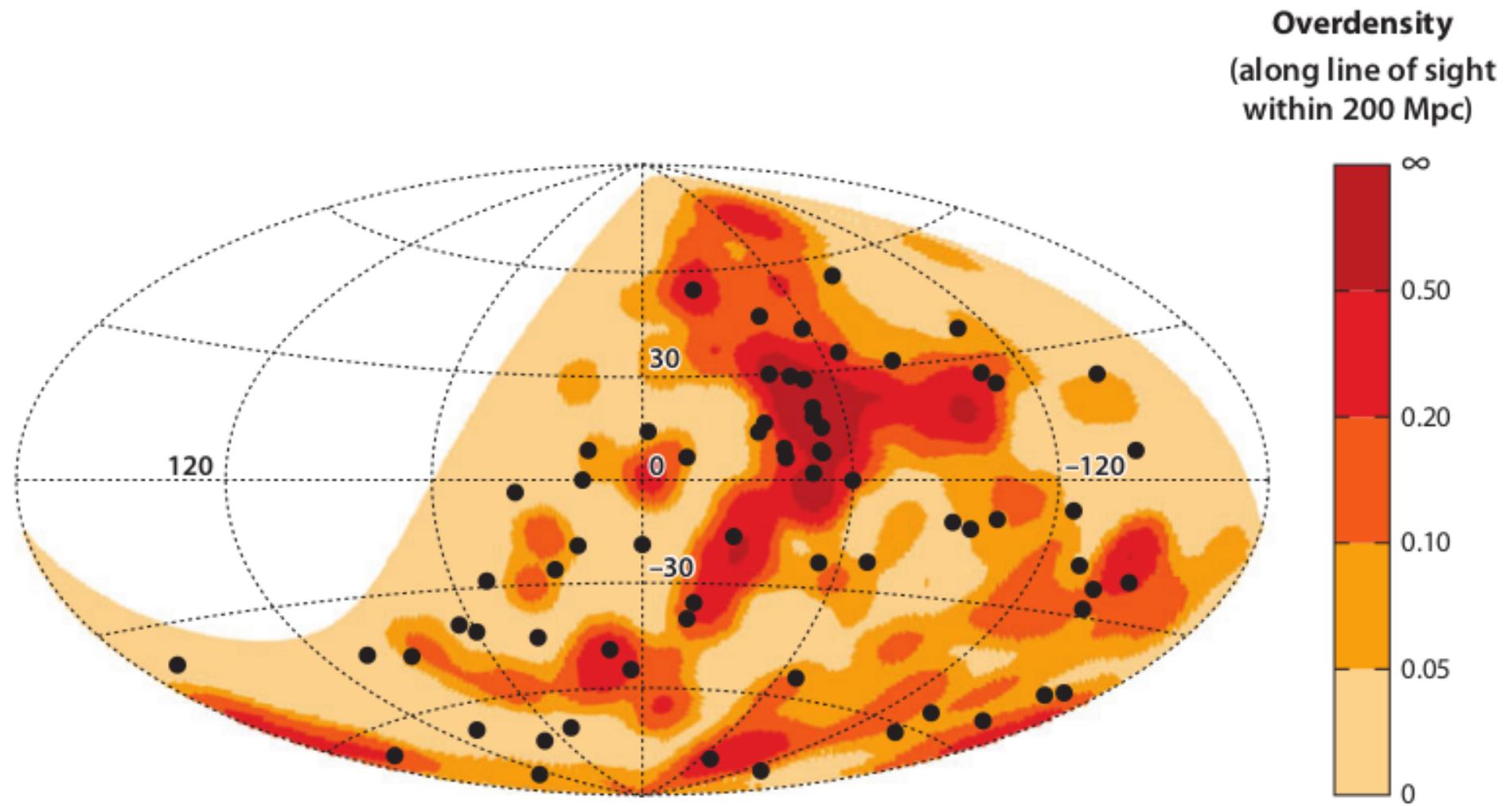


$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E} \approx \beta_{\text{shock}}$$

CHALLENGE ACCEPTED



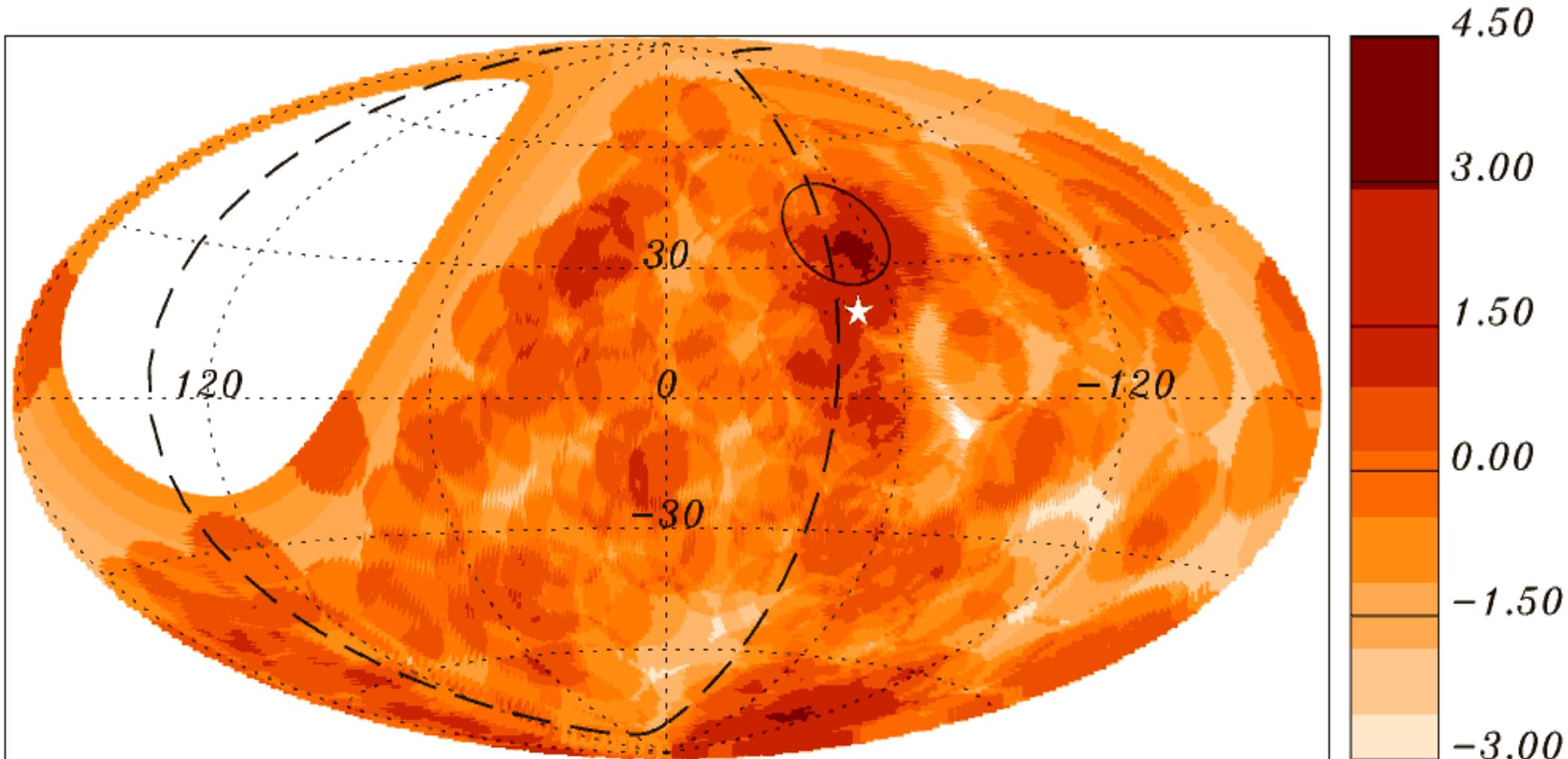
Correlación UHECR - Materia



Puntos negros: UHECR + resolución angular

Mapa: Distribución masa suavizada según 2MRS, $d < 200$ Mpc

Correlación UHECR - Materia



Li-Ma Significance



Algunas definiciones

- Área, Apertura, Exposición, Espectro integral, Espectro diferencial, Espectro

Calcule el número total de rayos cósmicos que llegan en todas las direcciones, por año y por km^2 , en el rango

$$10^{16} < E/\text{eV} < 10^{17}$$



Espectro

- Espectro de energía:

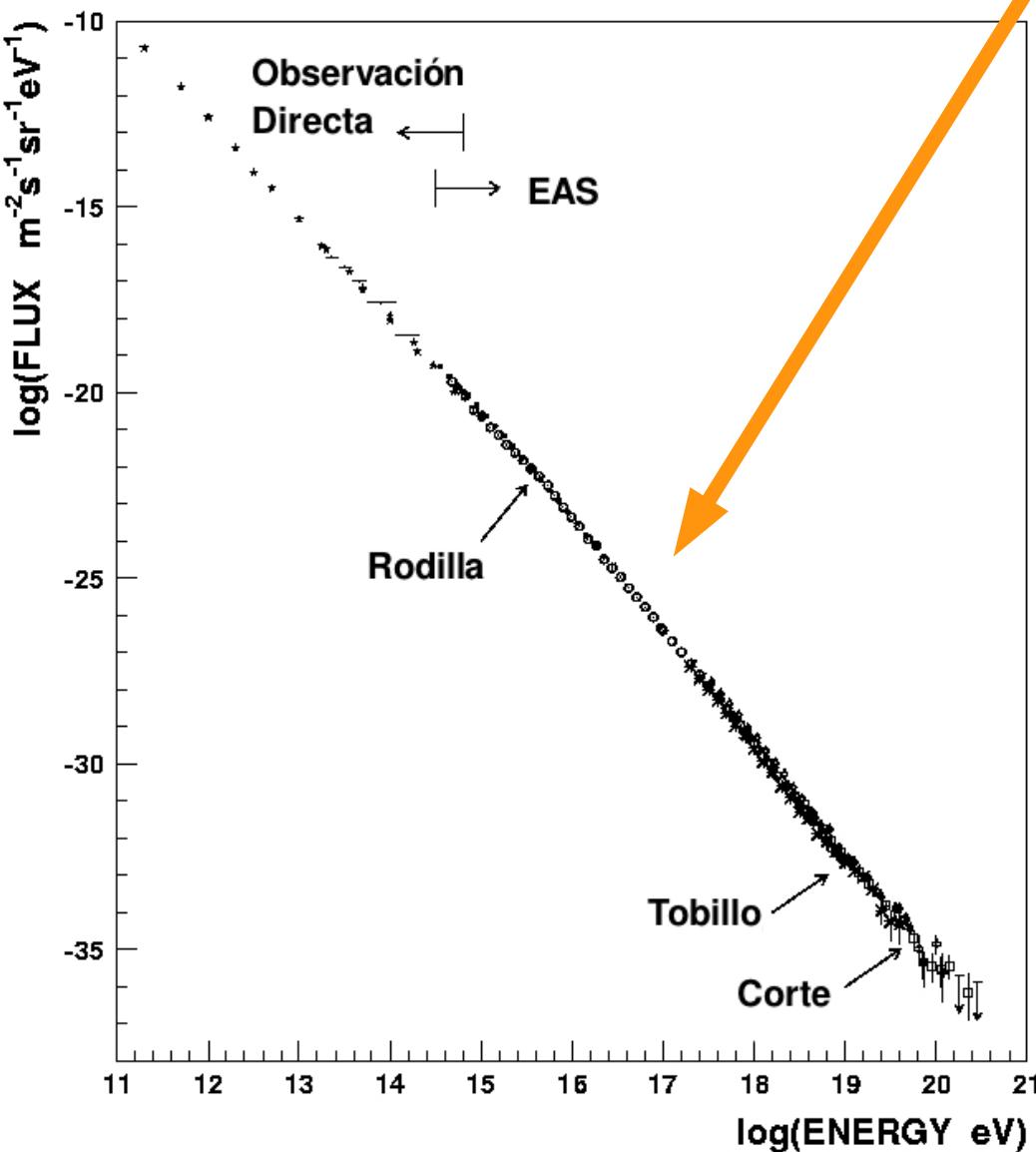
$$j(E) = \frac{dN}{dt \ dA \ d\Omega \ dE}$$

- Unidades

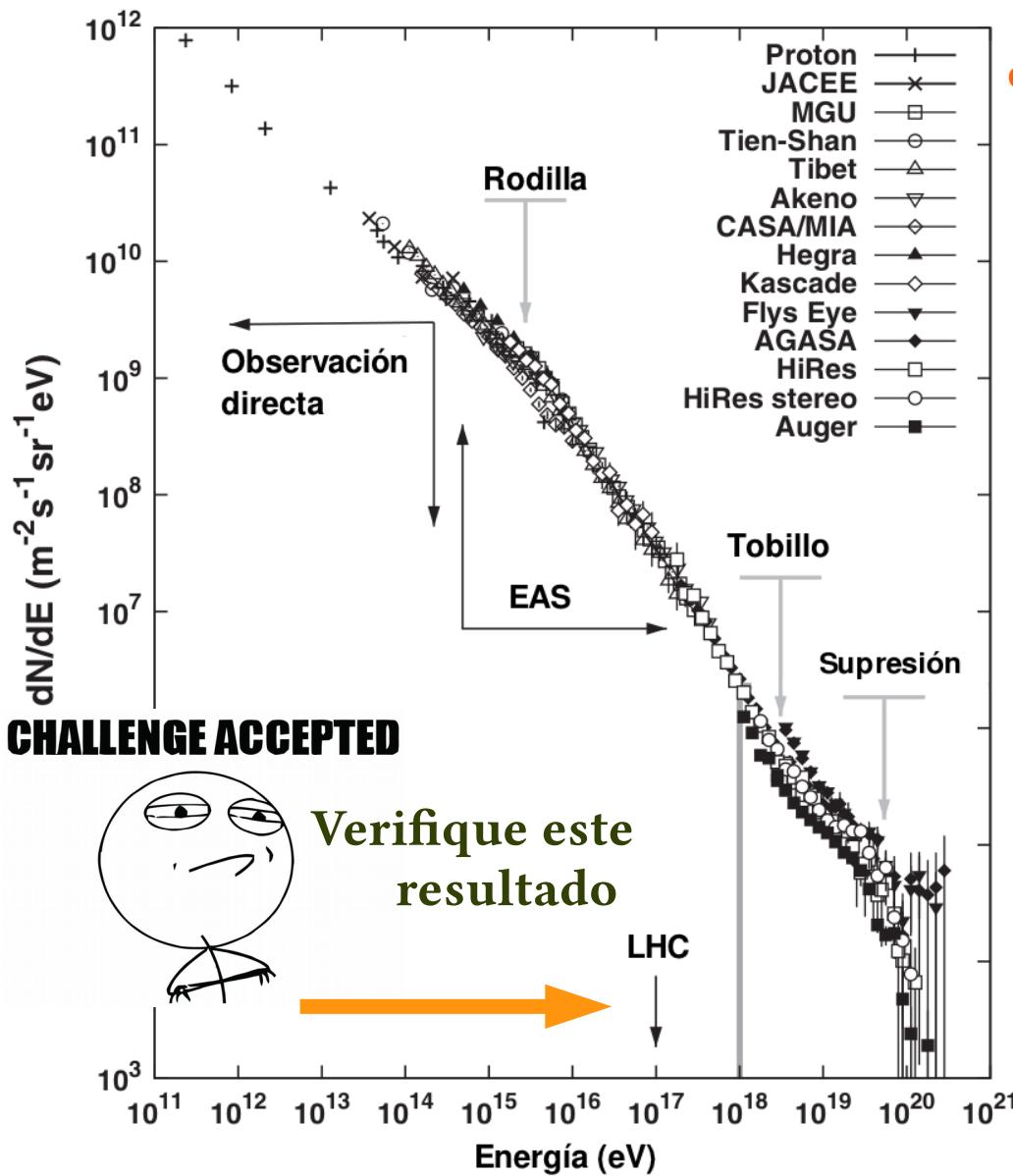
$$[j(E)] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{ s sr eV}}$$

- En general:

$$j(E) = j_0 E^\alpha, \alpha \approx -3$$



Espectro x E^2

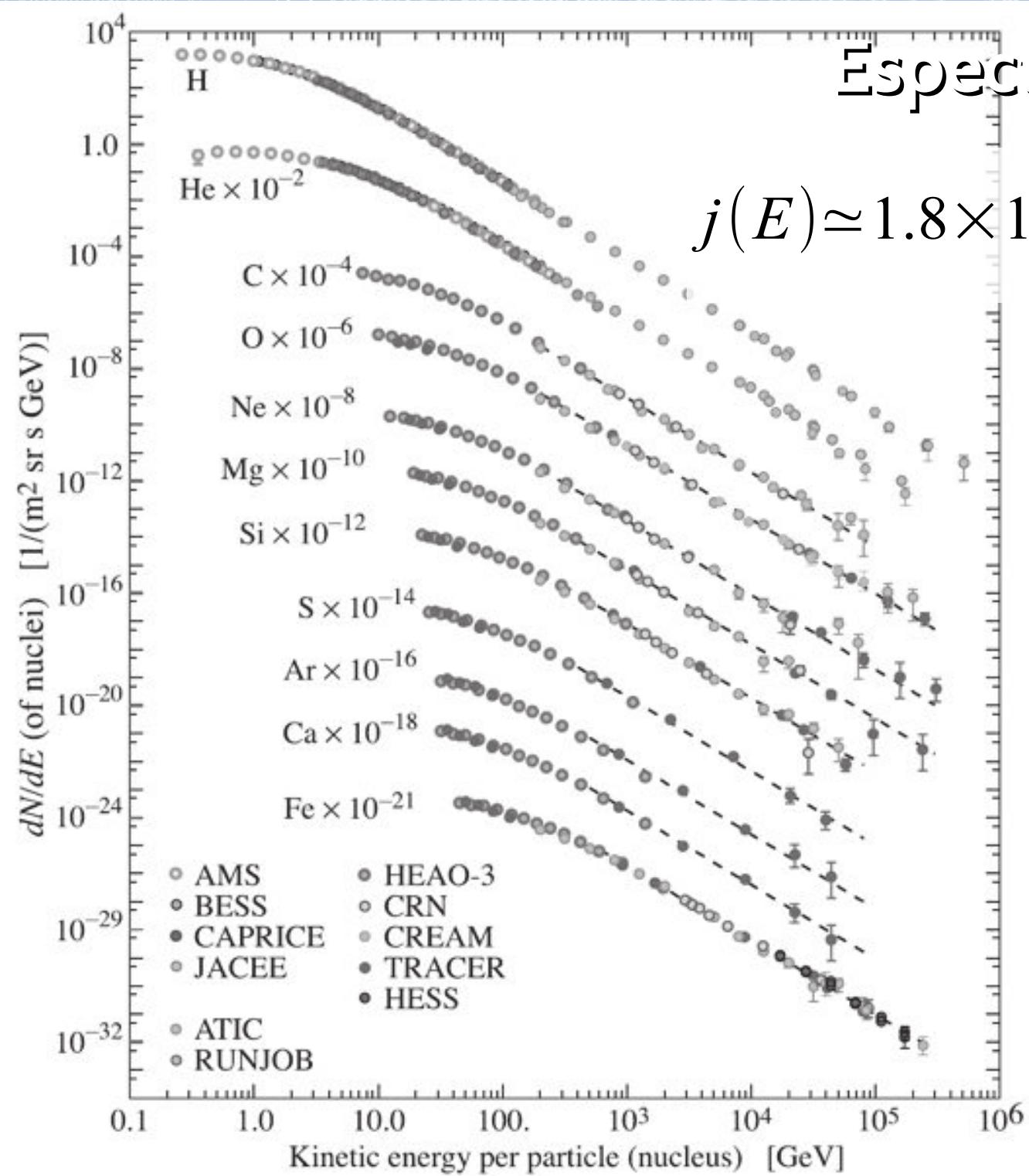


- Cambios en la pendiente espectral:

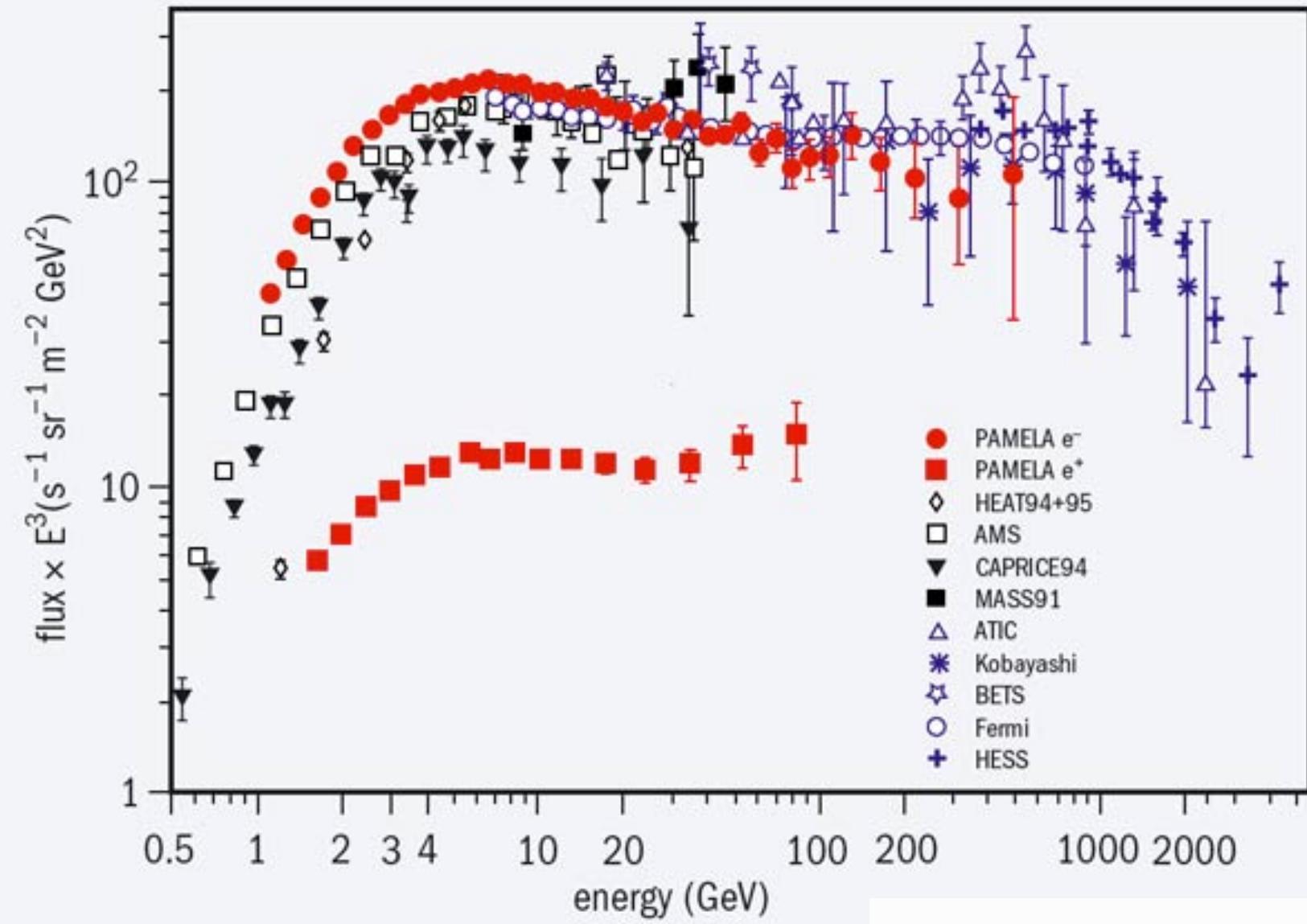
- Viento Solar $\rightarrow 10^9 \text{ eV}$
- 1^{ra} rodilla $\rightarrow 10^{15.5} \text{ eV}$
- 2^{da} rodilla $\rightarrow \sim 10^{17} \text{ eV}$
- Tobillo $\rightarrow 10^{18.61} \text{ eV}$
- Supresión $\rightarrow \sim 10^{19.46} \text{ eV}$

Transición entre distintos fenómenos físicos

Espectro y composición



Electrones



$$j(E) \approx 300 E^{-3.3} \frac{\text{particles}}{\text{m}^2 \text{s} \text{sr} \text{GeV}}$$

Cambios espectrales

- La capacidad de aceleración de la fuente es

$$E_{\max} \propto (Z \times B \times R)$$

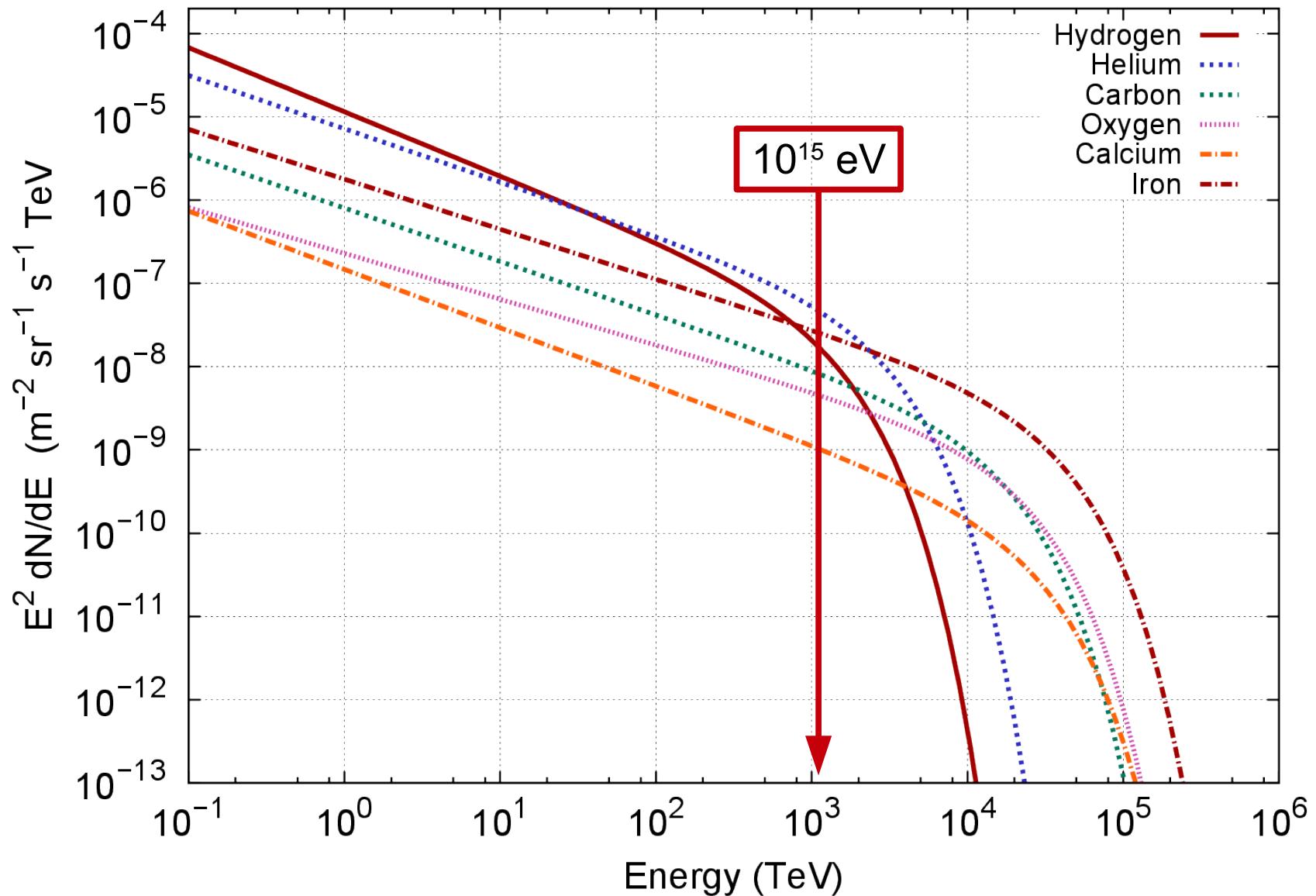
- Para una fuente (B y R están fijos), $E_{\max} \propto Z$
- Por otro lado, el flujo de una especie química Z :

$$J(E, Z) \simeq j_0(Z) E^{\alpha(Z)}$$

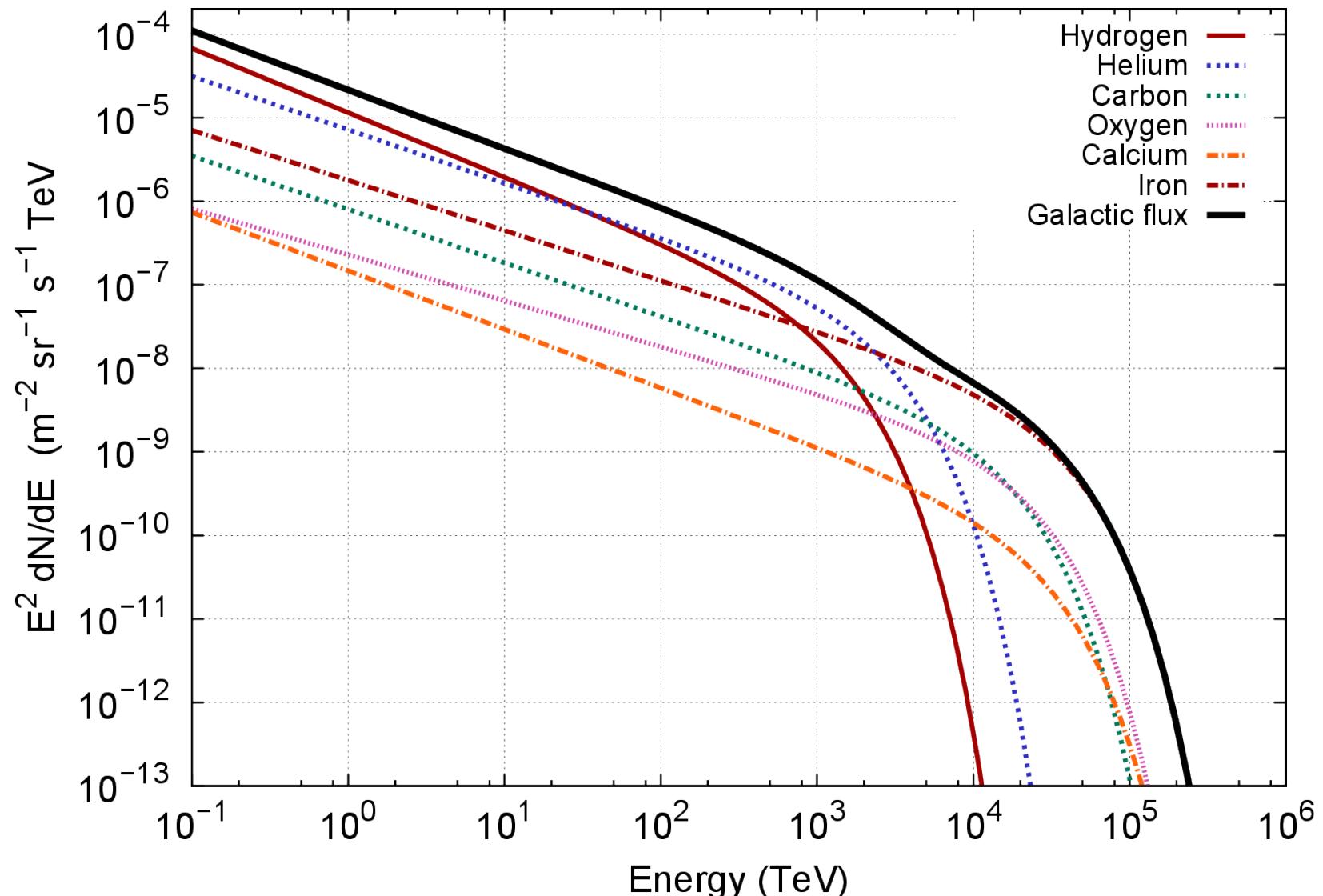
- Luego, hay una energía de corte E_c en el espectro de cada especie
- Proponemos un término de atenuación exponencial

$$J(E, Z) \simeq j_0(Z) E^{\alpha(Z)} \times \exp\left(-\frac{E}{ZE_c}\right), \quad E_c = 10^{15} \text{ eV}$$

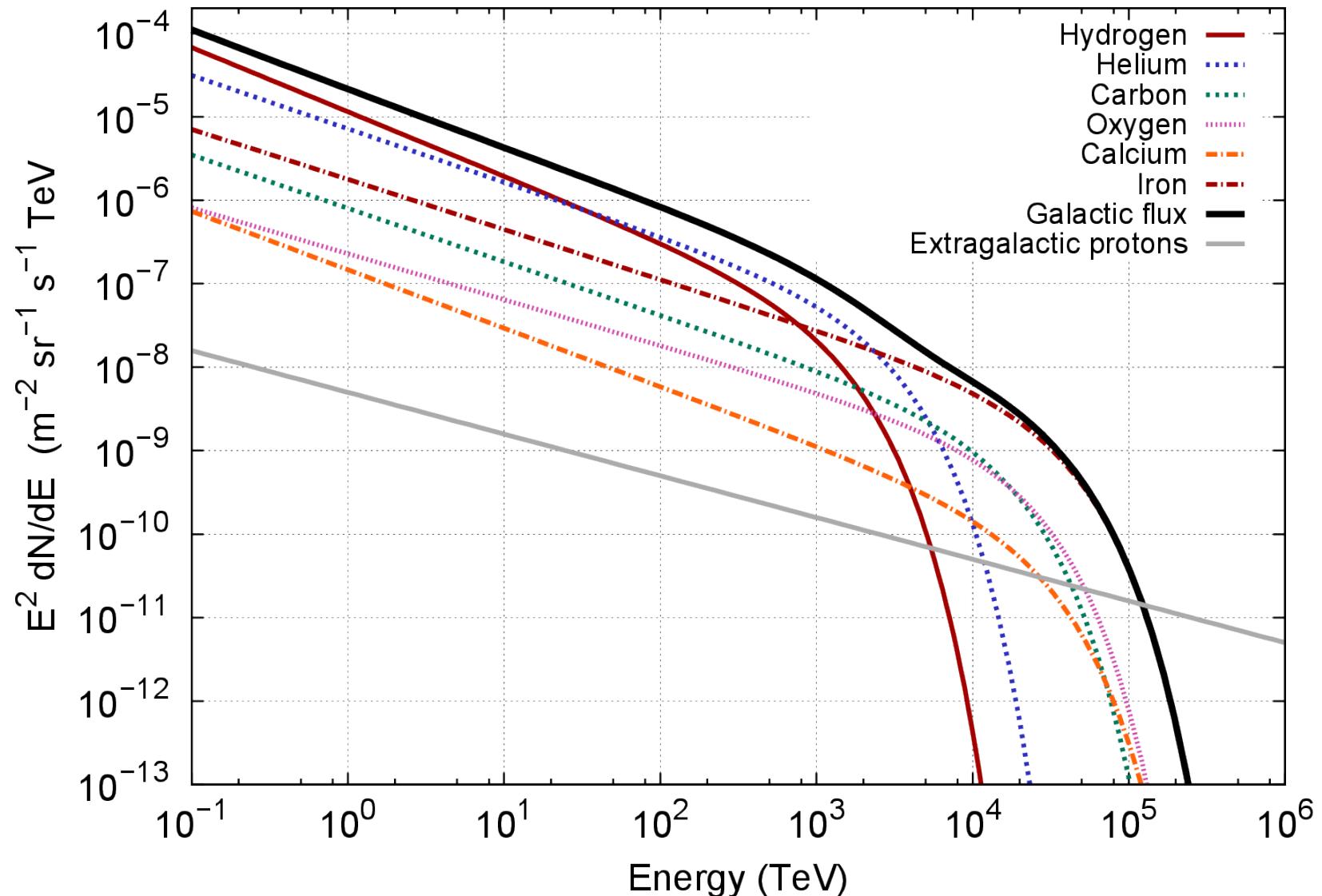
Espectros RC galácticos



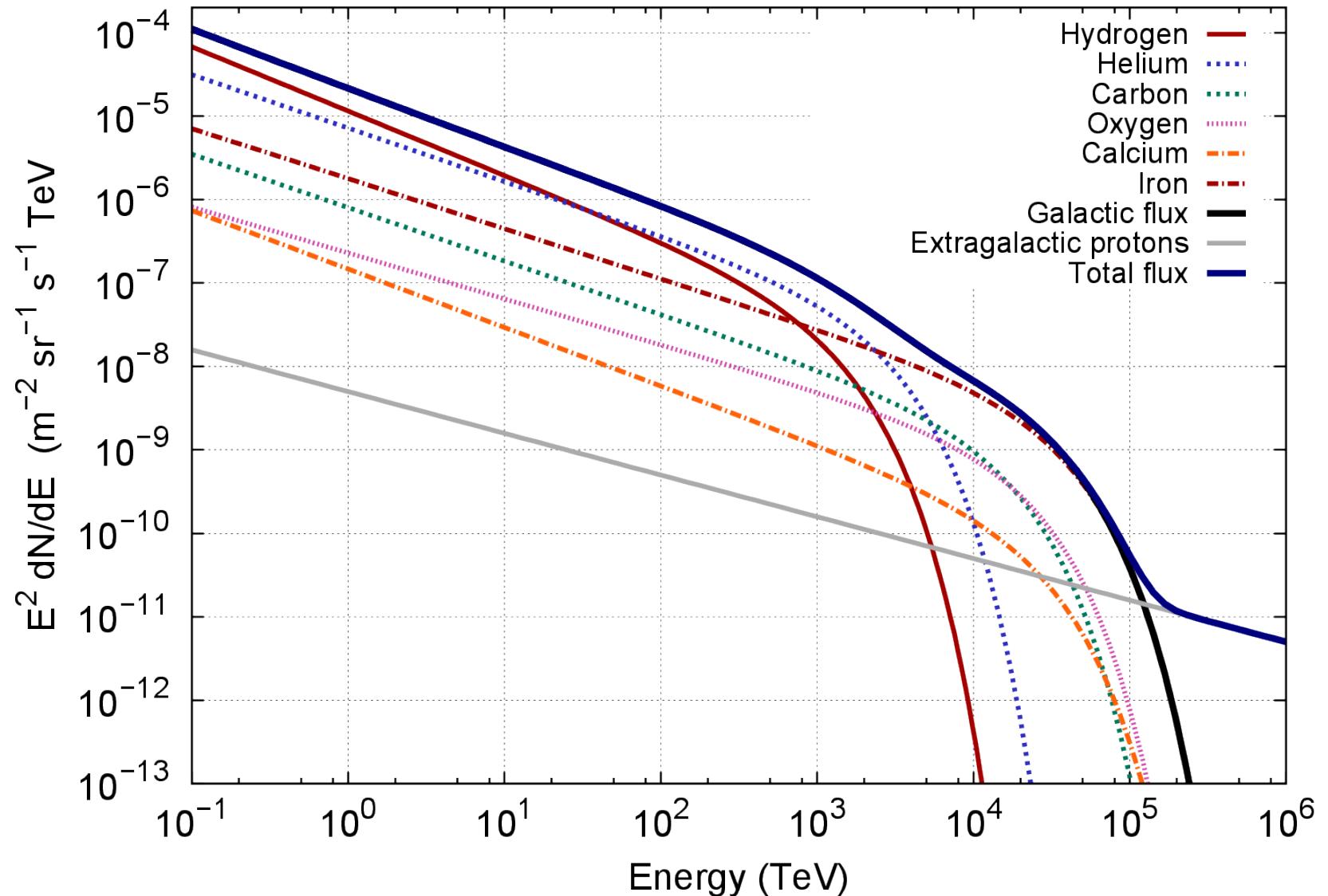
Espectro total galáctico



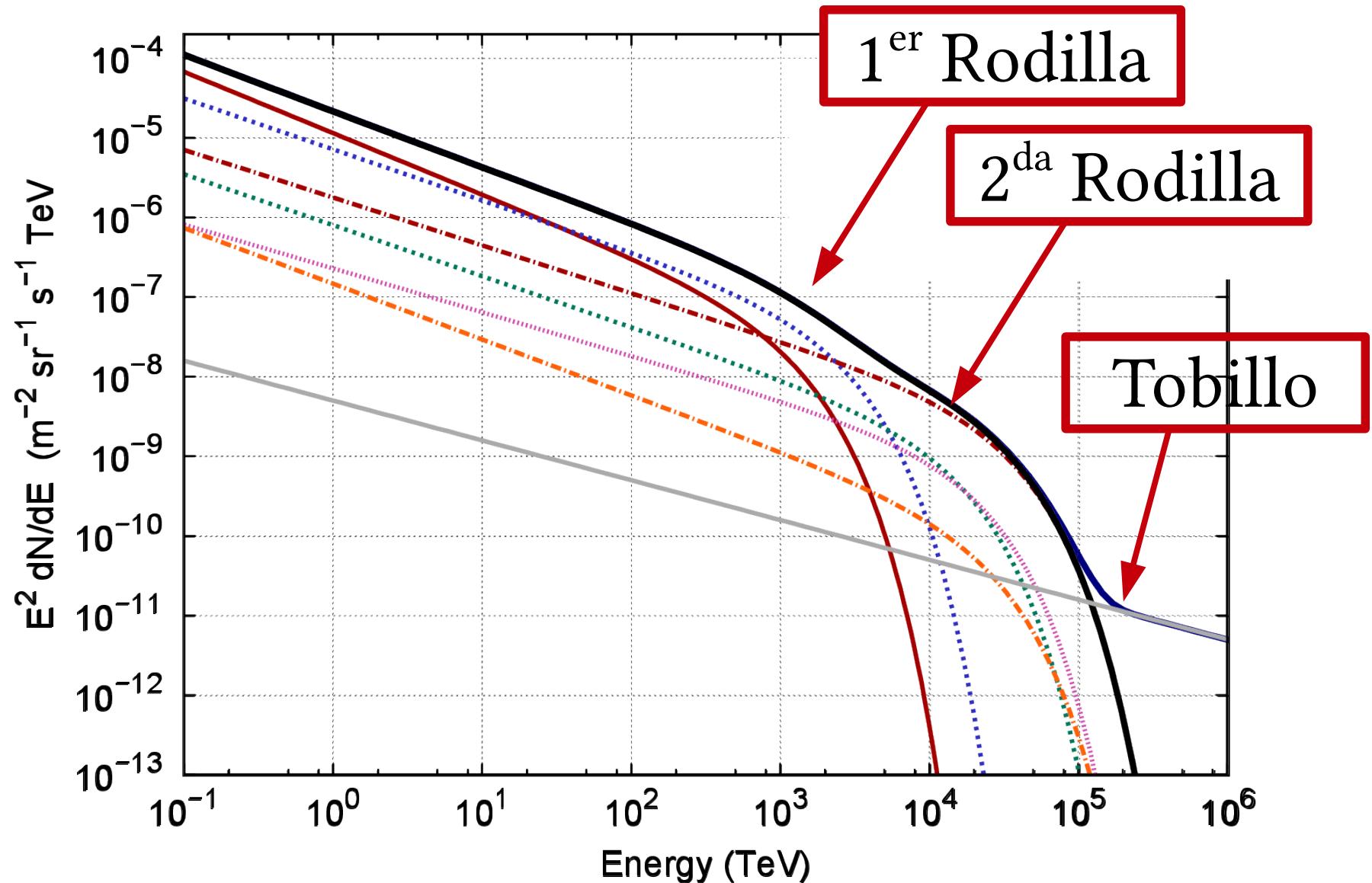
Pero tengo un flujo extragaláctico



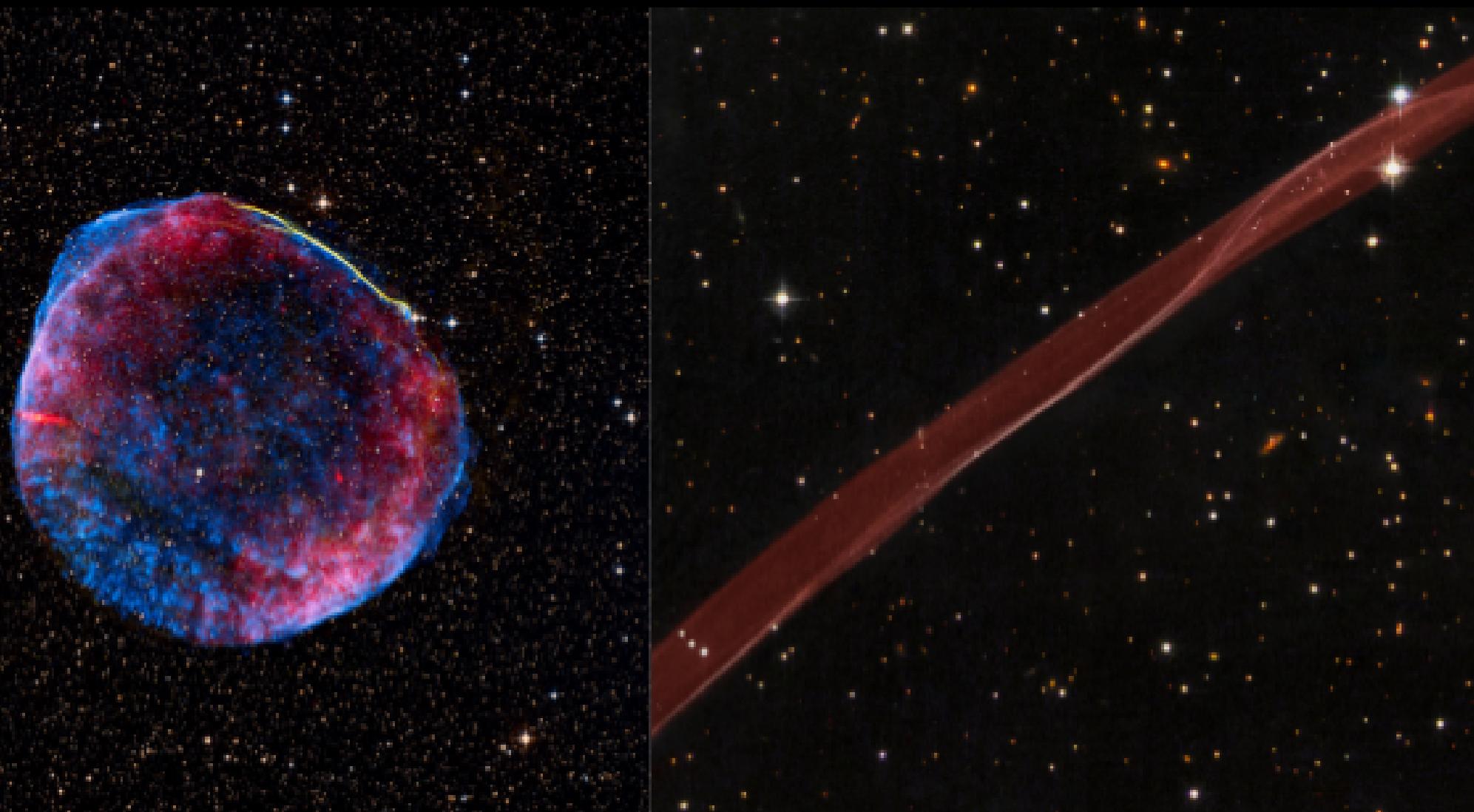
Y el flujo total...



¿Origen de las características?



Aceleración



Fermi 2^{do} órden

Glóbulos de Bok (Bok, 1947)

$M/M_o \sim 100-200$, $R \sim 1$ ly

Nubes moleculares gigantes

$M/M_o = 10^4 - 10^6$, $R \sim 300$ ly

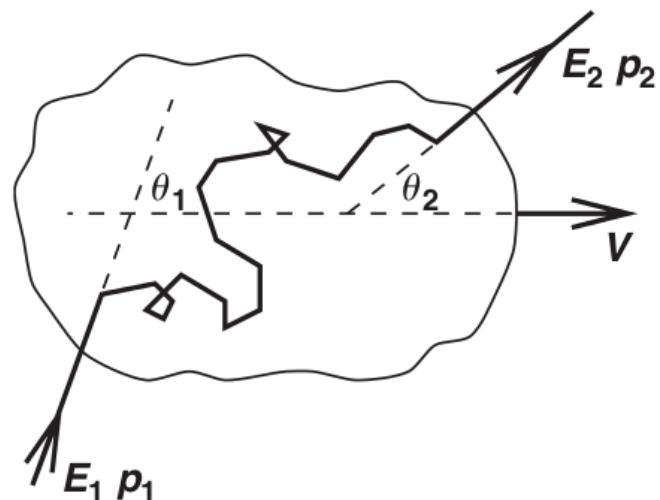
Campos eléctricos para acelerar Campos magnéticos para confinar

- La nube avanza con velocidad $v_c \sim 20 \text{ km/s} \ll c$
- Hay irregurlaridades en la concentración de plasma → Irregularidades en el campo magnético en el interior de la nube
- No hay campos eléctricos
- En el marco de la nube:

$$E'_1 = \gamma E_1 (1 - \beta \cos \theta_1)$$

$$E'_2 = \frac{E_2}{\gamma (1 + \beta \cos \theta'_2)}$$

$$E'_1 = E'_2 \rightarrow \frac{\Delta E}{E} \equiv \frac{E_2 - E_1}{E_1} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \beta \cos \theta'_2 + \beta^2 \cos \theta_1 \cos \theta'_2}{1 - \beta^2} - 1$$



Tomando valores medios...

$$\langle \cos \theta_1 \rangle = \frac{\int_{\Omega} \cos \theta_1 f(\beta, \theta_1) d\Omega}{\int_{\Omega} f(\beta, \theta_1) d\Omega}$$

- Para la dirección de salida, no hay una dirección preferencial,

$$\overline{\cos \theta'_2} = 0.$$

- Para la entrada, la probabilidad depende de las velocidades relativas entre la nube y el RC

$$\approx c(1 - \beta \cos \theta_1),$$

- Entonces,
- $$\begin{aligned}\overline{\cos \theta_1} &= c \frac{\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos(\theta_1)(1 - \beta \cos \theta_1) \sin \theta_1 d\theta_1 d\phi}{c \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (1 - \beta \cos \theta_1) \sin \theta_1 d\theta_1 d\phi} = \frac{-\frac{4}{3}\pi\beta}{4\pi} \\ &= -\frac{1}{3}\beta.\end{aligned}$$

Y reemplazando...

- En la expresión para el balance de energía:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \beta \cos \theta'_2 + \beta^2 \cos \theta_1 \cos \theta'_2}{1 - \beta^2} - 1$$

- Tenemos:

$$\frac{\overline{\Delta E}}{E} = \frac{1 + \beta^2/3}{1 - \beta^2} - 1 = \frac{4\beta^2}{3(1 - \beta^2)}, \longrightarrow \boxed{\overline{\Delta E} \simeq \frac{4}{3}\beta^2 E}$$

Y reemplazando...

- Luego de n encuentros, la energía será

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

- Y entonces

$$n = \frac{\ln E_n/E_0}{\ln \left(1 + \overline{\Delta E}/E \right)}$$

- Si tengo una energía E_n , el número de rayos cósmicos con energía $E_p > E_n$ será

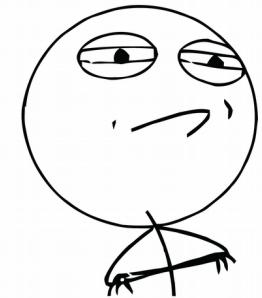
$$N(E_p > E_n) \propto p_e^n,$$

Y reemplazando...

- Tomando logarítmos y reagrupando las constantes

CHALLENGE ACCEPTED

$$\frac{dN}{dE} \propto E_p^a$$

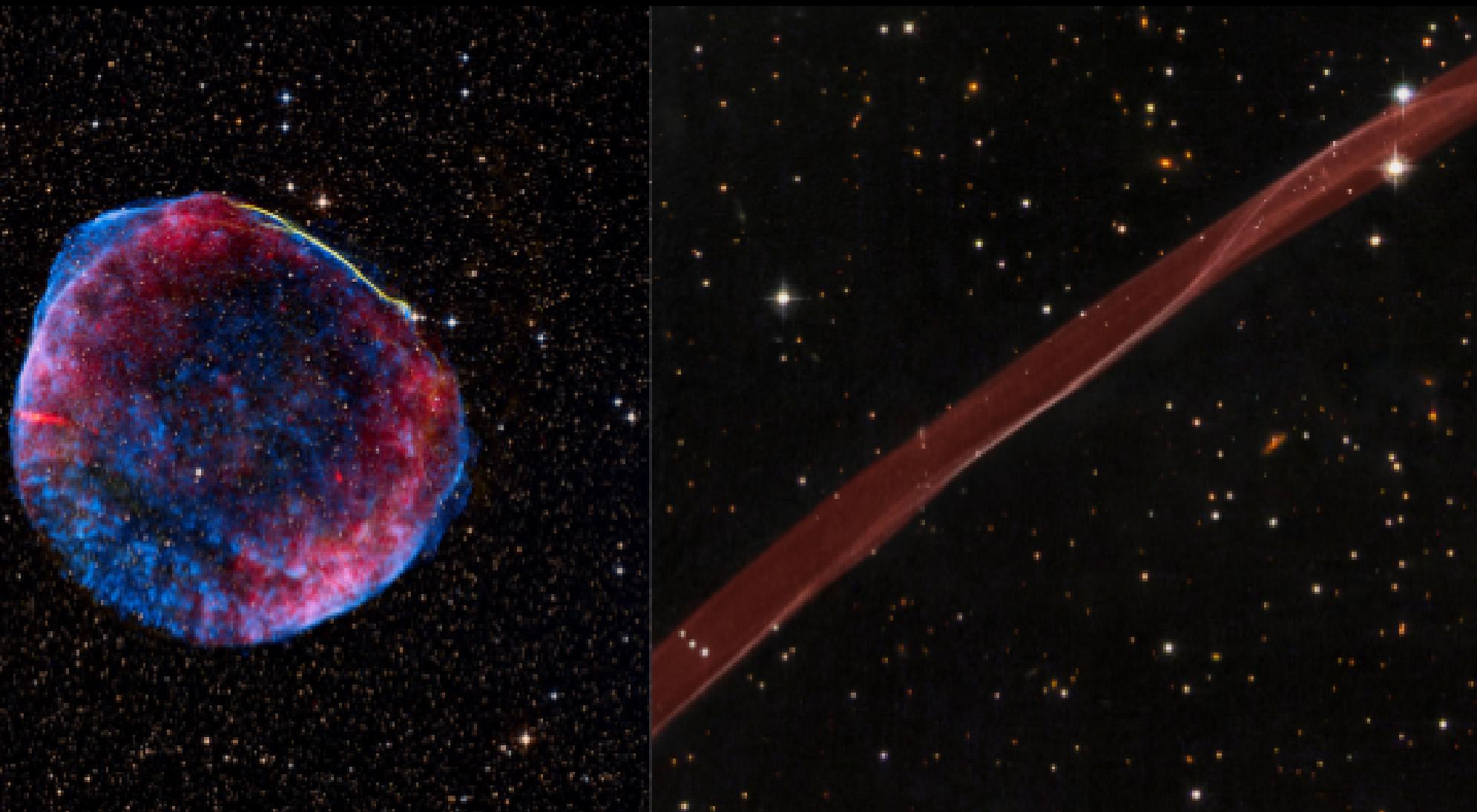


- Donde (recordar $\ln(1 \pm x) \sim \pm x$ si $x \ll 1$)

$$a = \frac{\ln(p_e)}{\ln(1 + \Delta E/E)} - 1 \simeq \frac{\ln(p_e)}{\Delta E/E} - 1 = \frac{3 \ln(p_e)}{4\beta^2} - 1$$

- Ahora, $p_e < 1 \rightarrow \ln(p_e) < 1 \rightarrow \alpha < -1$
- Peeeroooo.... $\beta \ll 1 \rightarrow p_e \sim 1$, lo cuál no es razonable

Ondas de choque



Aceleración en ondas de choque

- Onda de choque con velocidad $v_s \sim 10^4$ km/s
- La velocidad del gas en el medio es $v_p \sim 10$ km/s
- En el marco comóvil, el gas del medio entra en el frente con velocidad $u_1 = v_s$ y densidad ρ_1 , y sale a una región con velocidad $u_2 = v_s - v_p$ y densidad ρ_2 .
- La relación de compresión en la onda es:

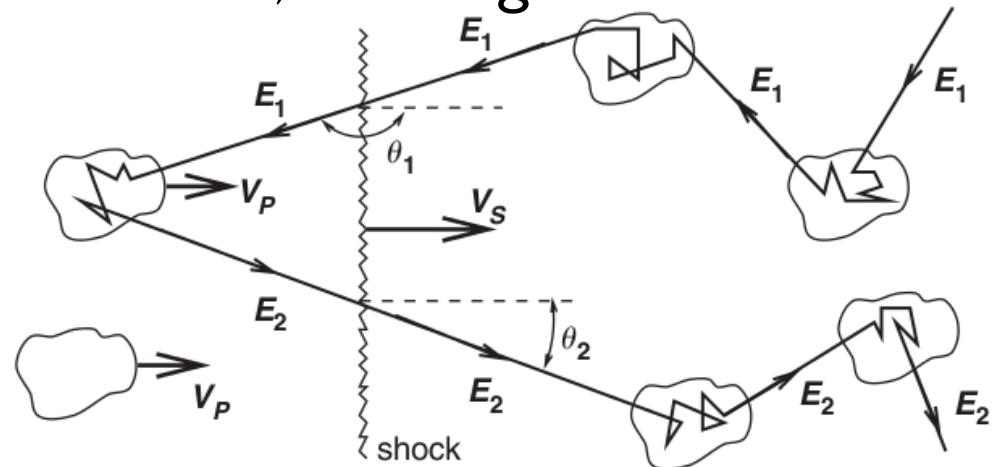
$$R = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \rightarrow \frac{v_s}{v_p} \simeq \frac{R}{R - 1}$$

Campos eléctricos para acelerar Campos magnéticos para confinar

- Hay irregularidades magnéticas en el frente
- Si la longitud de coherencia del campo es mayor que el radio de Larmor, entonces la partícula va y vuelve por el frente
- Cada vez que la partícula pasa por el frente, su energía se incrementa.
- En el marco de la nube:

$$E'_1 = \gamma E_1 (1 - \beta \cos \theta_1)$$

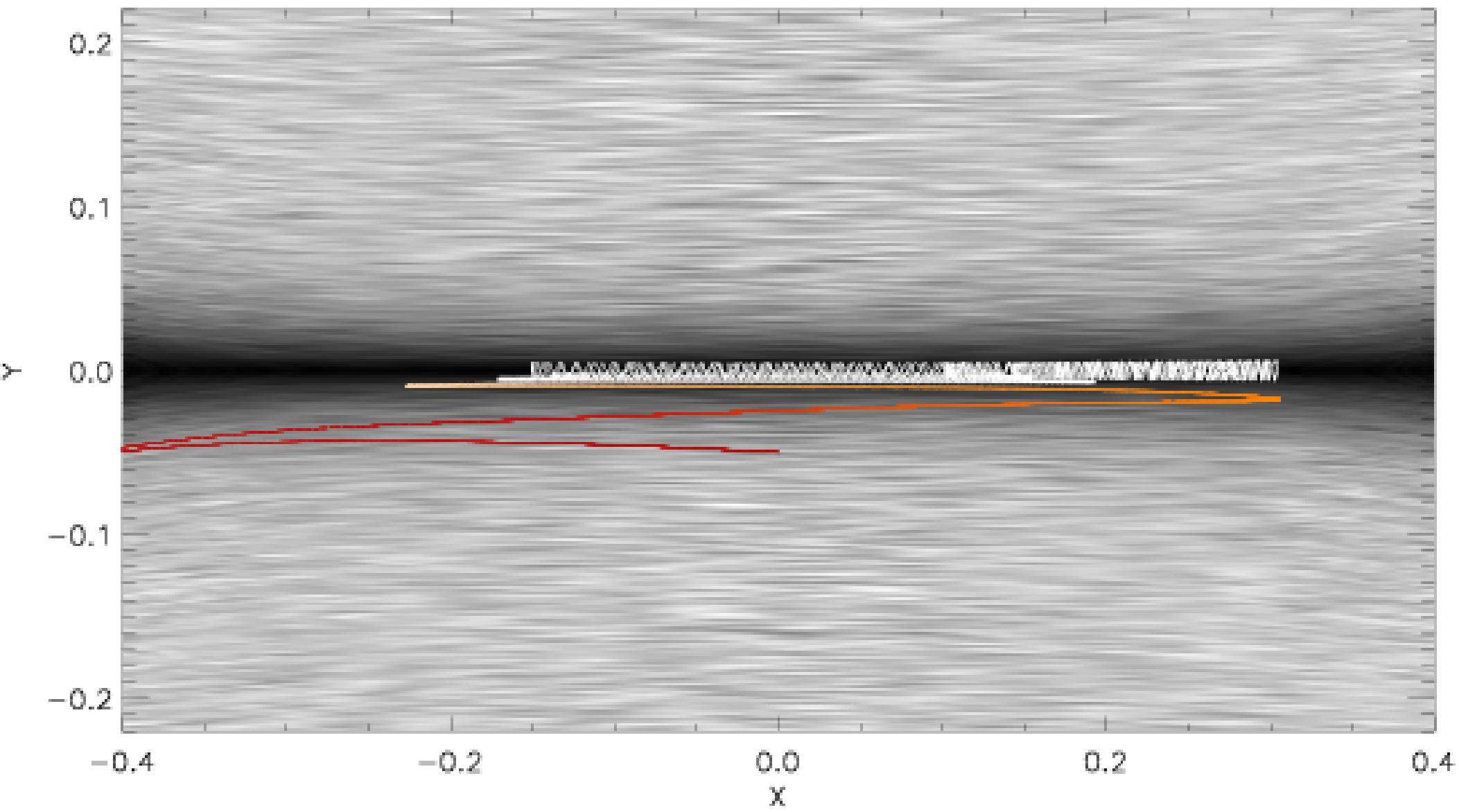
$$E'_2 = \frac{E_2}{\gamma (1 + \beta \cos \theta'_2)}$$



$$E'_1 = E'_2 \rightarrow \frac{\Delta E}{E} \equiv \frac{E_2 - E_1}{E_1} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \beta \cos \theta'_2 + \beta^2 \cos \theta_1 \cos \theta'_2}{1 - \beta^2} - 1$$

Simulación Onda de Choque

de Gouveia Dal Pino & Kowal (2013), arXiv:1302.4374 [astro-ph.HE]



Fermi 1^{er} orden

- Valores medios angulares:

$$\langle \cos \theta_1 \rangle = \frac{\int_{\Omega} \cos \theta_1 f(\beta, \theta_1) d\Omega}{\int_{\Omega} f(\beta, \theta_1) d\Omega} \approx -2/3$$



$$\langle \cos \theta_2' \rangle \approx 2/3$$

- Reemplazando en la ecuación anterior:

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{4/3\beta + 5/9\beta^2}{1-\beta^2} \approx \frac{4}{3}\beta \rightarrow \left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle \approx \left(\frac{4}{3} \right) \left(\frac{R-1}{R} \right) \left(\frac{v_s}{c} \right)$$

- Probabilidad de confinamiento

$$p_c = 1 - \frac{4 v_s}{R c} \rightarrow N(E_p > E_n) \propto p_c^n \rightarrow \frac{dN}{dE} \propto E^\alpha, \text{ y } \alpha = \frac{\ln p_c}{\ln \langle \Delta E / E \rangle} - 1$$

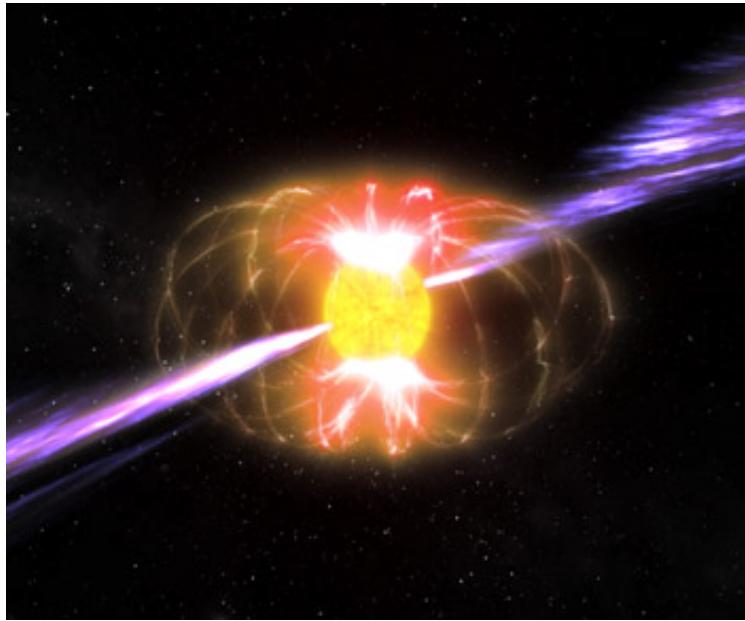
Fermi 1^{er} orden

- Valores medios angulares:

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{\ln(1 - p_{\text{esc}})}{\ln\left(1 + \overline{\Delta E}/E\right)} - 1 \\ &\simeq \frac{p_{\text{esc}}}{\overline{\Delta E}/E} - 1 \\ &= \frac{\frac{-4v_s}{Rc}}{\frac{4}{3}\left(\frac{R-1}{R}\right)\frac{v_s}{c}} - 1 \\ &= \frac{2+R}{1-R}.\end{aligned}$$

- Con lo cual, si $R=4$, $\alpha \sim -2$

Aceleración en Objetos Compactos



- Objeto compacto

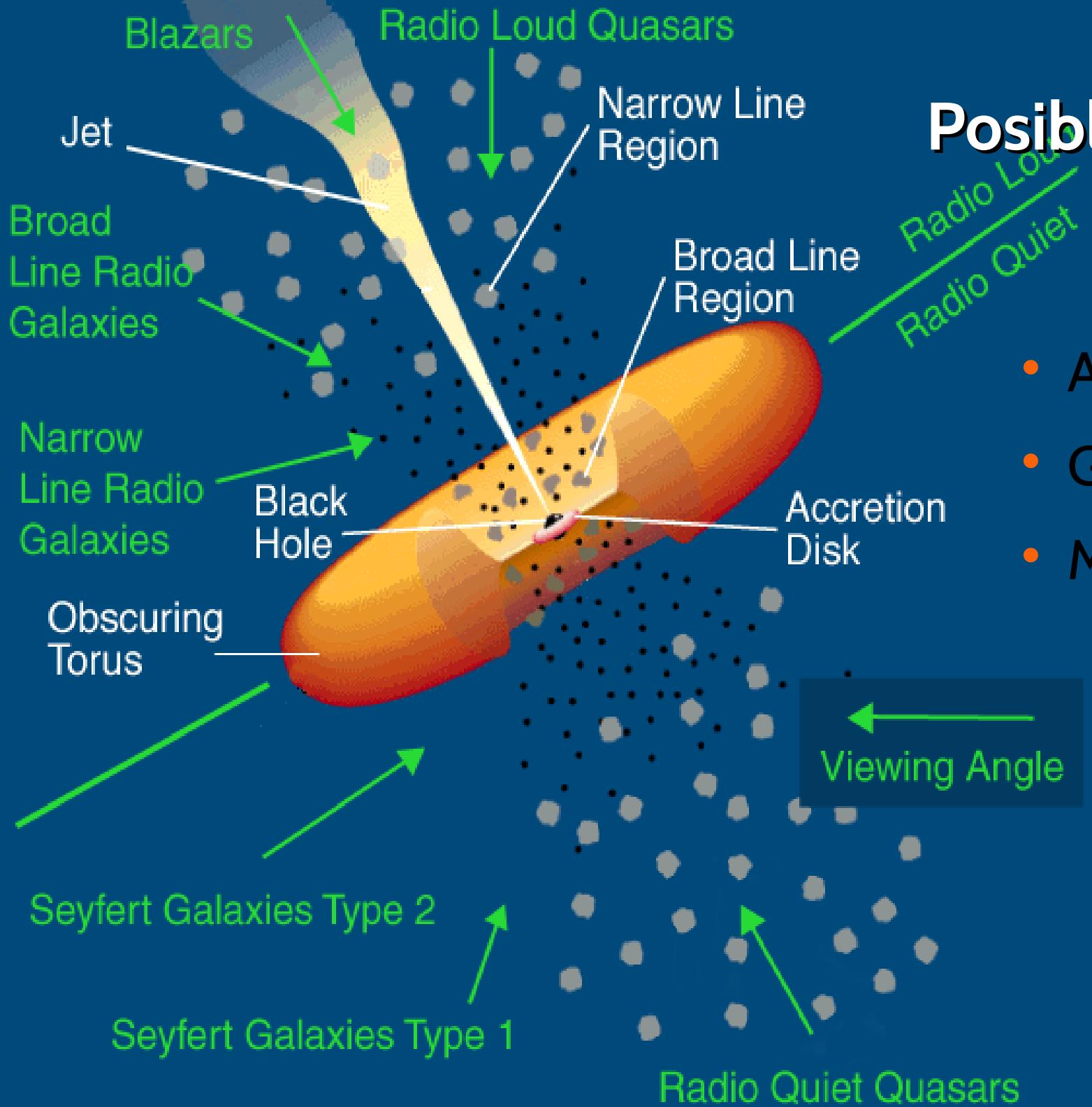
$$R \approx 10 \text{ km}; B \approx 10^{11} \text{ T}; \Omega \approx 10^4 \text{ s}^{-1}$$

- Energía máxima para partícula de carga Z

$$E_{\max} = 300Z \left(\frac{B}{2 \times 10^{11} \text{ T}} \right) \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^3 \left(\frac{\Omega}{10^4 \text{ s}^{-1}} \right)^2 \text{ EeV}$$

- El objeto pierde energía por rad. Gravitatoria
- Después de unos días, su capacidad decayó:

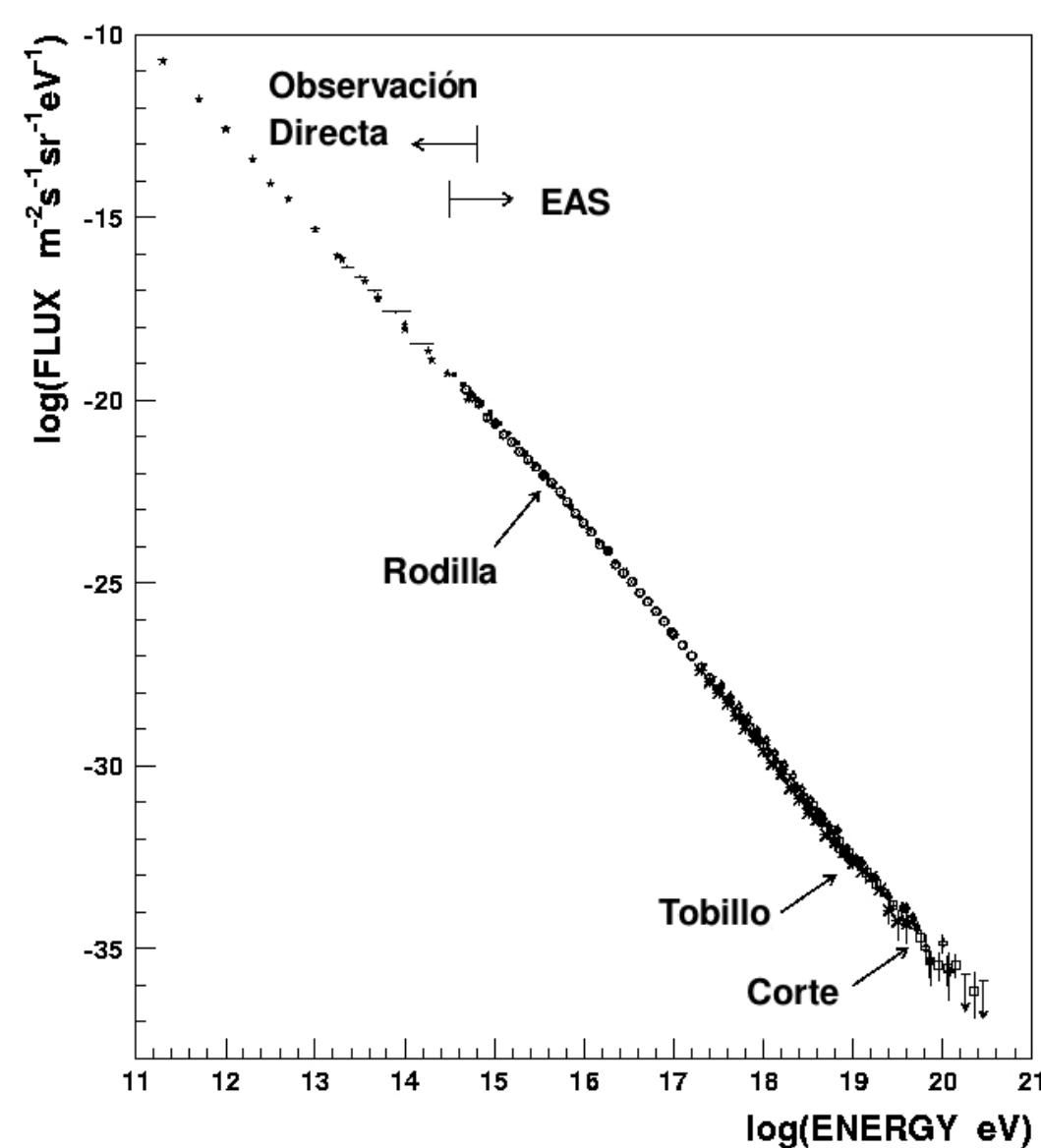
$$t_d = 0.5 Z \left(\frac{I}{50 M_{\text{Sol}} \text{ km}^2} \right)^2 \left(\frac{2 \times 10^{11} \text{ T}}{B} \right) \left(\frac{10 \text{ km}}{R} \right)^3 \left(\frac{6 \text{ EeV}}{E_d} \right) \text{ días}$$



Posibles Fuentes

- AGN ?
- GRB ????
- Magnetars ????

Espectro



- Espectro de energía:

$$j(E) = \frac{d^4 N}{dt dA d\Omega dE}$$

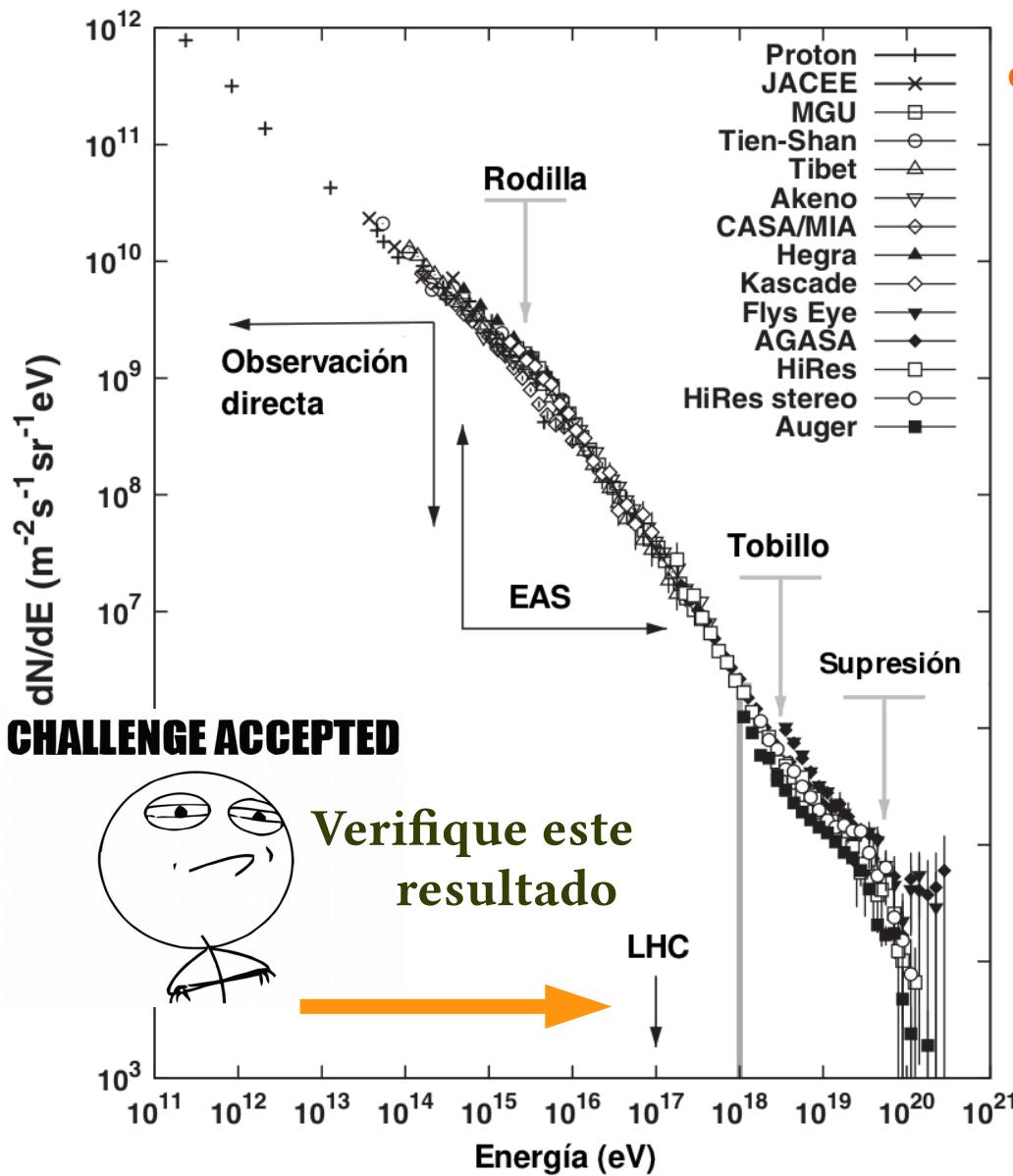
- Unidades

$$[j(E)] = \frac{1}{m^2 s sr eV}$$

- En general:

$$j(E) = j_0 E^\alpha, \alpha \approx -3$$

Espectro x E^2

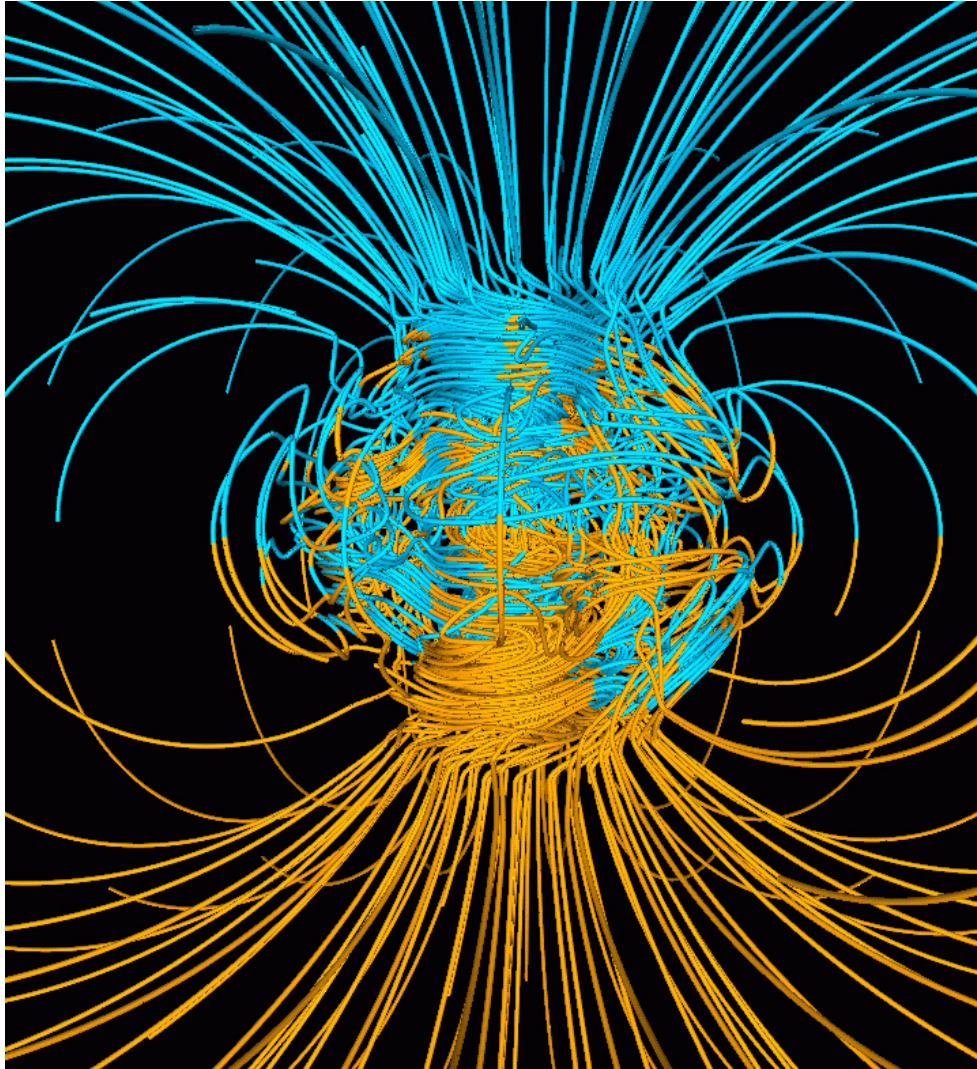


- Cambios en la pendiente espectral:

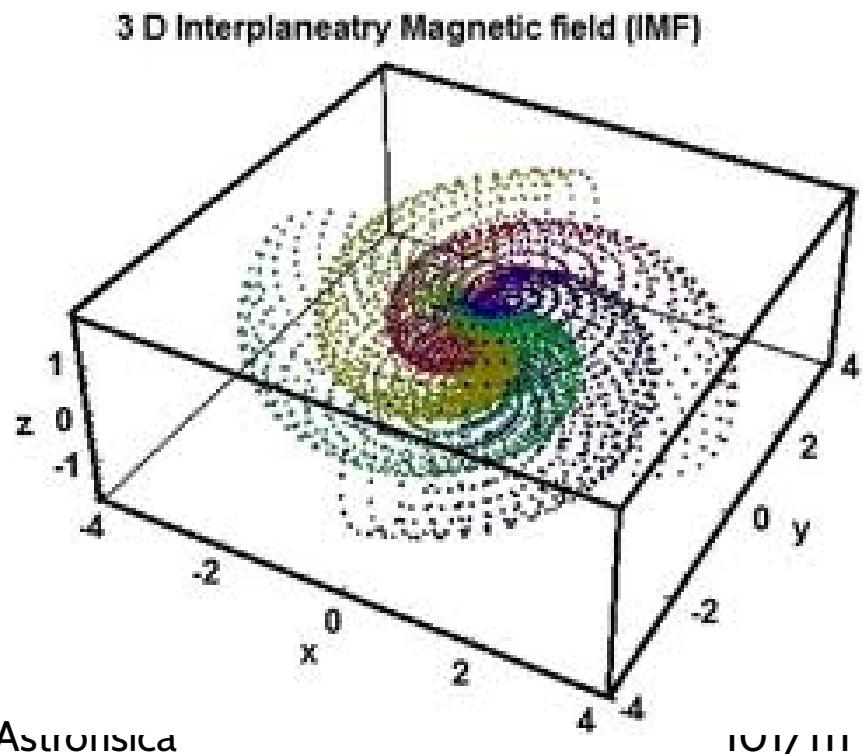
- Viento Solar $\rightarrow 10^9 \text{ eV}$
- 1^{ra} rodilla $\rightarrow 10^{15.5} \text{ eV}$
- 2^{da} rodilla $\rightarrow \sim 10^{17} \text{ eV}$
- Tobillo $\rightarrow 10^{18.61} \text{ eV}$
- Supresión $\rightarrow \sim 10^{19.46} \text{ eV}$

Transición entre distintos fenómenos físicos

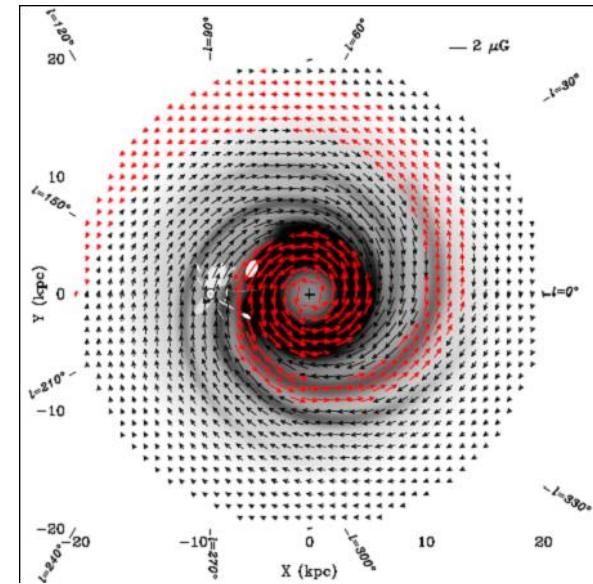
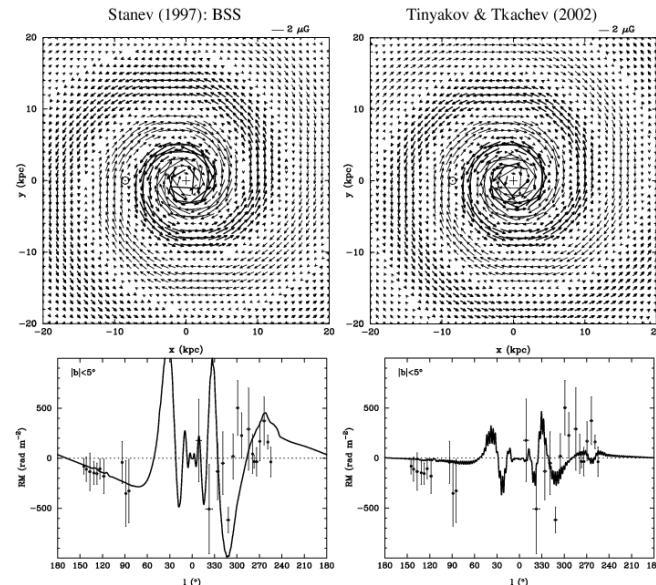
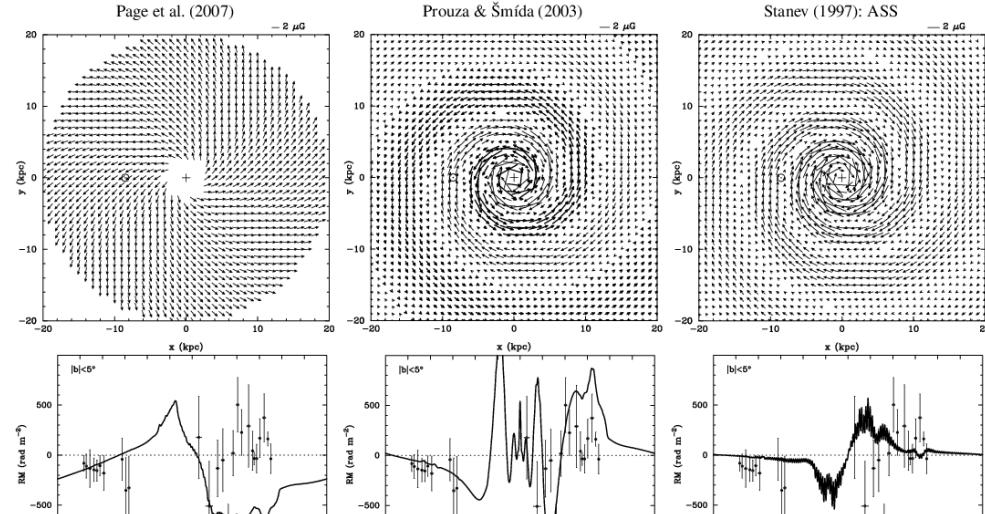
Propagación: Campos Magnéticos



- Los RC son, en general, partículas cargadas
- Los campos magnéticos B deflectan su trayectoria.
- B: intensidad o recorrido

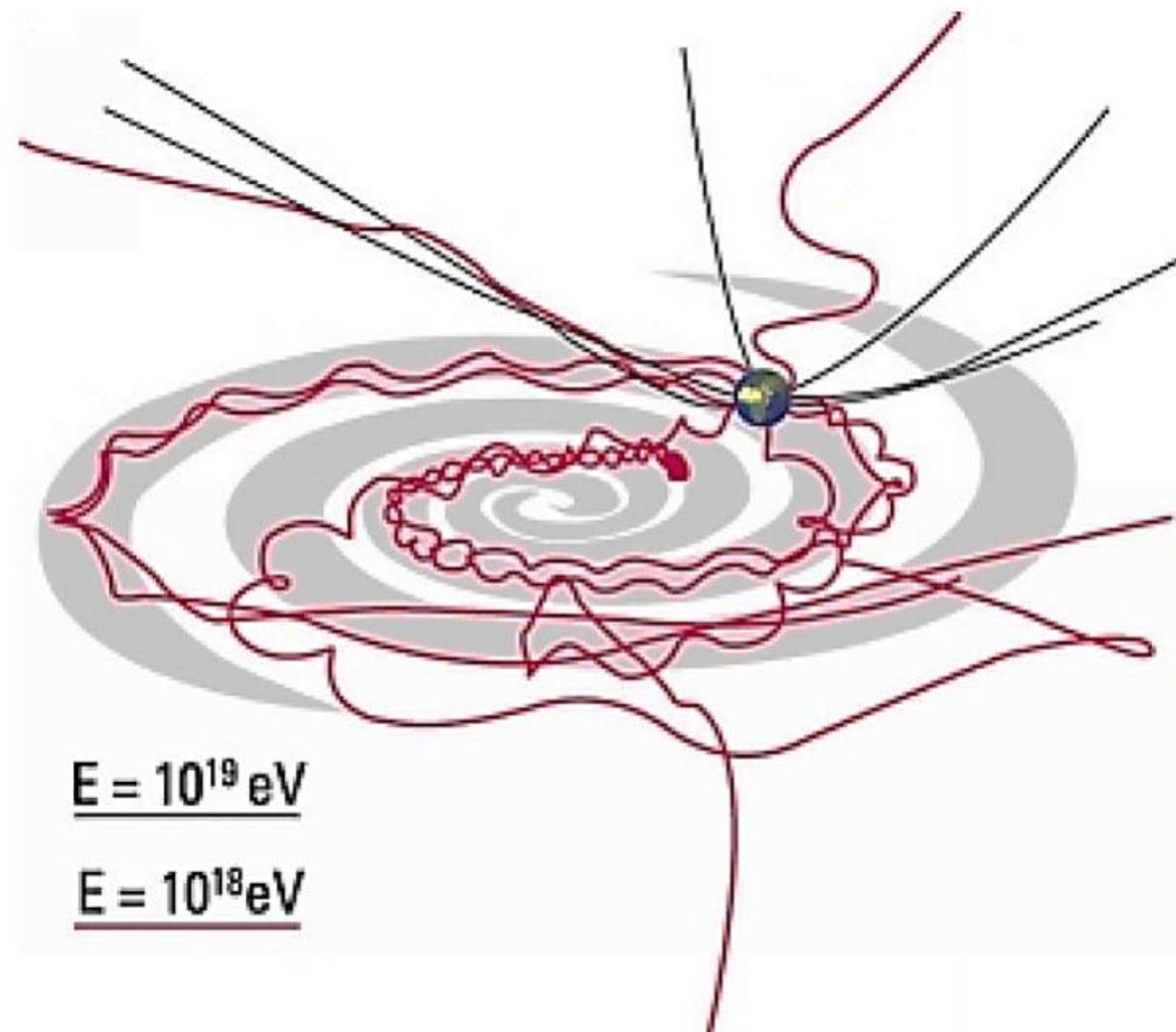


Campos Magnéticos Galácticos

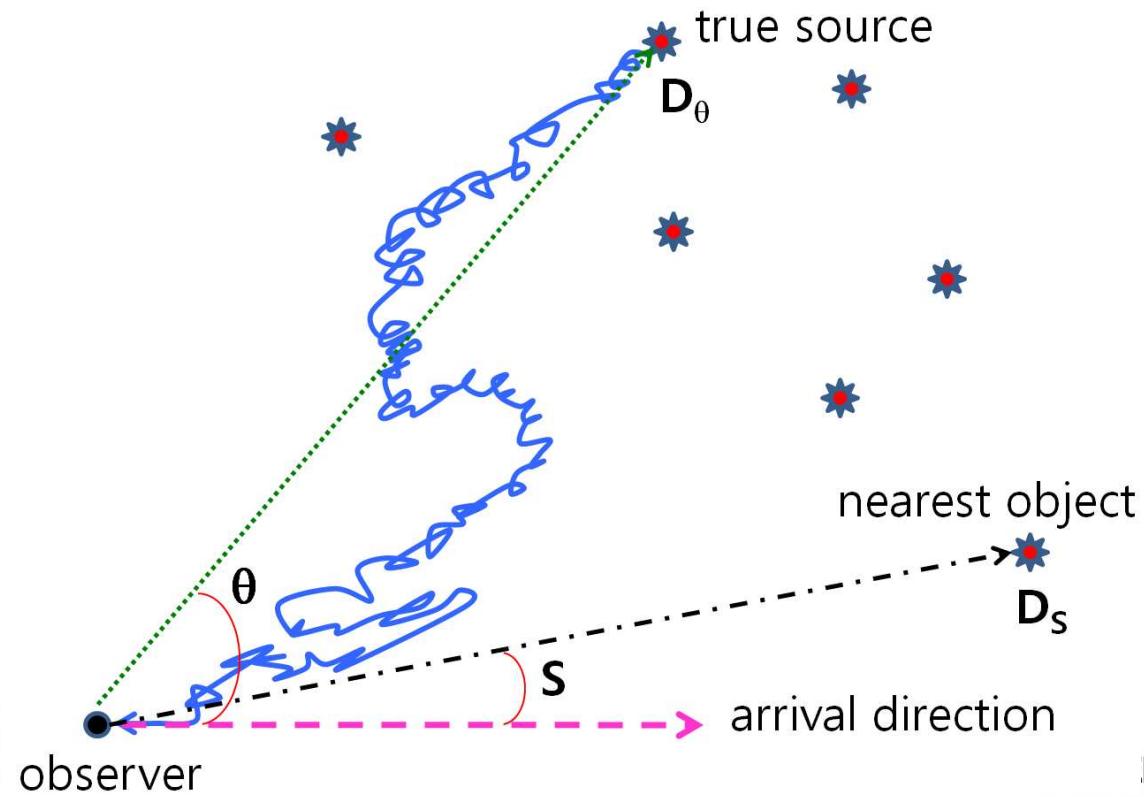
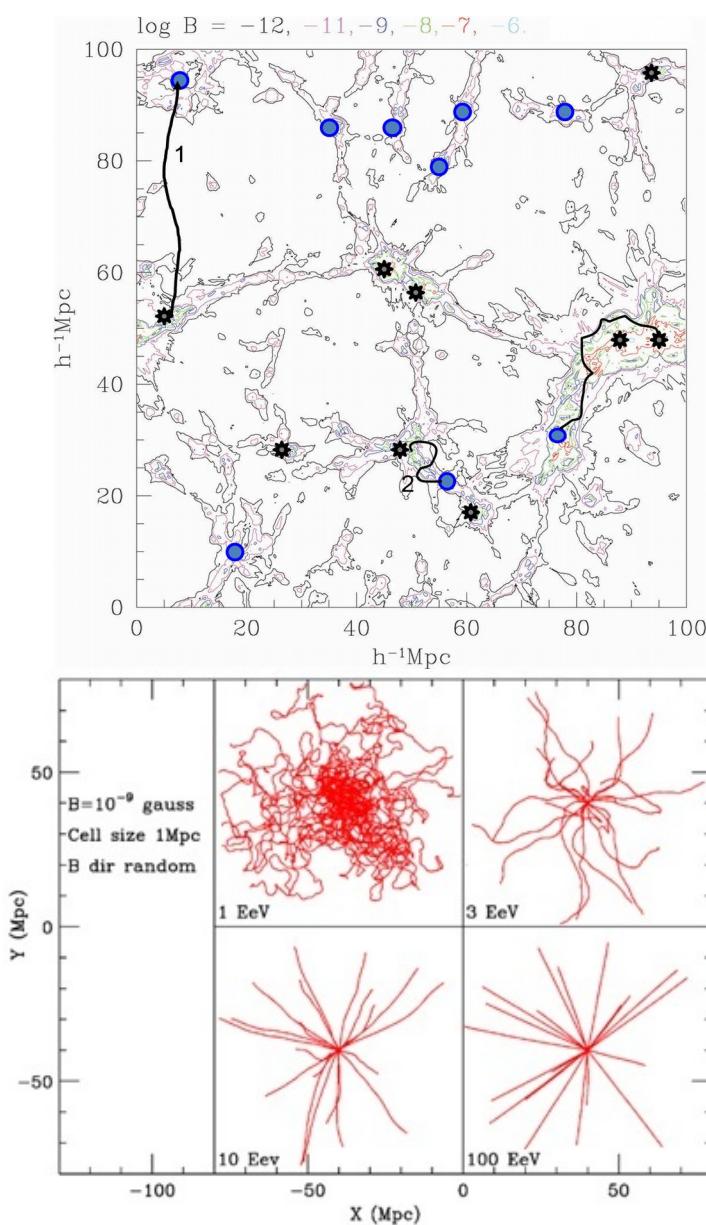


- En general, se propone:
 - Campo Uniforme $|B| \sim 2\mu\text{G}$, siguiendo la los brazos espirales
 - Campo Turbulento: fluctuaciones sobre el campo uniforme

Deflexiones galácticas



Encima, campos intergalácticos



NGE ACCEPTED

Las partículas no “apuntan” a la fuente
Debido a las deflexiones magnéticas

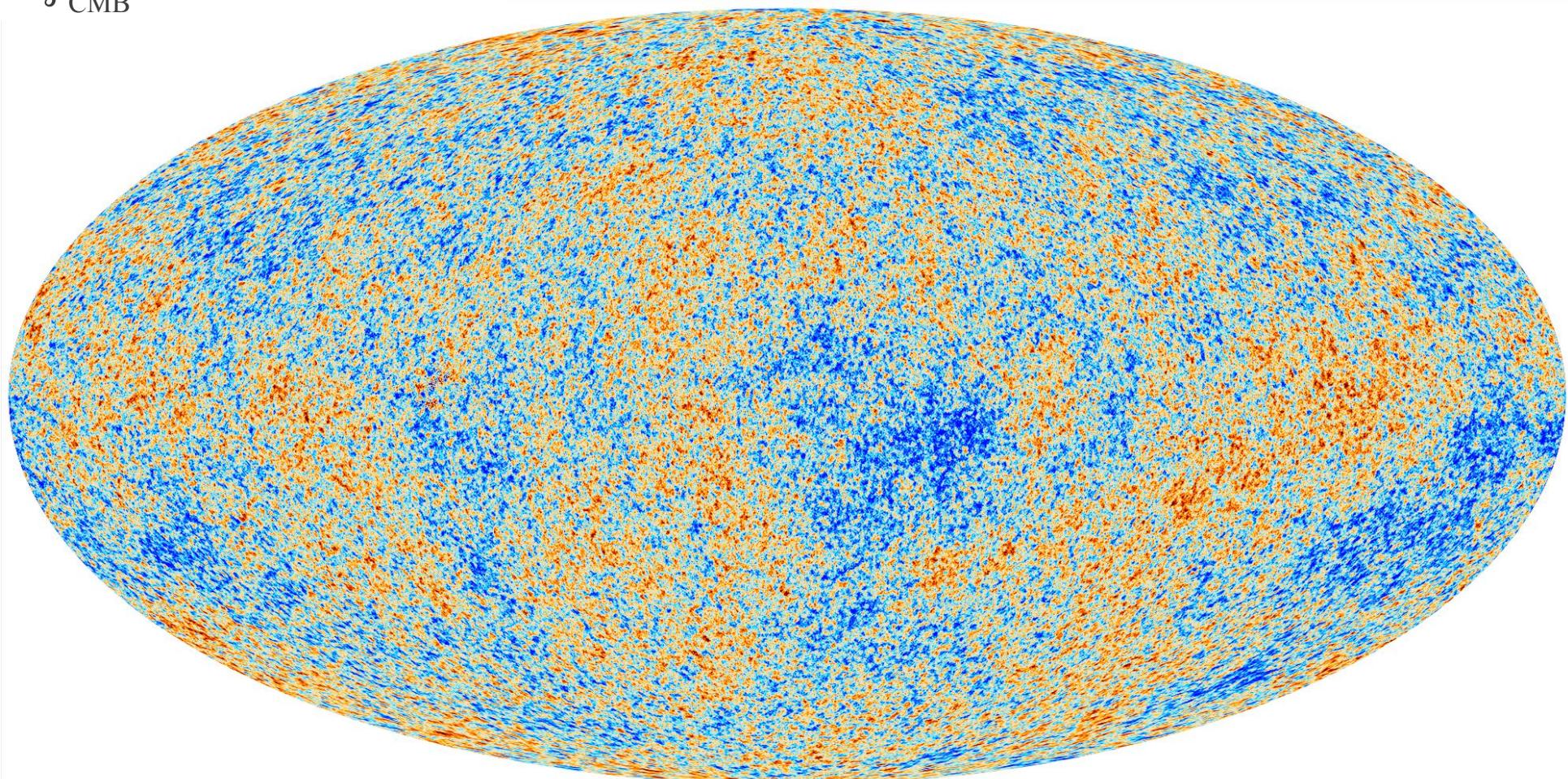
$$\text{Si } E > 20 \text{ EeV}, \Delta\theta \simeq \frac{100 \text{ EeV}}{E_p} \times 1^\circ$$

Fondo de radiación cósmica (CMB)

$$n_{\gamma_{\text{CMB}}} = 411 \text{ cm}^{-3}$$

$$\langle E_{\gamma_{\text{CMB}}} \rangle \approx 0.6 \text{ meV}$$

¿Es el Universo transparente?
Depende de la energía a la cual miremos



Propagación: efecto GZK (Greisen-Zatsepin-Kuz'min)

- Fotoproducción de piones por interacción con el CMB

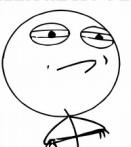
$$\begin{aligned} p^+ \gamma_{\text{CMB}} &\rightarrow p^+ \pi^0 \\ p^+ \gamma_{\text{CMB}} &\rightarrow (\Delta^+) \pi^0 \rightarrow p^+ \pi^0 \pi^0 \\ &\vdots \end{aligned}$$

- El truco: **el protón resultante es indistinguible del original**, sólo que con energía menor
- Eventualmente, esos piones neutros decaen en fotones (los llamados fotones GZK):

$$\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$$

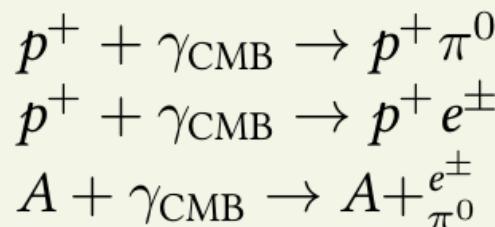
Calcule la “longitud de decaimiento” ($\beta \gamma c$) de un π^0 con $E=1 \text{ PeV}$

CHALLENGE ACCEPTED



Propagación: GZK y otros efectos

GZK



$$\begin{aligned} E_{p^+} &\gtrsim 30 \text{ EeV} \\ E_{p^+} &\gtrsim 3 \text{ EeV} \\ E_A &\gtrsim (1 + m_{e,\pi}/A m_p) E_{p^+} \end{aligned}$$

Expansión ($E_p \gtrsim 10^{21} \text{ eV}$)

$$\frac{1}{E_p} \frac{dE_p}{dt} = -\frac{1}{1+z} \frac{dz}{dt}$$

Fotodesintegración



Longitud de interacción

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_z} + \sum_i \frac{1}{n_{\text{CMB}} \sigma_i}$$

CHALLENGE ACCEPTED

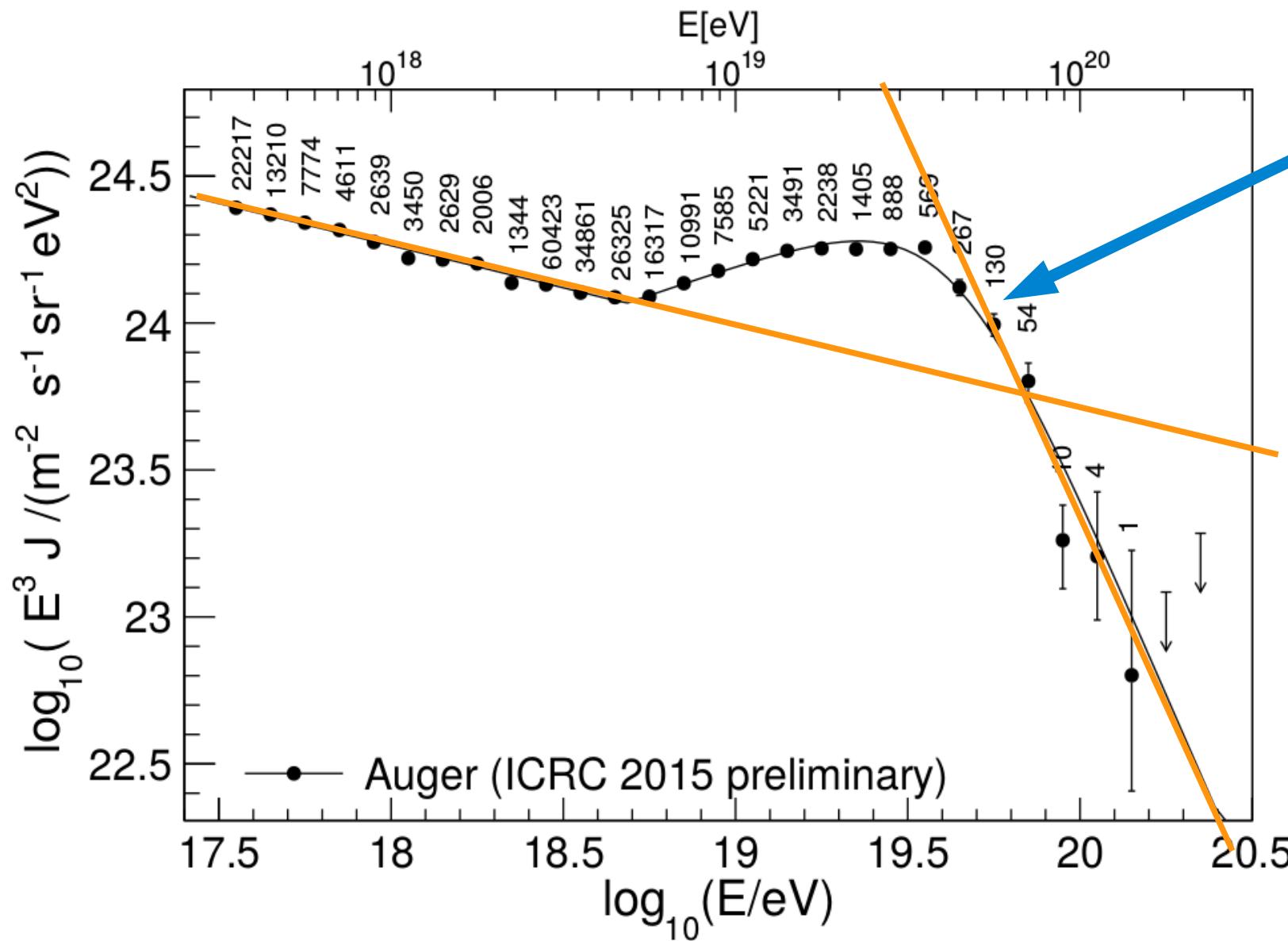


$$\begin{aligned} s &= m_p^2 + 2E_p E_{\text{CMB}} - 2\vec{p}_p \cdot \vec{p}_{\text{CMB}} \\ &= m_p^2 + 2E_p E_{\text{CMB}}(1 - \beta_p \cos \theta), \end{aligned}$$

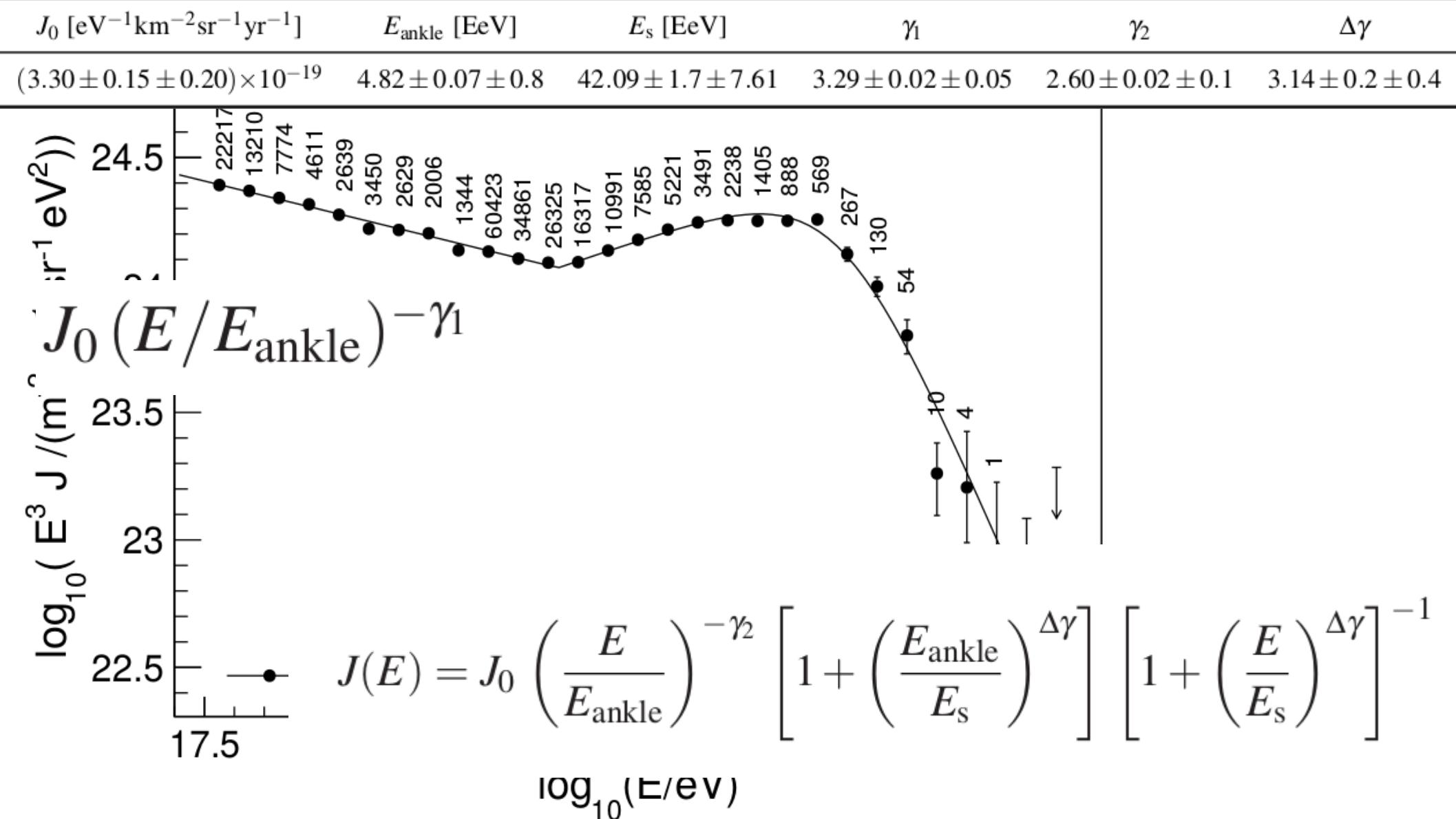
Verifique estos tres umbrales (Sugerencia: use el invariante de Mandelstam s)

Ver, p. ej, Harari et al, JCAP 2006(11), 012 (2006)

Espectro UHECR x E^3

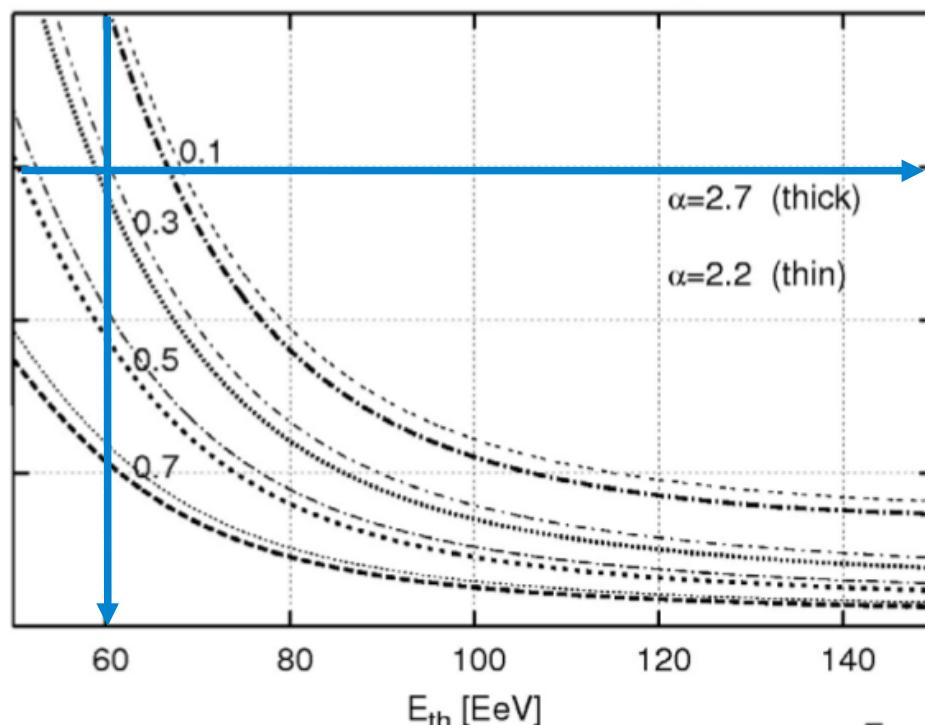


Espectro UHECR x E^3



Fraction of events from $x > D$

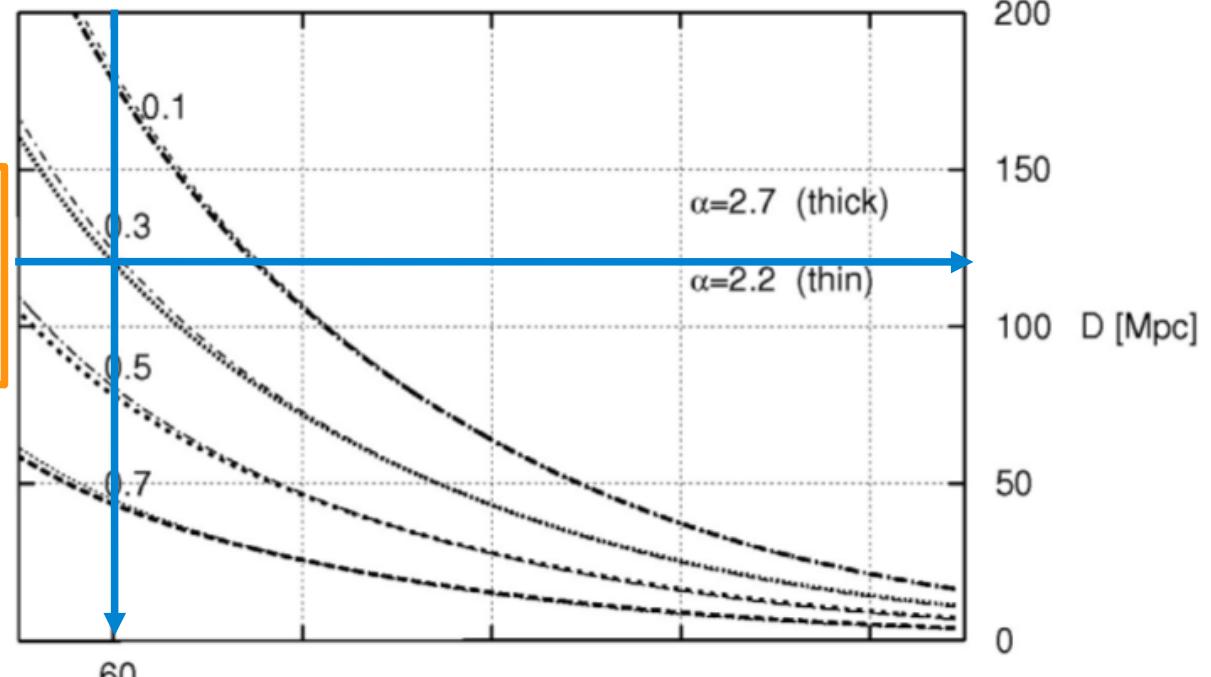
$$dN_s/dE = k E^{-\alpha}$$



Horizonte GZK

Si $E_{th} = 60$ EeV, el 70% de los protones provienen de $D < 150$ Mpc (30% a más de 150 Mpc)

Fraction of events from $x > D$, Fe source, $dN_s/dE = k E^{-\alpha}$



Si $E_{th} = 60$ EeV, el 70% de los hierros provienen de $D < 120$ Mpc (30% a más de 120 Mpc)

Para otros núcleos

