

- **Unidad** 01 – Fenomenología de Astropartículas
- **Clase** U01
- **Fecha** 28 May 2019
- **Cont** Presentación, introducción
- **Cátedra** Asorey
- **Web**

<https://gitlab.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

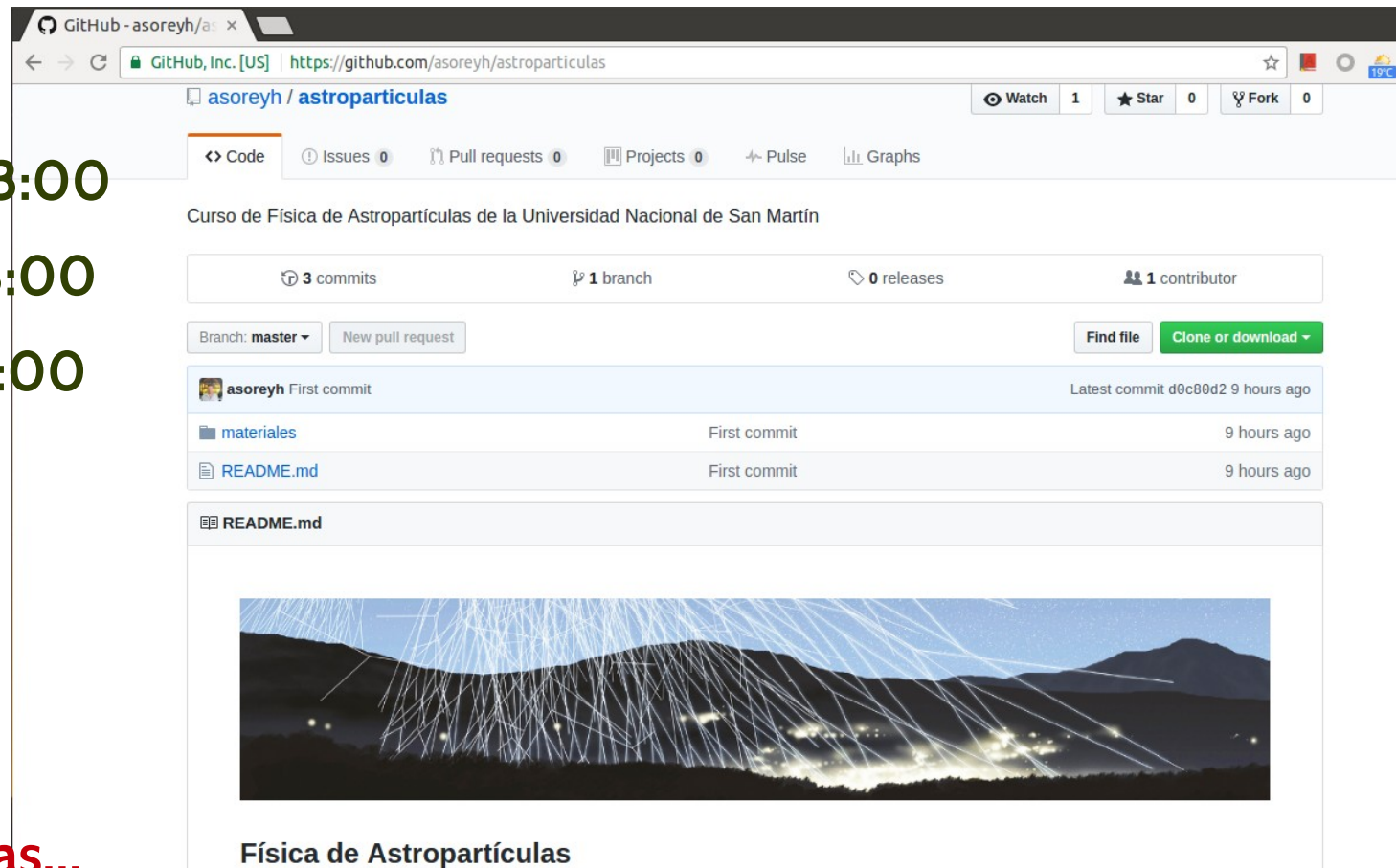
- **Las clases:**

- **Martes 09:00 a 13:00**
- **Martes 14:00 a 18:00**
- **Jueves 14:00 a 18:00**

- **La Bibliografía:**

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

- **La página: clases, guías...**



The screenshot shows a GitHub repository page for 'asoreyh/astroparticulas'. The repository is titled 'Curso de Física de Astroparticulas de la Universidad Nacional de San Martín'. It has 3 commits, 1 branch, 0 releases, and 1 contributor. The current branch is 'master'. There are buttons for 'New pull request', 'Find file', and 'Clone or download'. The repository contains a folder named 'materiales' and a file named 'README.md', both with their first commit 9 hours ago. The README.md file contains a large image of a night sky with a network of white lines connecting various points, overlaid on a landscape with mountains and city lights.

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

- **La máquina virtual**
Lubuntu 18.04 en virtualbox

Formas de Aprobación...

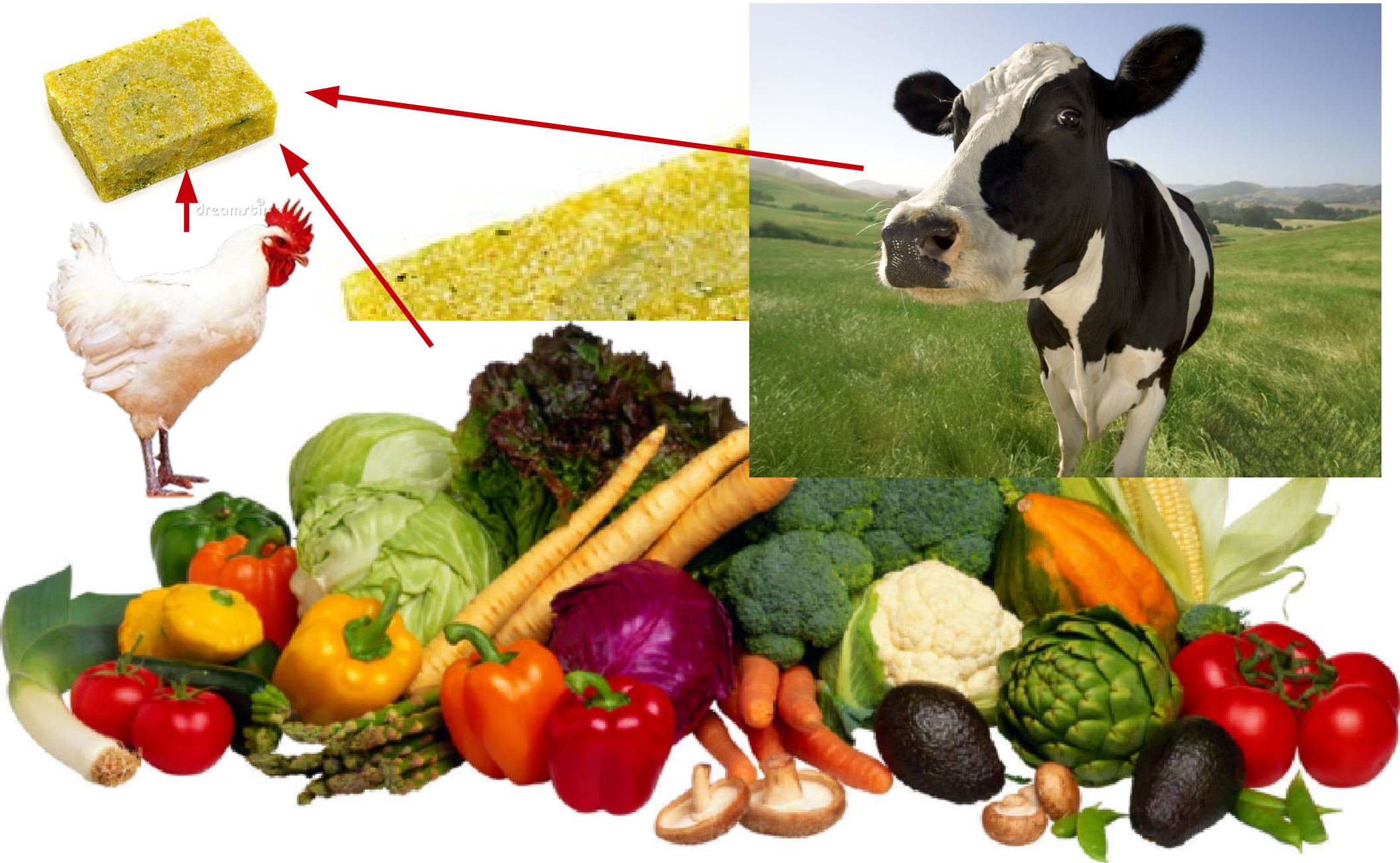
- **Evaluación continua (60%)**
 - Participación en clases
 - Entrega de prácticos
 - Charla con tema a elección
- **Trabajo final integrador, a definir (40%), ó**
- **Promoción, cumpliendo todas estas condiciones:**
 - Entrega del 100% de los prácticos en tiempo y forma
 - Entrega del 100% de los informes 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

- **Evaluación** 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

- **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...
 - Es una materia introductoria, una especie de glosario
 - Cubriremos un amplio rango de tópicos en poco tiempo
 - Para profundizar → ver referencias, papers y libros
- Exposición final
 - tópico de la materia relacionado con su tesis, a discutir con la cátedra. Será presentado en una jornada de integración con participación de miembros de ITeDA en fecha a definir

Contenidos: la magia de Knorr™

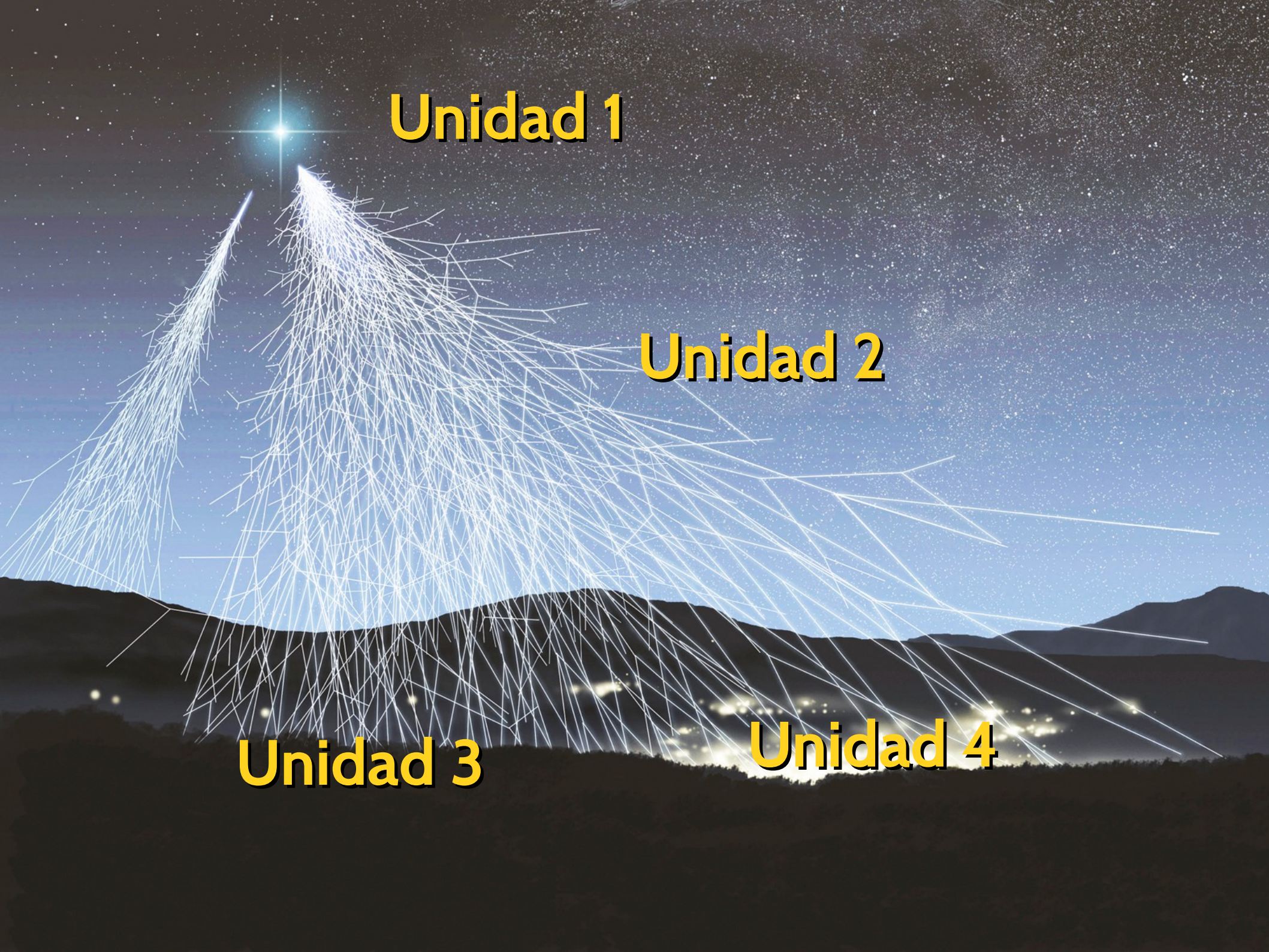


Unidad 1

Unidad 2

Unidad 3

Unidad 4

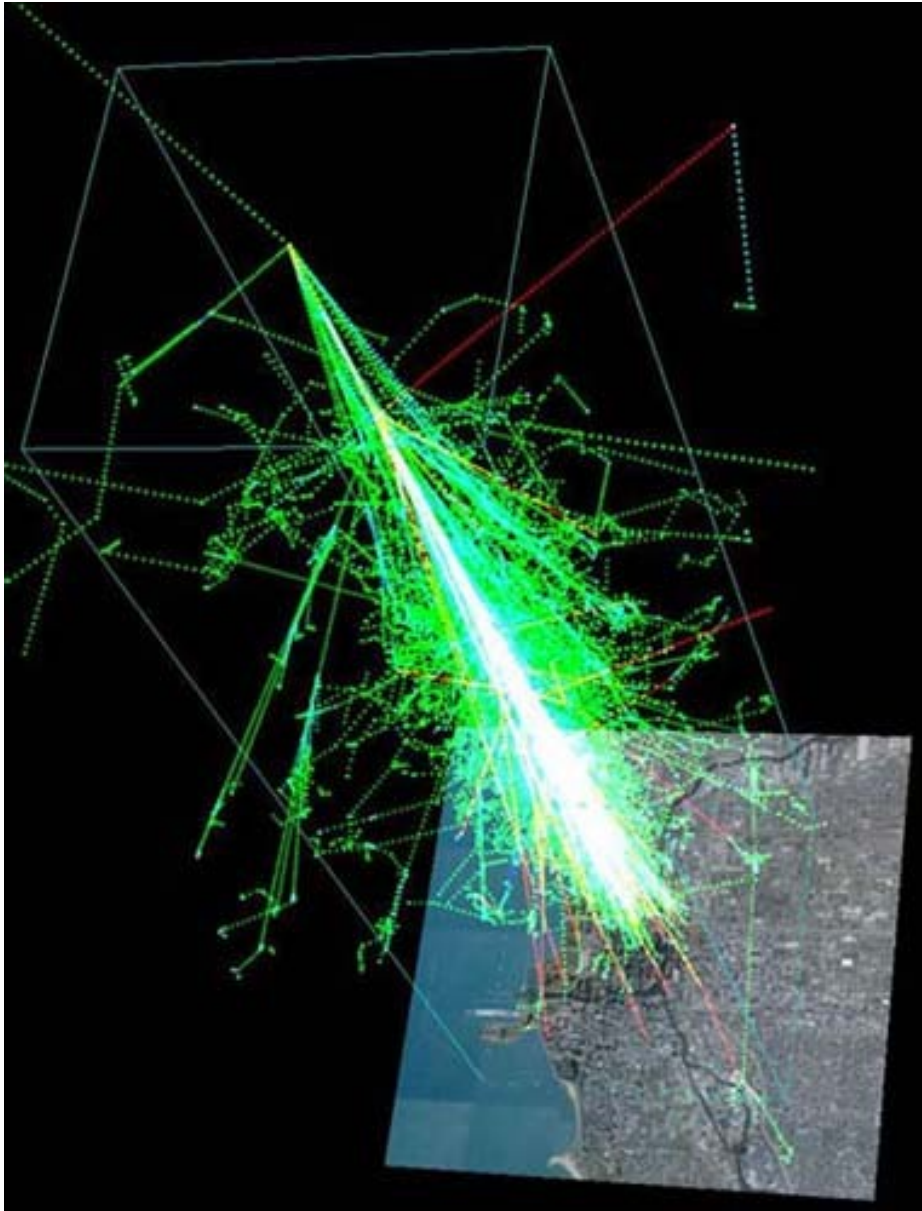


Unidad 1: Fenomenología de Astropartículas

- 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. (U04: *Transporte heliosférico y magnetosférico*).
- **Laboratorio unidad 1:** Propagación en el medio intergaláctico con CrPropa.



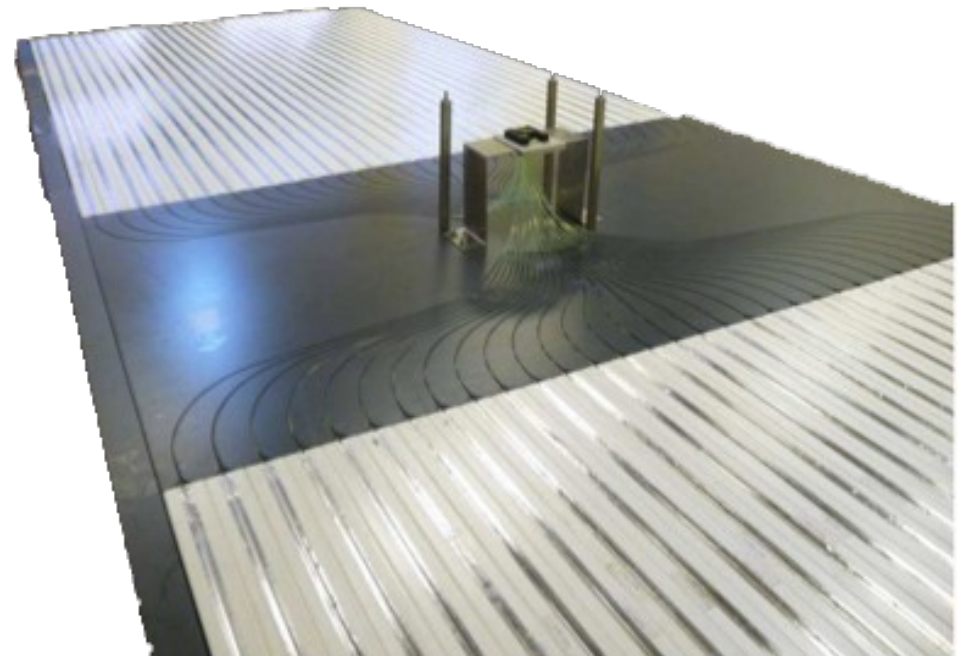
Unidad 2: Lluvias Atmosféricas Extendidas



- 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 unidad 3: Detección de AP en un centellador plástico.**



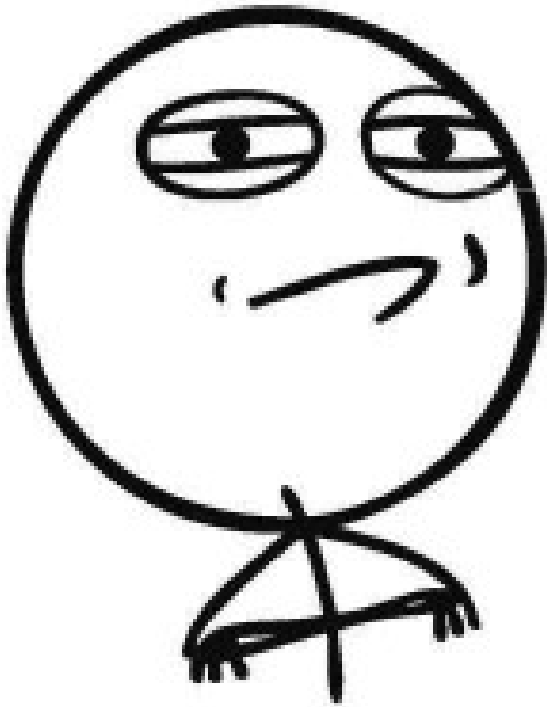
• Unidad 4: Aplicaciones y análisis de datos



- 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.**

Tarea para el hogar

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

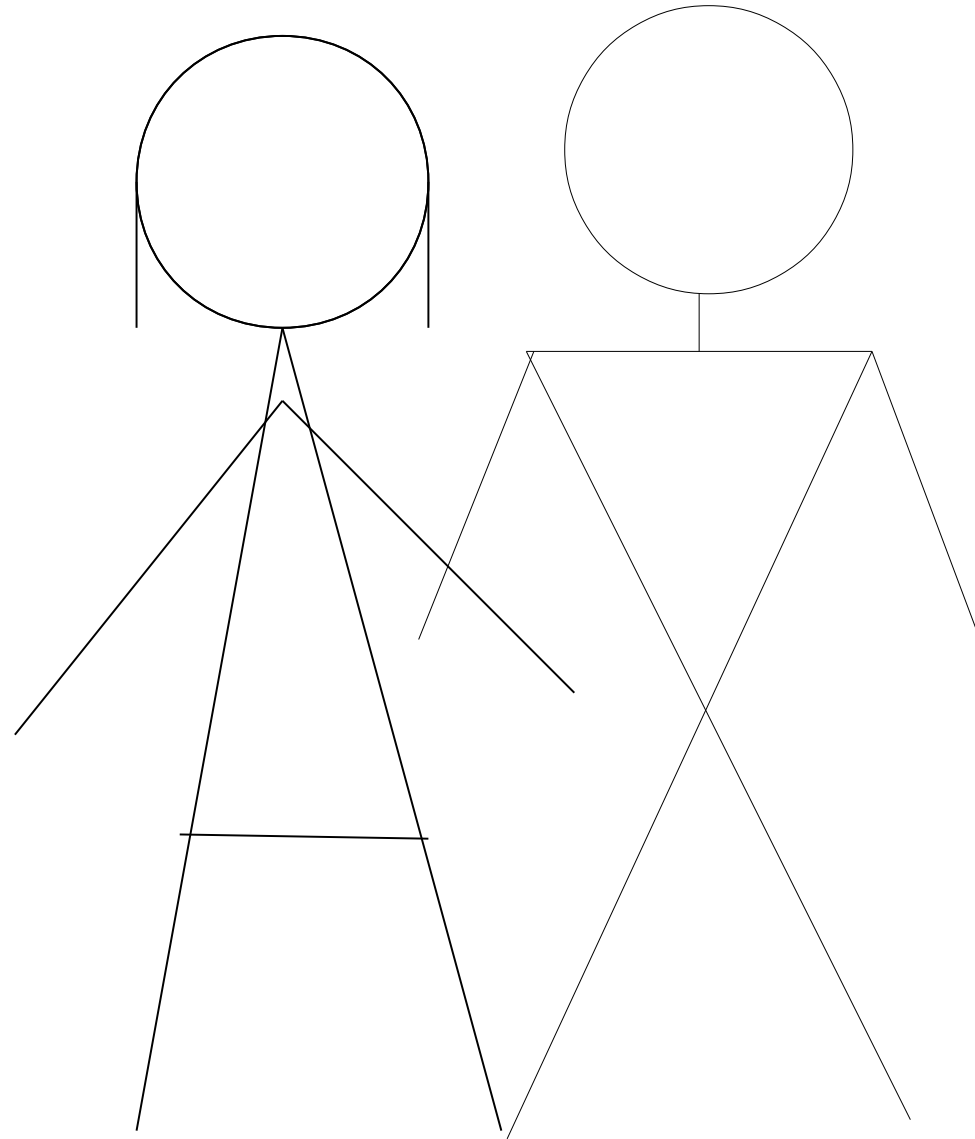
 Springer

- *“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



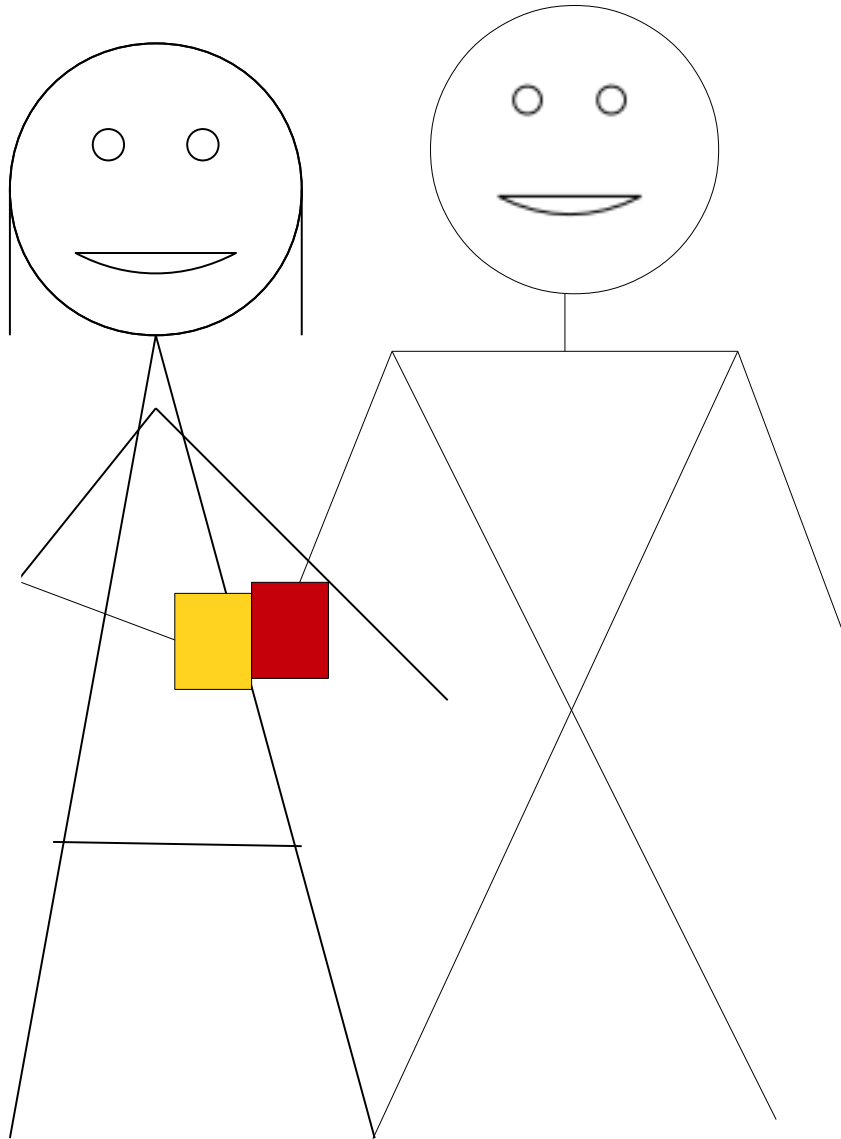
Para ello usamos modelos simplificados...



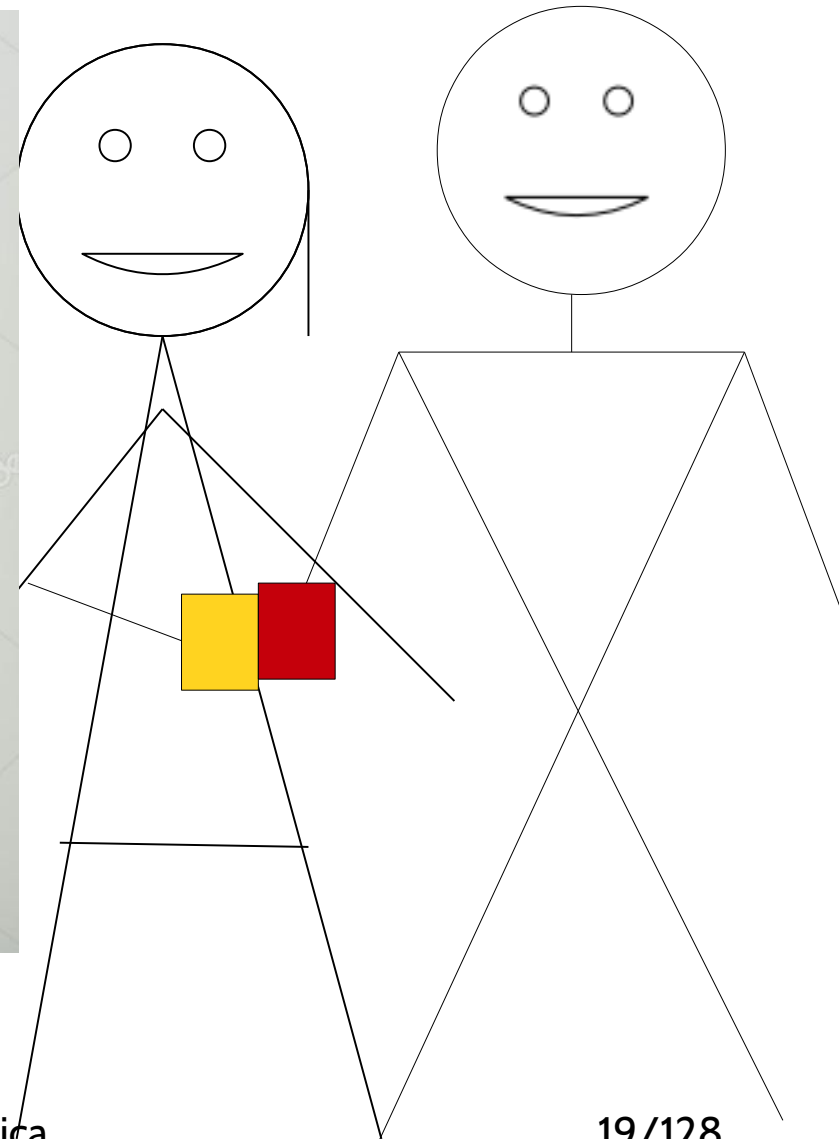
Para mejorar al modelo debemos contrastarlo



Que podrían ser mejorados ...



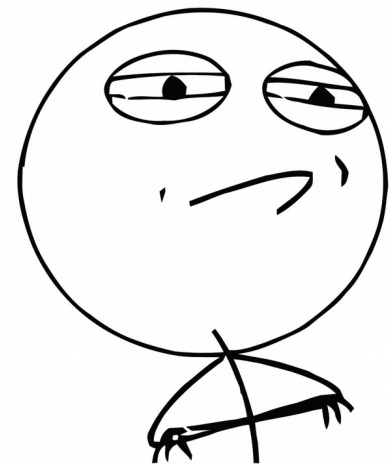
**Pero seguro estarán muy lejos de la realidad....
(¡por suerte!)**



El Universo extremo

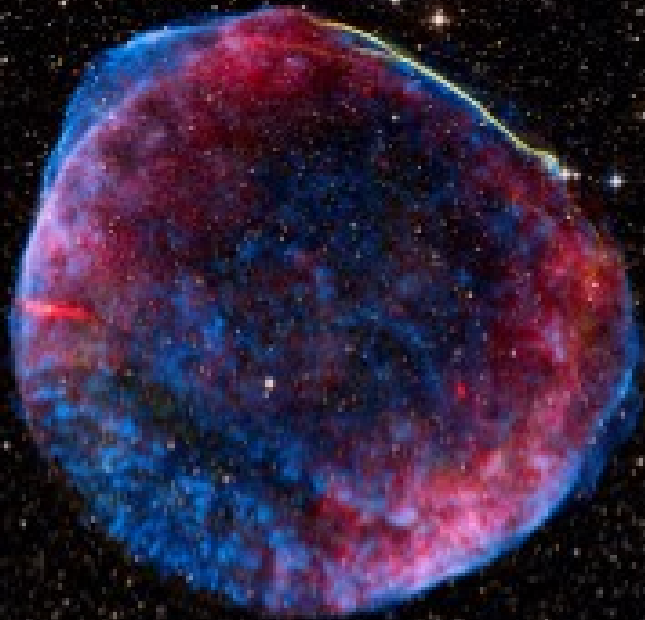
Las Astropartículas son testigos
presenciales de estos eventos del
Universo Extremo

CHALLENGE ACCEPTED



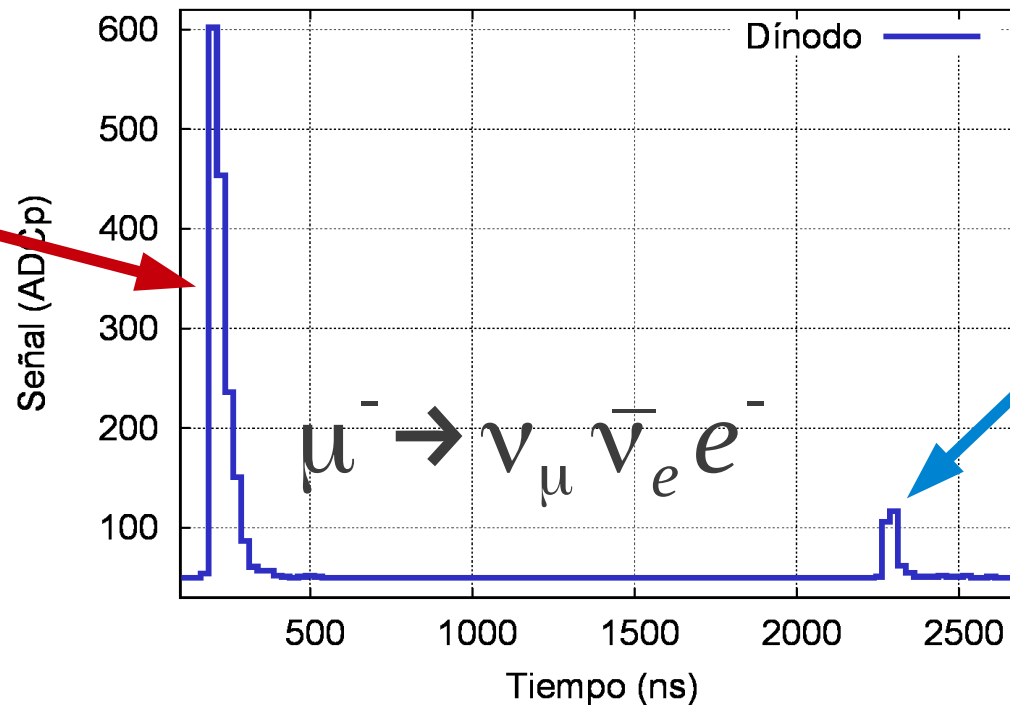
Alcances

- Comienza en un remanente de supernova



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

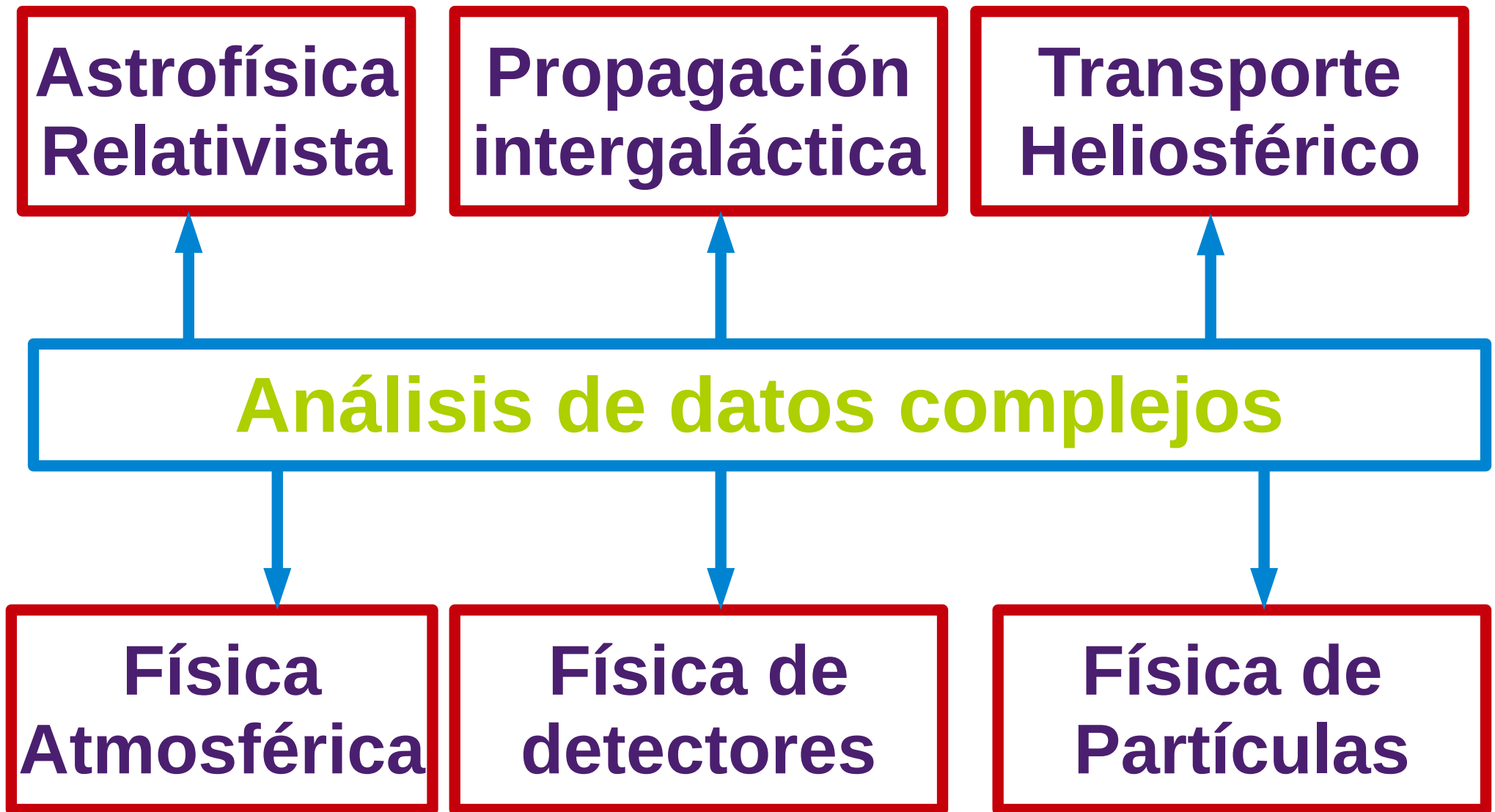
50	50	50
61	49	54
139	49	602
91	51	454
59	50	236
60	50	151
53	50	87
53	50	61
50	50	57
51	51	57
50	50	52
51	49	51
51	50	50
50	49	51
51	50	52
50	50	51
# t	4	30008562
# c	663486982	



50	50	50
49	51	51
62	50	106
53	50	117
51	51	62
50	50	55
50	50	51
53	51	51
51	50	51
49	49	52
51	50	51
51	49	51
51	50	52
50	49	50
50	51	50
52	50	51
# t	4	30008646
# c	663486983	

$$\Delta t = 84 \times 25 \text{ ns} = 2100 \text{ ns}$$

$$\Delta p = 1$$



- **El principio de la relatividad**

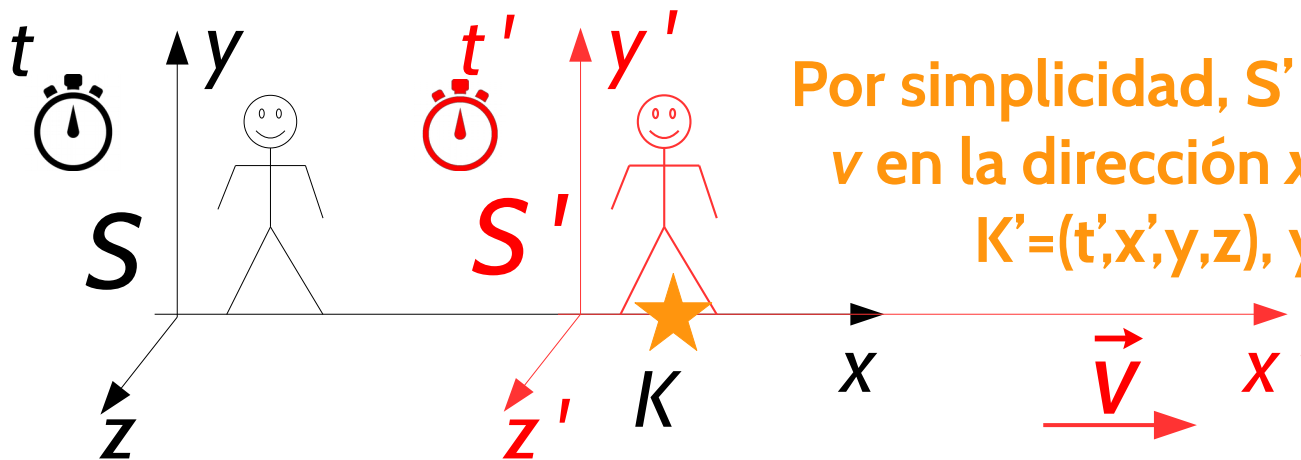
Las leyes que gobiernan los cambios en los estados de los sistemas físicos son iguales para todos los observadores inerciales

- **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 $y'=y$

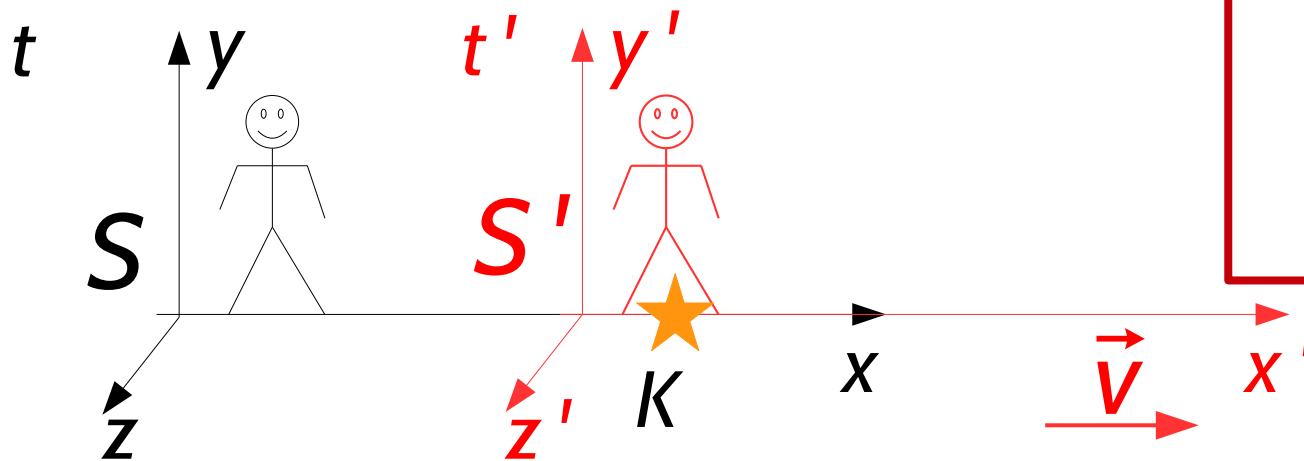
Transformaciones de Lorentz

- 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 $y'=y$

$$\begin{aligned}t' &= \gamma \left(t - \frac{1}{c^2} v x \right) \\x' &= \gamma (x - v t) \\y' &= y \\z' &= z\end{aligned}$$

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



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 ($\mathbf{C} = \mathbf{0}$)
 - Preservan el origen (invariante) \rightarrow Rotaciones y Boosts

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

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

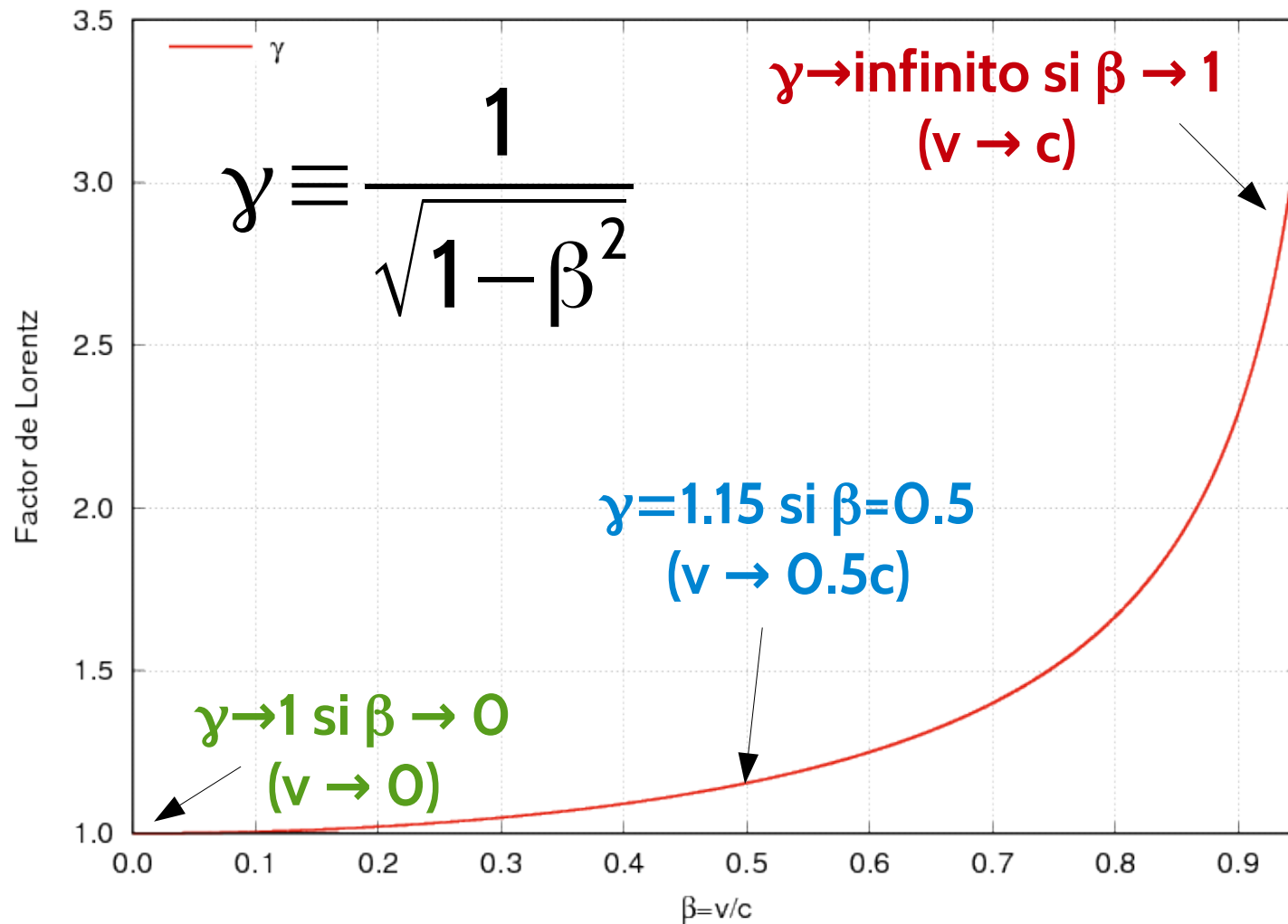
$$\Lambda \equiv \Lambda_v^\mu = \begin{bmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- Y luego, $S \rightarrow S'$:

$$\begin{bmatrix} t' \\ x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

- 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

- Estudiemos la función gamma



Aproximación Newtoniana, $v \rightarrow 0$

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

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

$$x' = \gamma (x - vt) \rightarrow x' \simeq x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

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

Dilatación temporal y Contracción espacial

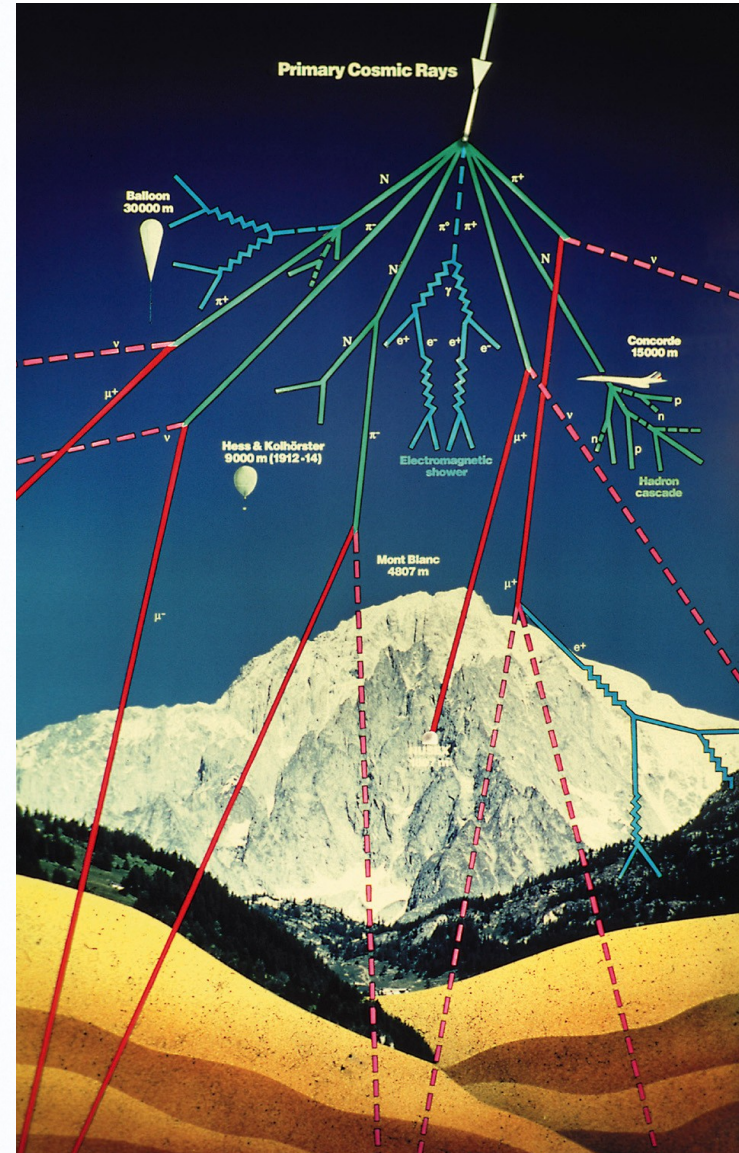
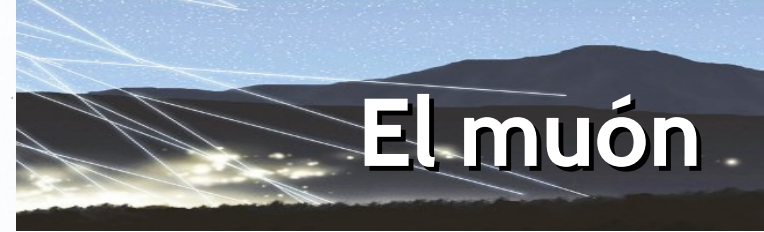
- El lapso de tiempo entre dos eventos no es invariante de un observador a otro en distintos marcos de referencia

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

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

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

El muón



- Muón: decae en electrones en un tiempo promedio de $\tau = 2.2 \mu\text{s}$ ($2.2 \times 10^{-6} \text{s}$).

$$\bar{\mu} \rightarrow e^- \gamma \bar{\nu}_e$$

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

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

- Algún μ decae en $2 \mu\text{s}$ (p.ej) \Rightarrow este es en el marco de referencia del μ (t'). $\Rightarrow x' = t' c \beta = 594 \text{ m} = x'$

- Esto es un frame S' . ¿Acuáto corresponde esto en S ?

yo que $t' = 0 \Rightarrow t = 0$ (por construcción) tenemos:

$$x' = x/\gamma \Rightarrow x = x' \cdot \gamma \Rightarrow x = 7 \cdot 594 \text{ m} \Rightarrow x = 4158 \text{ m}$$

- y el tiempo t ? las cosas serán consistentes.
- Antes de decaer el muón recorre más de 4 km en nuestro marco de referencia.



Muones producidos en la atmósfera se observan en el piso

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 $u'=dx'/dt'$

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

Si $u \ll c \Rightarrow u' \simeq u - v$. 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:

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

+ - - -

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

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

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

- 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 comóvil es el tiempo propio: es independiente de las coordenadas.

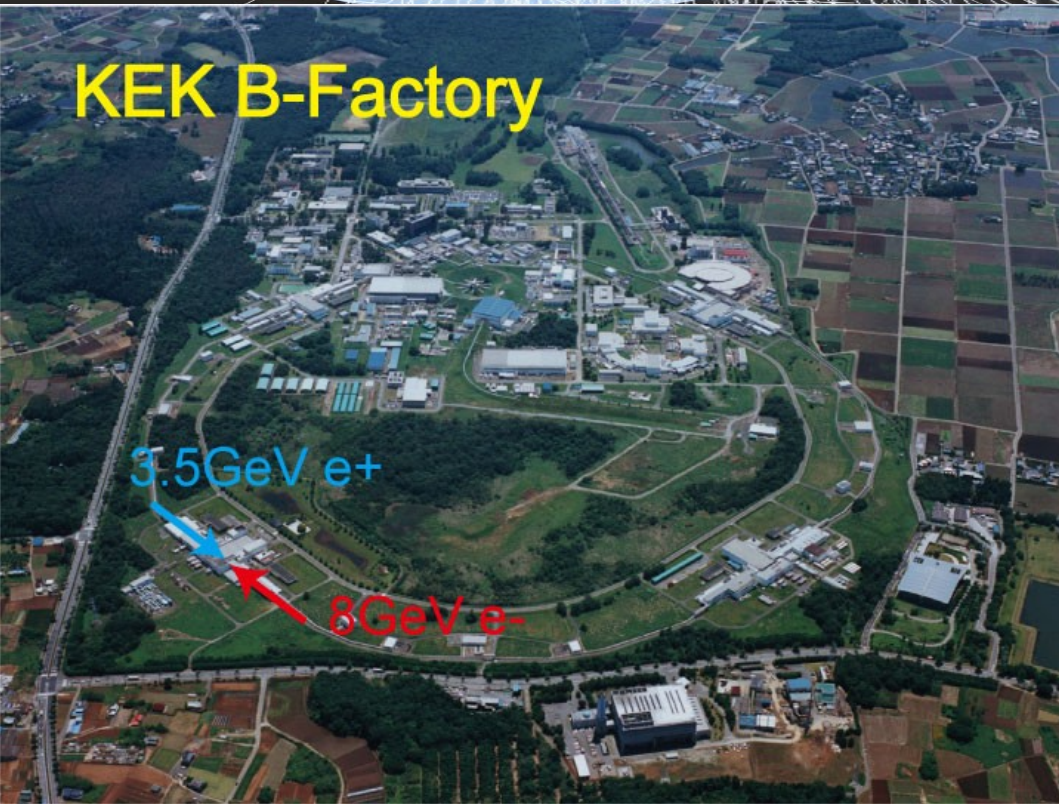
$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 = ds'^2 = c^2 d\tau^2$$

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

Tiempo propio

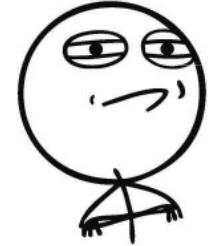
$$dt = \gamma d\tau$$

Ejemplo real



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

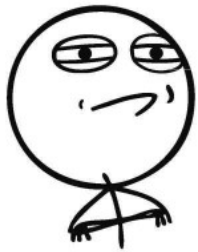
CHALLENGE ACCEPTED



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

Tareíta:

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

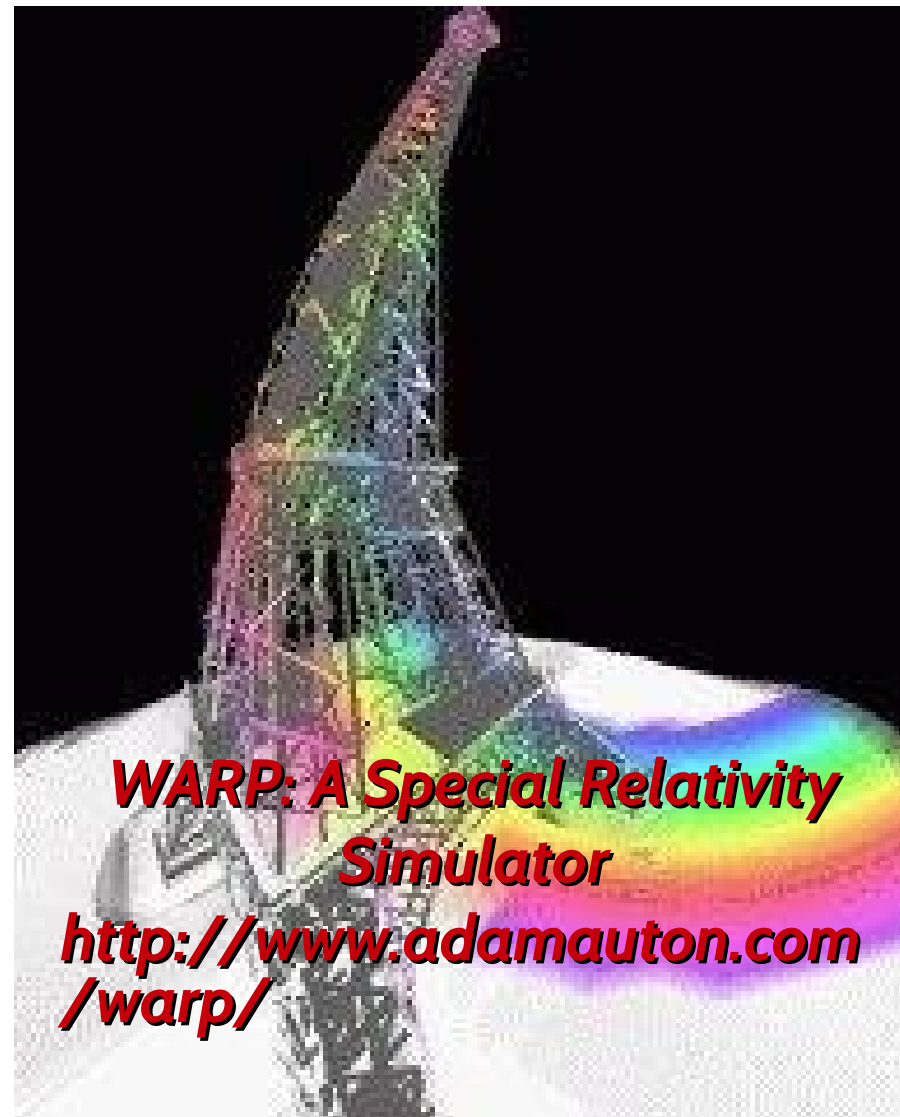


Jugando con la velocidad de la luz



A slower speed of light

<http://gamelab.mit.edu/games/a-slower-speed-of-light/>



WARP: A Special Relativity Simulator

<http://www.adamauton.com/warp/>

Otro disclaimer: tensores

- Convención de Einstein en notación covariante
 - Índices latinos, i, j, k, \dots 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: $\mathbf{g} \mathbf{g}^{-1} = \delta_{\nu}^{\mu}$

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

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

- 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 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

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

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

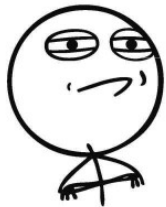
- **Los postulados de Einstein implican cambios profundos en la concepción de la Naturaleza.**
 - Estos afectan nuestra percepción de distancia y lapso temporal, de espacio y tiempo.
- **Las transformaciones de Lorentz indican como transforman las leyes de la física entre dos marcos de referencia inerciales.**
 - 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?

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

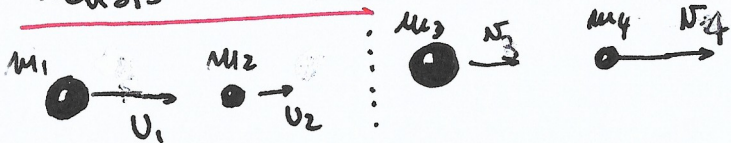
- E: ¡Ahh! ¿Pero cuál t estarás usando en tu derivada? ¿En que marco de referencia?
- N: ¿Cómo? ¿el tiempo no es absoluto? ¿Acaso t no es el mismo para todos los observadores inerciales?
- E: Jejejeje.... (sonrisa con mirada pícaro)



Pasen y vean

Colisiones (v es inicial, v es final, puede haber cambio de masas).

Análisis Clásico



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

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 = m_3 v_3 + m_4 v_4 \quad (1)$$

En S'

$$m_1 u_1' + m_2 u_2' = m_3 v_3' + m_4 v_4' \quad (2)$$

y $v_3' = v_3 - v$ (3) (v es la vel. relativa entre S y S')

En S'

$$m_1 u_1 + m_2 u_2 - (m_1 + m_2) v = m_3 v_3 + m_4 v_4 - v(m_3 + m_4)$$

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

(4) $m_1 + m_2 = m_3 + m_4$ Conservación de la masa.

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

Análisis Relativista

Imaginemos que en el caso relativista $\vec{p} = m\vec{v}$ y $\vec{p}' = m\vec{v}'$ (Suponemos paralelos a Post. 1 y $m = m'$) \Rightarrow (1) y (2) se mantienen. Cambiando (3) por lo relativista:

$$v_3' = \frac{v_3 - v}{1 - v_3 v / c^2} \quad (5)$$

\Rightarrow reemplazando en (2):

$$m_1 \frac{u_1 - v}{1 - u_1 v / c^2} + m_2 \frac{u_2 - v}{1 - u_2 v / c^2} = m_3 \frac{v_3 - v}{1 - v_3 v / c^2} + m_4 \frac{v_4 - v}{1 - v_4 v / c^2}$$

¿y ahora? v no se cancela, entonces esta ecuación (conservación de la cant. de movimiento) no vale en general! o' tendríamos que ajustar los pesos para ajustar.

La definición estándar no se verifica.

Principios de conservación

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

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

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:

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

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

- 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 algebraica (como ejercicio)

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

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

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

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

Donde $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ y $\beta = v/c$

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

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

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 Algebraica (Problema enloquece):

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

Es una cantidad invariante derivada de la conservación del momento.

- Con la nueva definición de p,

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

- aparece una nueva magnitud conservada

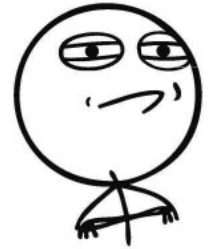
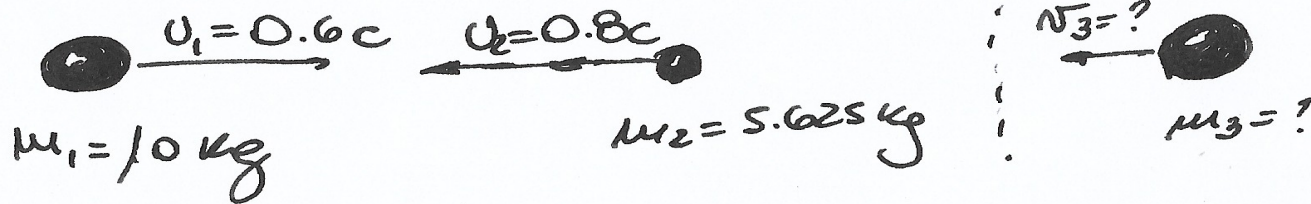
$$m \gamma = \frac{m}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{m}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

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

Choque inelástico: $m_3 > m_1 + m_2$!! energía a masa

CHALLENGE ACCEPTED

Colisión inelástica.



Claramente distintos: $m_3 = 15.625 \text{ kg}$ y $v_3 = 0.0170$.

Relativísticamente:

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

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

$$\Rightarrow \cancel{p_T^i} = 7.5 \text{ kg}c - 7.5 \text{ kg}c \Rightarrow \cancel{p_T^i} \quad p_T^i = 0 \quad \Rightarrow \underline{v_3 = 0}$$

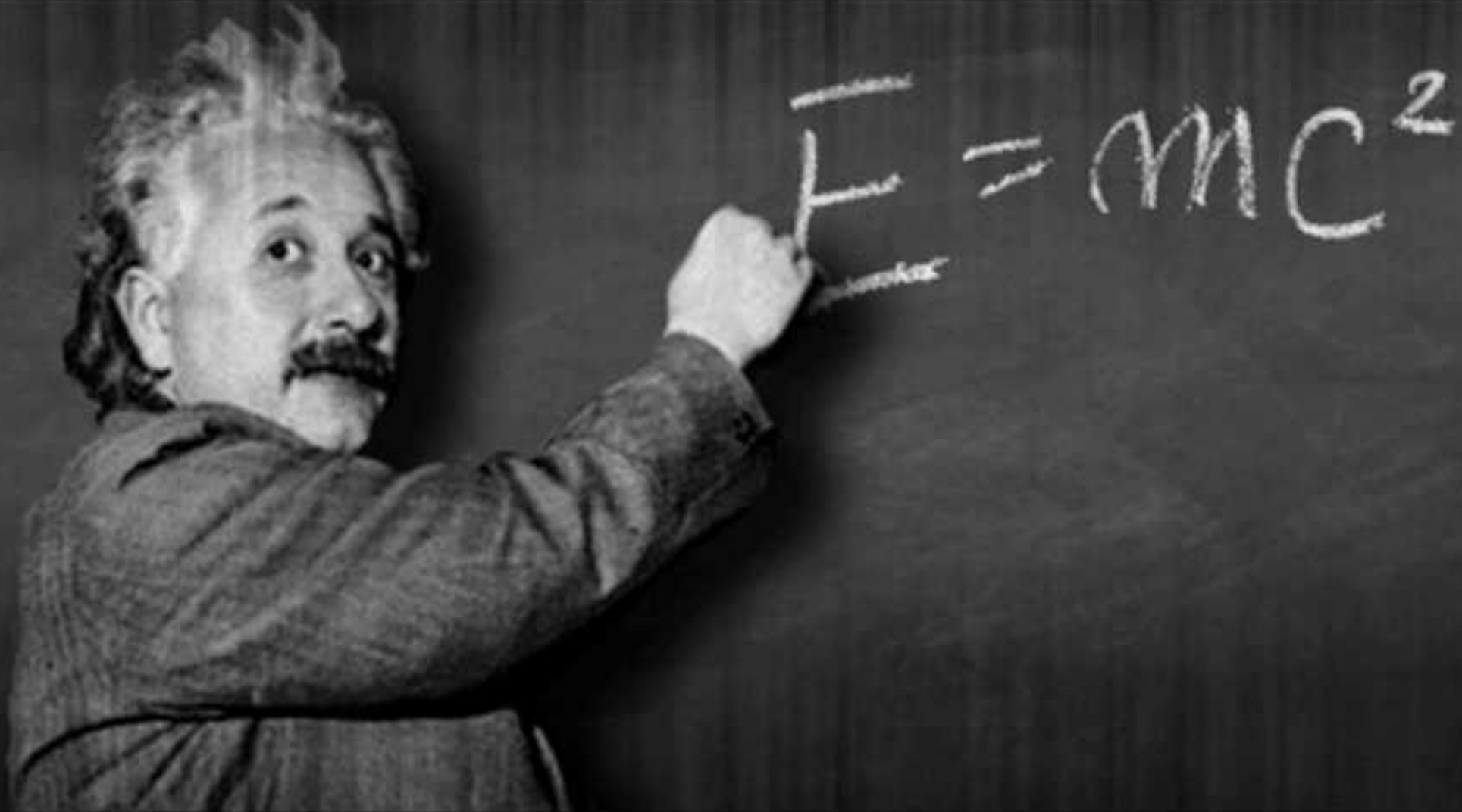
$$\Rightarrow \boxed{p_f = 0} \quad \text{y} \quad \gamma_3 = 1$$

Conservación energía.

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

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

Gracias Isaac, seguí participando....



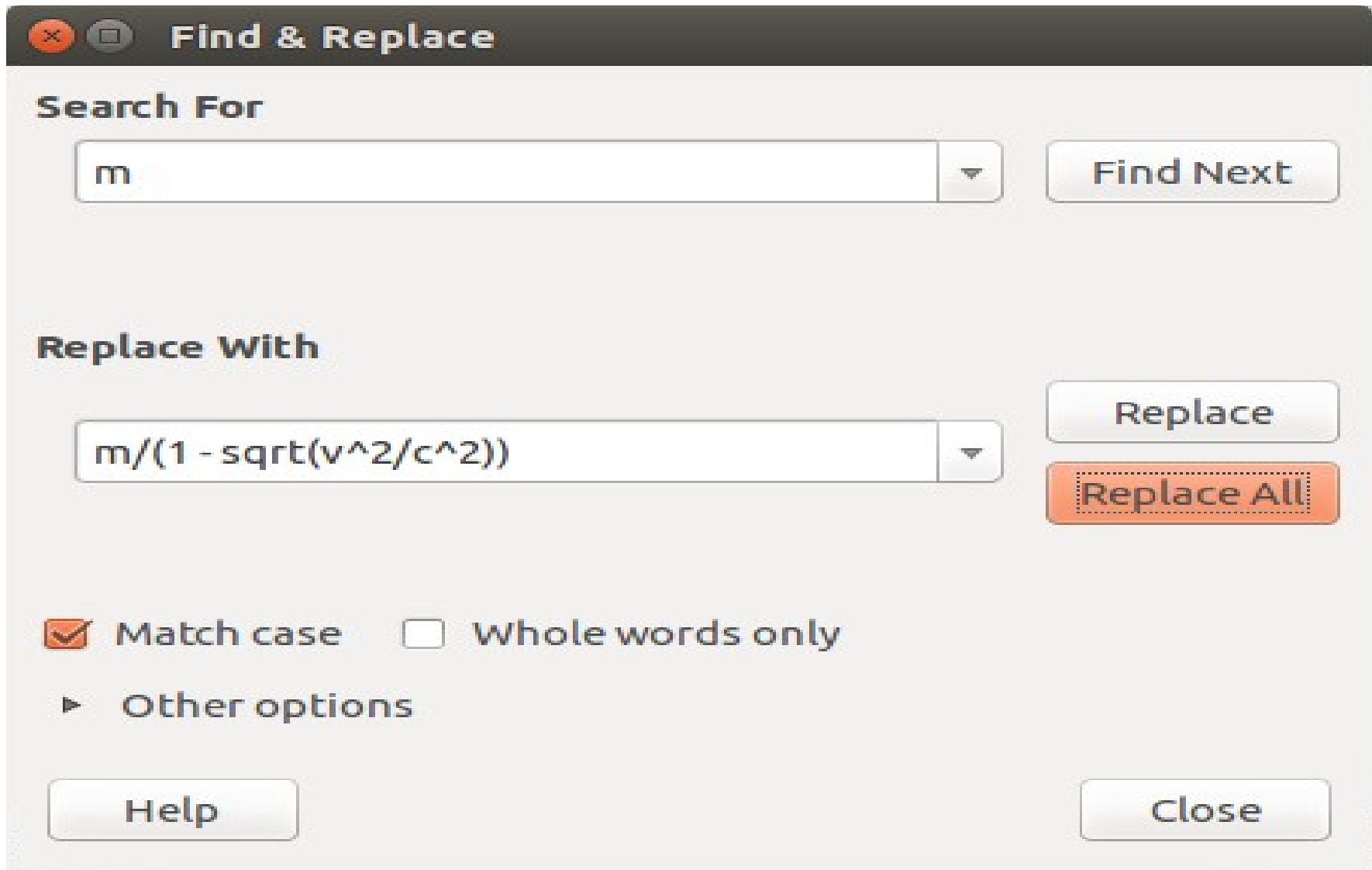
Según Richard Feynmann....

- *“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

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

- Luego, la famosa fórmula, si $v=0$,

$$E = m c^2$$

- Desarrollemos para $v \rightarrow 0$:

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



CHALLENGE ACCEPTED



Otro disclaimer: cos y contras

- Cada vector contravariante (vector) tiene asociado un vector covariante (forma), gracias a la métrica (contra \rightarrow co)

(“el tensor métrico sube y baja índices”) $a_{\mu} = g_{\mu\nu} a^{\nu} = (t, -\mathbf{r})$

- La transformación inversa co \rightarrow contra $a^{\mu} = g^{\mu\nu} a_{\nu} = (t, \mathbf{r})$

- ¿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:

$$a'^{\mu} = \Lambda_{\nu}^{\mu} a^{\nu}, \quad a''^{\rho} = \Lambda'{}^{\rho}_{\mu} a'^{\mu}$$

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

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

$$a''^{\rho} = \Lambda'{}^{\rho}_{\nu} a^{\nu}$$

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

$$\mathbf{a}' \cdot \mathbf{b}' = a'_{\mu} b'^{\mu}$$

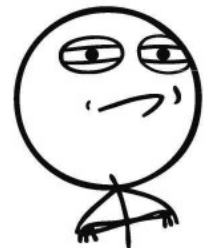
$$\mathbf{a}' \cdot \mathbf{b}' = (\Lambda^{-1})_{\mu}^{\sigma} a_{\sigma} (\Lambda)^{\mu}_{\rho} b^{\rho}$$

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

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

$$\mathbf{a}' \cdot \mathbf{b}' = a_{\rho} b^{\rho} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$$

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

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

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

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

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

luego

$$c^2 p^\mu p_\mu = E^2 - (pc)^2 = m^2 c^4$$

¿y si la partícula no tiene masa?

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

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

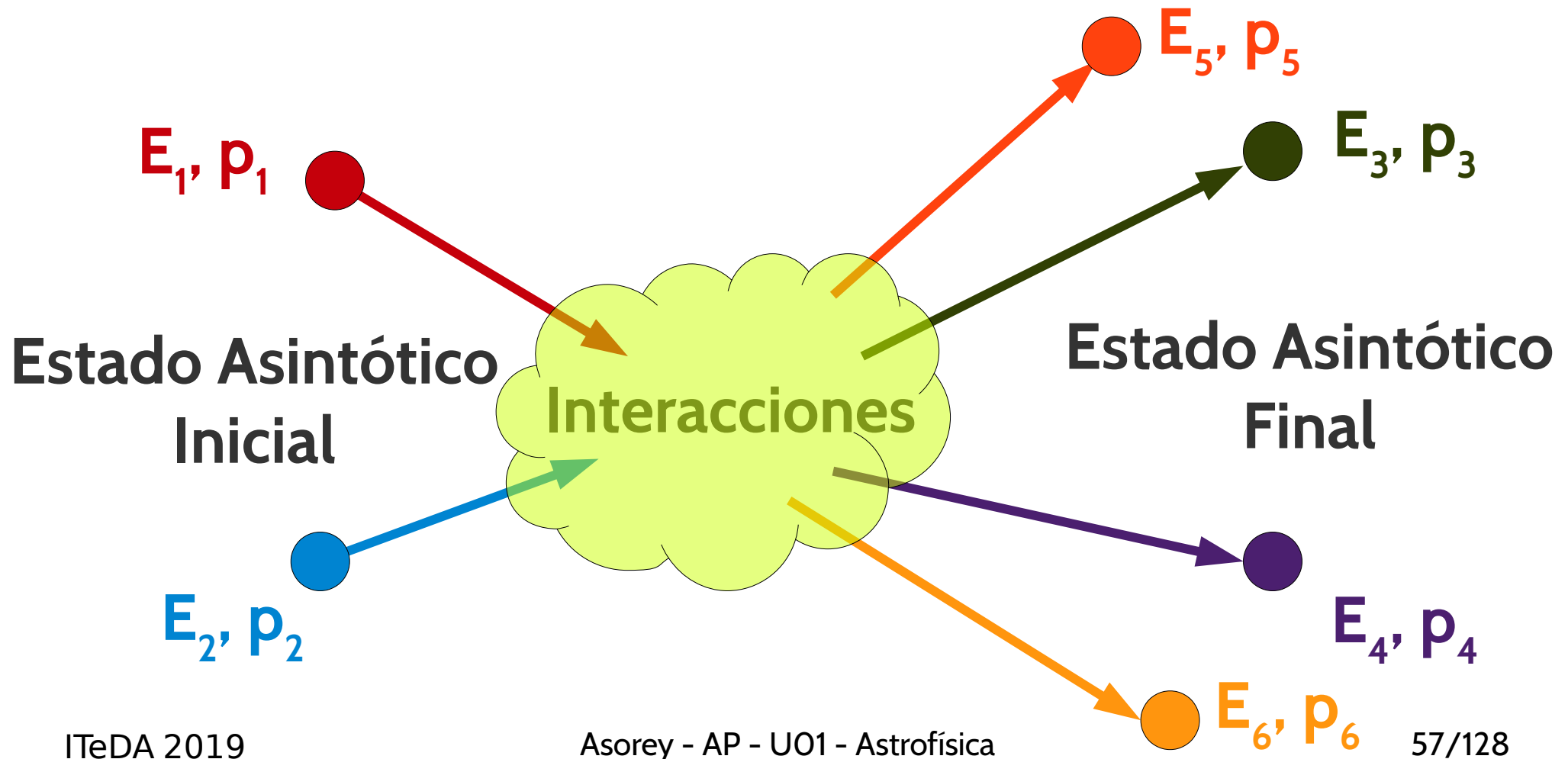
**Cantidad de
movimiento de
partículas sin masa**

$$E = pc$$

- 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**

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

- **La cantidad de movimiento total se conserva**

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

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

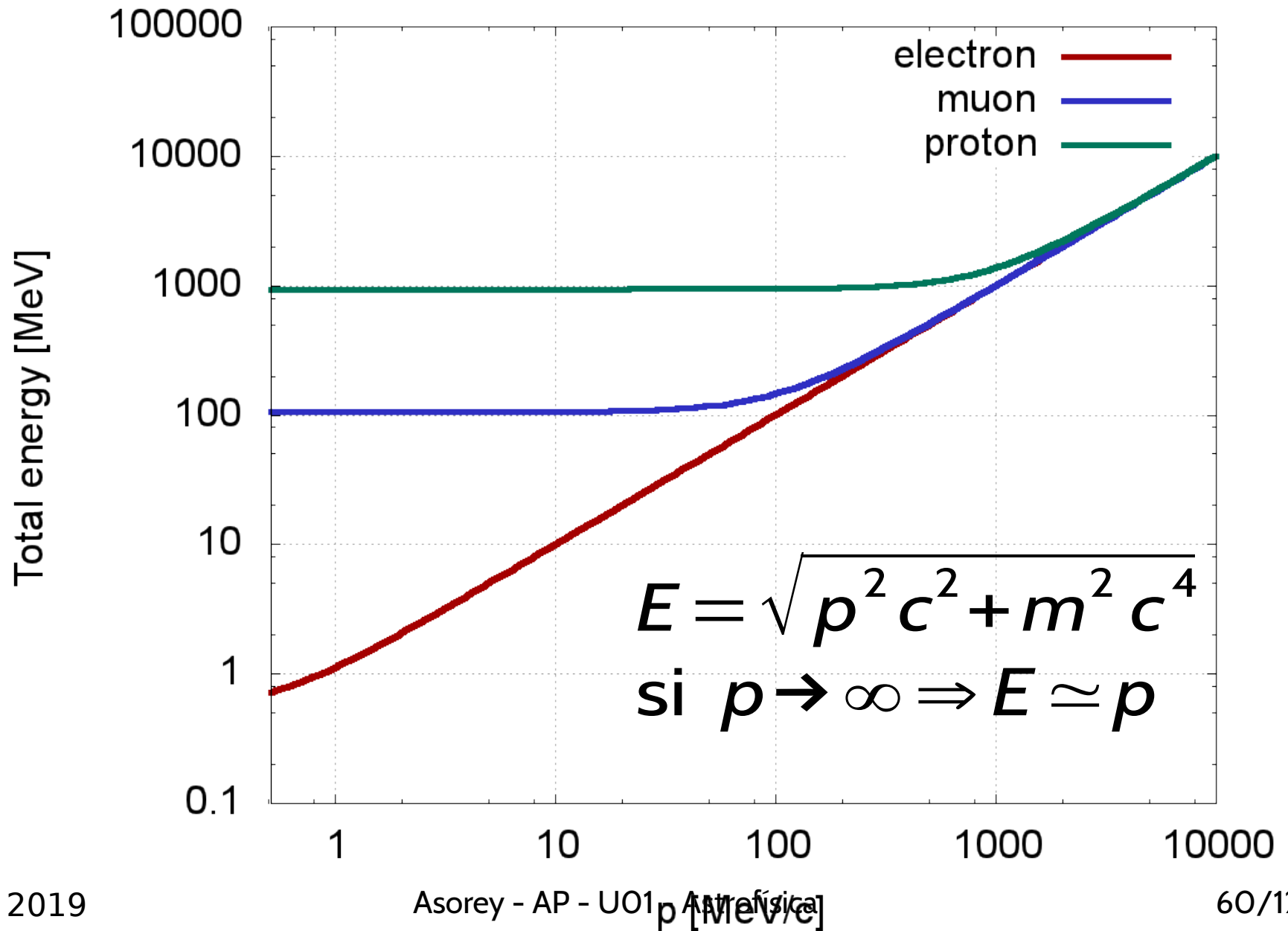
$$E^2 - (p c)^2 = (m c^2)^2$$

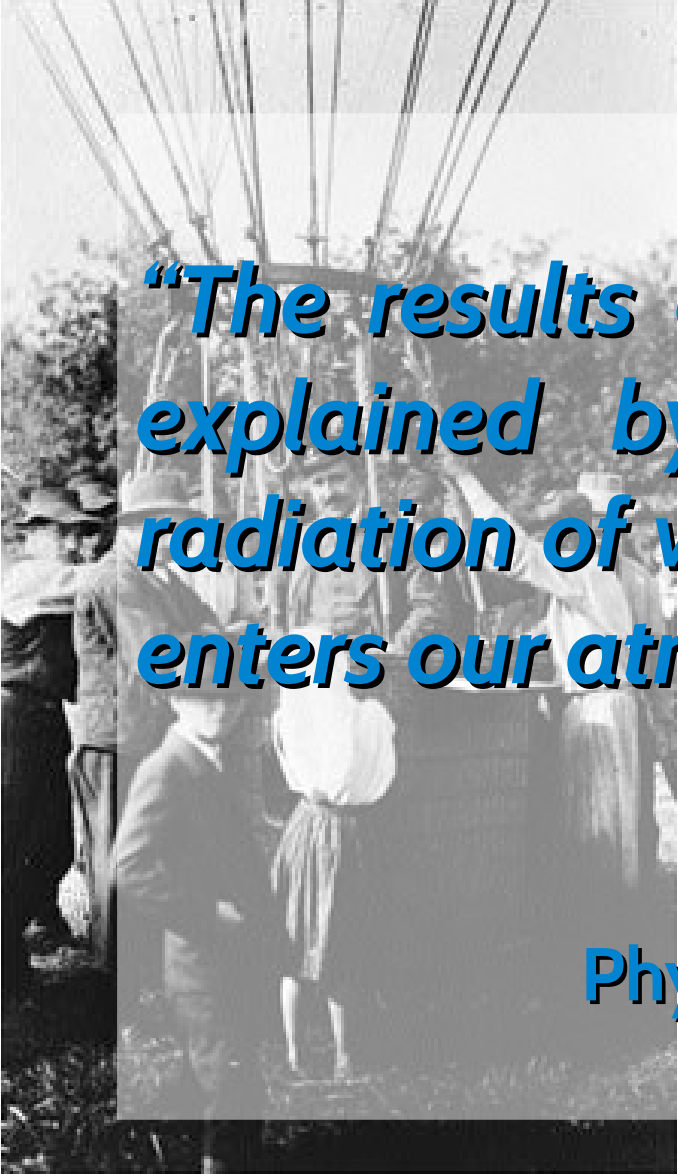
**Invariante
relativista**

- Una sutileza, es una expresión cuadrática

$$E = \pm \sqrt{(m c^2)^2 + (p c)^2}$$

Una imagen, mil palabras





“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 C3smicos (RC)

- Se define:

Astropart3culas

~~*Rayos c3smicos*~~ *3 Primarios*

a las part3culas, ~~con excepci3n de los fotones y~~ siendo en su mayor3a n3cleos at3micos, que se originan fuera del Sistema Solar y llegan a la Tierra o su entorno cercano.

Abreviamos RC (3 RCG para los gal3cticos)

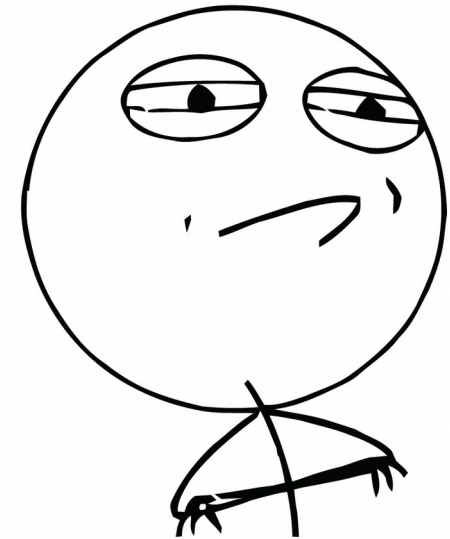
- Notaremos su energ3a como E_p .
- Rayos C3smicos de Ultra-Alta Energ3a (UHECR),

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

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



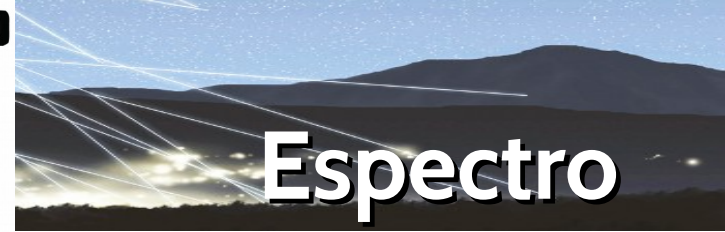
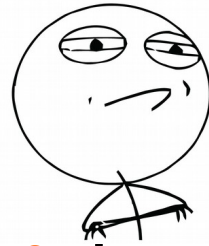


Algunas definiciones

- 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 km², en el rango $10^{16} < E/eV < 10^{17}$

CHALLENGE ACCEPTED



Espectro

- Espectro de energía:

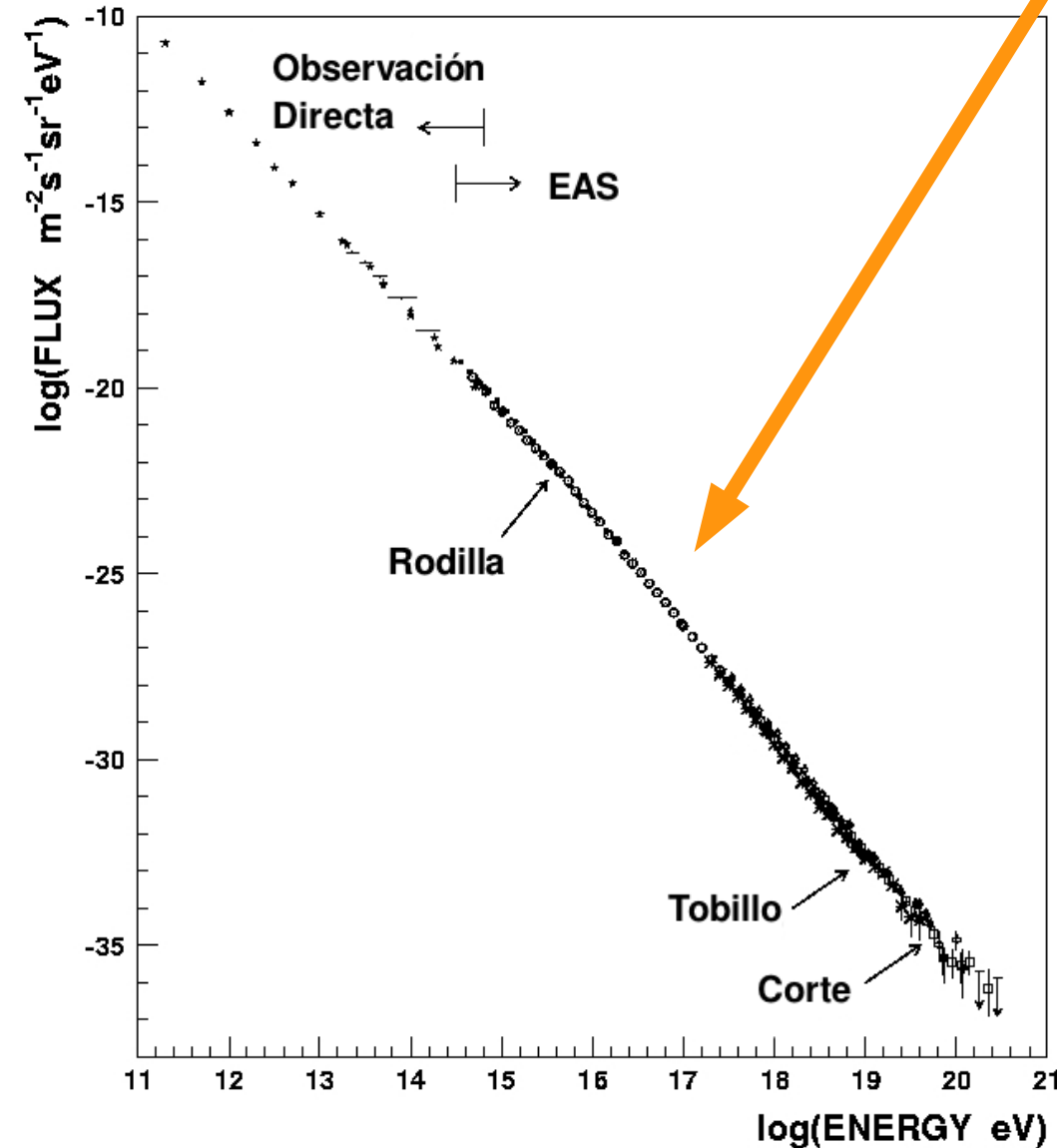
$$j(E) = \frac{dN}{dt dA d\Omega dE}$$

- Unidades

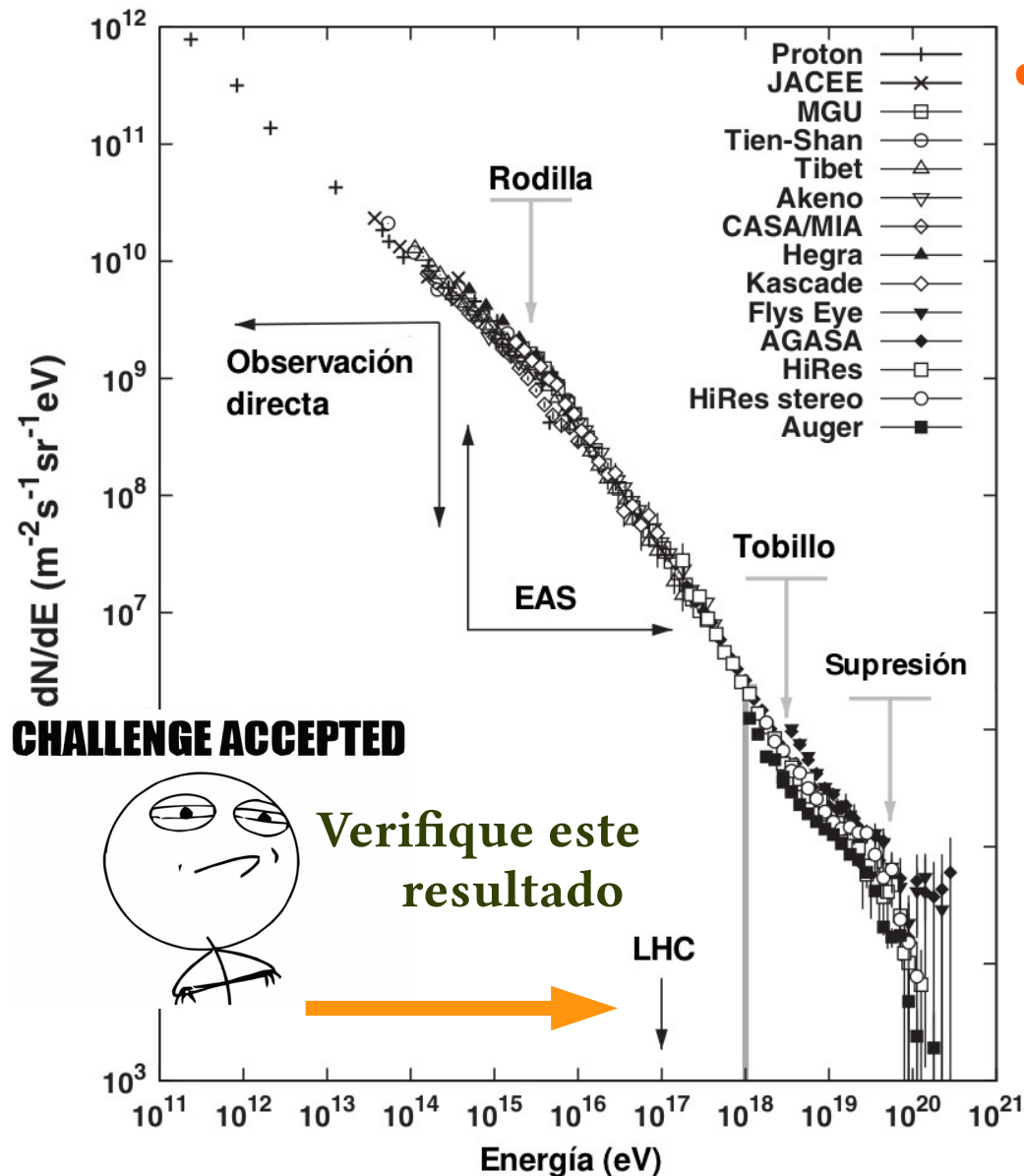
$$[j(E)] = \frac{1}{\text{m}^2 \text{ s sr eV}}$$

- En general:

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



Espectro x E²



• Cambios en la pendiente espectral:

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

Transición entre distintos fenómenos físicos

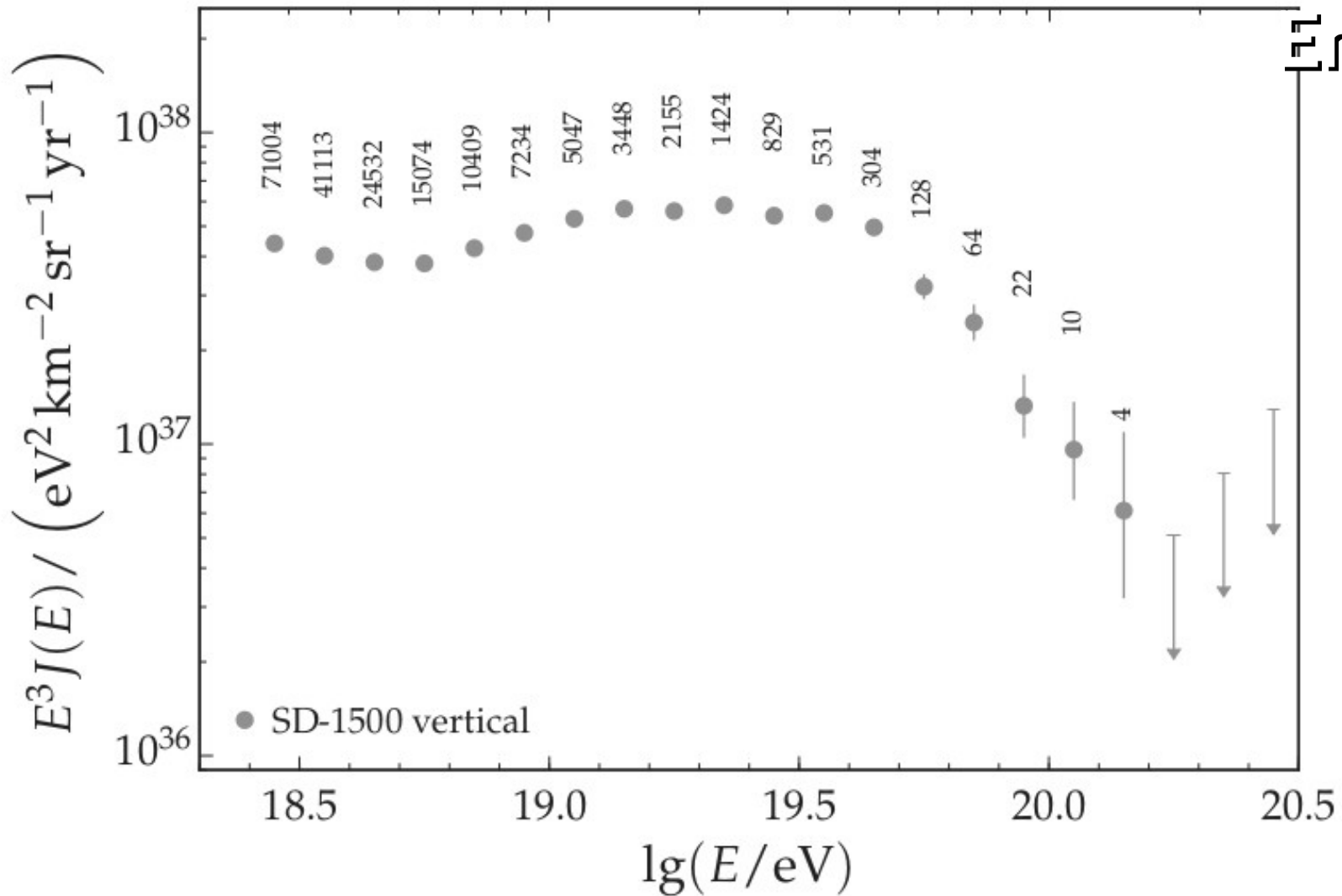
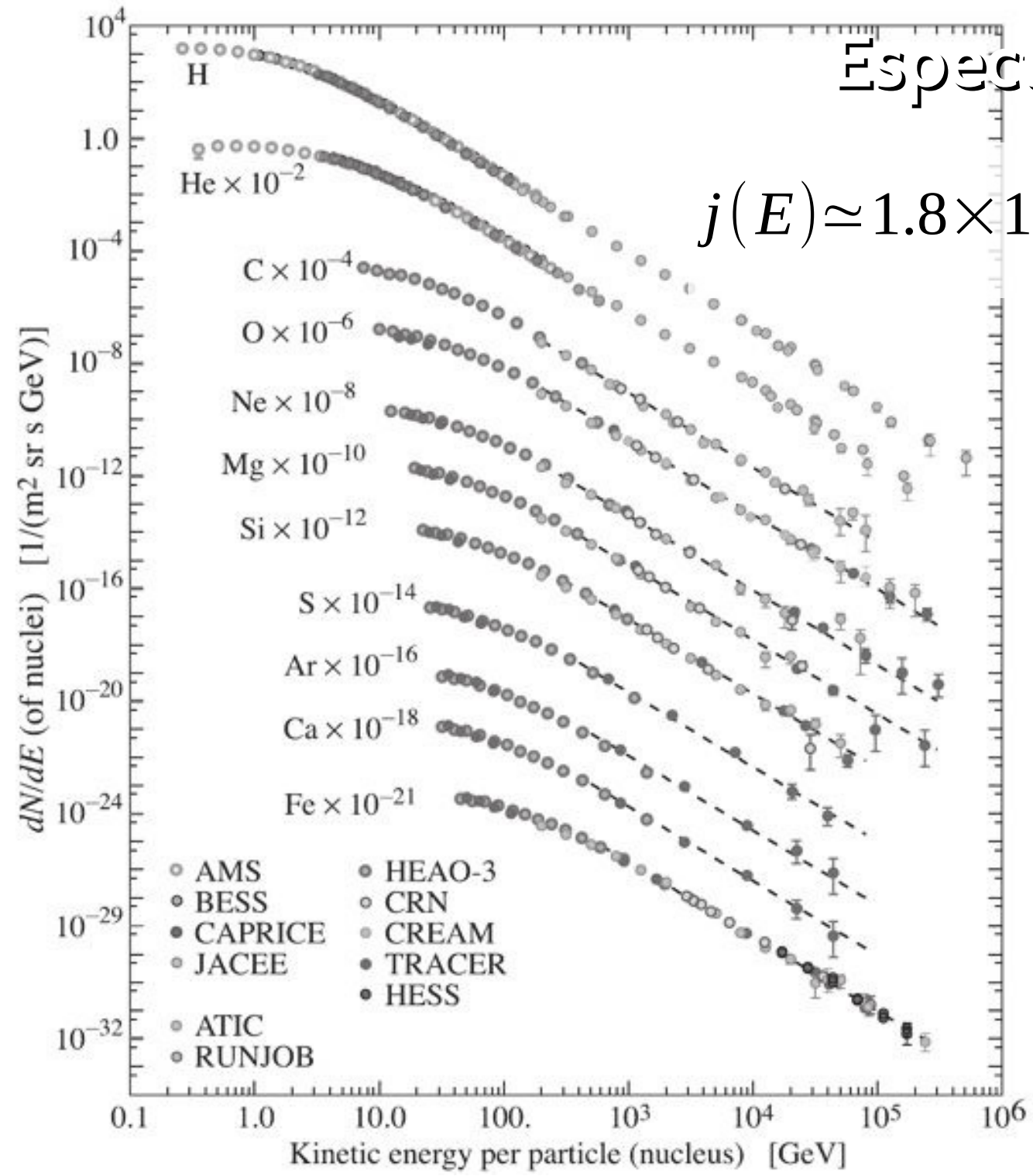


Figure 2: The unfolded spectrum for the SD 1500 vertical sample. The number of events is shown for each bin. The error bars represent statistical uncertainties. The upper limits correspond to the 84% C.L.

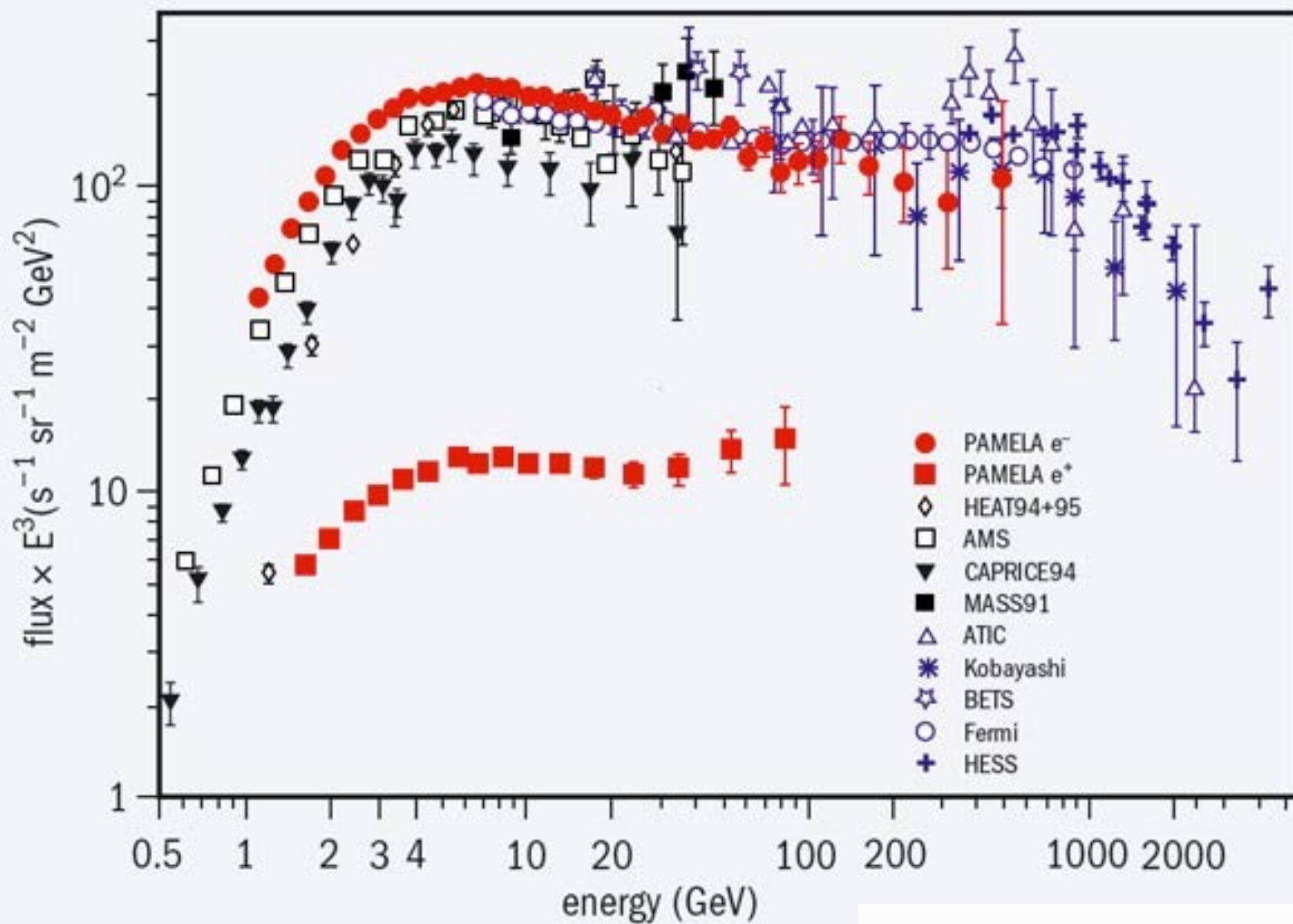
Espectro y composición



$$j(E) \approx 1.8 \times 10^{-4} E^{-2.7} \frac{\text{nucleons}}{\text{m}^2 \text{ s sr GeV}}$$

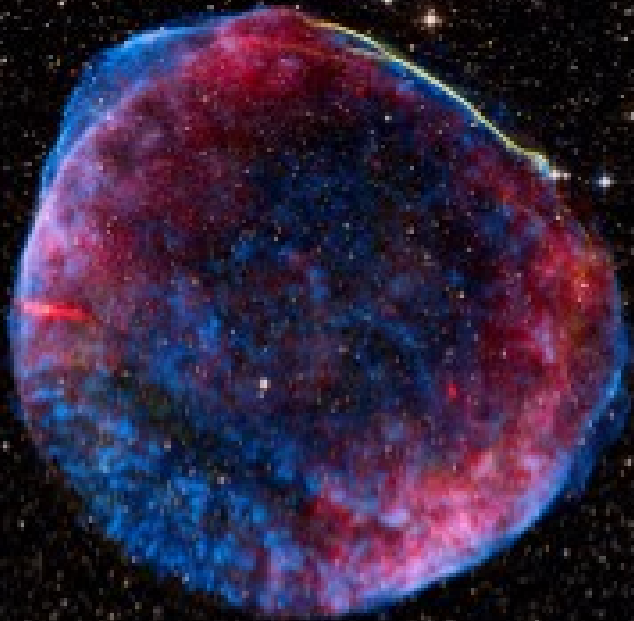


Electrones



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

Aceleración



campos eléctricos para acelerar
campos magnéticos para confinar

Campos electromagnéticos

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

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

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

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

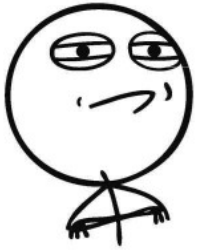
$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

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

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

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

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



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

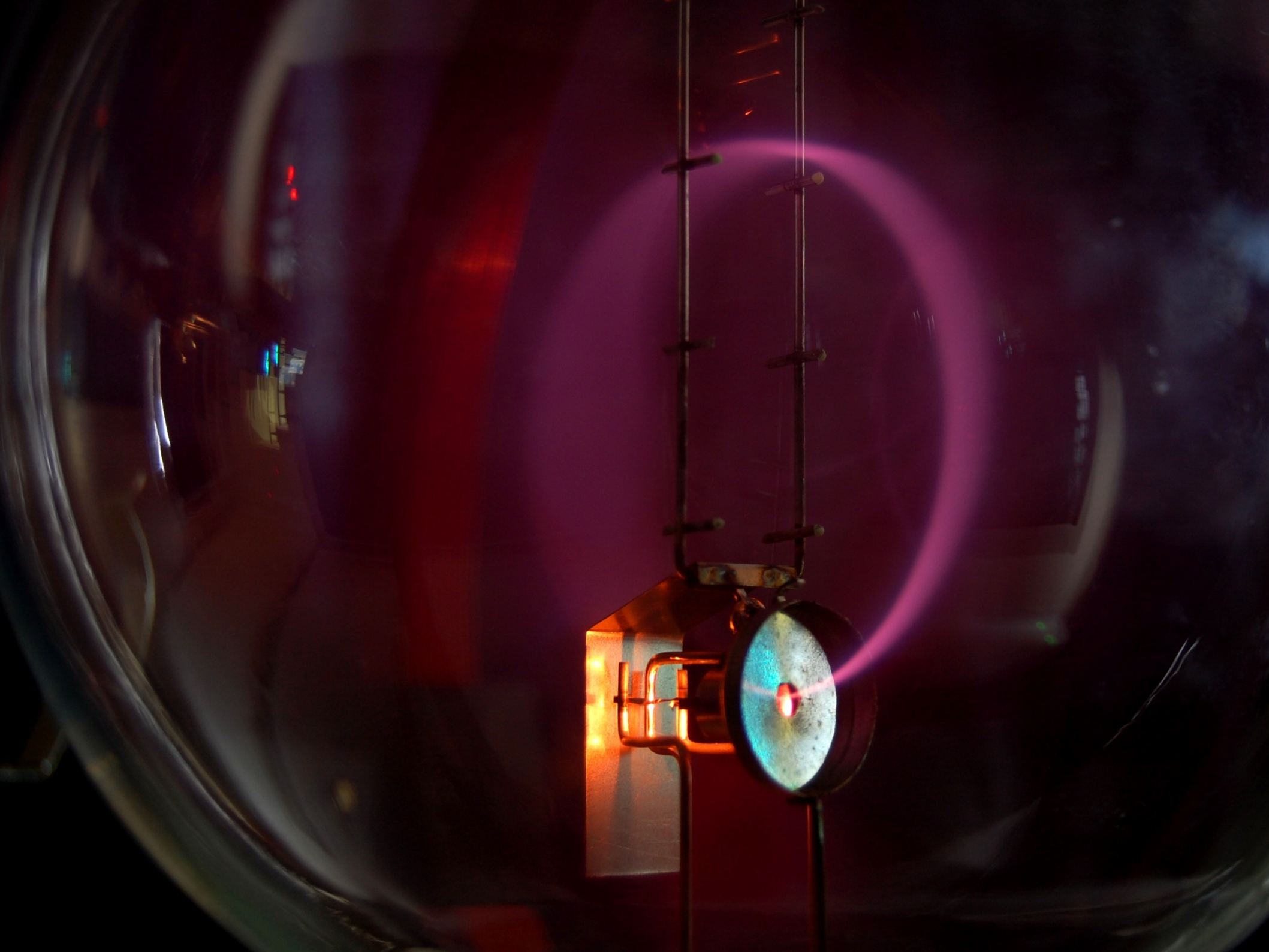
$$\vec{F} = q (\vec{v} \times \vec{B})$$

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

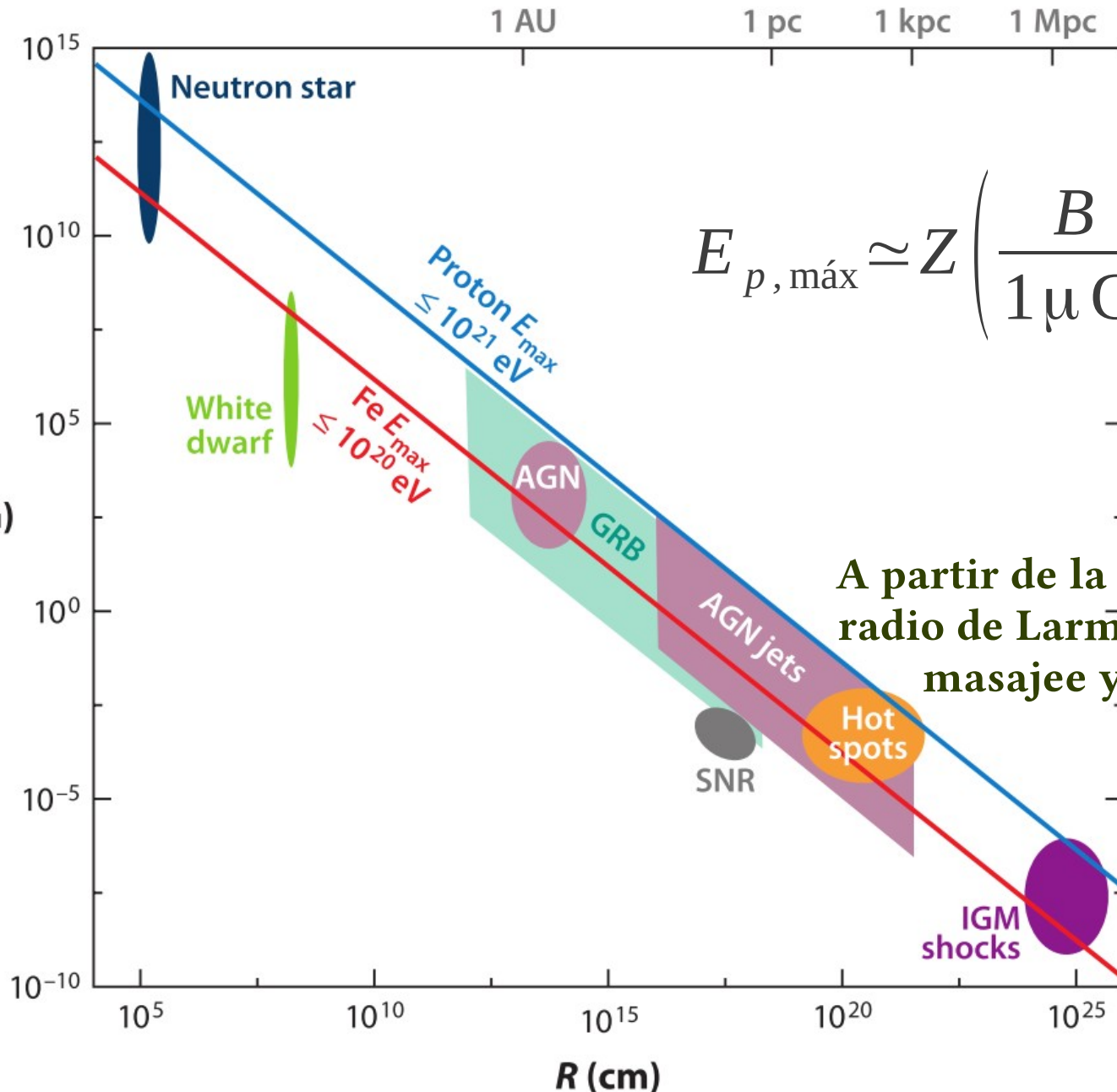
$$r_g = \left(\frac{\gamma m}{|q|} \right) \left(\frac{v_{\perp}}{B} \right)$$

- El período es entonces:

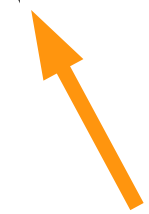
$$t_g = \frac{2\pi \gamma m}{|q| B}$$



Hillas Plot

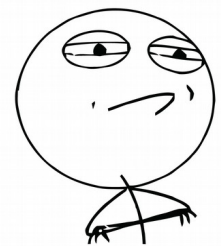


$$E_{p, \text{máx}} \simeq Z \left(\frac{B}{1 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{R}{1 \text{kpc}} \right) \text{EeV}$$



CHALLENGE ACCEPTED

A partir de la definición del radio de Larmor, reordene, masajee y obtenga



$$\frac{\langle \Delta E \rangle}{E} \simeq \beta_{shock}$$

- La capacidad de aceleración de la fuente es

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

- Para una fuente (B y R están fijos), $E_{\text{máx}} \propto Z$

- Por otro lado, el flujo de una especie química Z:

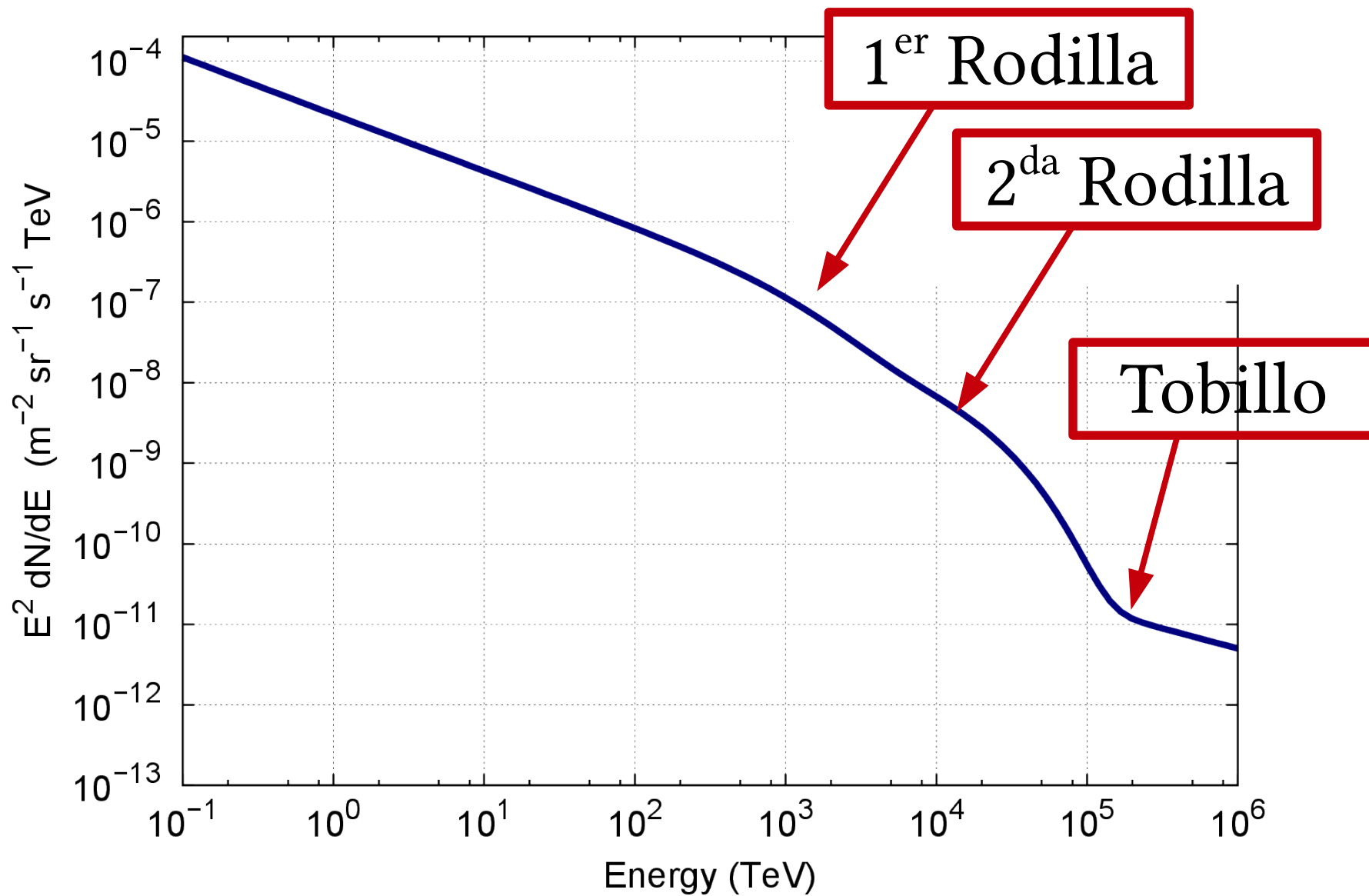
$$J(E, Z) \simeq j_0(Z) E^{\alpha(Z)}$$

- Luego, hay una energía de corte E_c en el espectro de cada especie

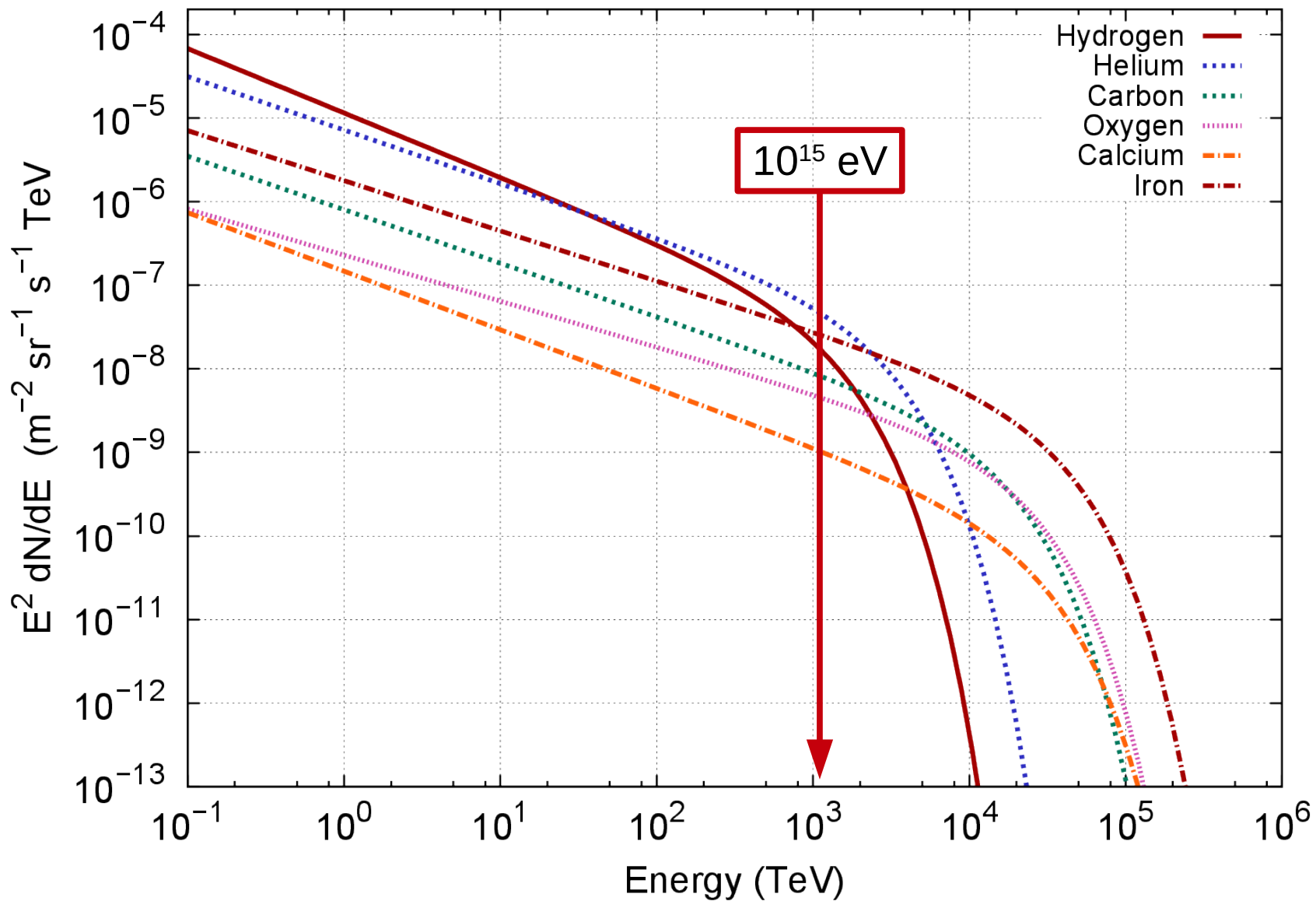
- Proponemos un término de atenuación exponencial

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

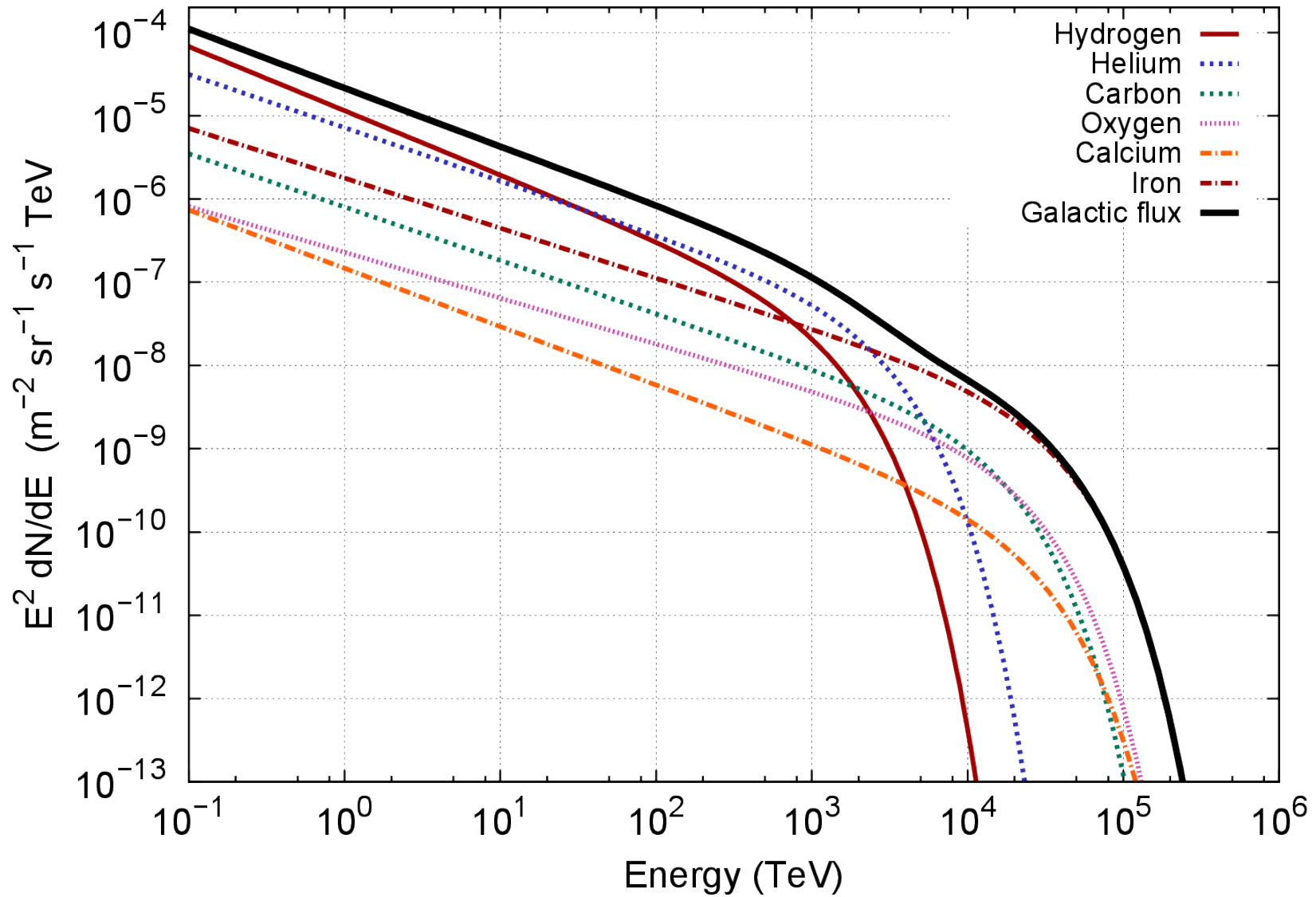
¿Origen de las características?



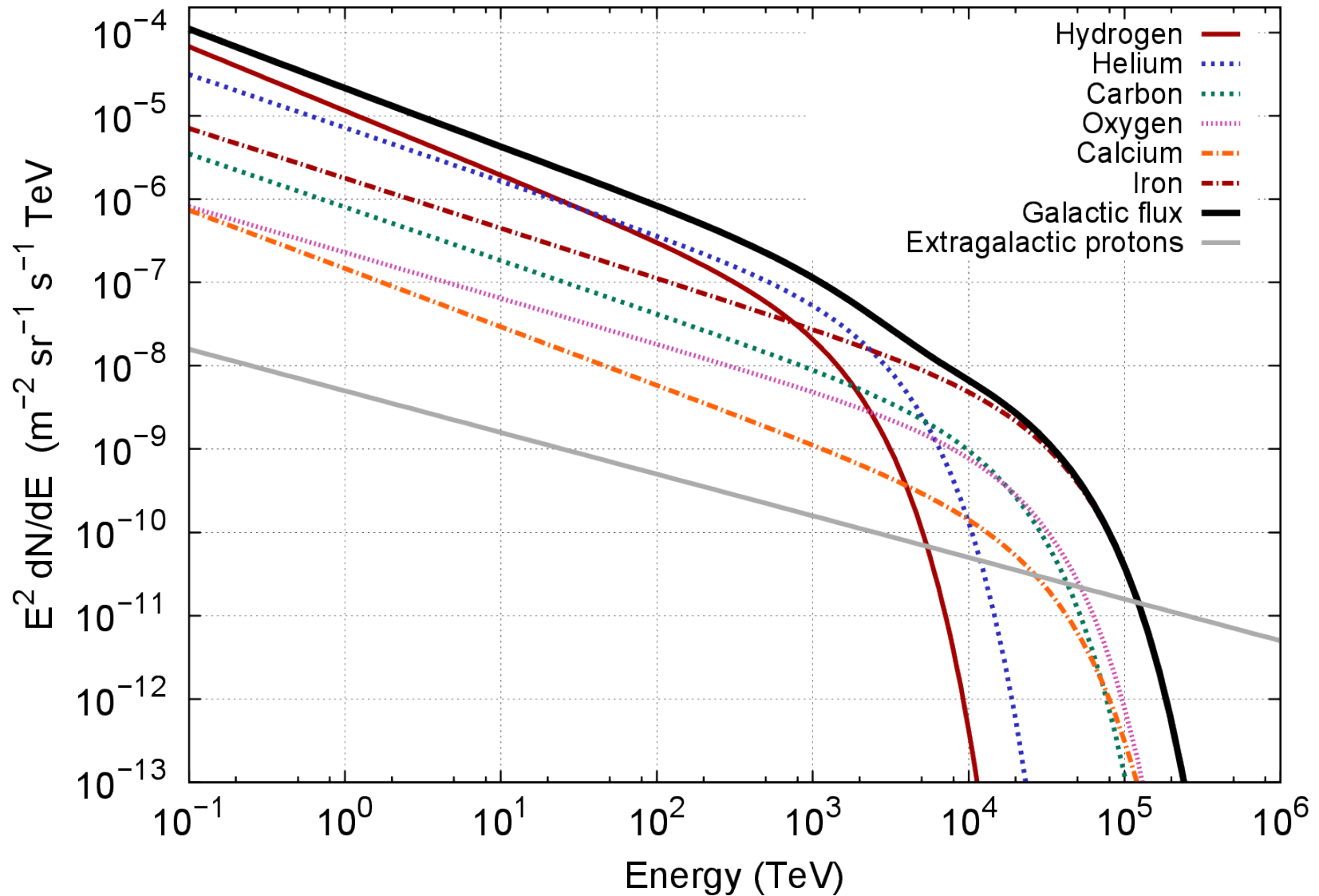
Espectros RC galácticos



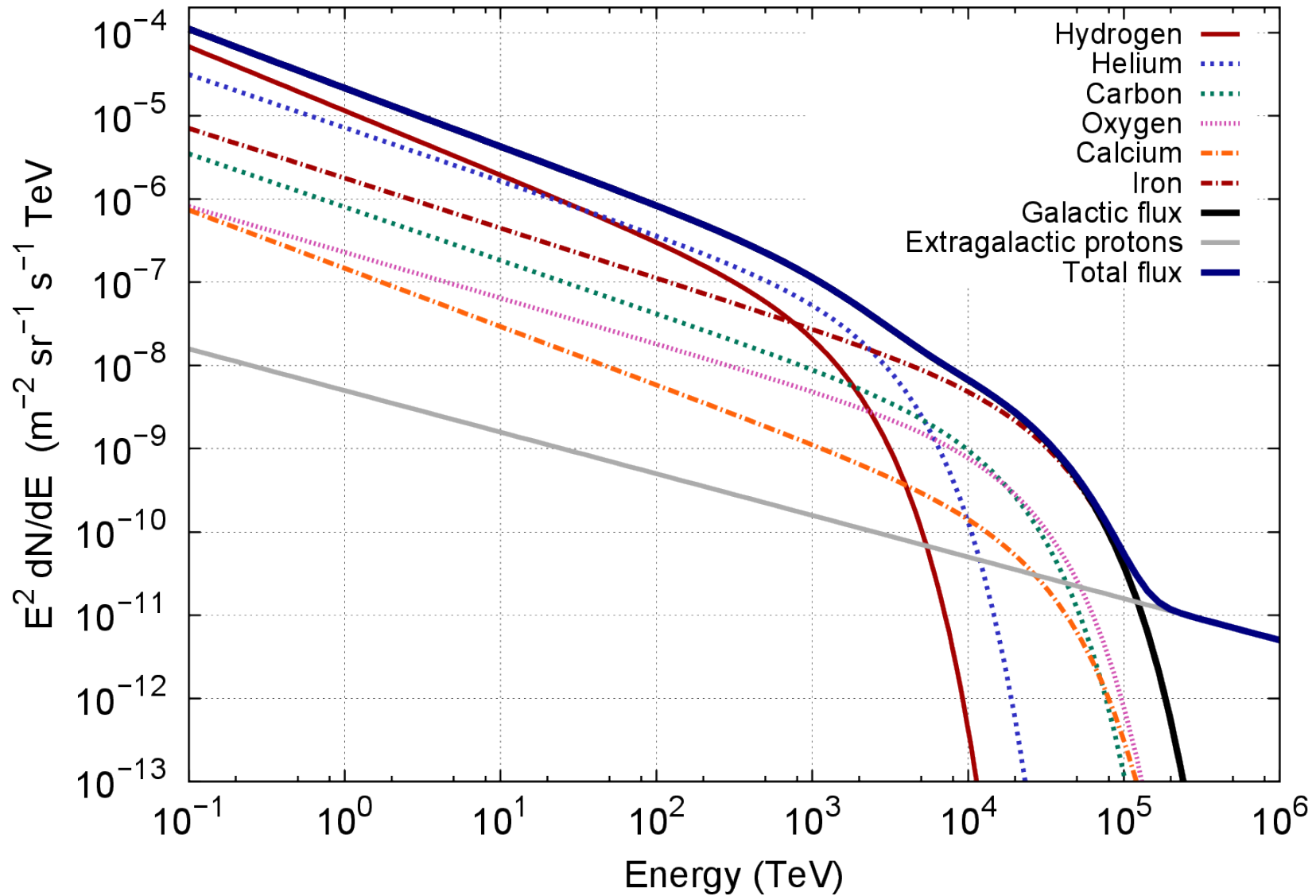
Espectro total galáctico



Pero tengo un flujo extragaláctico



Y el flujo total...



¿Cómo lograr que una partícula alcance energías tan altas?

Ya viene...

- **Aceleración (bottom-up)**

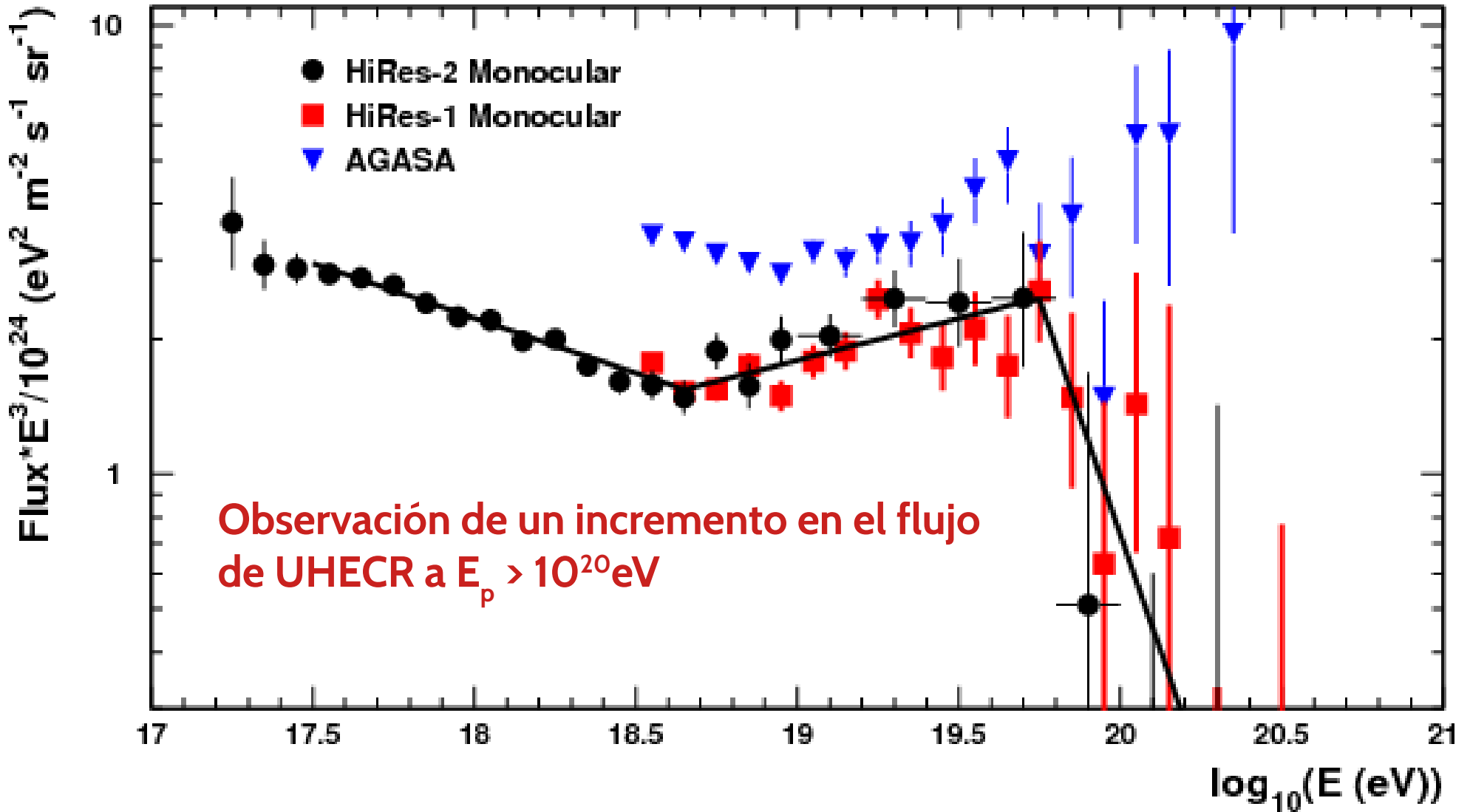
Existe un entorno astrofísico donde la combinación de campos eléctricos y magnéticos permiten acelerar partículas a altas energías

- **Decaimiento (top-down)**

Existen partículas muy masivas cuyos decaimientos generan partículas de alta energía

Descartados por las observaciones

Decaimiento: Top down



- Possible candidates:
 - Metastable super-heavy dark matter particles: cryptons (strongly interacting string theory sector)
 - big-bang relics
 - topological defects: cosmic strings, monopoles, hybrid defects
- Properties
 - $m > 10^{20}$ eV
 - Cosmological distribution → no GZK, no cosmological anisotropy (or at least, no expected mass distribution) + galactic anisotropy
 - lifetime longer than the age of Universe: $t_0 \sim 10^{17}$ s $< \tau_X < 10^{28}$ s
 - R parity → decay on UHC primary + neutrino and photon fluxes compared to proton fluxes

UHECR Spectrum → no signatures

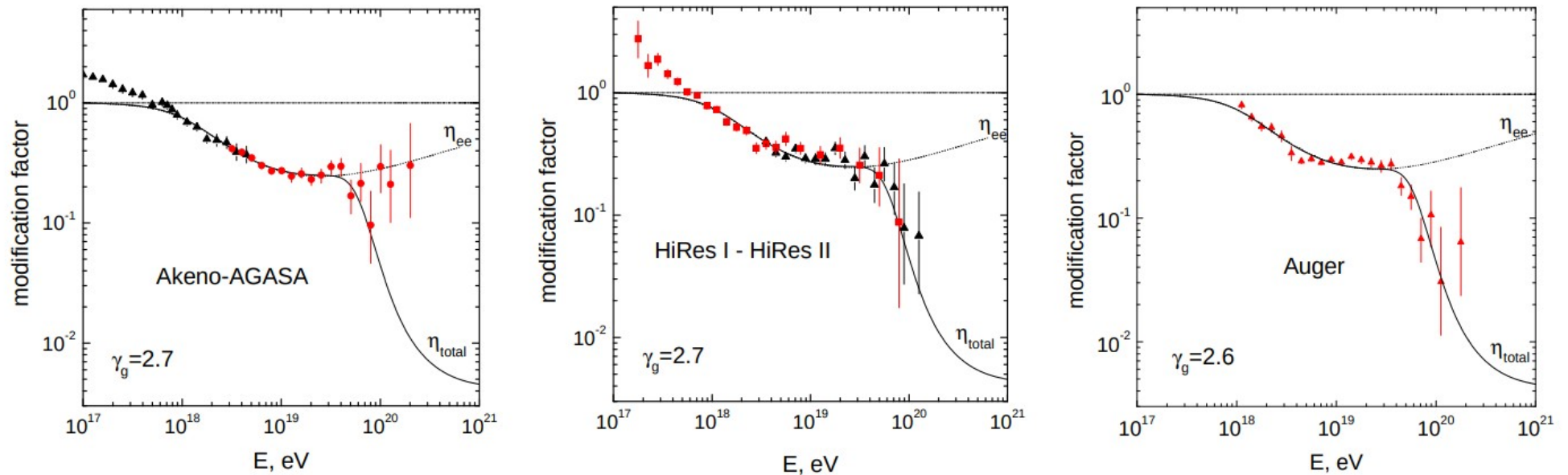


Figure 2: The pair-production dip and GZK suppression as predicted by simplest model of uniformly distributed proton sources compared to Akeno-AGASA, HiRes, and Auger data, from Ref. [45].

UHECR: Nor photons either neutrinos observed

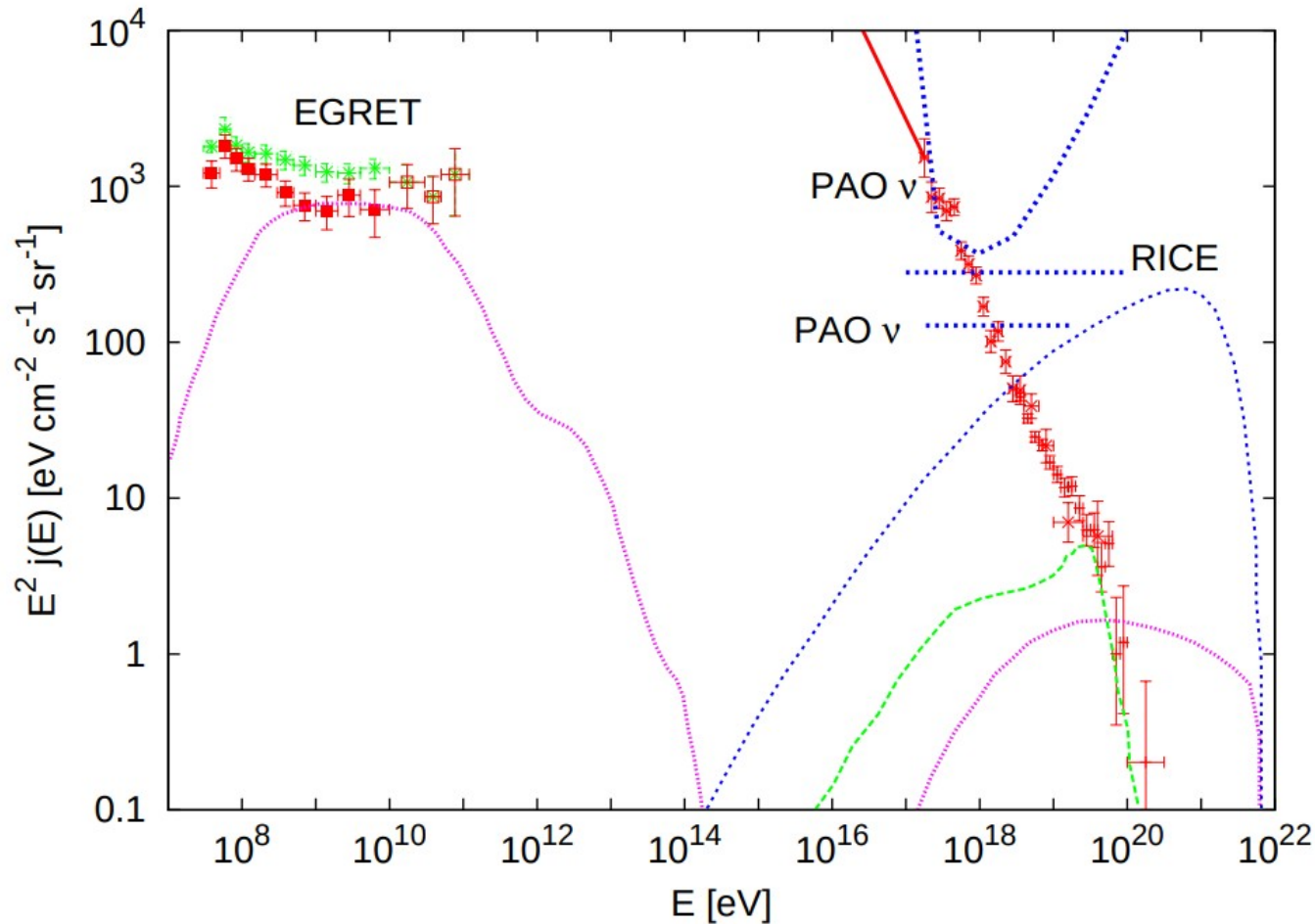


Figure 3: Proton (green), photon (magenta) and neutrino (blue) fluxes in a TD model with $M_X = 2 \times 10^{13}$ GeV, evolution $\dot{n}_X \propto t^{-3}$ and continuous distribution of sources (adopted from Ref. [42]) together with two determinations of the MeV–GeV diffuse photon background from EGRET data, CR data, and the new neutrino limit from PAO [49], (differential top, integral limit below for an assumed $1/E^2$ neutrino spectrum).

Aceleración: bottom up





Fermi 2^{do} orden

Glóbulos de Bok (Bok, 1947)

$M/M_{\odot} \sim 100-200$, $R \sim 1 \text{ ly}$

Nubes moleculares gigantes

$M/M_{\odot} = 10^4 - 10^6$, $R \sim 300 \text{ ly}$

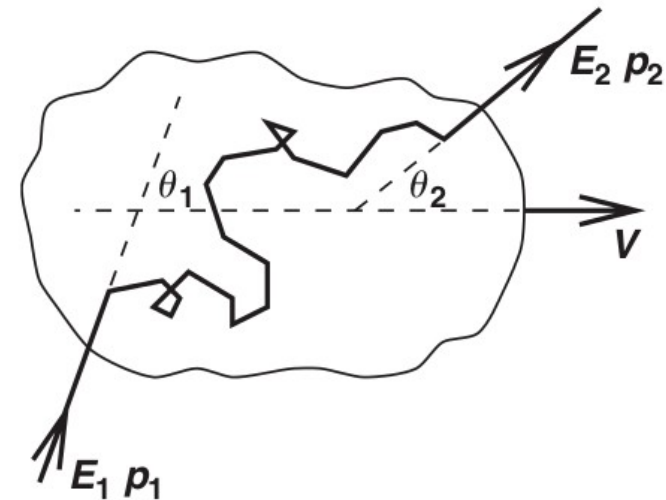
Campos eléctricos para acelerar Campos magnéticos para confinar

- La nube avanza con velocidad $v_c \sim 20 \text{ km/s} \ll c$
- Hay irregularidades en la concentración de plasma \rightarrow
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,
- $$\begin{aligned} \overline{\cos \theta_1} &= \frac{c \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos(\theta_1)(1 - \beta \cos \theta_1) \sin \theta_1 d\theta_1 d\phi}{c \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (1 - \beta \cos \theta_1) \sin \theta_1 d\theta_1 d\phi} = \frac{-\frac{4}{3}\pi\beta}{4\pi} \\ &= -\frac{1}{3}\beta. \end{aligned}$$

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 logaritmos y reagrupando las constantes

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

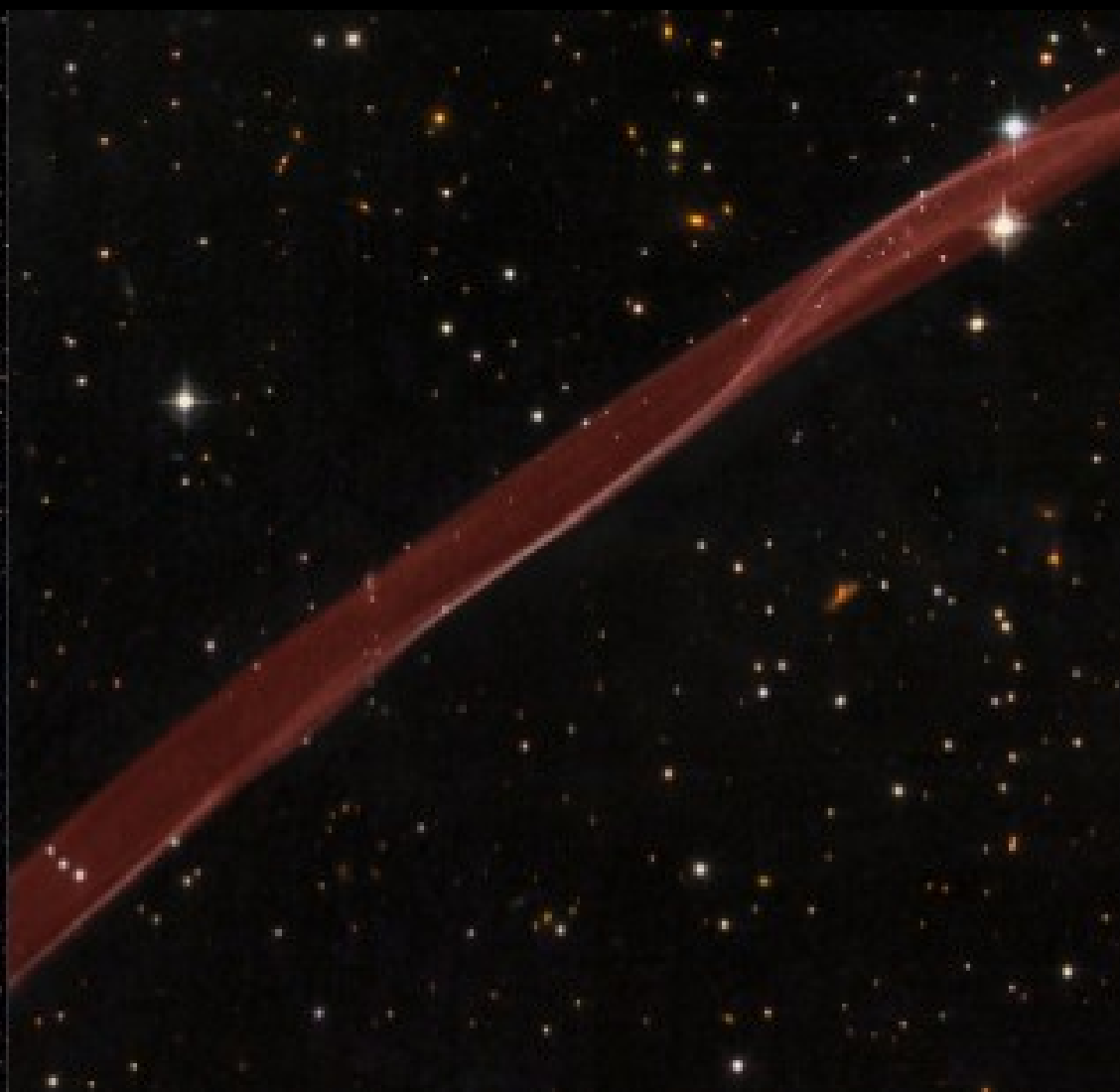
- Donde (recordar $\ln(1 \pm x) \sim \pm x$ si $x \ll 1$)

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

- Ahora, $p_e < 1 \rightarrow \ln(p_e) < 0 \rightarrow \alpha < -1$

- 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:

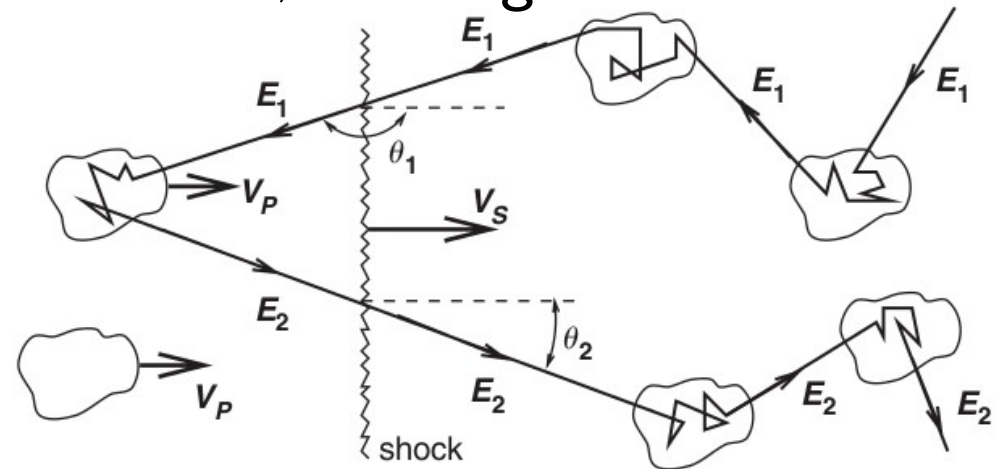
$$R = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \rightarrow \frac{v_s}{v_p} \simeq \frac{R}{R - 1}$$

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:

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

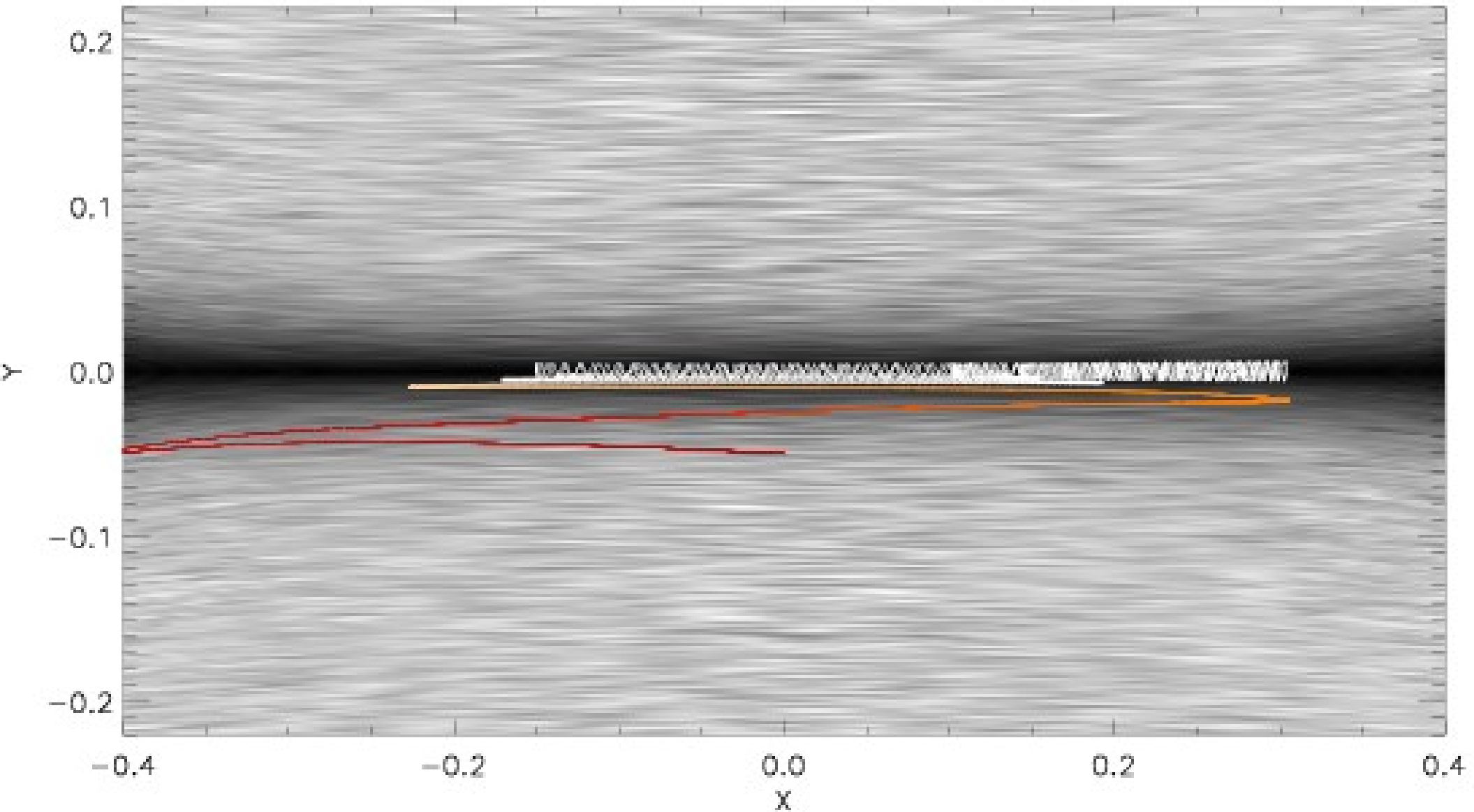
$$E'_2 = \frac{E_2}{\gamma (1 + \beta \cos \theta'_2)}$$



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

Simulación Onda de Choque

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



Fermi 1^{er} órden

- 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

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



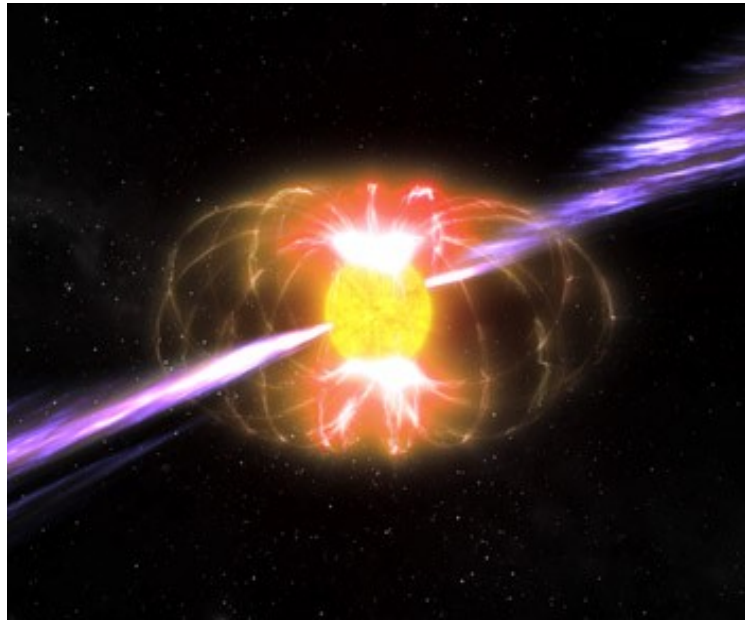
Fermi 1^{er} orden

- Valores medios angulares:

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

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

Aceleración en Objetos Compactos



- Objeto compacto

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

- Energía máxima para partícula de carga Z

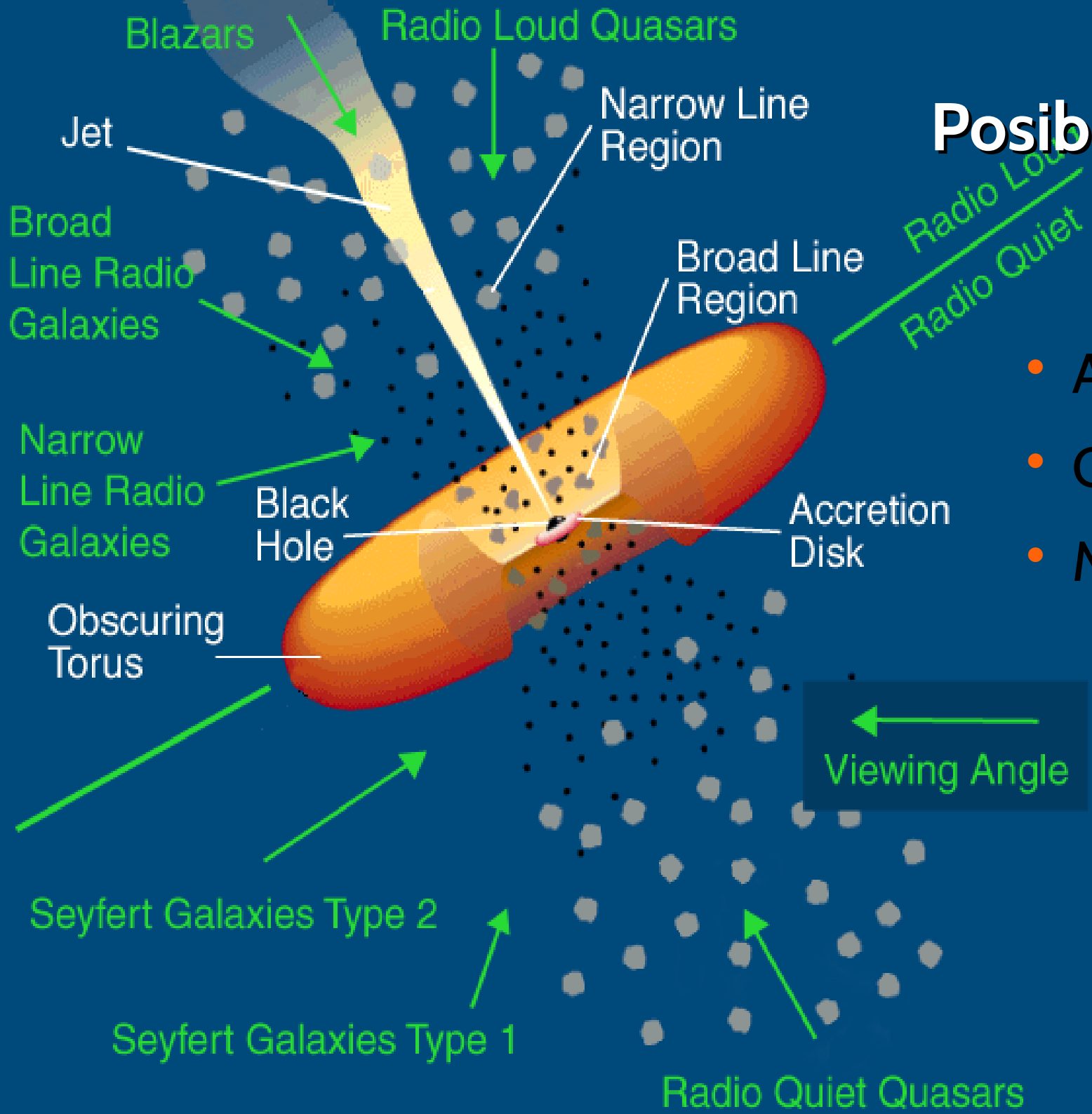
$$E_{\text{máx}} = 300Z \left(\frac{B}{2 \times 10^{11} \text{ T}} \right) \left(\frac{R}{10 \text{ km}} \right)^3 \left(\frac{\Omega}{10^4 \text{ s}^{-1}} \right)^2 \text{ EeV}$$

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

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

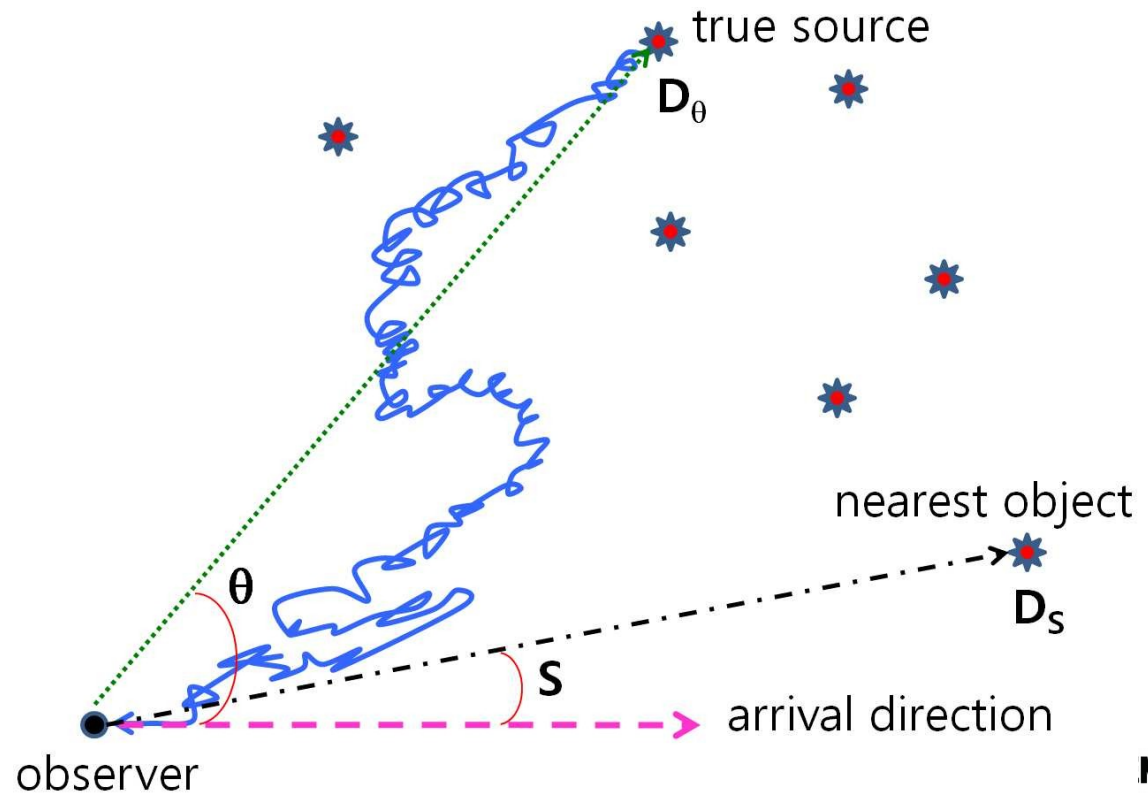
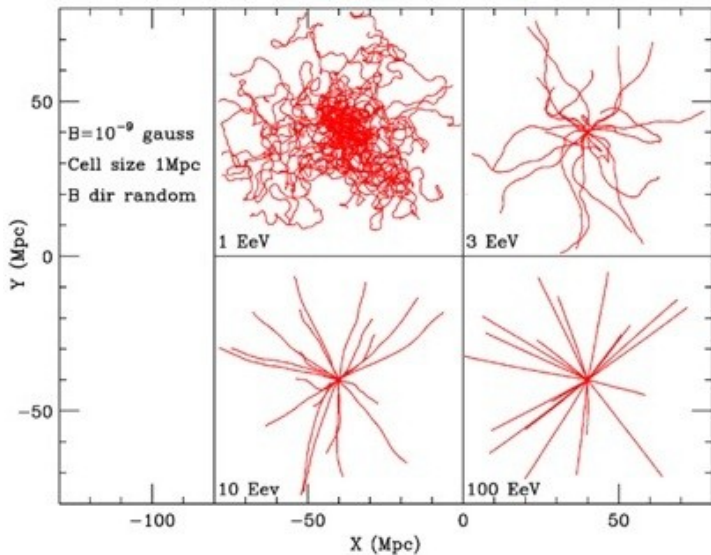
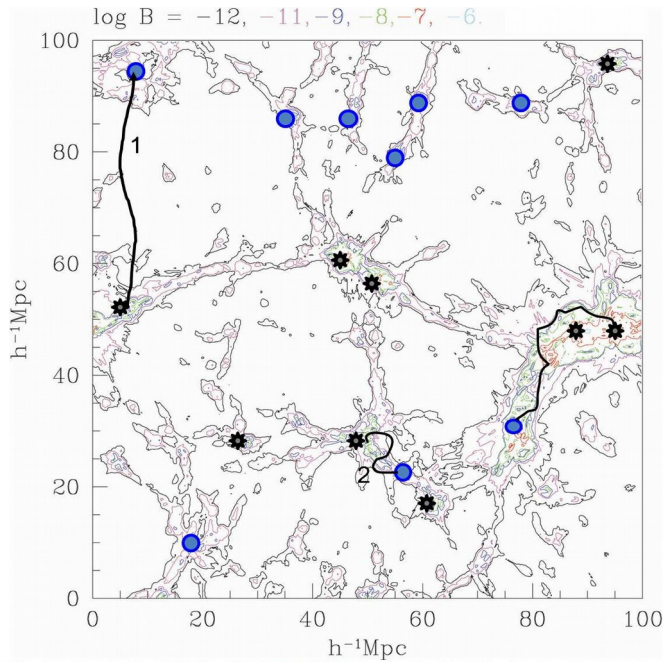


Posibles Fuentes



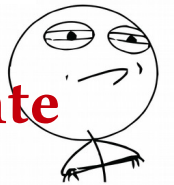
- AGN ?
- GRB ?????
- Magnetars ?????

Propagación: 1) campos intergalácticos



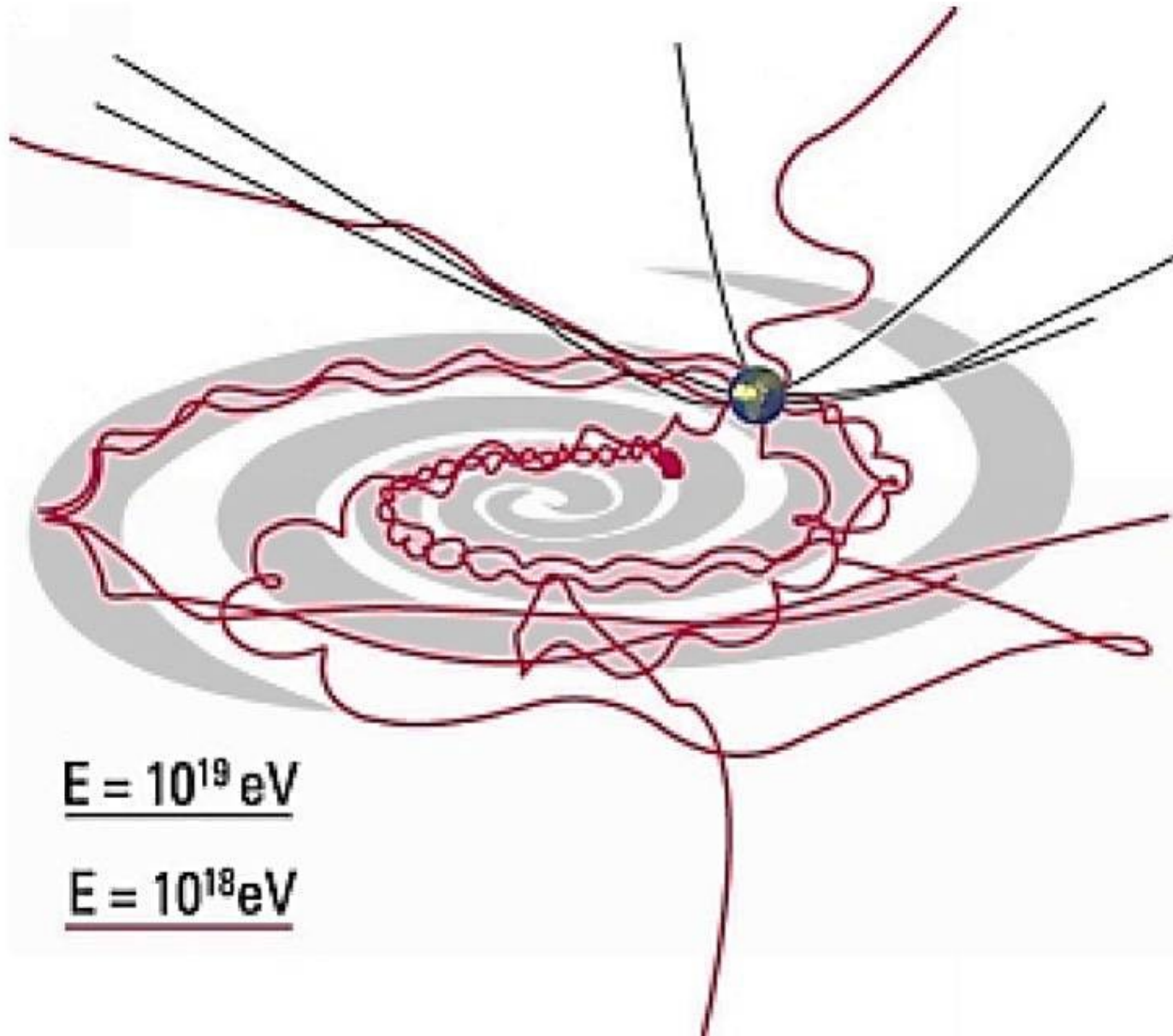
Las partículas no “apuntan” a la fuente
 Debido a las deflexiones magnéticas

NGE ACCEPTED

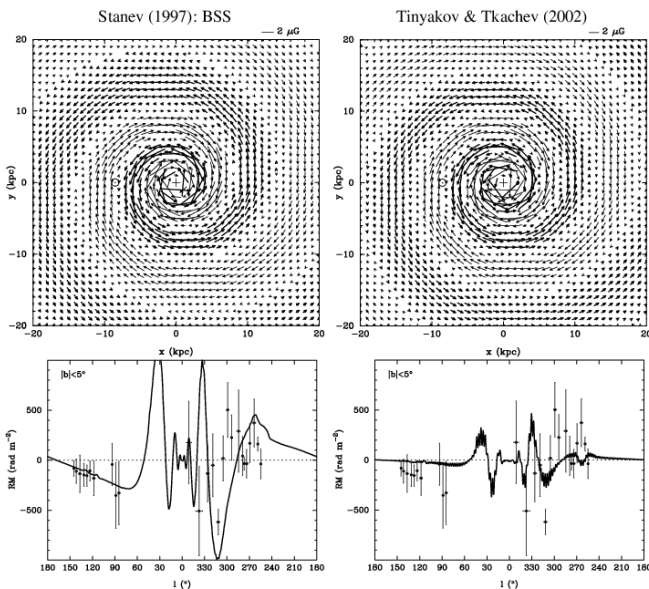
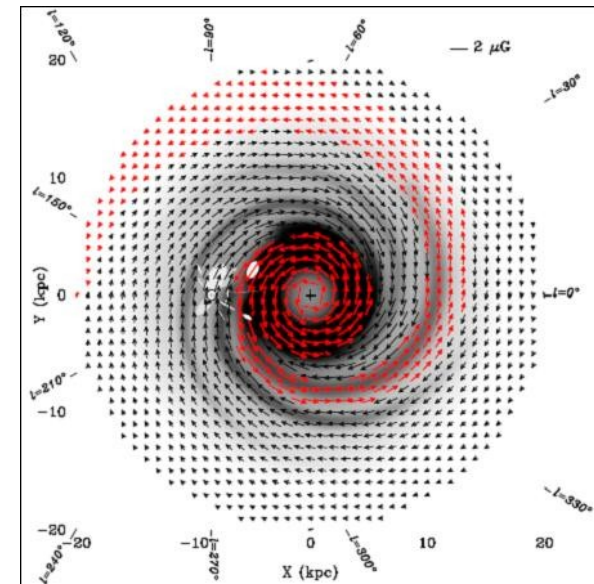
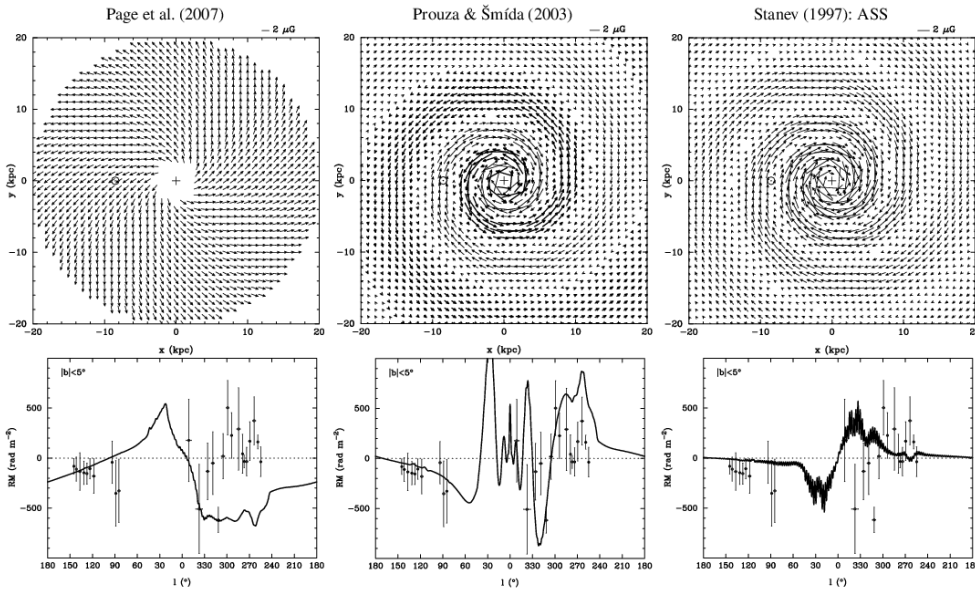


$$\text{Si } E > 20 \text{ EeV, } \Delta\theta \simeq \frac{100 \text{ EeV}}{E_p} \times 1^\circ$$

Propagación: 2) deflexiones galácticas



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

Galactic magnetic fields

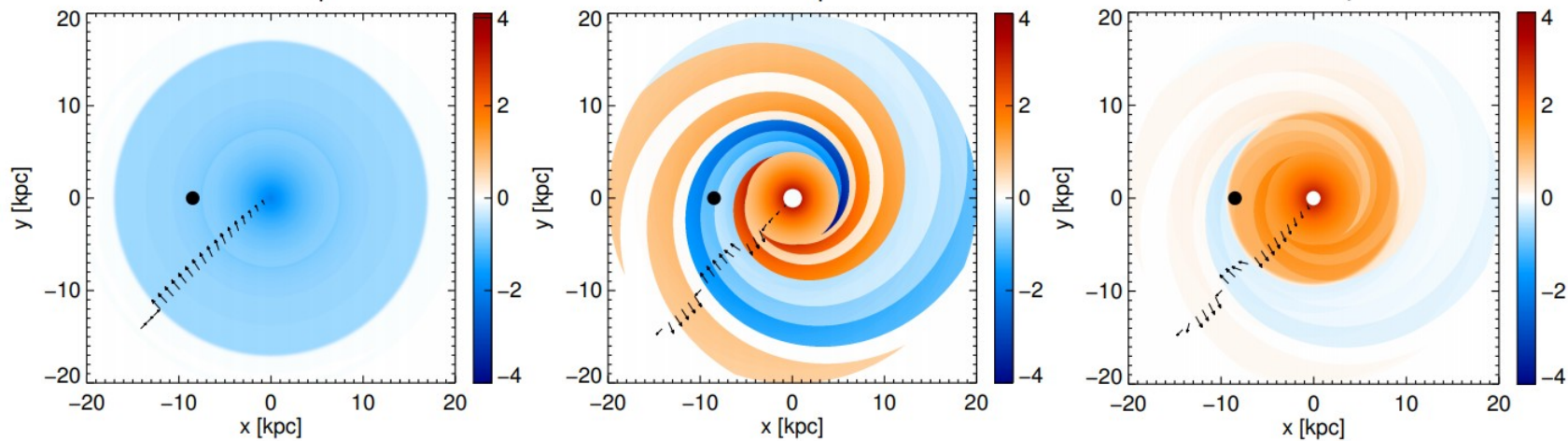
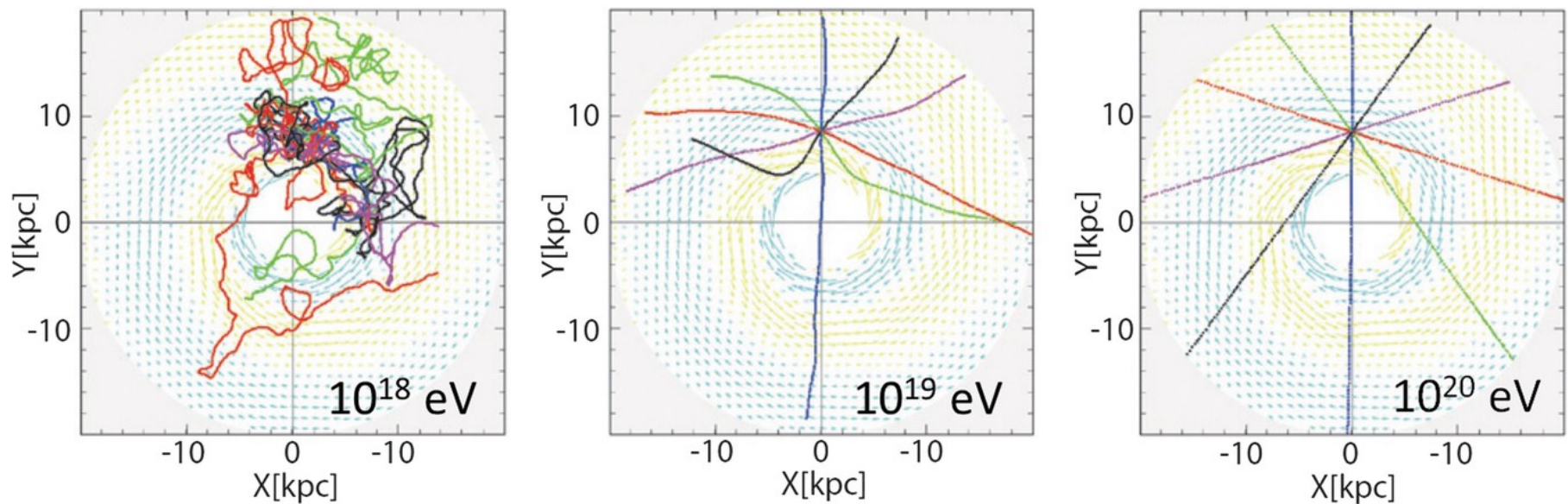
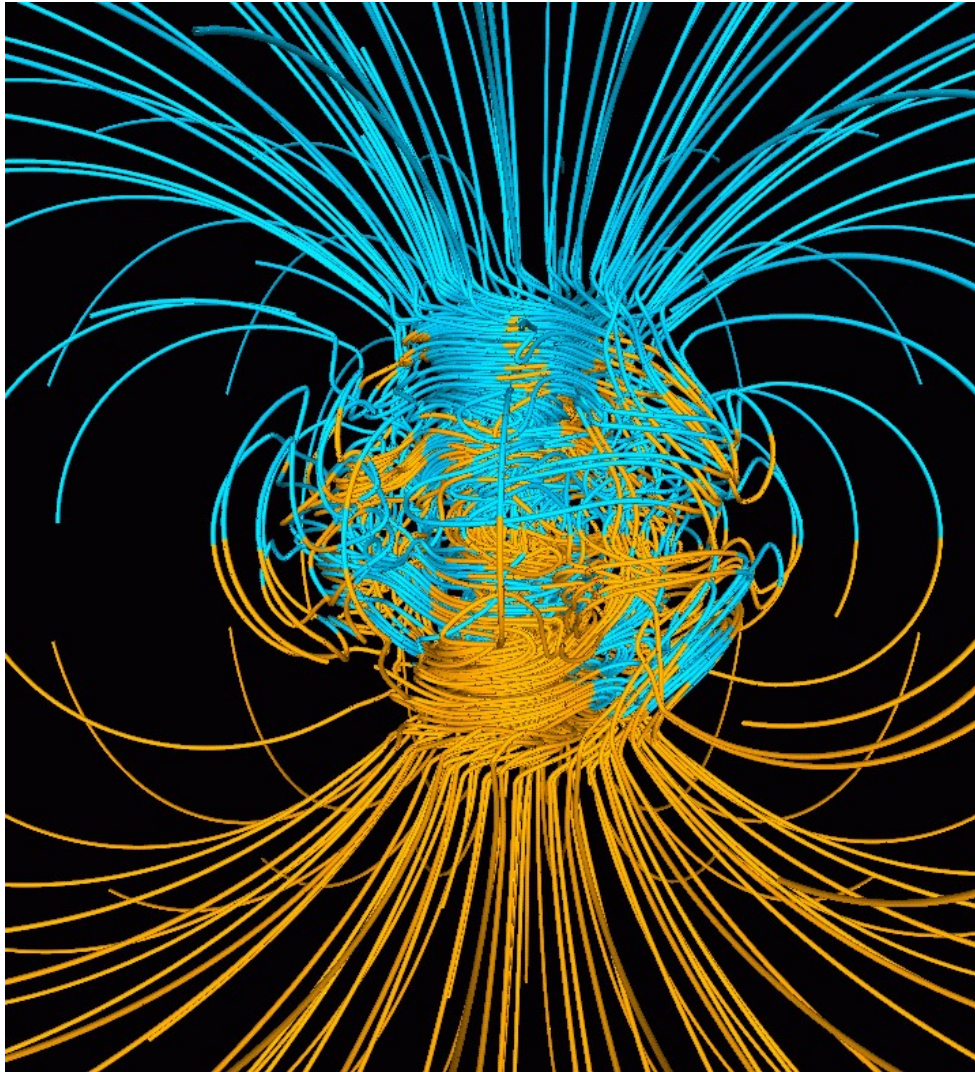


Fig. 3. The regular component of the GMF model in the x - y plane (parallel to the Galactic plane) as seen from above. The slices are located at vertical heights $z = -3$ kpc (*left*), $z = 10$ pc (*middle*), and $z = 650$ pc (*right*). The Sun, represented by a black dot, is located at $(-8.5, 0, 0)$ kpc. The black arrows give the direction of the field along the $x = y$ line. The magnitude of the field is color-coded and takes negative values for negative values of the azimuthal component of the field.

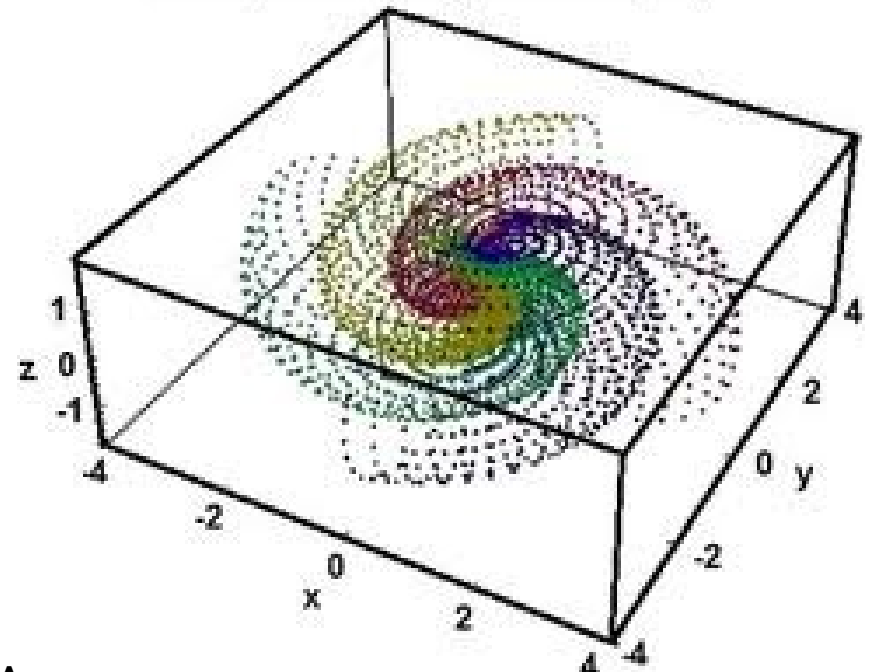


Propagación: 3) campos magnéticos helio y geo

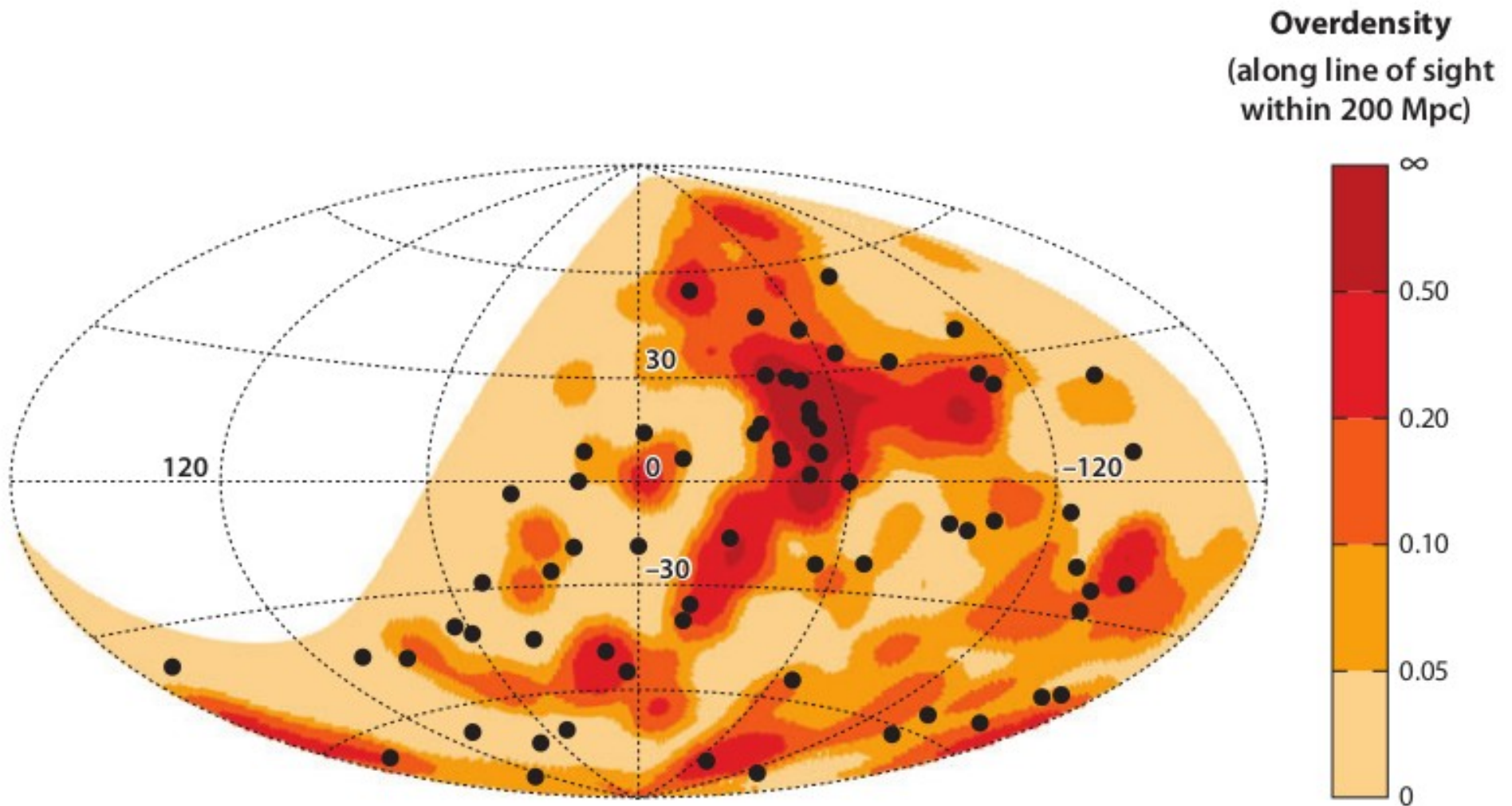


- Los RC son, en general, partículas cargadas
- Los campos magnéticos B deflecan su trayectoria.
- B : intensidad o recorrido

3 D Interplanetary Magnetic field (IMF)



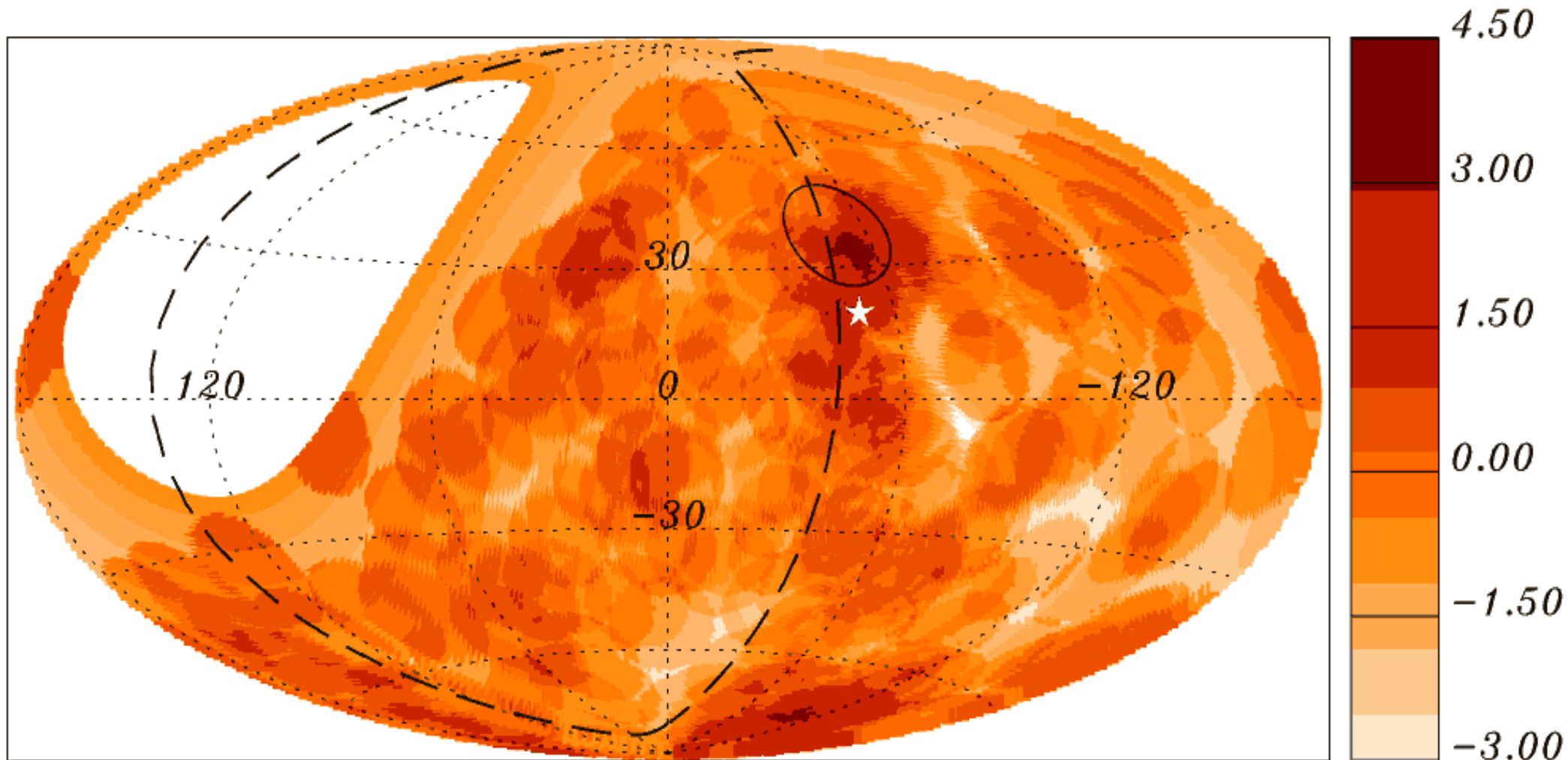
Correlación UHECR - Materia



Puntos negros: UHECR + resolución angular

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

Correlación UHECR - Materia



Li-Ma Significance

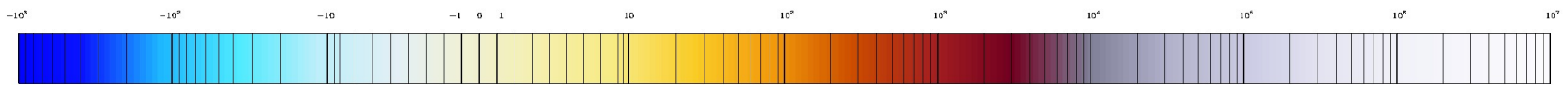
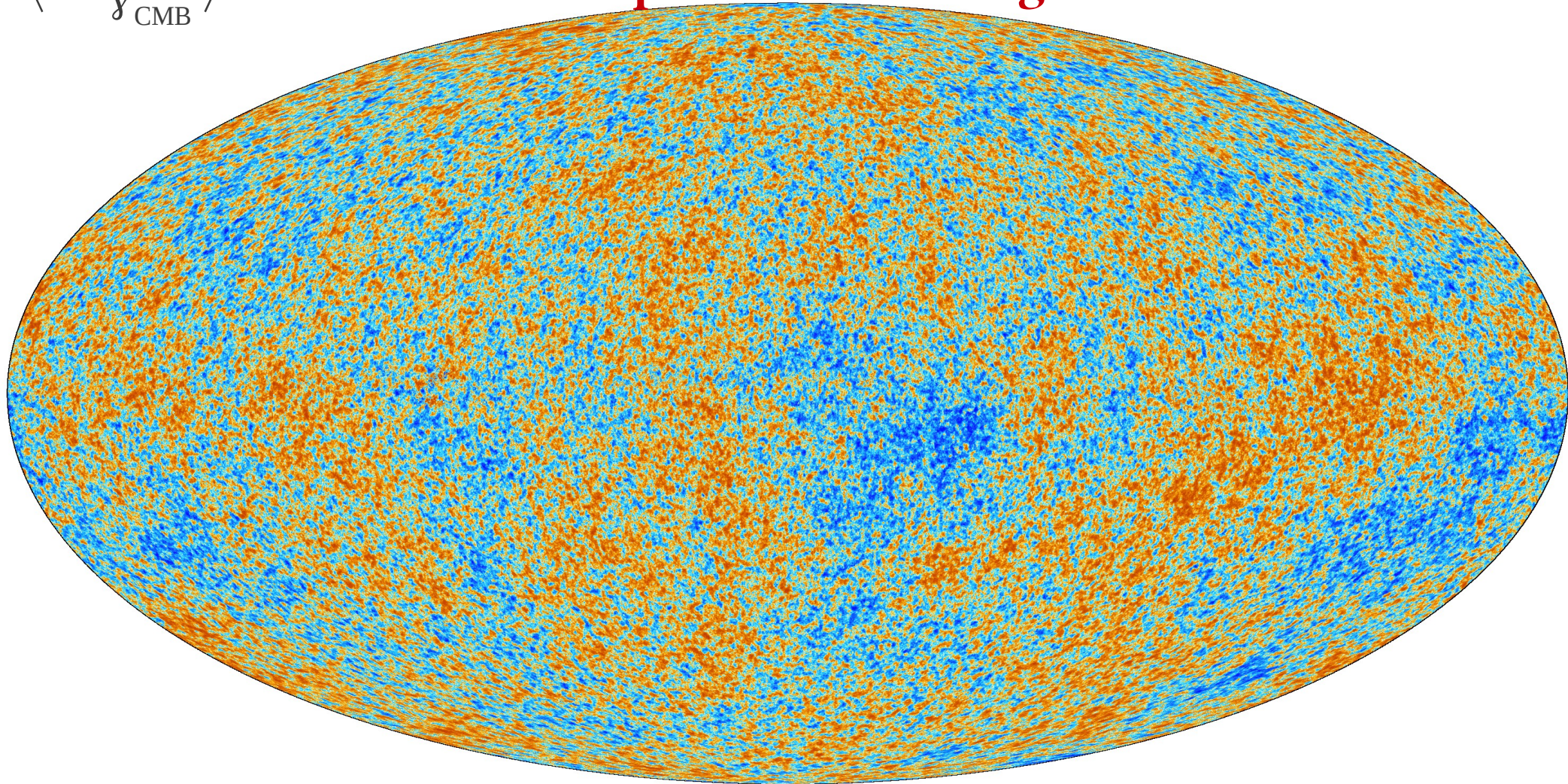
Fondo de radiación cósmica (CMB)

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

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

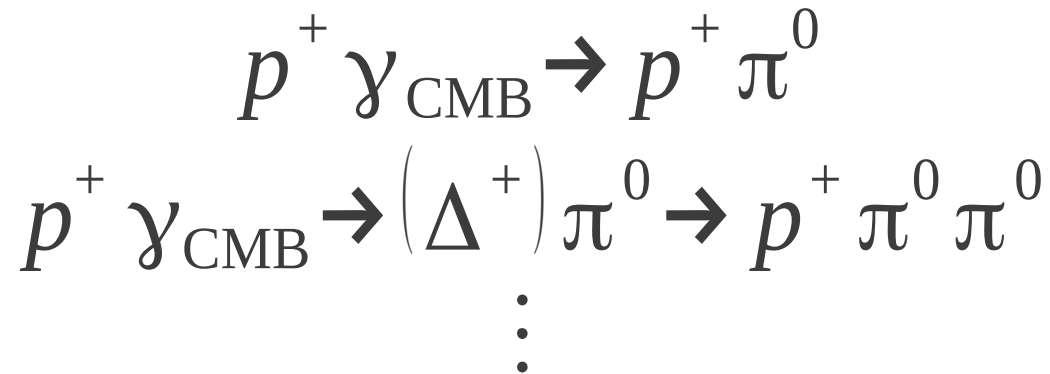
¿Es el Universo transparente?

Depende de la energía a la cual miremos

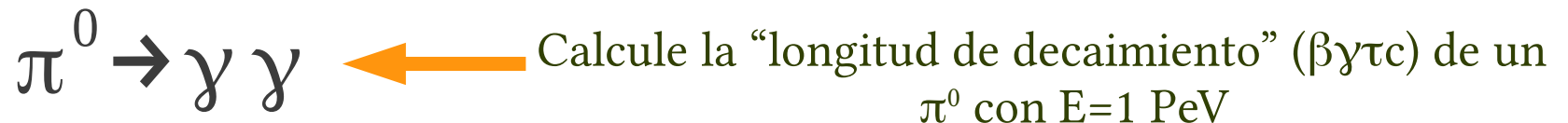


Propagación: efecto GZK (Greisen-Zatsepin-Kuz'min)

- Fotoproducción de piones por interacción con el CMB



- 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):





Carino libre medio

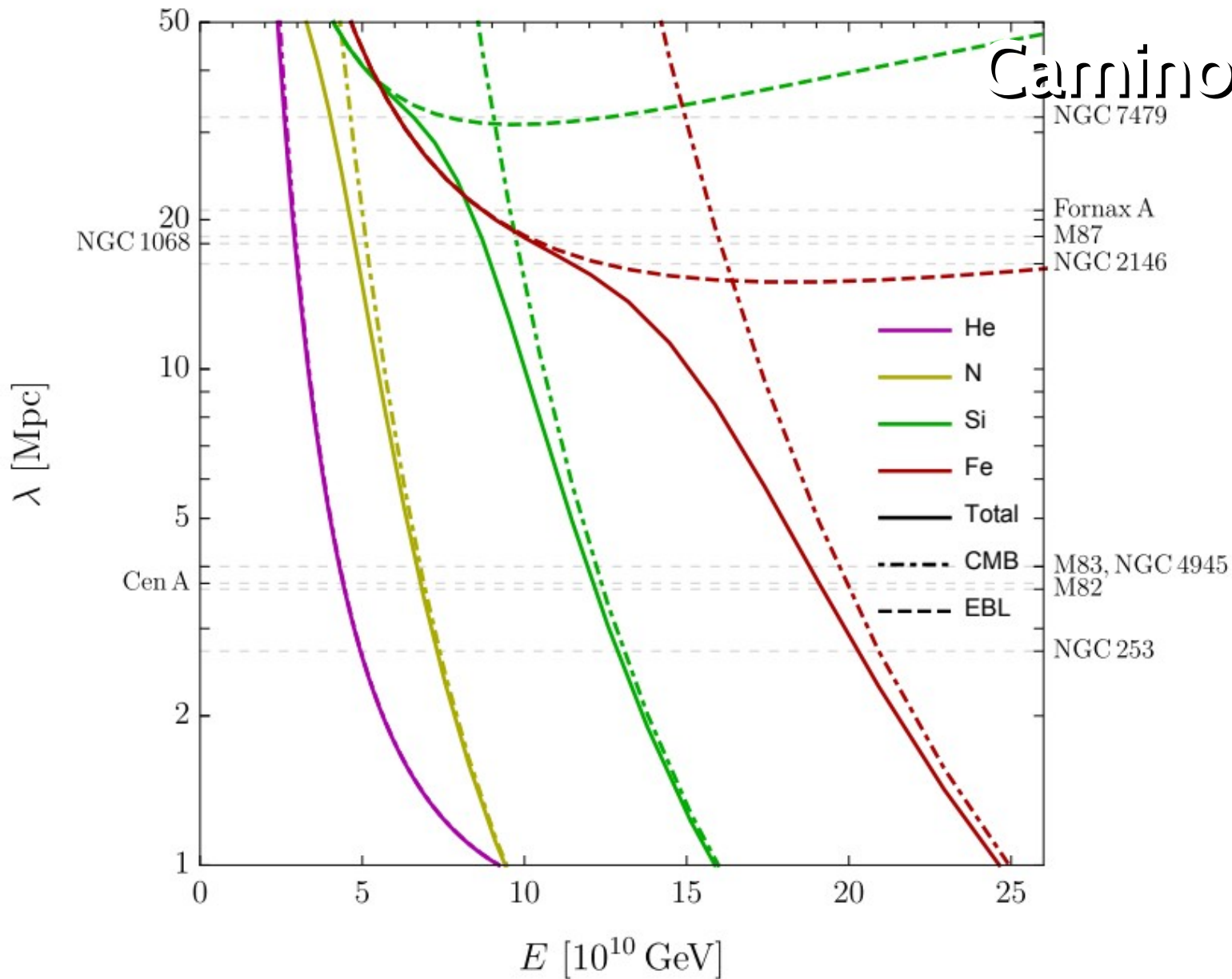


FIG. 4: Photodisintegration mfp on the CMB and EBL. The horizontal dashed lines indicate the distance to nearby starbursts and radio galaxies.

dos Anjos et al., 2018, arXiv: 1810.04251[astro-ph.HE]

Propagación: GZK y otros efectos

GZK

$$\begin{aligned} p^+ + \gamma_{\text{CMB}} &\rightarrow p^+ \pi^0 & E_{p^+} &\gtrsim 30 \text{ EeV} \\ p^+ + \gamma_{\text{CMB}} &\rightarrow p^+ e^\pm & E_{p^+} &\gtrsim 3 \text{ EeV} \\ A + \gamma_{\text{CMB}} &\rightarrow A + \frac{e^\pm}{\pi^0} & E_A &\gtrsim (1 + m_{e,\pi}/Am_p)E_{p^+} \end{aligned}$$

Expansión ($E_p \gtrsim 10^{21}$ eV)

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

Fotodesintegración

$$\begin{aligned} A + \gamma_{\text{CMB,IR}} &\rightarrow (A - n) + nN & E_A &\gtrsim 200 \text{ EeV} \\ A + \gamma_{\text{CMB,IR}} &\rightarrow A + e^\pm & E_A &\gtrsim 50 \text{ EeV} \end{aligned}$$

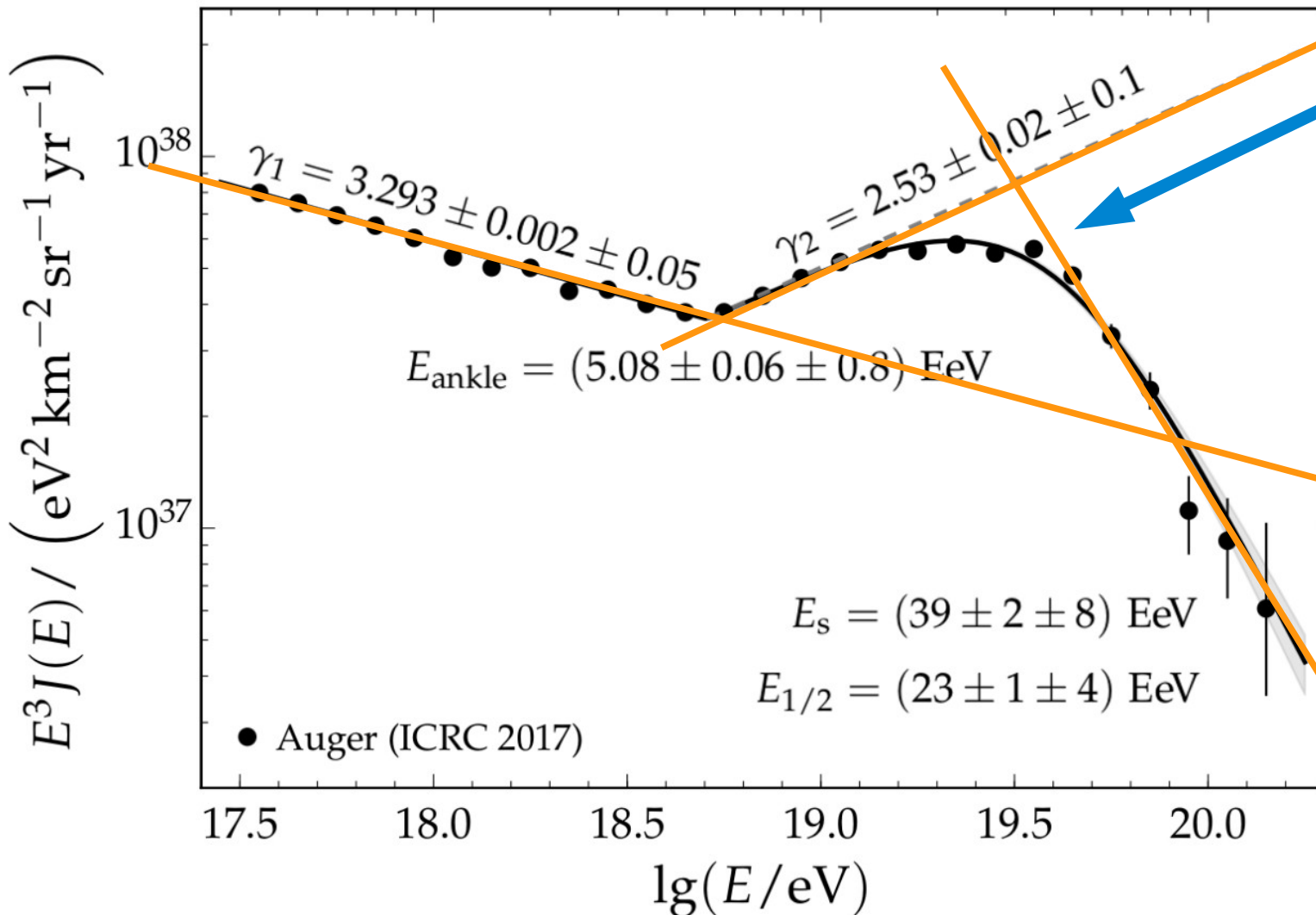
Longitud de interacción

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

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

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

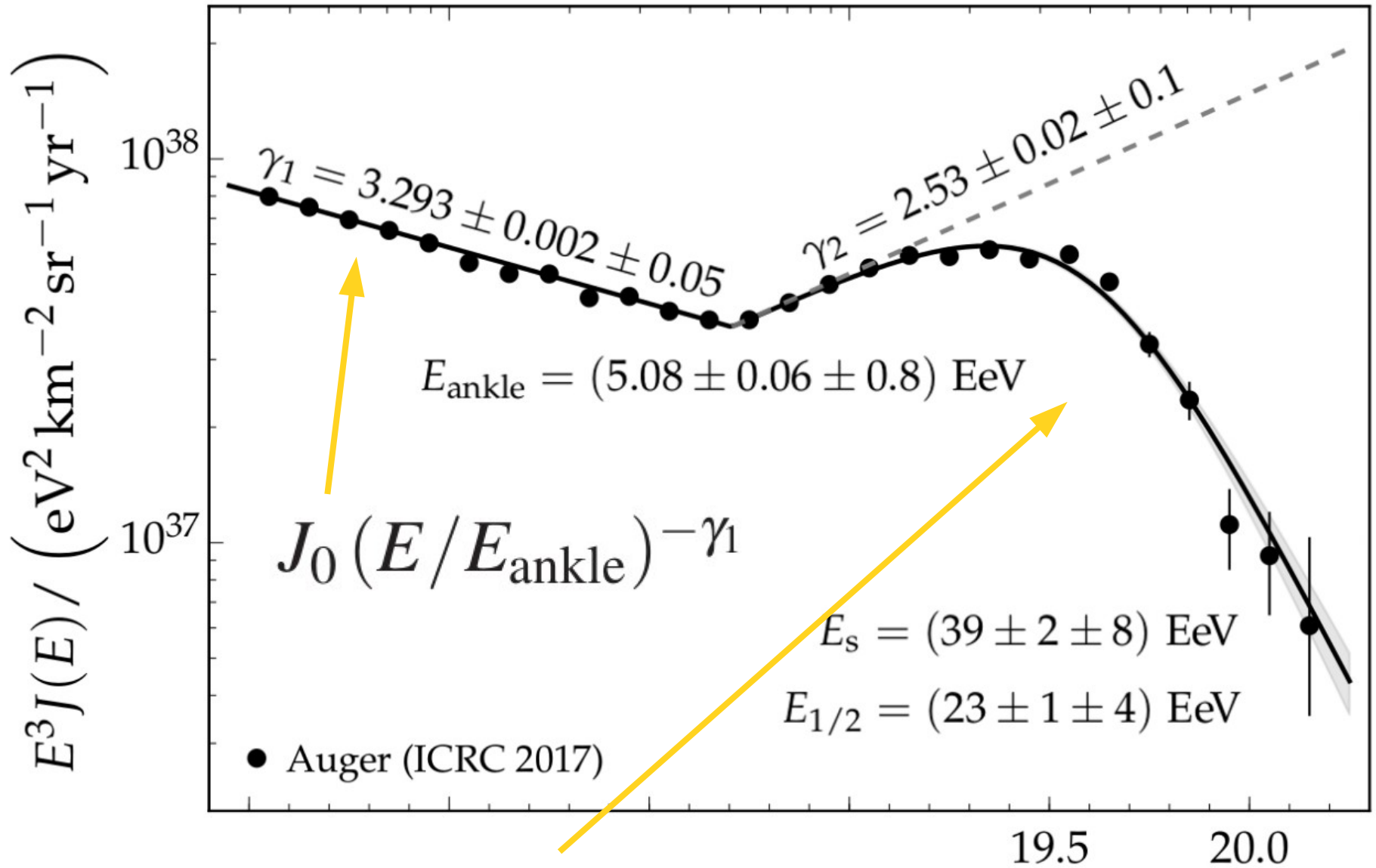
Espectro UHECR x E³



¿?



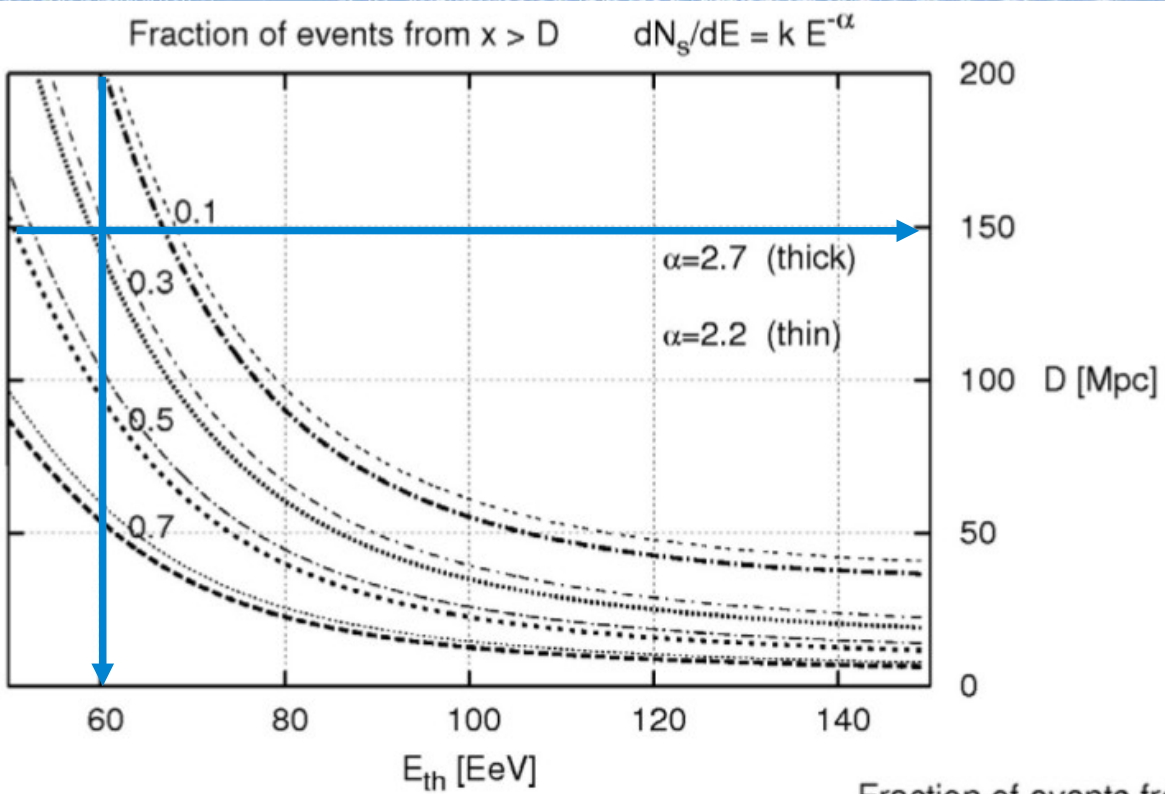
Espectro UHECR x E³



$$J(E) = J_0 \left(\frac{E}{E_{\text{ankle}}} \right)^{-\gamma_2} \left[1 + \left(\frac{E_{\text{ankle}}}{E_s} \right)^{\Delta\gamma} \right] \left[1 + \left(\frac{E}{E_s} \right)^{\Delta\gamma} \right]^{-1}$$

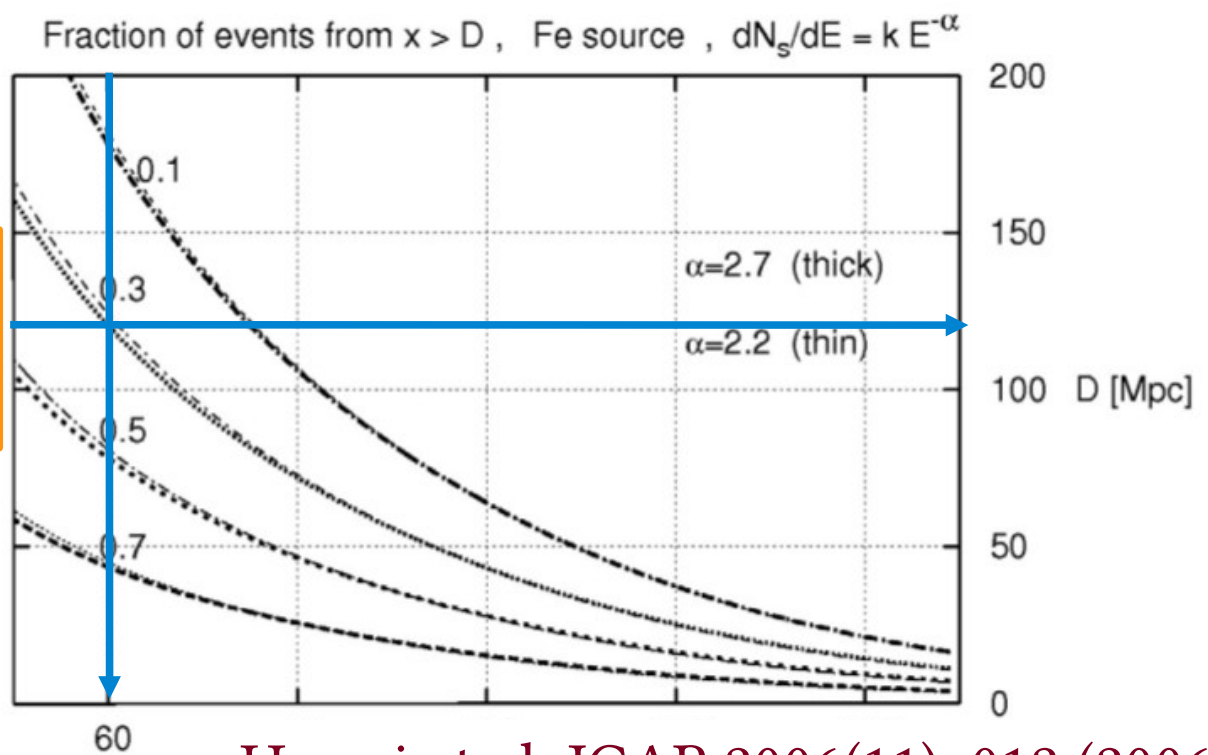


Horizonte GZK

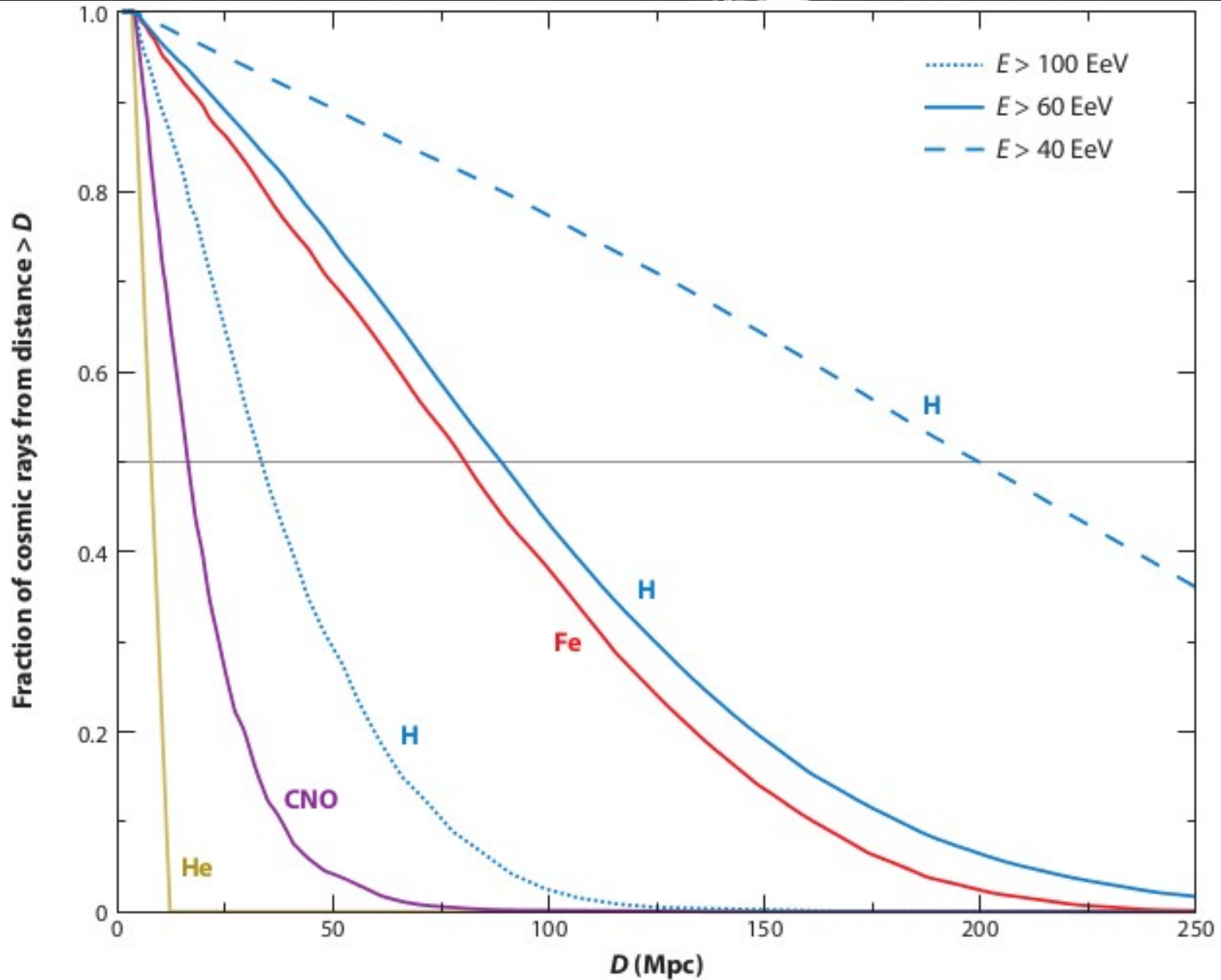


Si $E_{th} = 60$ EeV, el 70% de los protones provienen de $D < 150$ Mpc (30% a más de 150 Mpc)

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



Para otros núcleos



- A las energías más altas
 - → estudios de composición específicos
 - → limitados por la estadística
- Composición indeterminada:
 - top-down: $\sim 1/3$ hadrones, $\sim 1/3$ fotones, $\sim 1/3$ neutrinos
 - En ~ 15 años → no se observaron neutrinos ni fotones
- Son hadrones, ¿cuáles?
 - ¿protones? ¿hierros?
 - ¿mixed composition?
 - ¿transición hacia núcleos pesados (como en la 1er rodilla?)

UHE photon search → seguí participando

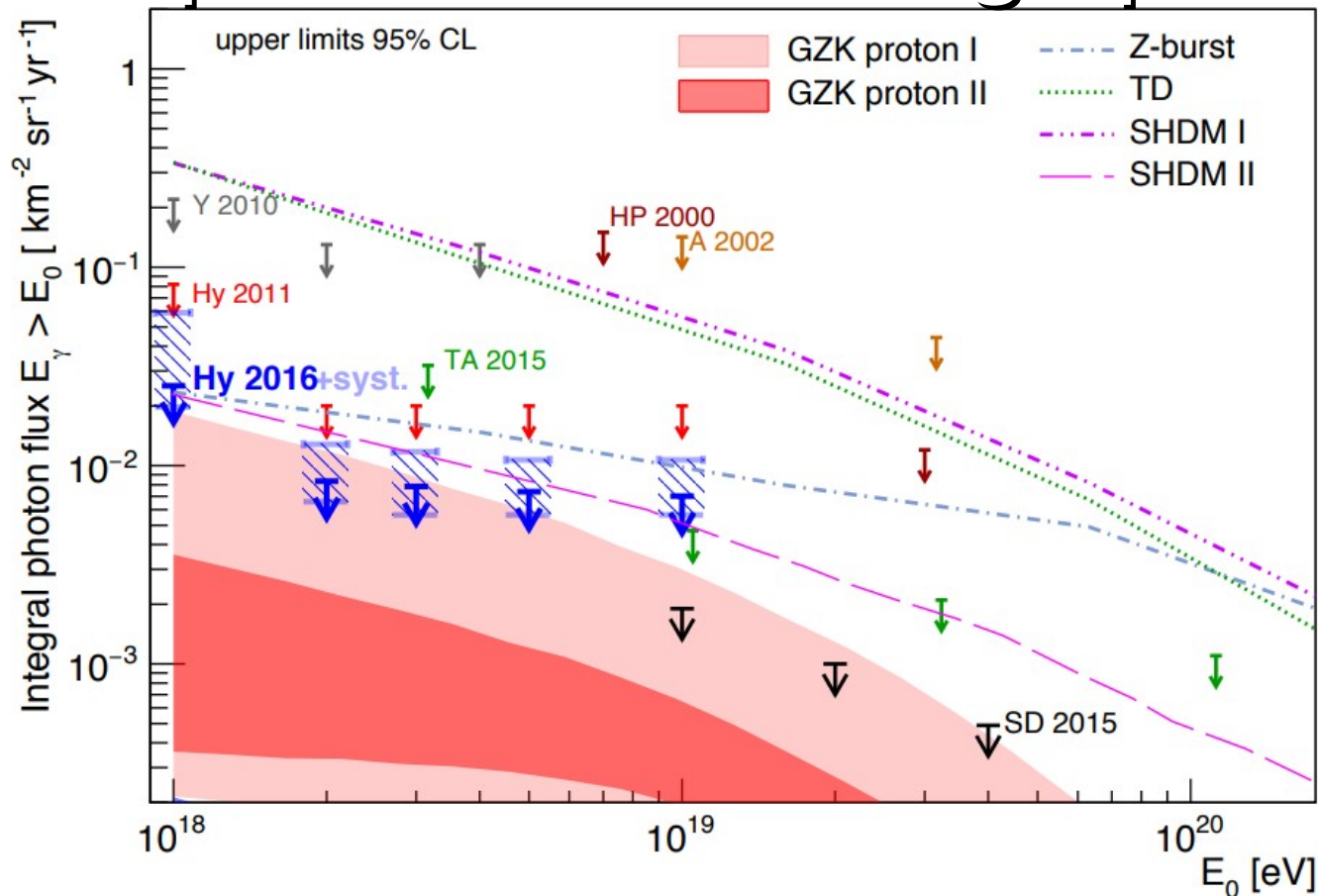


Figure 3: Upper limits on the integral photon flux derived in the analysis presented here (blue arrows, Hy 2016) [5]. The limits obtained when the detector systematic uncertainties are taken into account are indicated by the light-blue dashed boxes around the blue arrows. Also shown are the limits previously published by the Pierre Auger Observatory (Hy 2011 and SD 2015) and other experiments (Telescope Array, Yakutsk, AGASA, Haverah Park). The shaded regions and the lines give the predictions for photon fluxes from GZK-based models and several top-down models (Z-burst, topological defects, super-heavy dark matter). For a full list of references, see [5].

M. Niechciol for Auger, ICRC 2017, arXiv:1708.06592

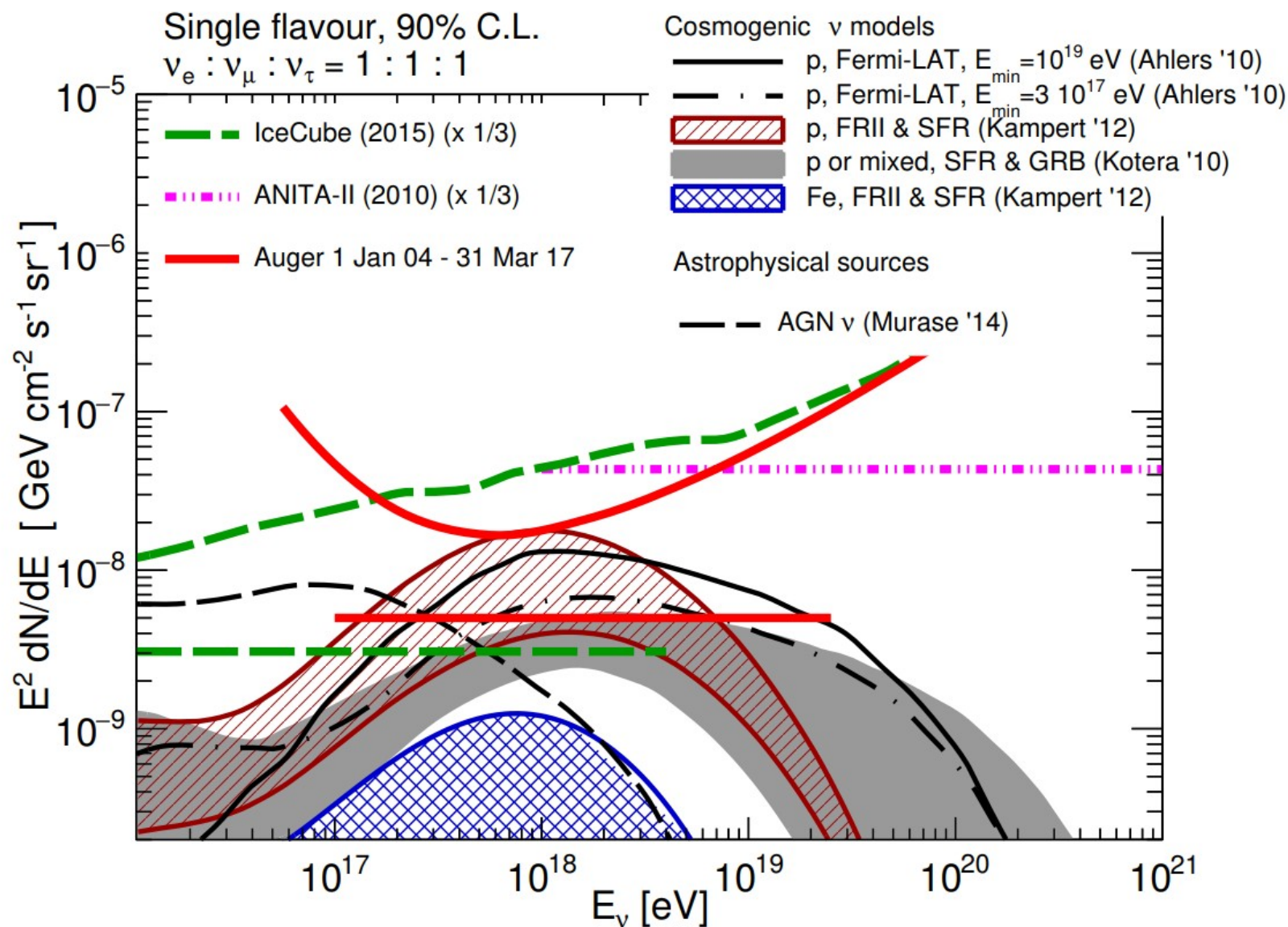
UHE Neutrino flux \rightarrow still waiting...

Figure 2: Integral upper limit (at 90% C.L.) for a diffuse neutrino flux of UHE $dN/dE_\nu = kE^{-2}$ given as a normalization, k , (straight red line), and differential upper limit (see text). Limits are quoted for a single flavor assuming equal flavor ratios. Similar limits from ANITAII [8] and IceCube [9] are displayed along with prediction for several neutrino models (cosmogenic [10, 11, 12], astrophysical [13].)

Transición hacia elementos pesados?

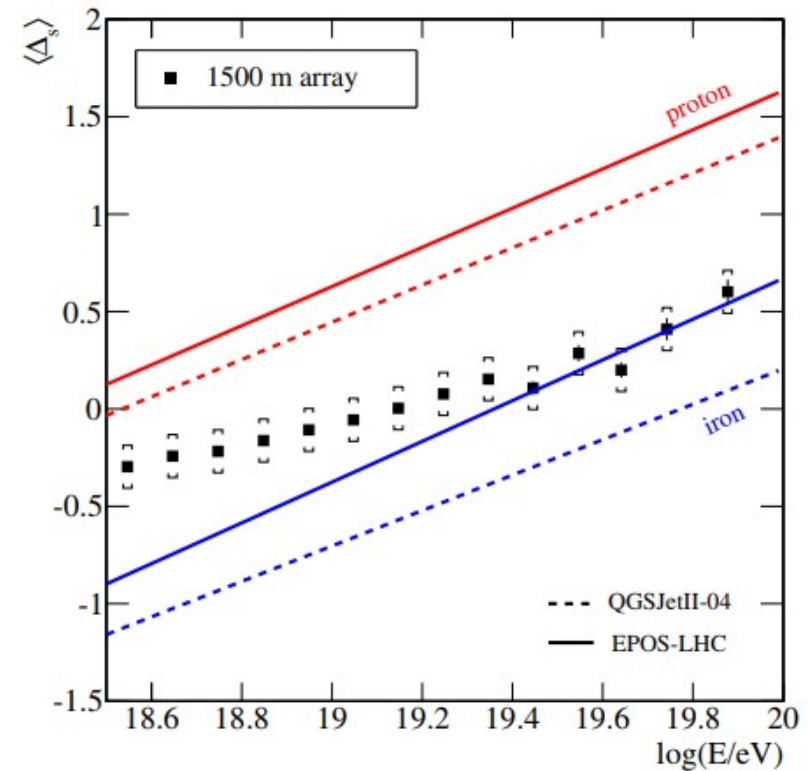
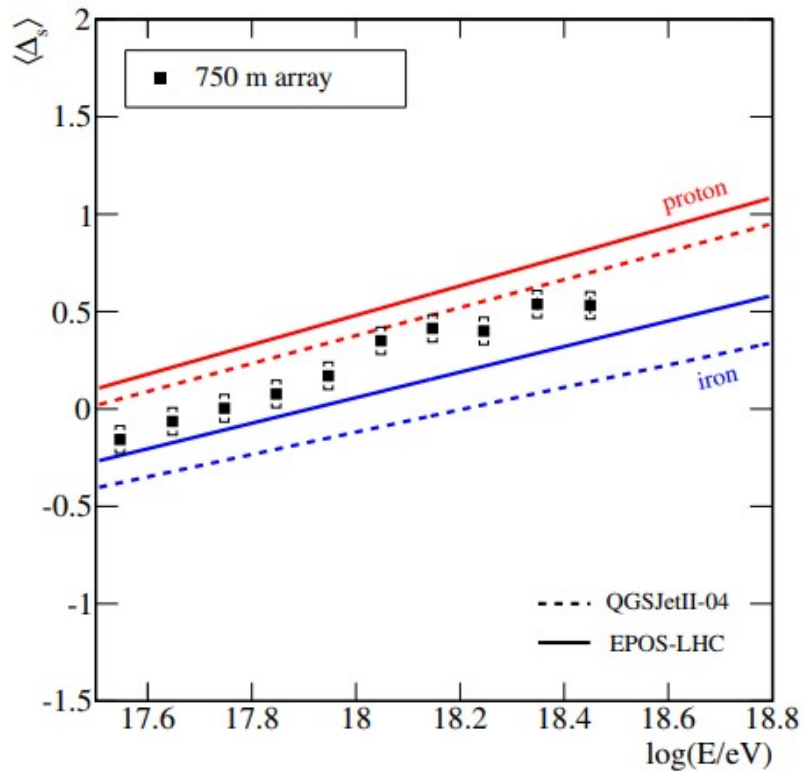


Figure 3: $\langle \Delta_s \rangle$ as a function of energy for the two surface arrays. Brackets correspond to the systematic uncertainties. Data are compared to the predictions obtained from simulations.

Transición hacia elementos pesados?

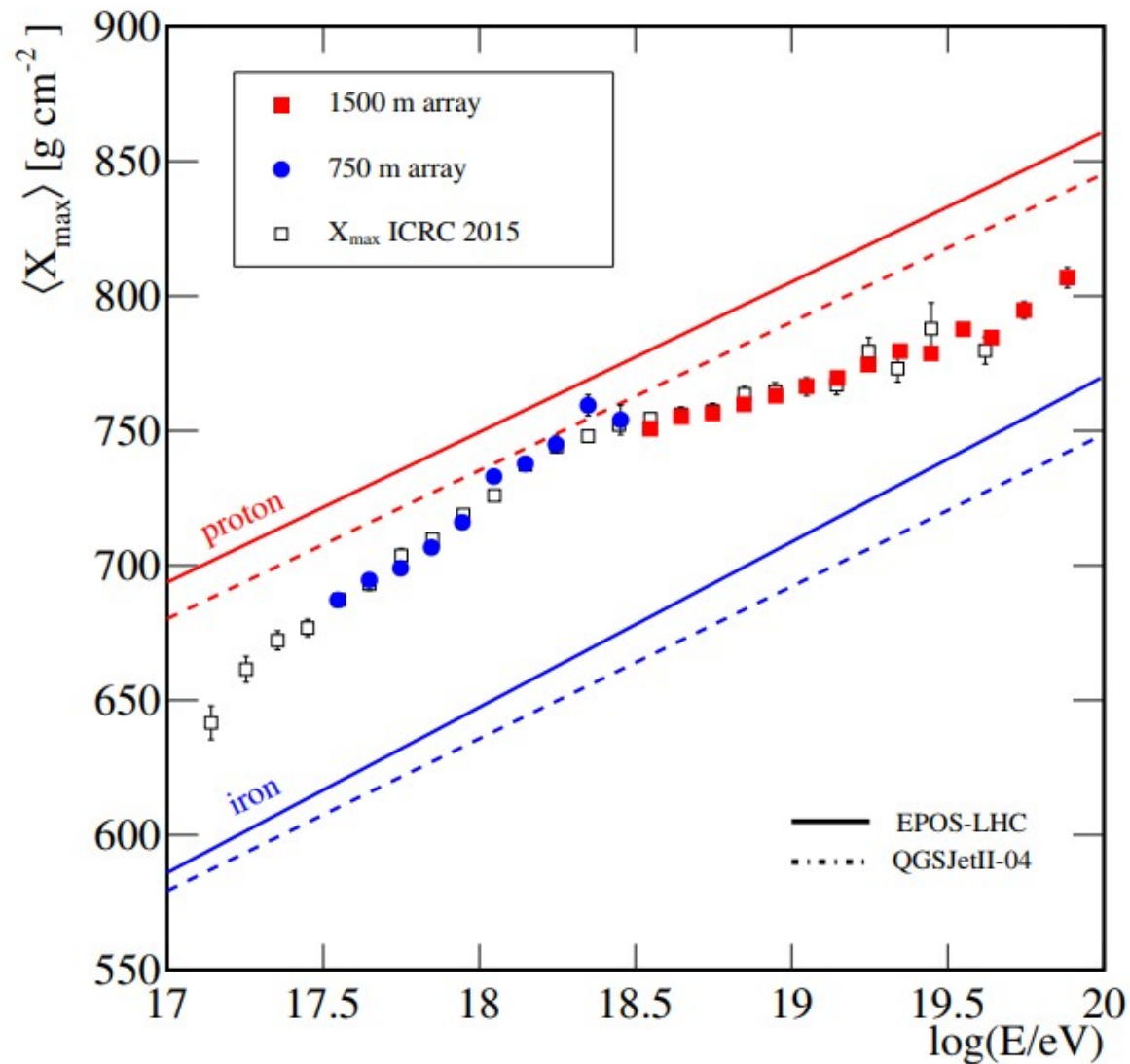


Figure 7: Comparison of $\langle X_{\max} \rangle$ measured using the fluorescence and surface detectors. The systematic uncertainties have been removed for a clearer view.

La composición y las fuentes

- Partículas cargadas:
 - “campos eléctricos para acelerar, campos magnéticos para confinar”
- La energía máxima dependerá del Z y de la capacidad de aceleración de la fuente ($\rightarrow \sim$ rodilla)
 - ~~“El modelo decepcionante” (dissapointing model)~~
 - Los modelos son modelos
- La deflexión magnética depende de la carga
 - “¿podemos decir que los UHECR apuntan a la fuente?”

$$\theta \approx 0.15^\circ Z \sqrt{\frac{D}{3.8 \text{ Mpc}} \frac{\lambda_B}{0.1 \text{ Mpc}} \left(\frac{B}{\text{nG}}\right) \left(\frac{10^{11} \text{ GeV}}{E}\right)}$$

Extragalactic magnetic fields ($\sim \text{nG}$)



$$Z, E \rightarrow B \rightarrow \Delta\theta$$

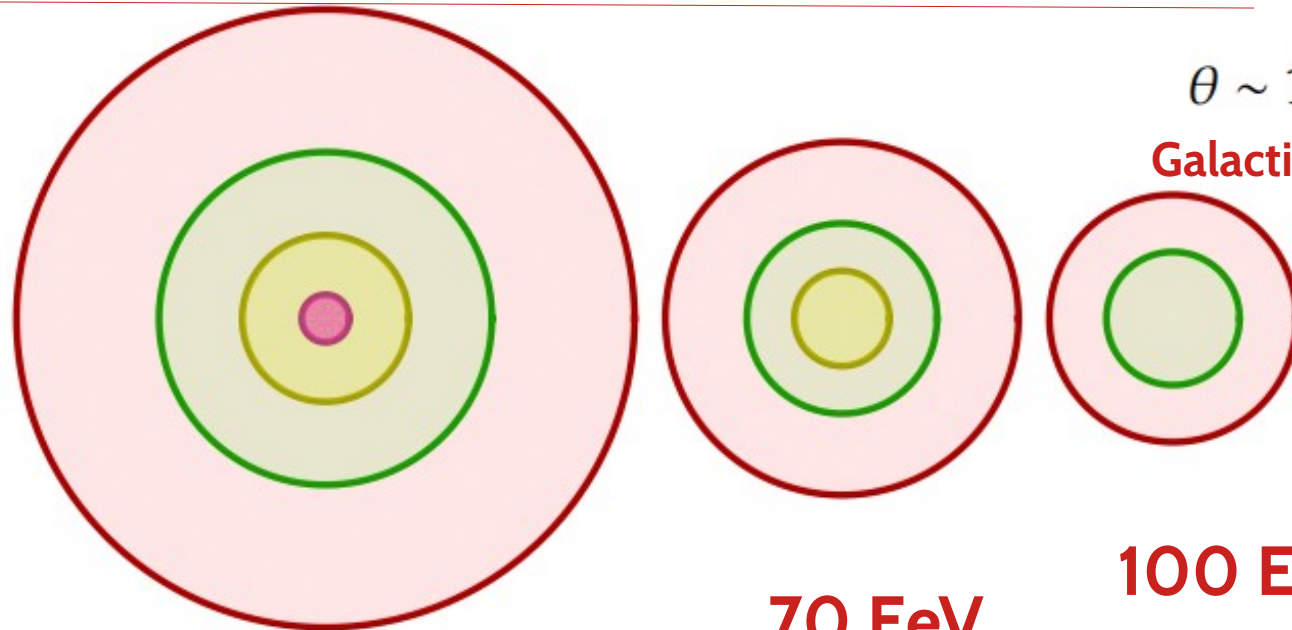
H

He

N

Si

Fe



$$\theta \sim 10^\circ Z \left(\frac{E}{10^{10} \text{ GeV}}\right)^{-1}$$

Galactic magnetic fields ($\sim \mu\text{G}$)

40 EeV

70 EeV

100 EeV

FIG. 1: Circles representing the composition-layered structure of hotspots at different energies, for proton sources (top) and nuclei sources (bottom). The radii of the circles respect the proportions of the angular sizes given by (1), for protons (black), helium (magenta), nitrogen (yellow), silicon (green) and iron (red); and for 40 EeV (left), 70 EeV (center) and 100 EeV (right).

2FHL (FermiLAT $E > 50 \text{ GeV}$) $\rightarrow \gamma \text{AGN}$

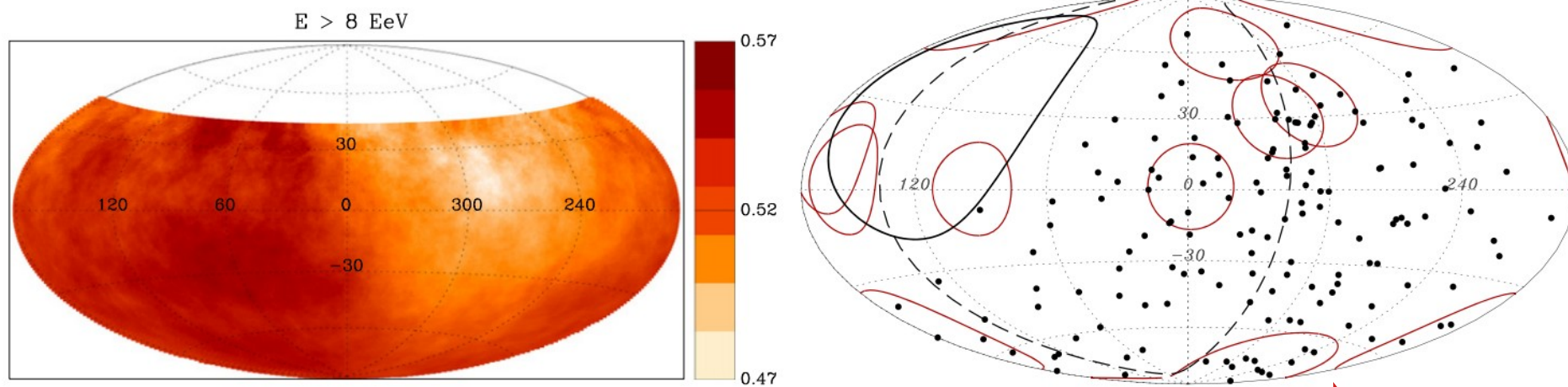


FIGURE 6. Left: Sky map in (equatorial coordinates) of flux, in $\text{km}^{-2} \text{ yr}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ units, smoothed in angular windows of 45° radius, for observed events with energies $E > 8 \text{ EeV}$ (from [48]). Right: The sky map (in Galactic coordinates) shows the events with $E \geq 58 \text{ EeV}$, together with the Swift AGNs brighter than $10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ and closer than 130 Mpc, indicated by red circles of 18° radius (from [16]).

Collaboration has also performed cross-correlation analyses with bright AGN from catalogs. For Swift-BAT bright AGNs, the correlation maximises for $D = 130 \text{ Mpc}$ and $\mathcal{L} > 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$, with a threshold energy of $E_{\text{th}} = 58 \text{ EeV}$ and an angular radius $\Psi = 18^\circ$. For those parameters, 62 pairs are observed between 155 cosmic rays and 10 AGNs (with $\mathcal{L}_X > \mathcal{L}_{\text{min}}$) while 32.8 are expected from isotropy. A sky map is shown in Figure 6 (right) representing these events and AGNs in galactic coordinates. The penalized probability to find in isotropic simulations stronger correlations under the same scan on $(\Psi, E_{\text{th}}, \mathcal{L}_{\text{min}}, D)$ is $P \simeq 1.3\%$ [16].

Anisotropies and superclusters

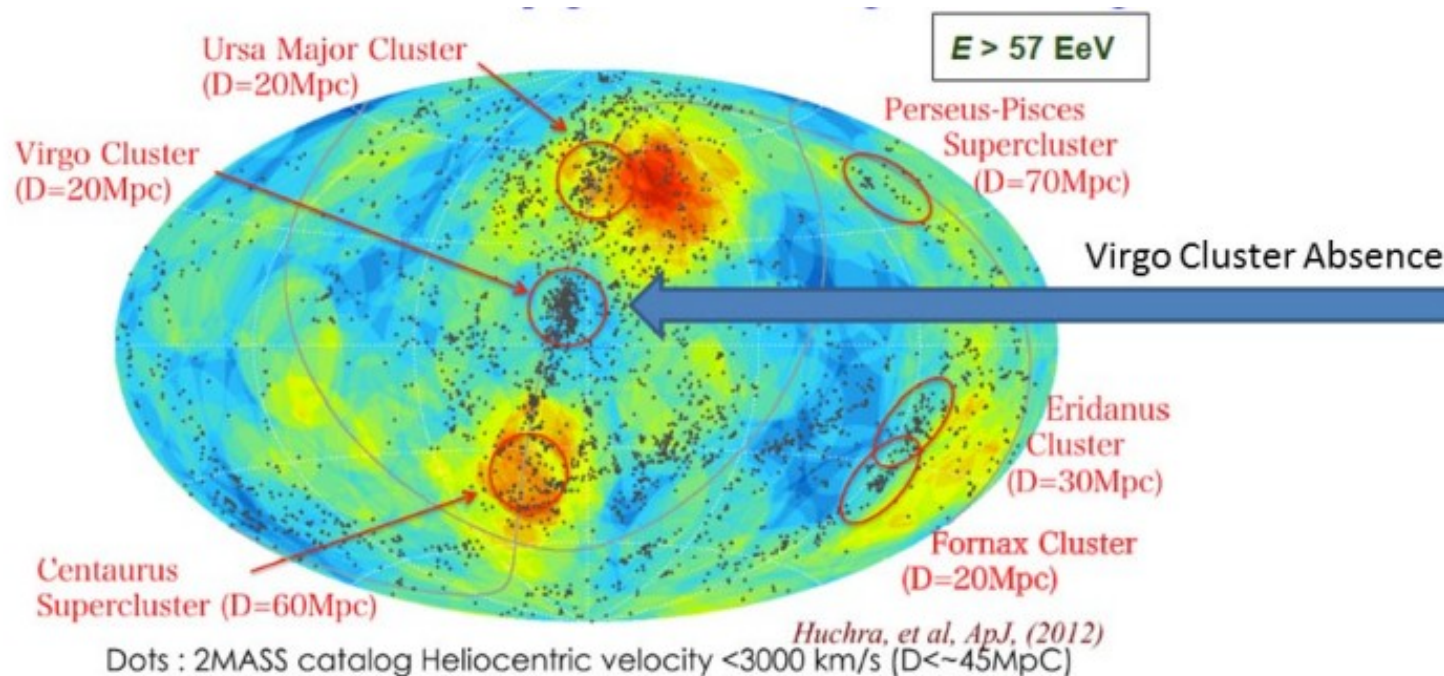


Figure 1: The combined map, in equatorial coordinates, based on the 2015 Auger and TA presentations where the two red hot spot UHECR clustering signals, North for TA and South for Auger, are showing the main UHECR dense event rate. The dark dots are the main galaxies in nearby GZK volumes [18]. This UHECR map is missing, at its center, of the most abundant and expected Virgo galaxy infrared cluster sources, the heaviest mass concentration within a GZK volume. To explain the absence of the UHECR events from Virgo we imagined and suggested a filter. We claimed therefore that UHECR were mostly lightest nuclei that are too fragile and cannot reach us above a few Mpc inside the cosmic big bang thermal bath. Indeed Virgo lay at 20 Mpc while the lightest nuclei interaction distance it is below a few Mpc. Only a decade later the light nuclei UHECR have been accepted by Auger collaboration team (see note at page 26 of [5]) because of the observed UHECR average depths of the shower maximum.

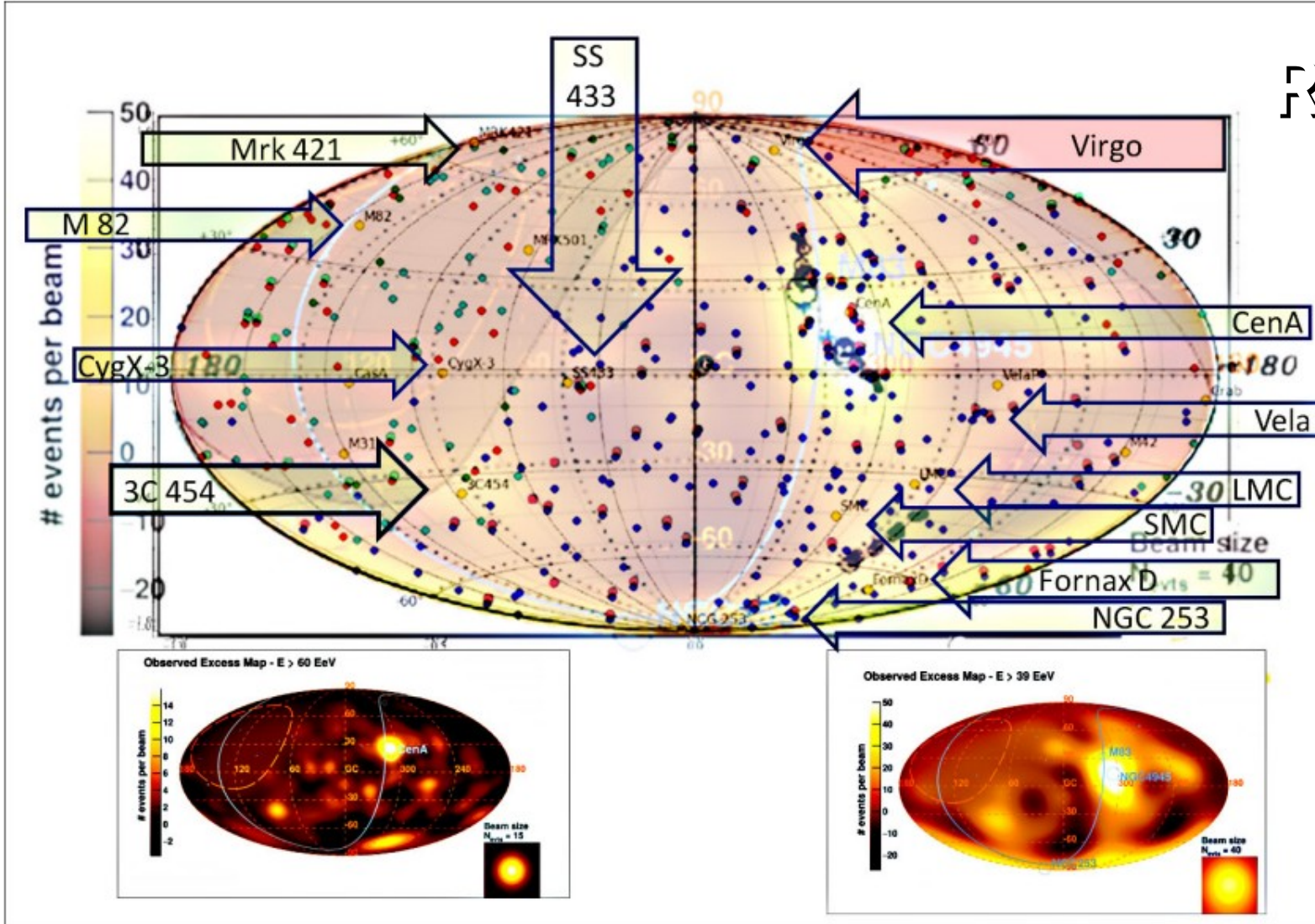
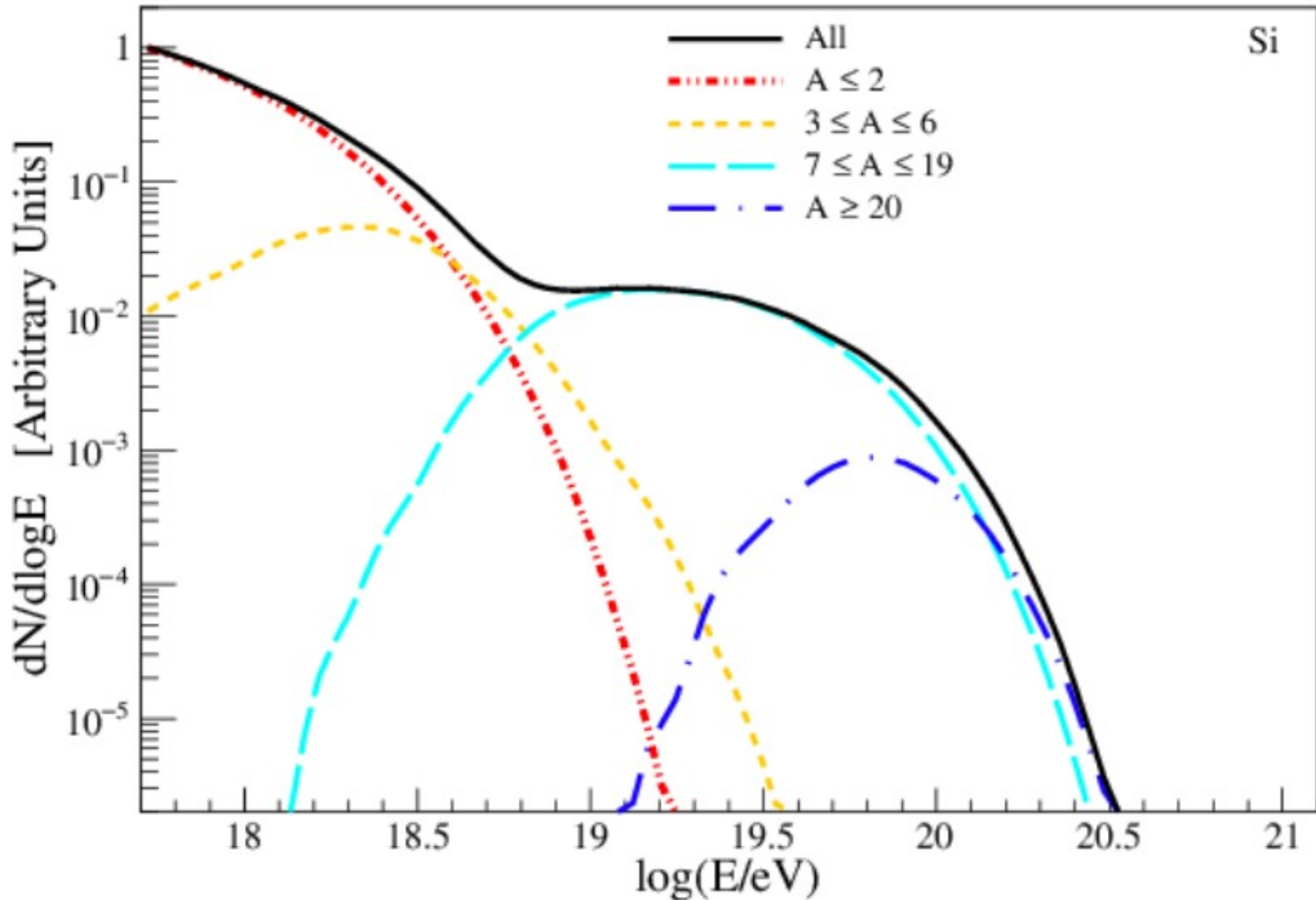


Figure 7: In present galactic coordinate sky map we recalled and tagged all the main probable sources (or missing ones, as Virgo) [21]. A 39 EeV anisotropy map is in background. These candidate sources are not different from previous ones discussed since 2008-2015. In particular we like to remind the very growing signals at Vela nearby sky, the weak LMC-SMC clustering, the enhanced NGC 253 and Fornax D area of events. In addition to the 3C 454, also far Mrk 421 and possibly the far AGN PKS 0208-512 might also play a role as sources of UHECR clustering; their UHE ZeV neutrino courier, hitting the relic cosmic neutrino background with mass (possibly at $\simeq 1.6eV$ as the candidate sterile one) are leading to nucleon and antinucleon secondaries observed as UHECR cluster

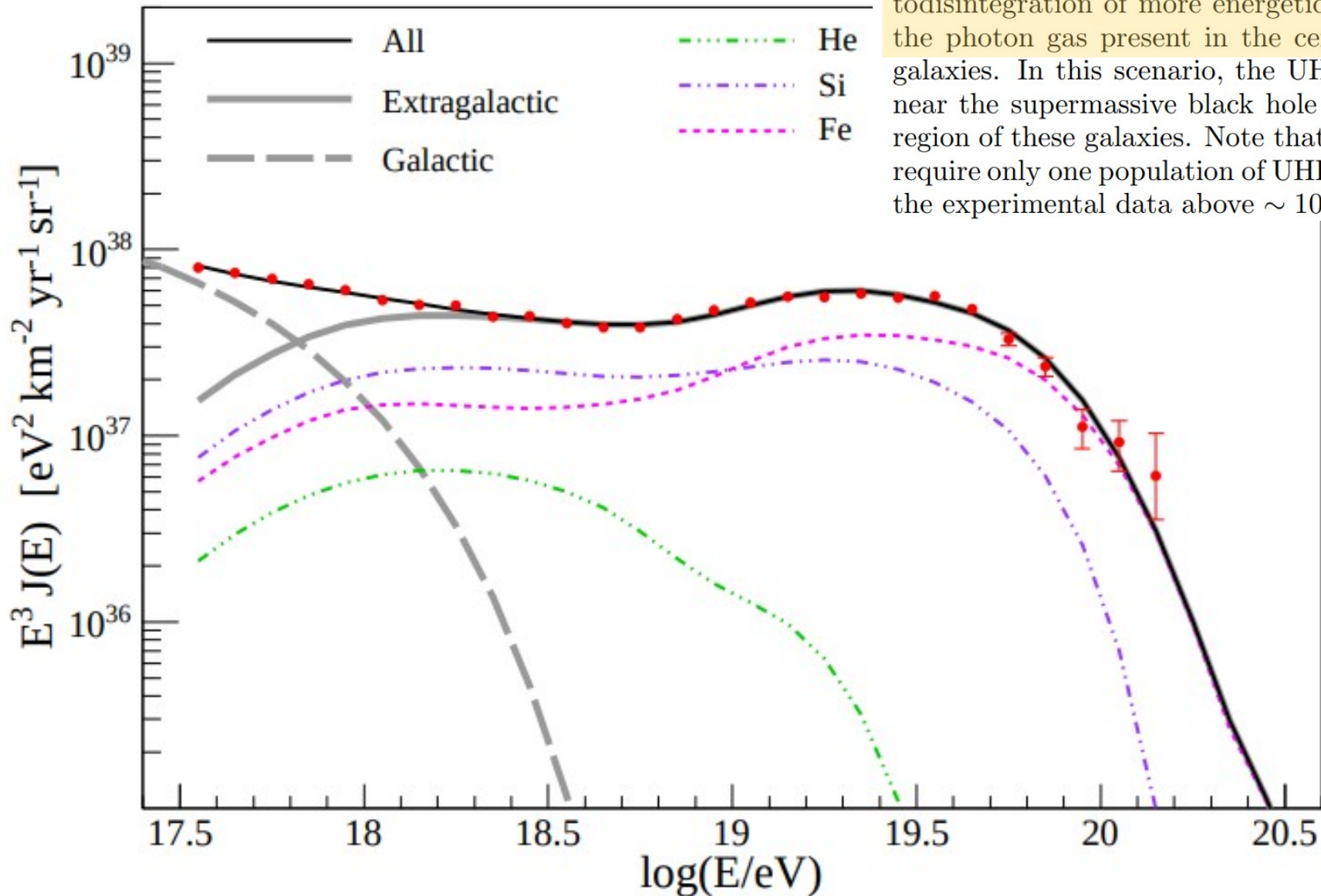
UHECR spectrum and composition

B too high (100G)



Model and fit to data

In this work, we have studied the possibility that the presumed extragalactic light component that dominates the UHECR flux below the ankle originates from the photodisintegration of more energetic and heavier nuclei in the photon gas present in the central regions of active galaxies. In this scenario, the UHECRs are accelerated near the supermassive black hole present in the central region of these galaxies. Note that these types of models require only one population of UHECR sources to explain the experimental data above $\sim 10^{18}$ eV.



Irons or protons? That is the question

