

# **Ensemble fluctuations of the cosmic ray energy spectrum and the magnetic field of the intergalactic medium**

A. D. Supanitsky<sup>1</sup> and G. Medina-Tanco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, CONICET-UBA)*

<sup>2</sup>*Instituto de Ciencias Nucleares-UNAM, México*

# Fuentes de los rayos cósmicos ultra energéticos

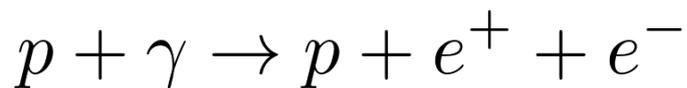
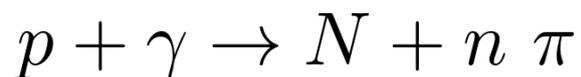
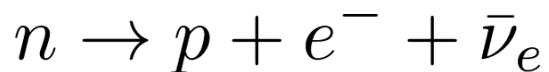
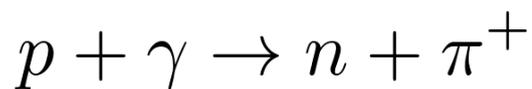
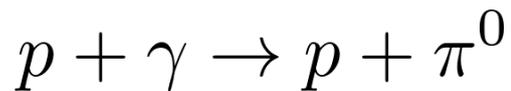
- A la fecha no hay fuentes identificadas.
- Los datos obtenidos por el observatorio Pierre Auger muestran un exceso en la dirección de Centaurus A (P. Abreu et al. 2008).
- Los datos de Telescope Array muestran un exceso en la dirección del blazar Markarian 421 (R. Abbasi et al. 2014).
- No se conoce la densidad de fuentes de rayos cósmicos, hay cotas obtenidas de los datos de Auger (P. Abreu et al. 2013):

$$\rho \in (0.06 - 5) \times 10^{-4} \text{ Mpc}^{-3}$$

95% CL

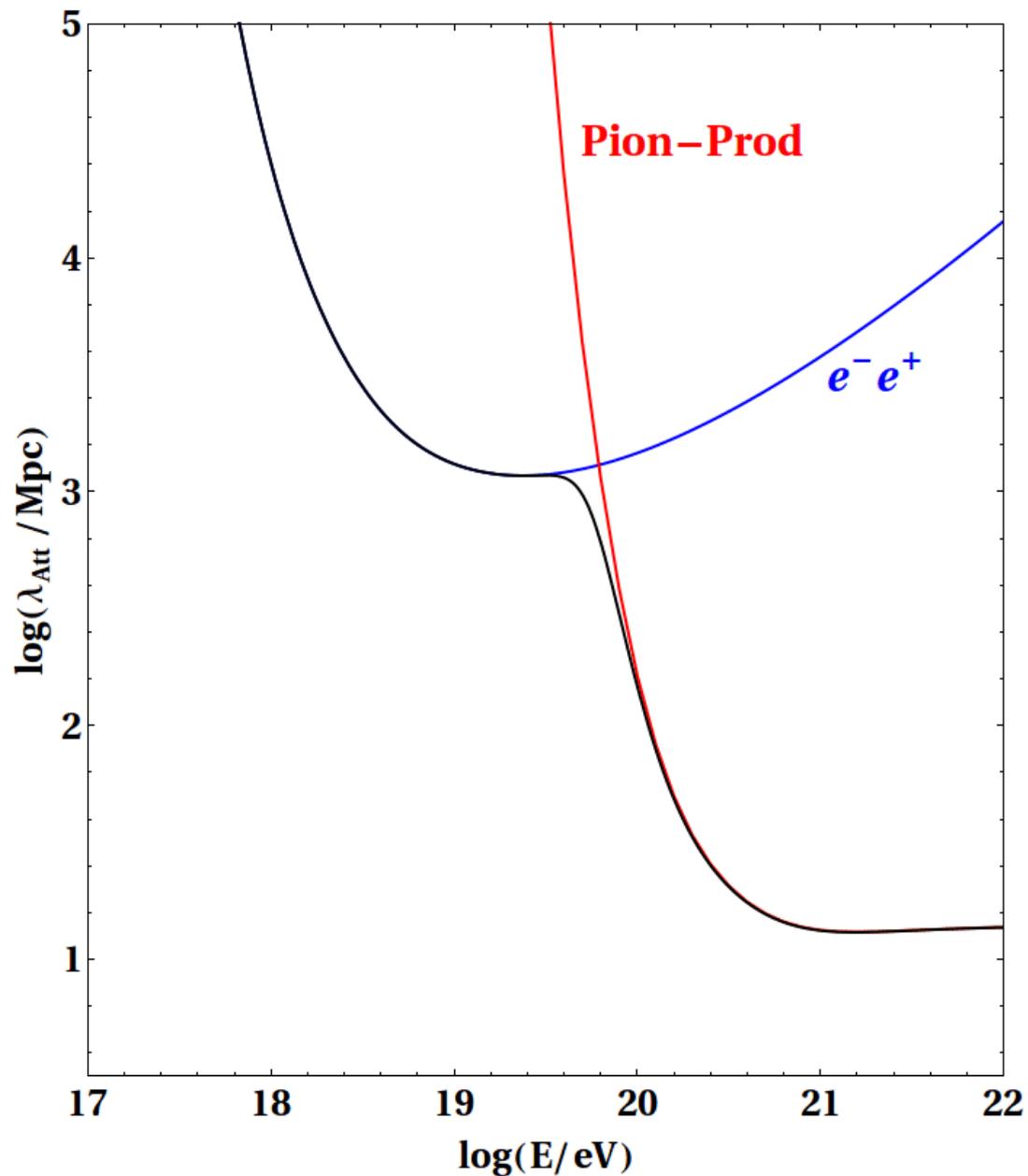
# Propagación de los rayos cósmicos ultra energéticos

## Protones

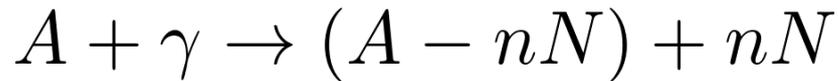
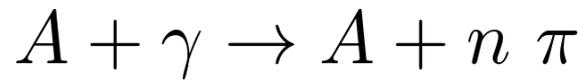


$\gamma$  → Radiación cósmica de fondo (CMB)  
 $\gamma$  → Fondo de luz extragláctico (EBL)

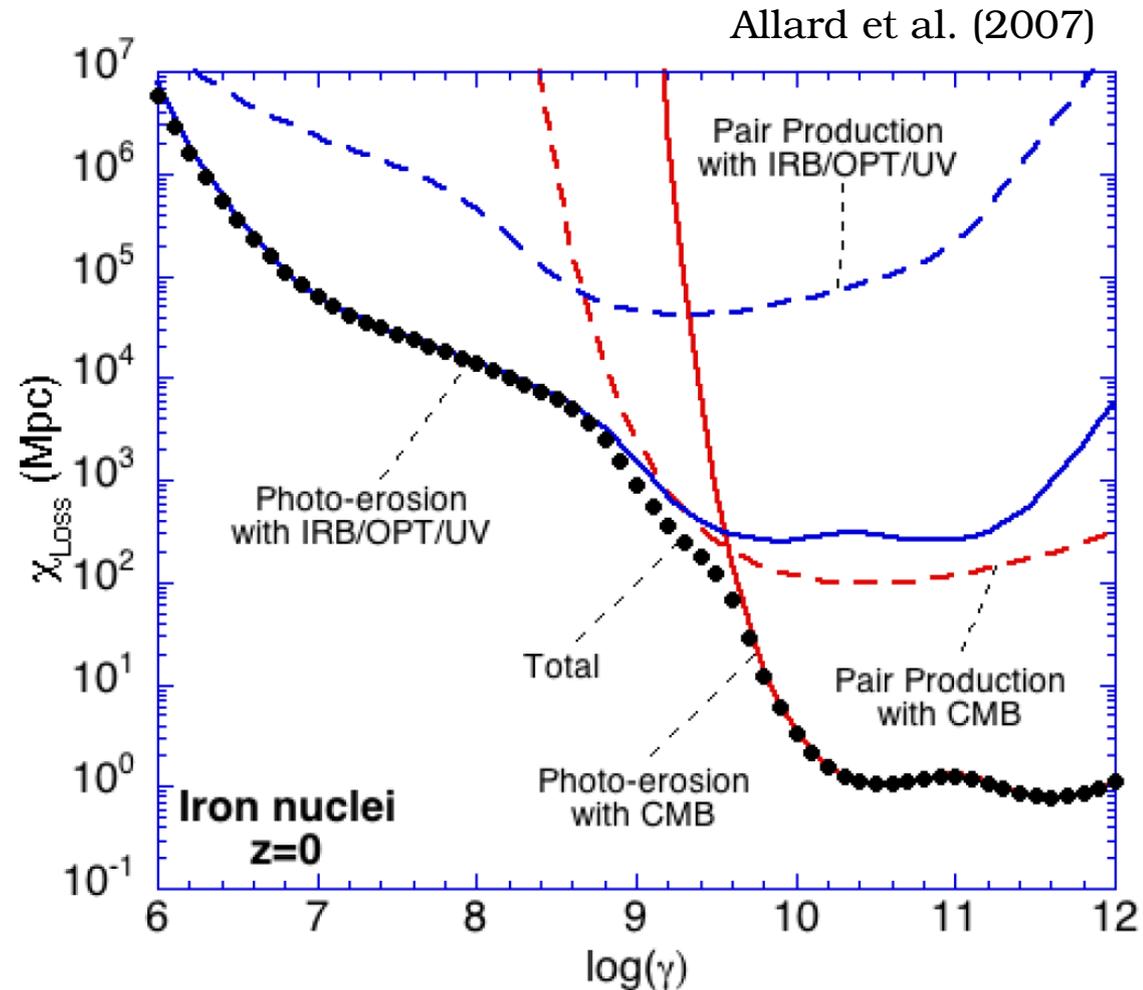
Longitud de atenuación en el CMB



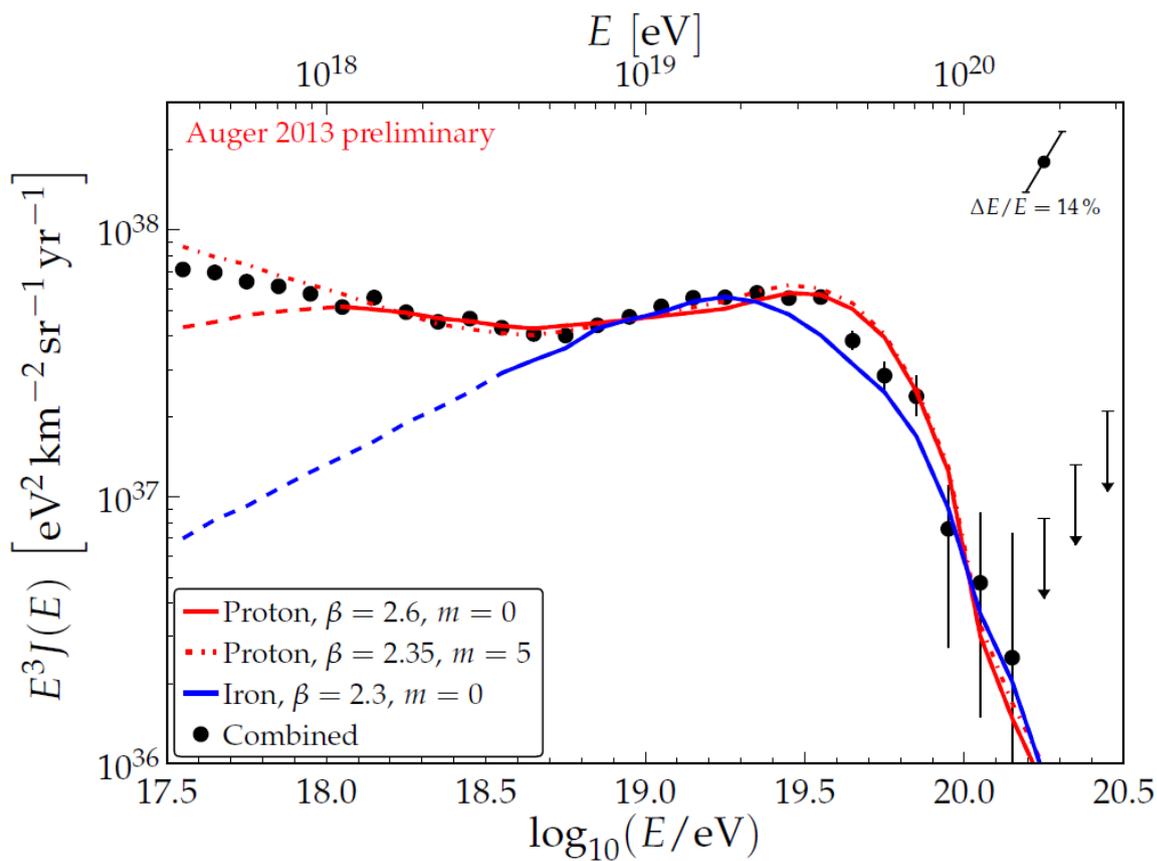
## Núcleos pesados



$\gamma$  → Radiación cósmica de fondo (CMB)  
 $\gamma$  → Fondo de luz extragaláctico (EBL)



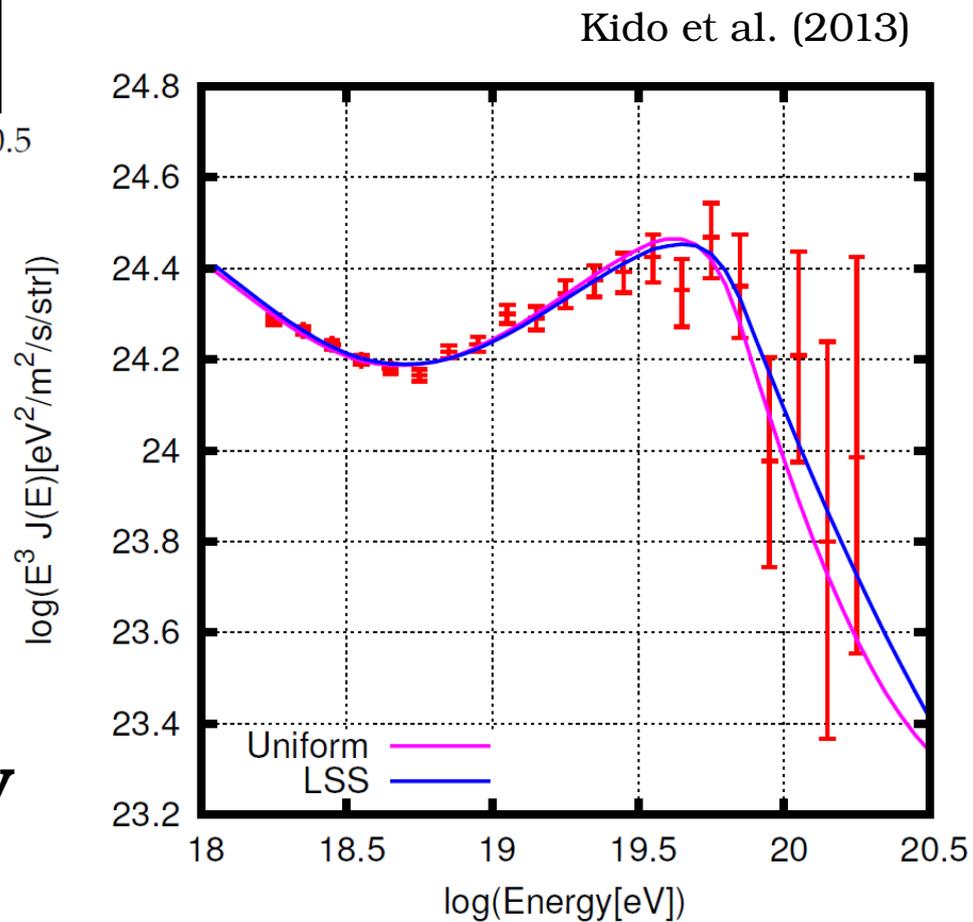
$$E_{Fe} \cong 5.2 \times 10^{10} eV \Gamma$$



Schulz et al. (2013)

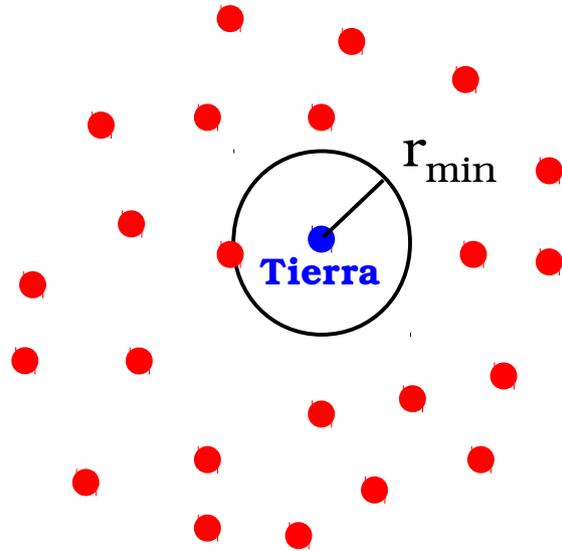
## Espectro de Telescope Array

## Espectro de Auger

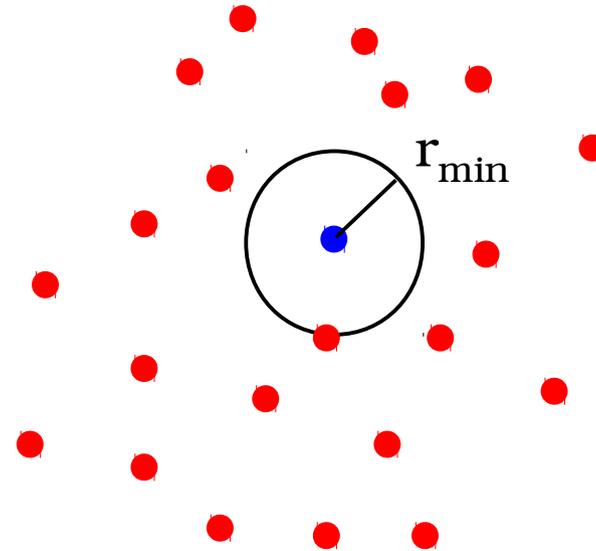


# Fluctuaciones debidas a la distribución de fuentes

Realización 1



Realización 2



**Fuentes extragalácticas  
de rayos cósmicos**

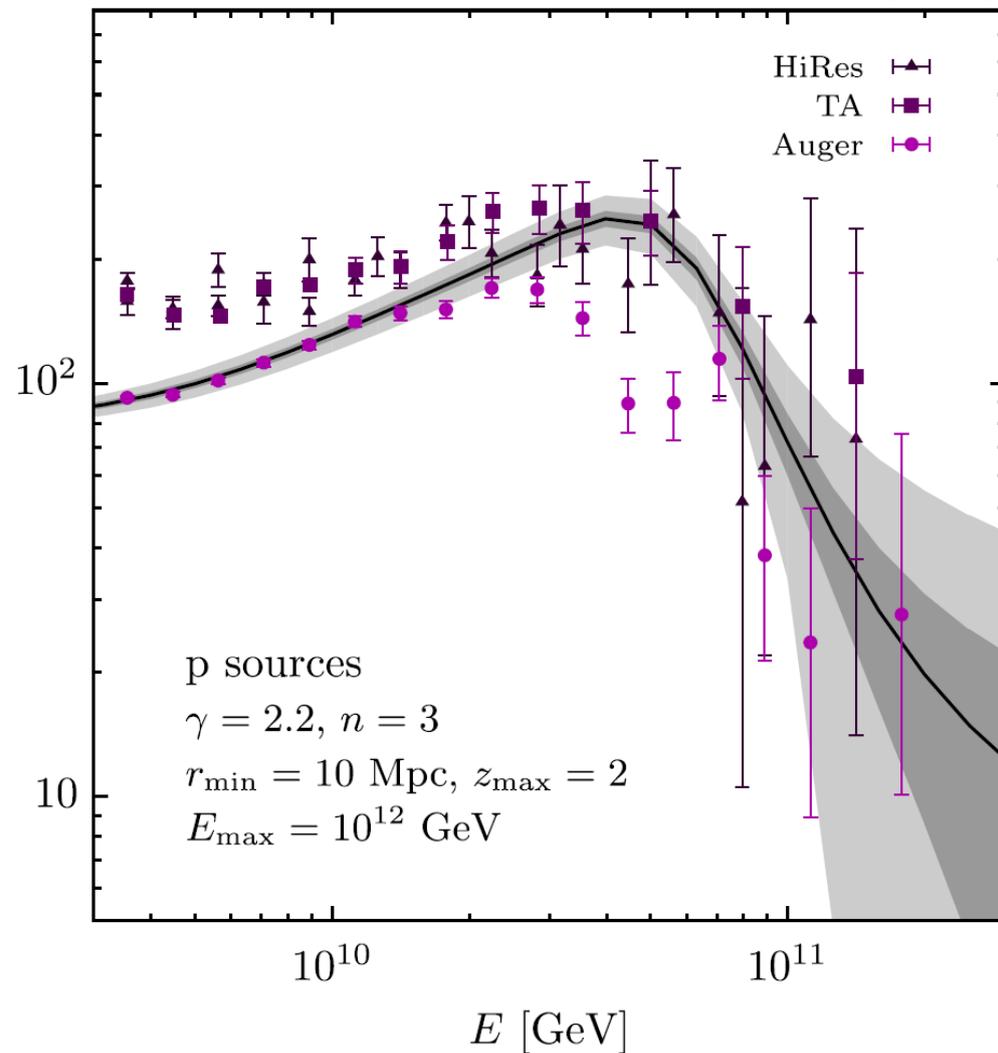
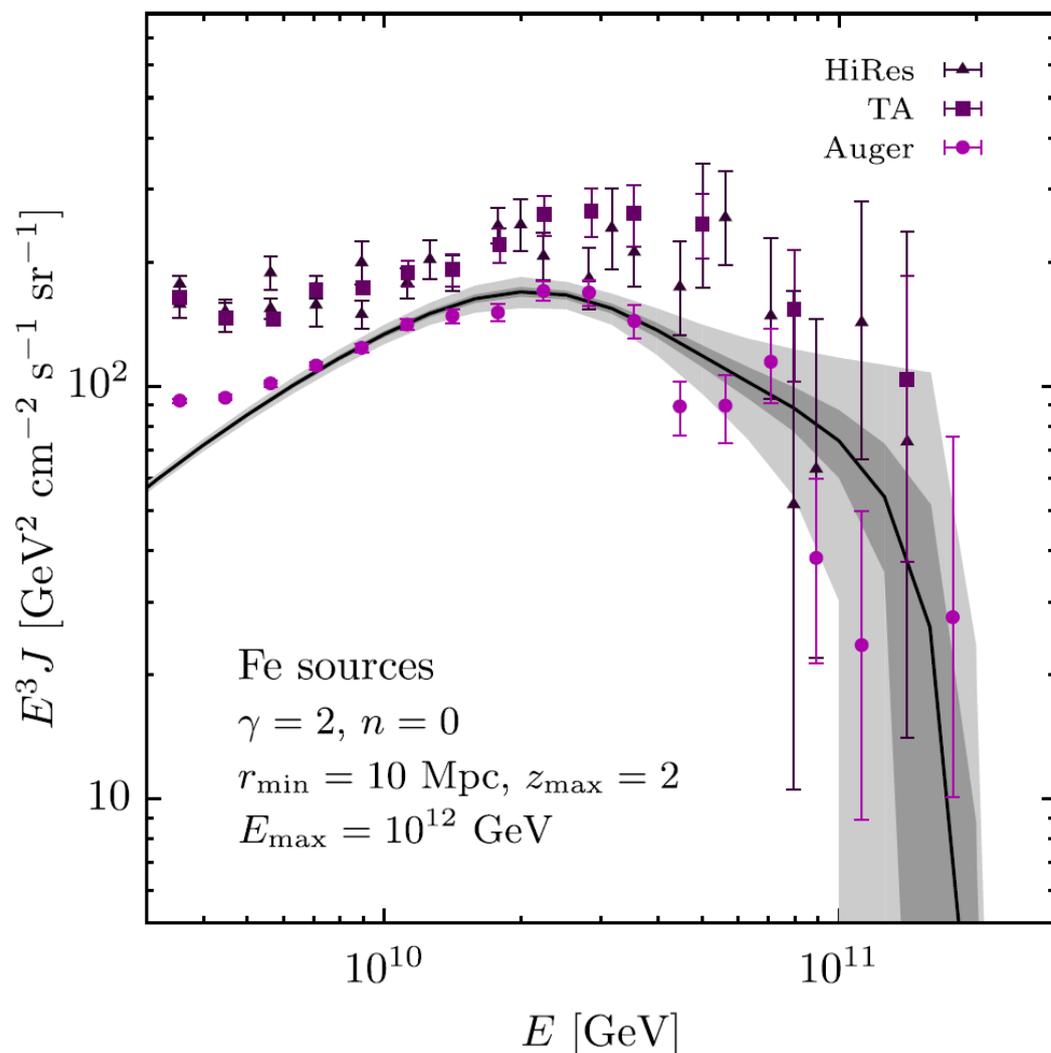
Dada una densidad de fuentes de rayos cósmicos hay muchas realizaciones posibles para la distribución espacial de dichas fuentes.

**Distribución uniforme:**

$$\frac{dN_s}{dr} = 4\pi n_s r^2$$

# Campo magnético del medio intergaláctico nulo

Ahlers et al. (2013)



## Distribución uniforme de fuentes:

$$n_s = 10^{-6} \text{ Mpc}^{-3}$$

Región gris claro

$$n_s = 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$$

Región gris oscuro

# Campo magnético del medio intergaláctico

Rotación de Faraday

$$\sqrt{\langle B^2 L_c \rangle} \lesssim 10 \text{ nG} \sqrt{\text{Mpc}} \quad \text{Blasi et al. (1999)}$$

$L_c$  Longitud de coherencia

Cotas recientes obtenidas usando observaciones provenientes de astronomía gamma. Por ejemplo:

$$B \neq [0.3, 3] \times 10^{-15} \text{ G} \quad 99\% \text{ CL} \quad \text{HESS Collaboration (2014)}$$

$$L_c = 1 \text{ Mpc}$$

# Simulación del campo magnético del medio intergaláctico

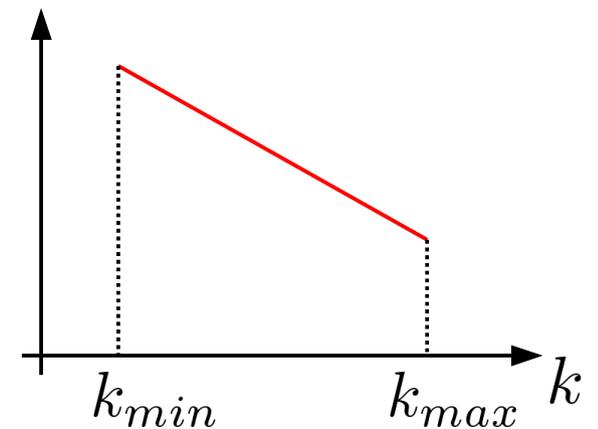
$$\bar{B}(\bar{x}) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \bar{B}(\bar{k}) \exp(i\bar{k} \cdot \bar{x}) \quad \text{Campo turbulento}$$

$$\langle ||\bar{B}(\bar{x})||^2 \rangle = \int_0^\infty dk B^2(k) = B_{RMS}^2$$

$$B^2(k) = B_{RMS}^2 \frac{(n-1) \left(\frac{2\pi}{L_{max}}\right)^{n-1}}{1 - \left(\frac{L_{min}}{L_{max}}\right)^{n-1}} k^{-n}$$

$$n = \frac{5}{3} \quad \text{Espectro de Kolmogorov}$$

Ley de potencias



$$k = \frac{2\pi}{L}$$

## Longitud de coherencia

$$L_c = \frac{n-1}{n} \frac{1 - \left(\frac{L_{min}}{L_{max}}\right)^n}{1 - \left(\frac{L_{min}}{L_{max}}\right)^{n-1}} \frac{L_{max}}{2}$$

Harari et al. (2002)

## Simulación numérica

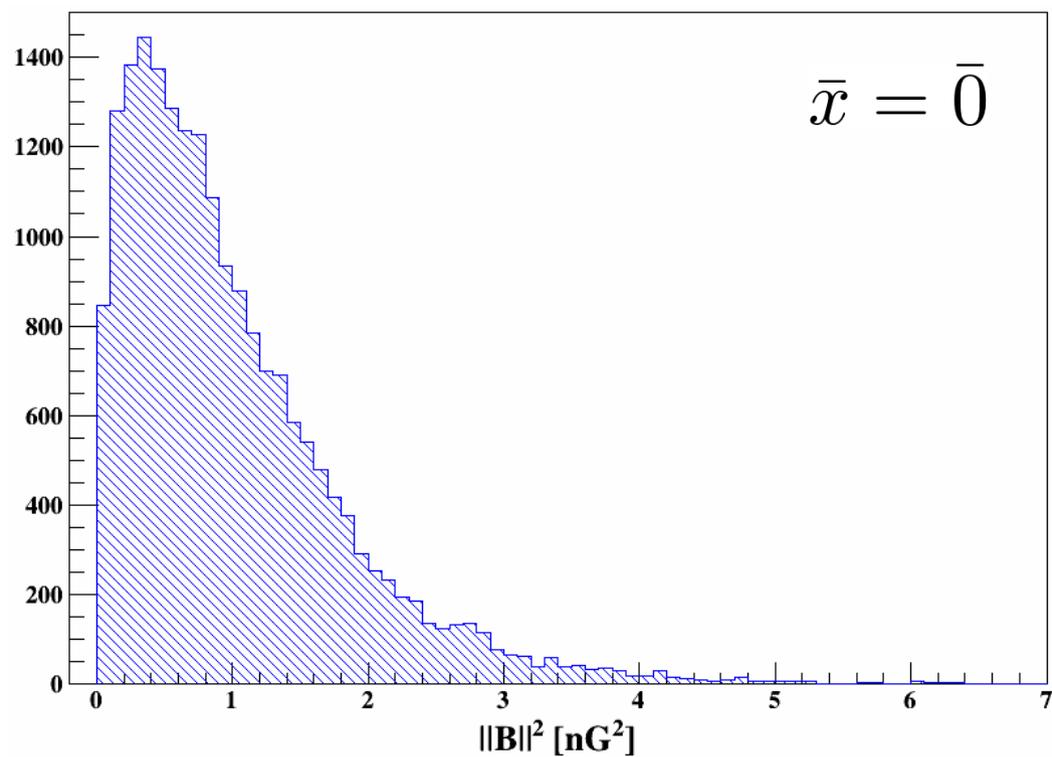
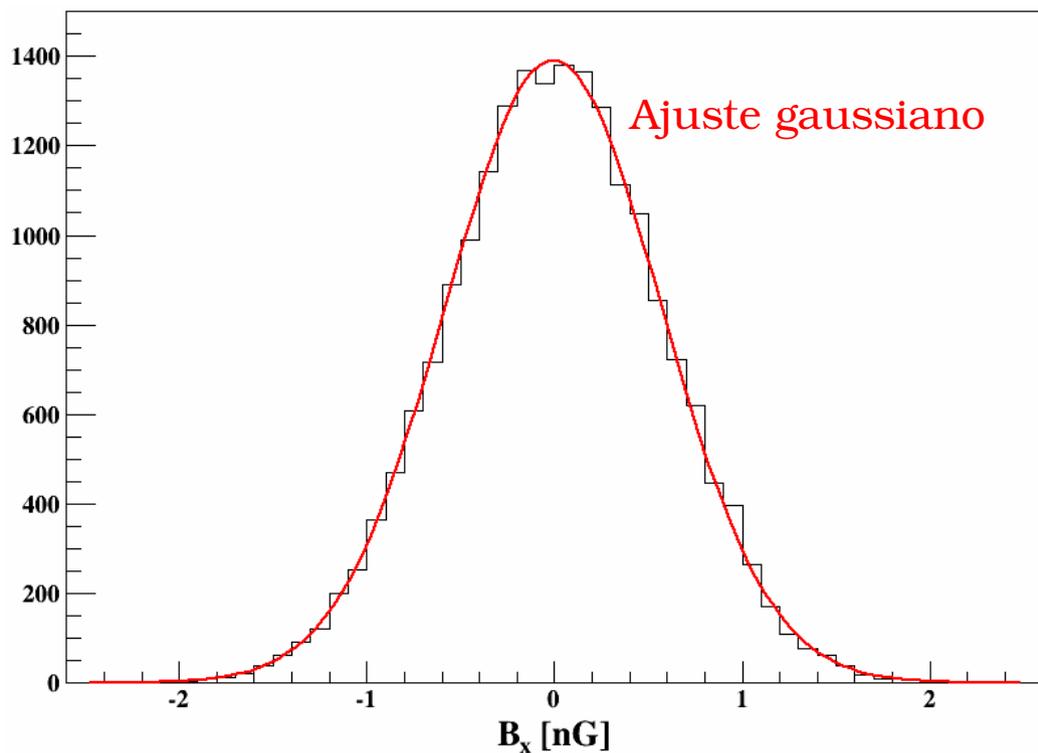
$$\bar{B}(\bar{x}) = \sum_{n=1}^N \bar{\varepsilon}_n A(k_n) \cos(\bar{k}_n \cdot \bar{x} + \beta_n)$$

Tautz & Dosch (2013)

$$A(k) \propto B(k)$$

$$k_n \in [k_{min}, k_{max}]$$

$$\bar{\varepsilon}_n \cdot \bar{k}_n = 0$$

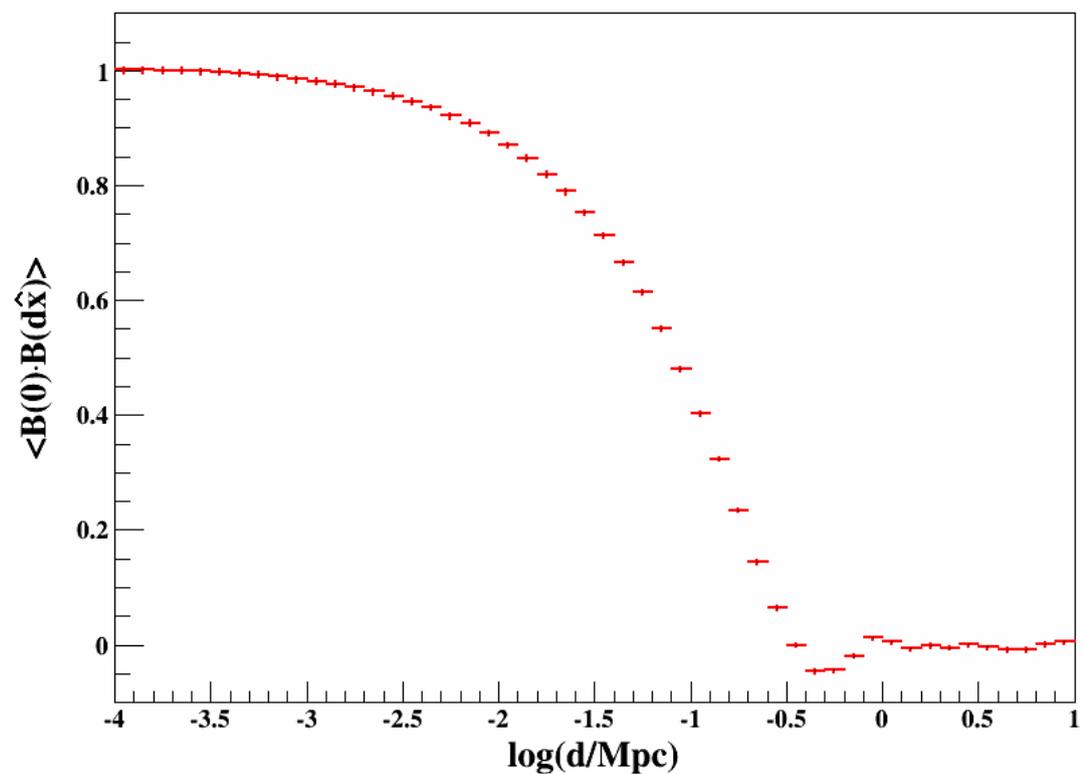


$$L_{max} = 1 \text{ Mpc}$$

$$L_{min} = 10^{-3} \text{ Mpc}$$

$$L_c = \frac{1}{5} \text{ Mpc}$$

$$B_{RMS} = 1 \text{ nG}$$



# Propagación de rayos cósmicos

**CRPropa 2.0.4** propagación de núcleos, nucleones, gammas y neutrinos

$$\phi(E_0) = K E_0^{-\gamma} \exp(-E_0/E_{cut}) \quad \text{Espectro de inyección}$$

↙  
Energía en la fuente

Tipo de núcleo en la Tierra

Distancia de la fuente

$$F(E, A, D | \gamma, A_0, E_{cut}, B)$$

↙  
Energía en la Tierra

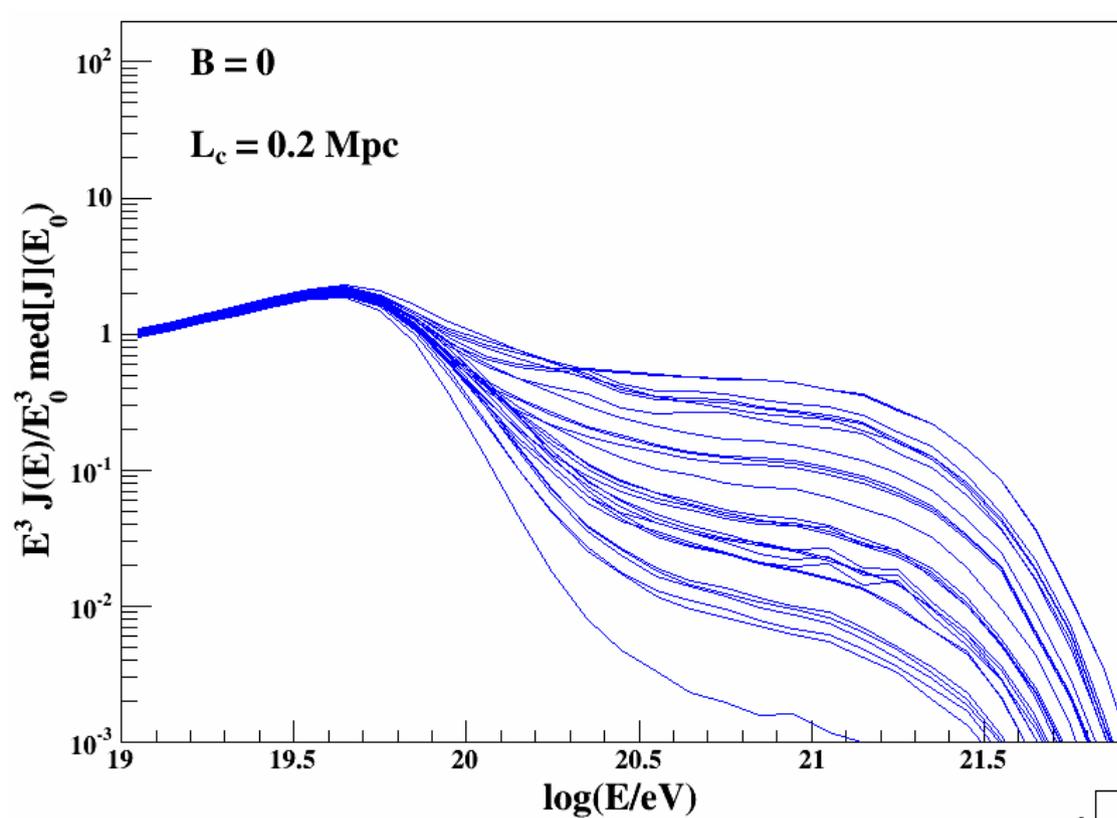
↘  
Tipo de núcleo en la fuente

$$J_A^s(E) = C \sum_{i=1}^N \frac{F(E, A, D_{s,i} | \gamma, A_0, E_{cut}, B)}{D_{s,i}^2}$$

$$s = 1, \dots, M$$

↙  
Muestra s

↘  
Fuente iésima



## Protones

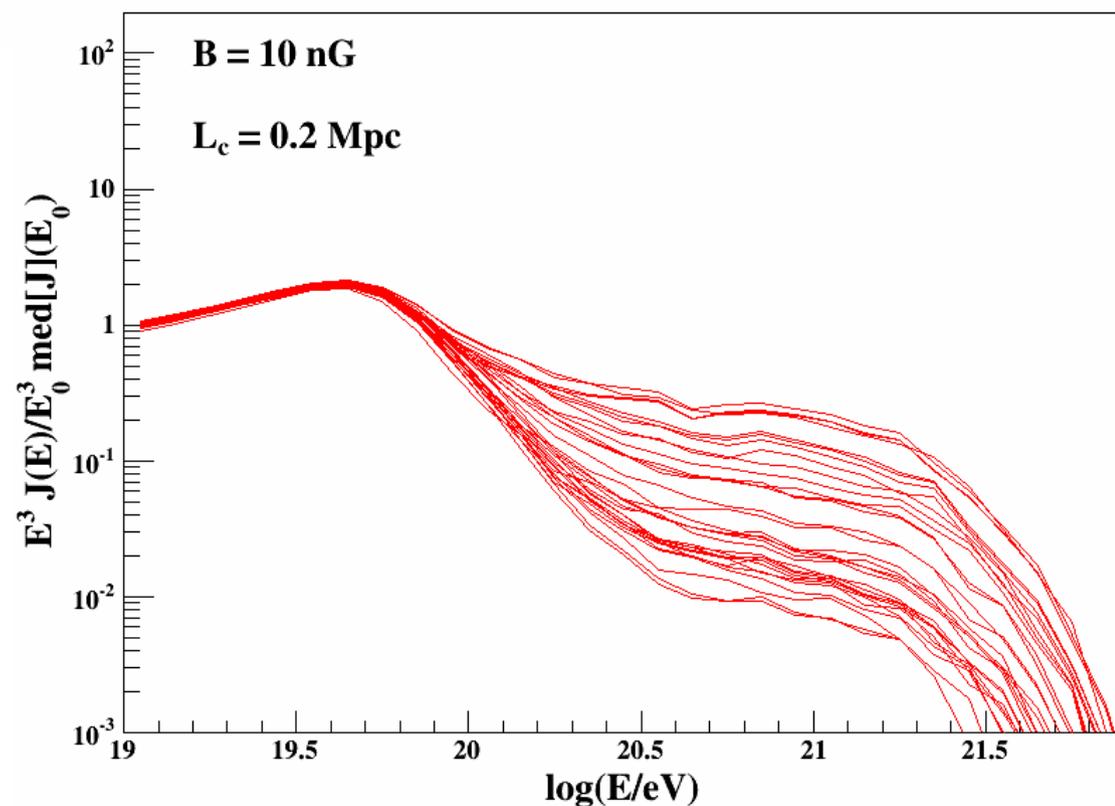
$$r_{min} = 3 \text{ Mpc}$$

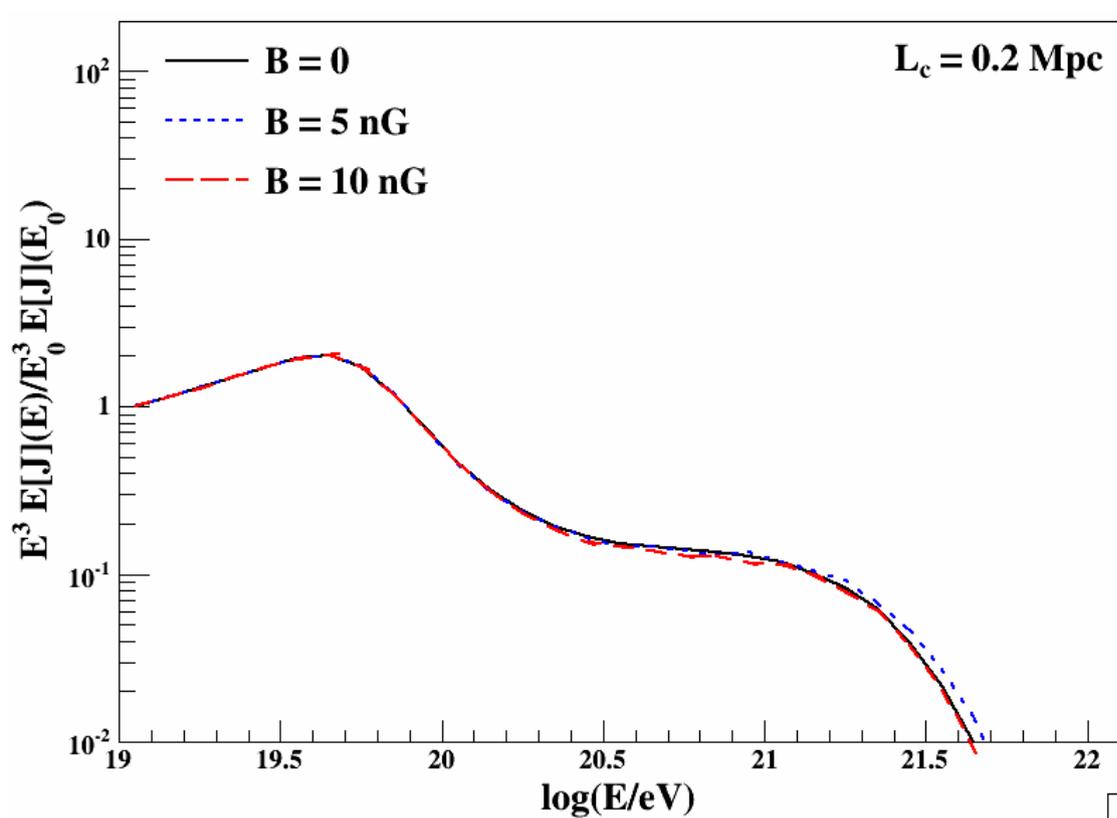
$$\gamma = 2.2$$

$$E_{cut} = 10^{21} \text{ eV}$$

$$\rho = 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$$

$$E_0 = 10^{19} \text{ eV}$$



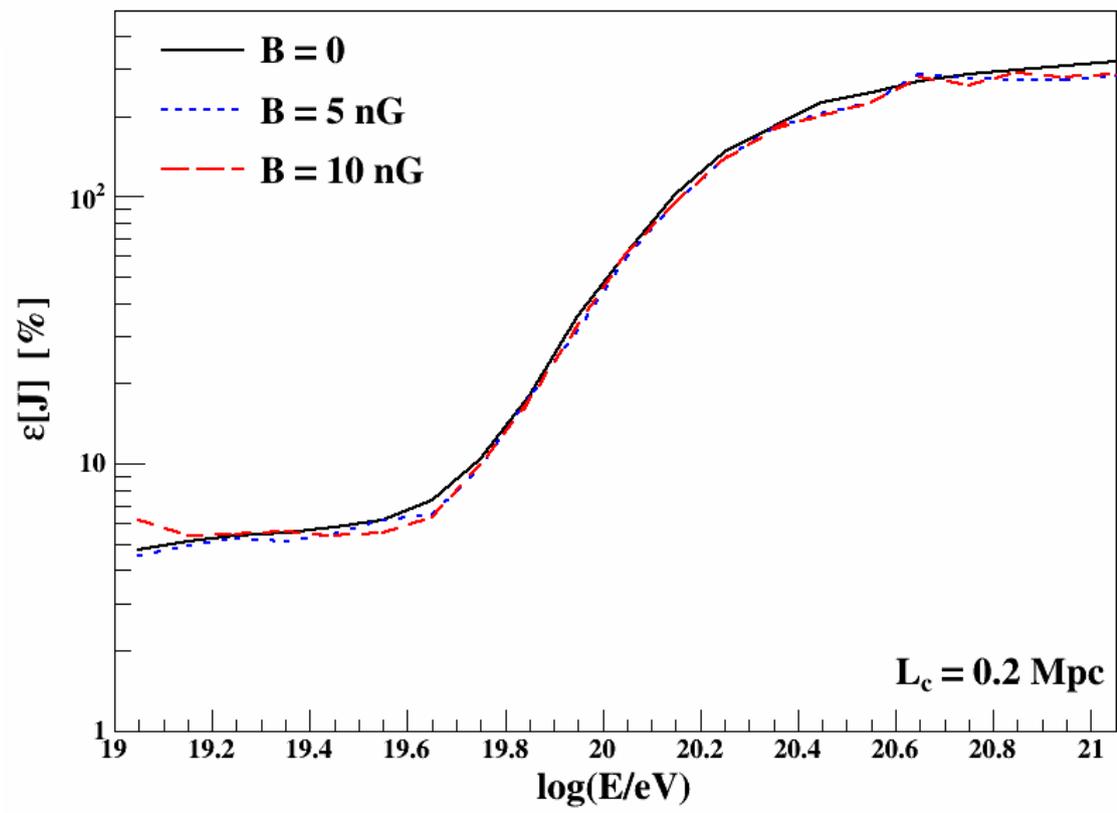


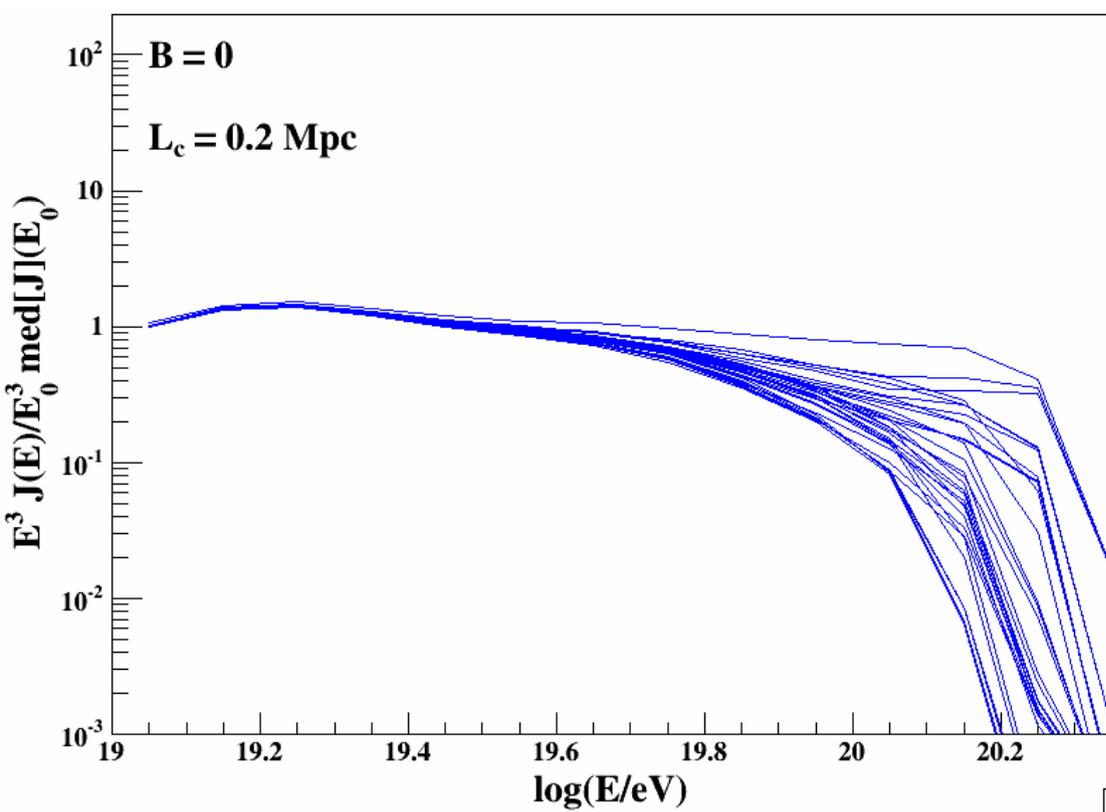
**Valor medio**

$$E_0 = 10^{19} \text{ eV}$$

**Error relativo**

$$\varepsilon[J](E) = \frac{\sigma[J](E)}{E[J](E)}$$





## Núcleos de hierro

$$r_{min} = 3 \text{ Mpc}$$

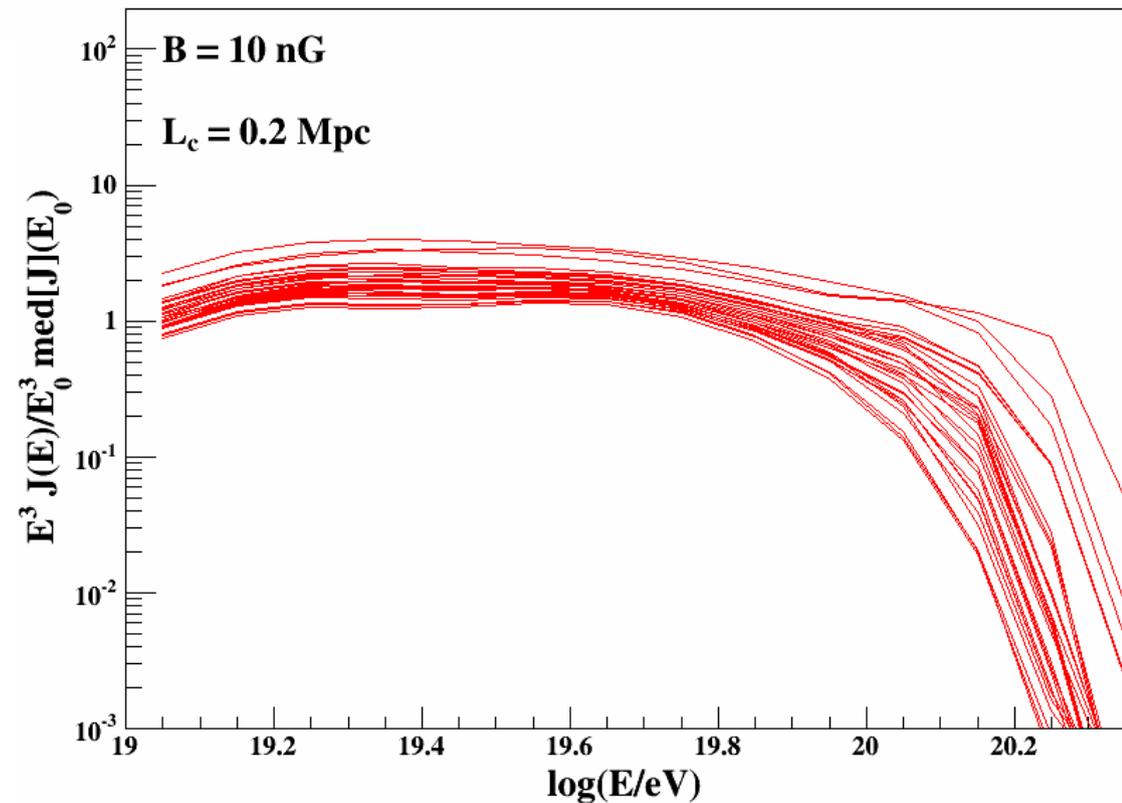
$$\gamma = 2$$

$$E_{cut} = 10^{21} \text{ eV}$$

$$\rho = 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$$

**Las fluctuaciones  
 aumentan para  $B = 10 \text{ nG}$**

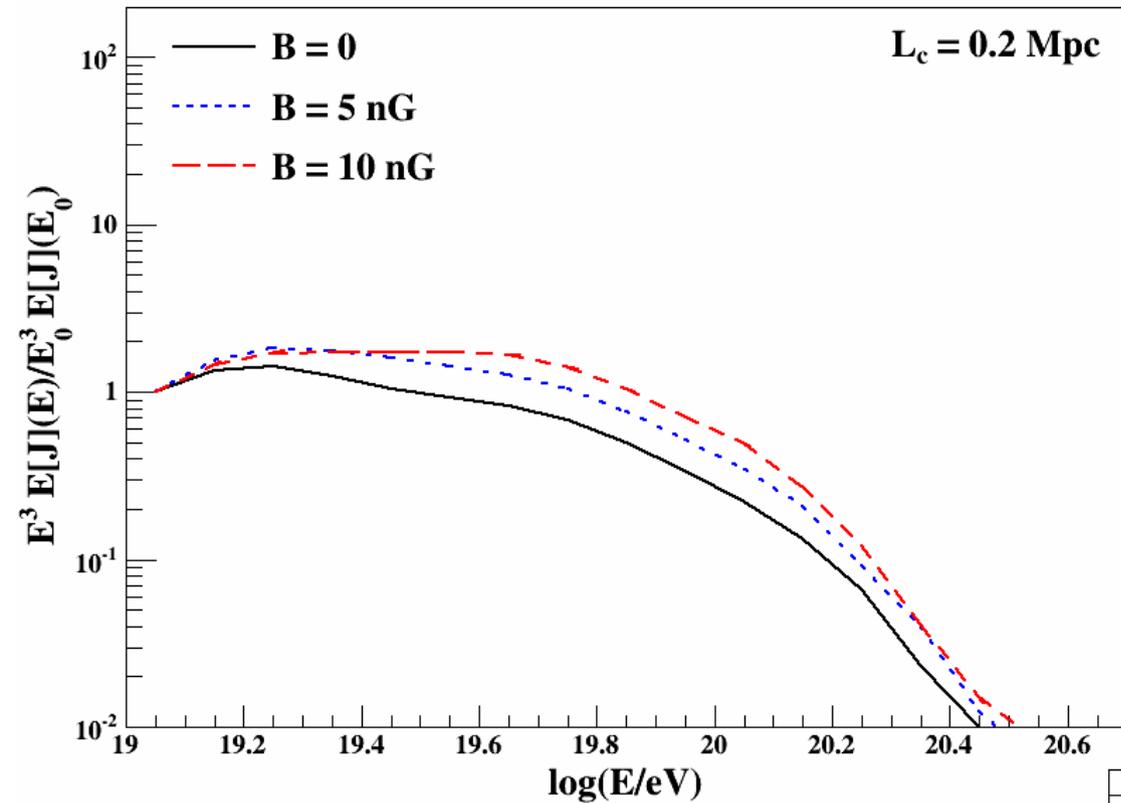
$$E_0 = 10^{19} \text{ eV}$$



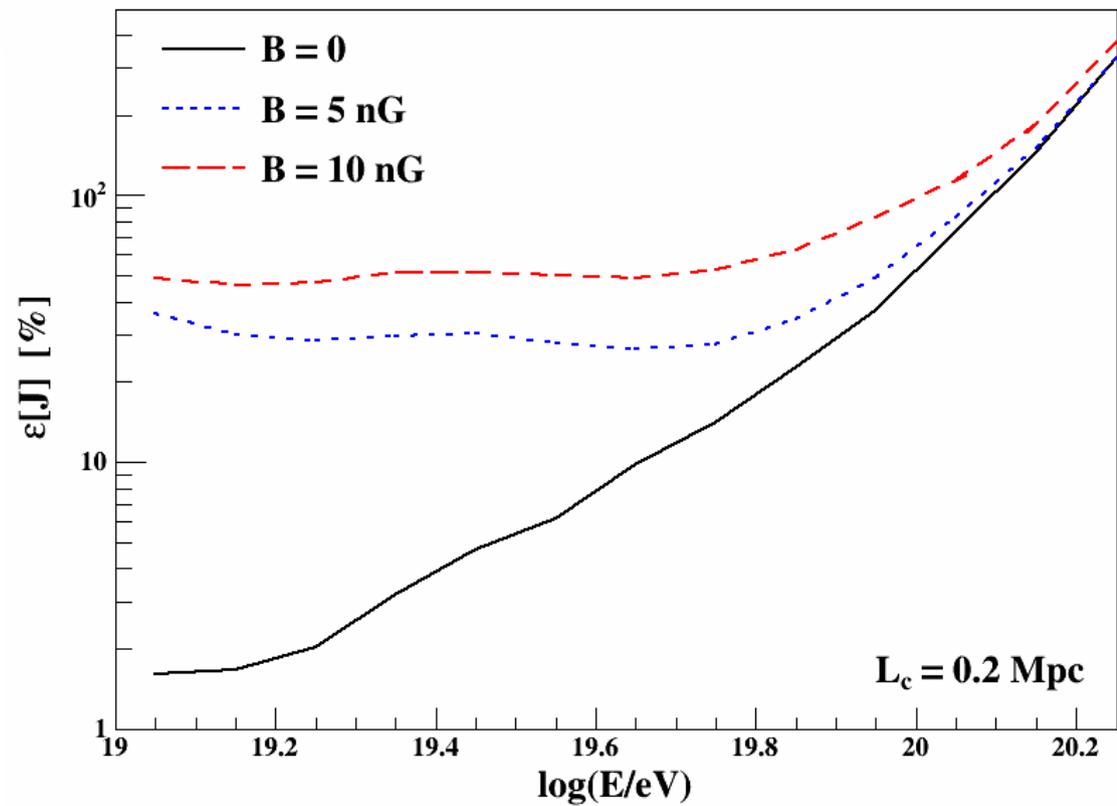
# Valor medio

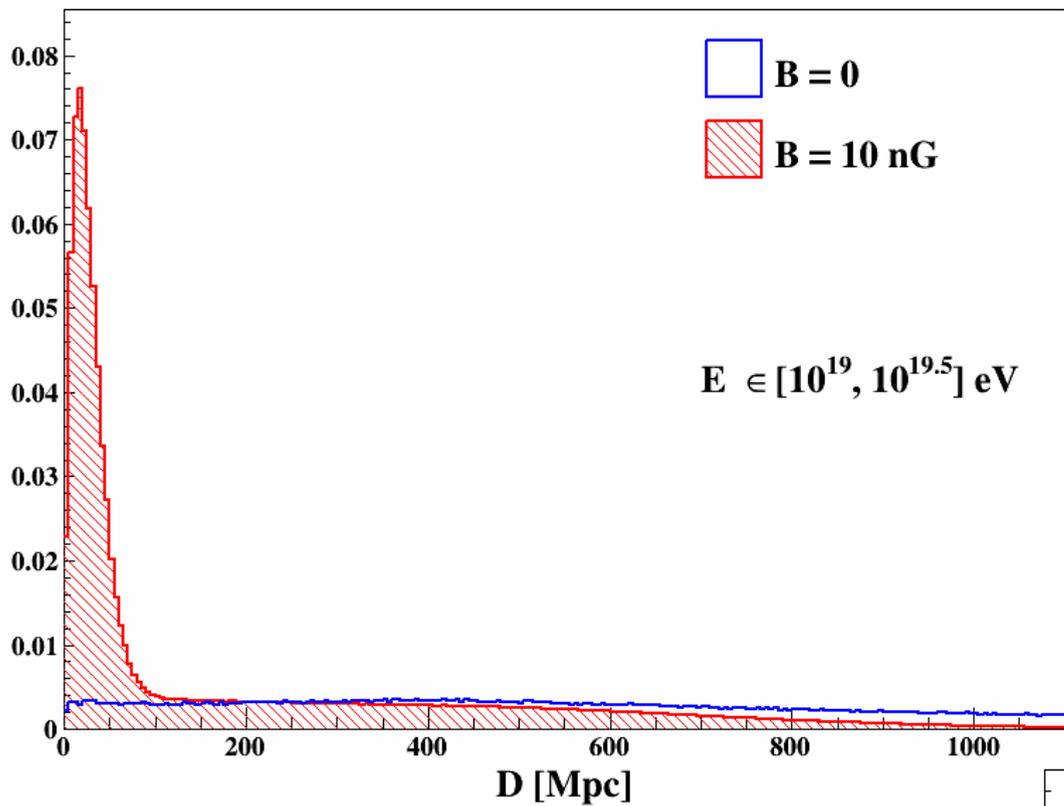
$$E_0 = 10^{19} \text{ eV}$$

$L_c = 0.2 \text{ Mpc}$



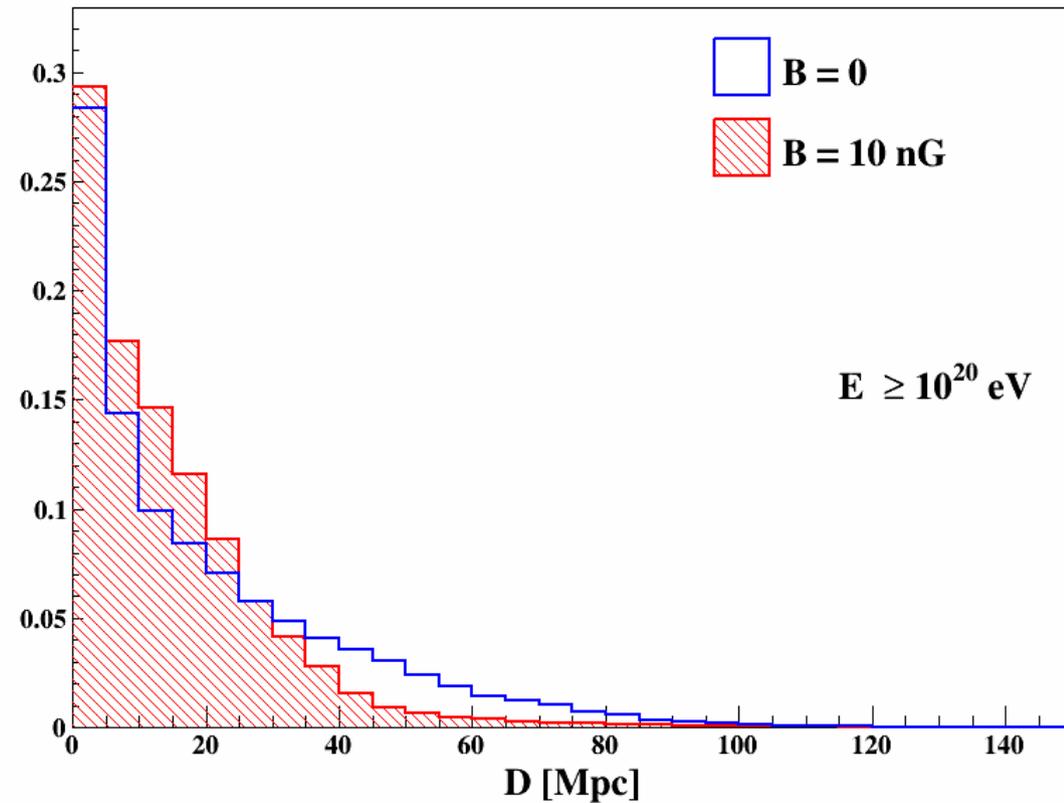
# Error relativo





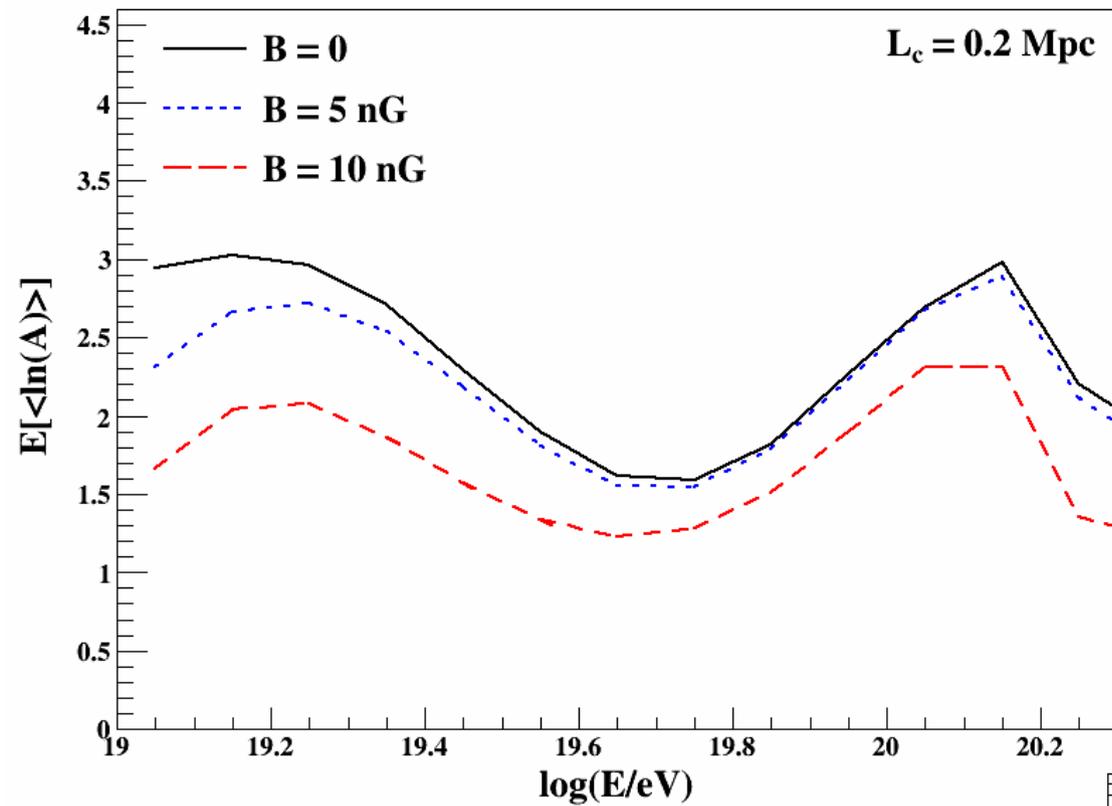
**A bajas energías y para valores de campo no despreciables, las partículas provienen de distancias mas cercanas a la tierra, lo cual aumenta las fluctuaciones.**

$$\frac{dN_s}{dr} = 4\pi n_s r^2$$

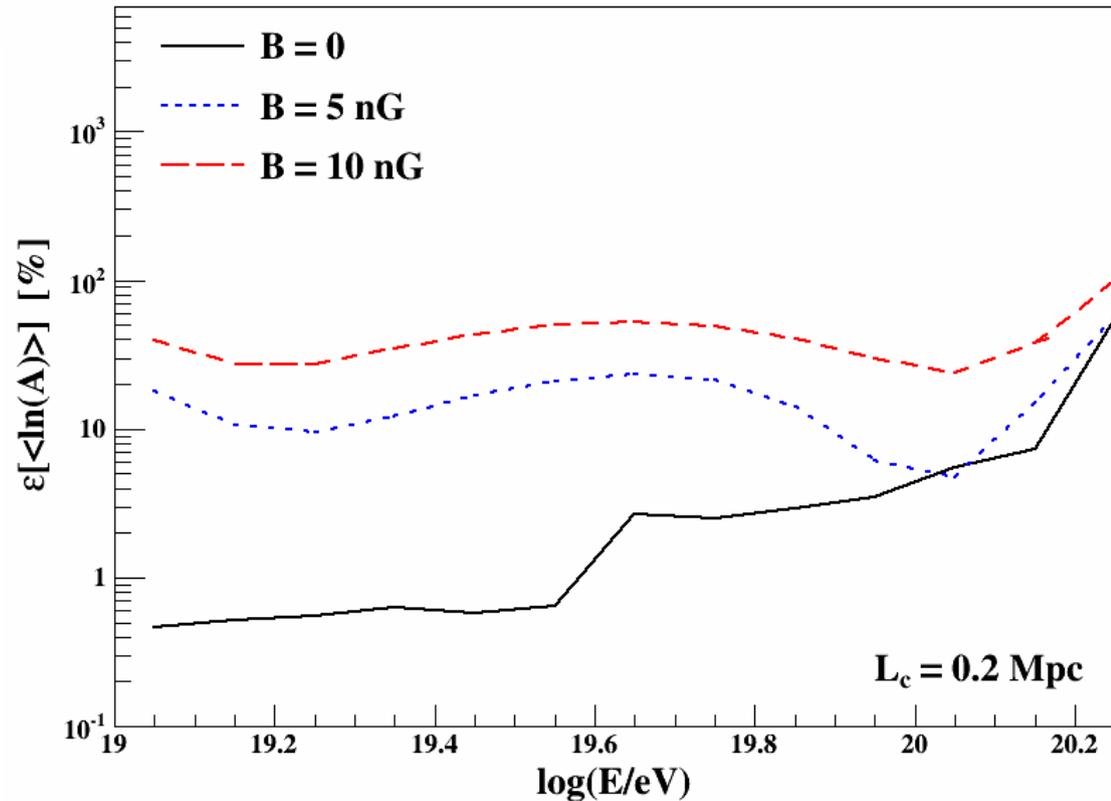


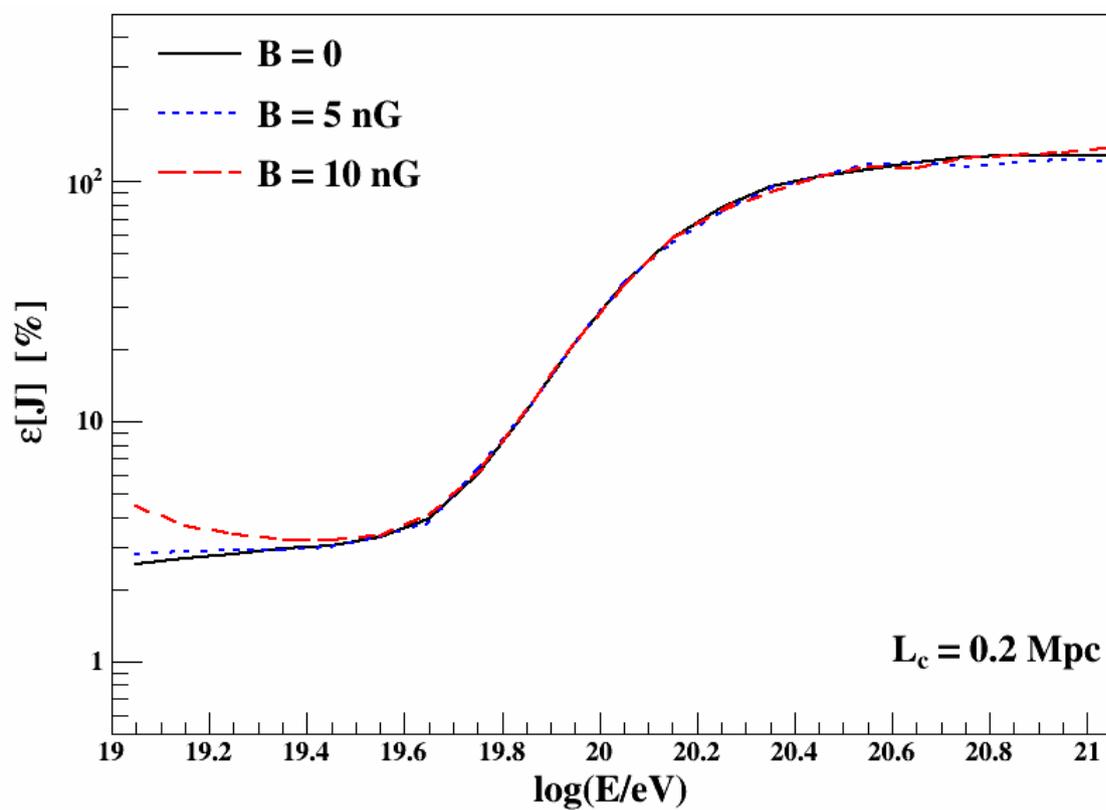
# Composición

$$\langle \ln A \rangle_s(E) = \frac{\sum_A \ln A J_A^s(E)}{\sum_A J_A^s(E)}$$



**Las fluctuaciones en la composición también aumentan con la intensidad del campo.**



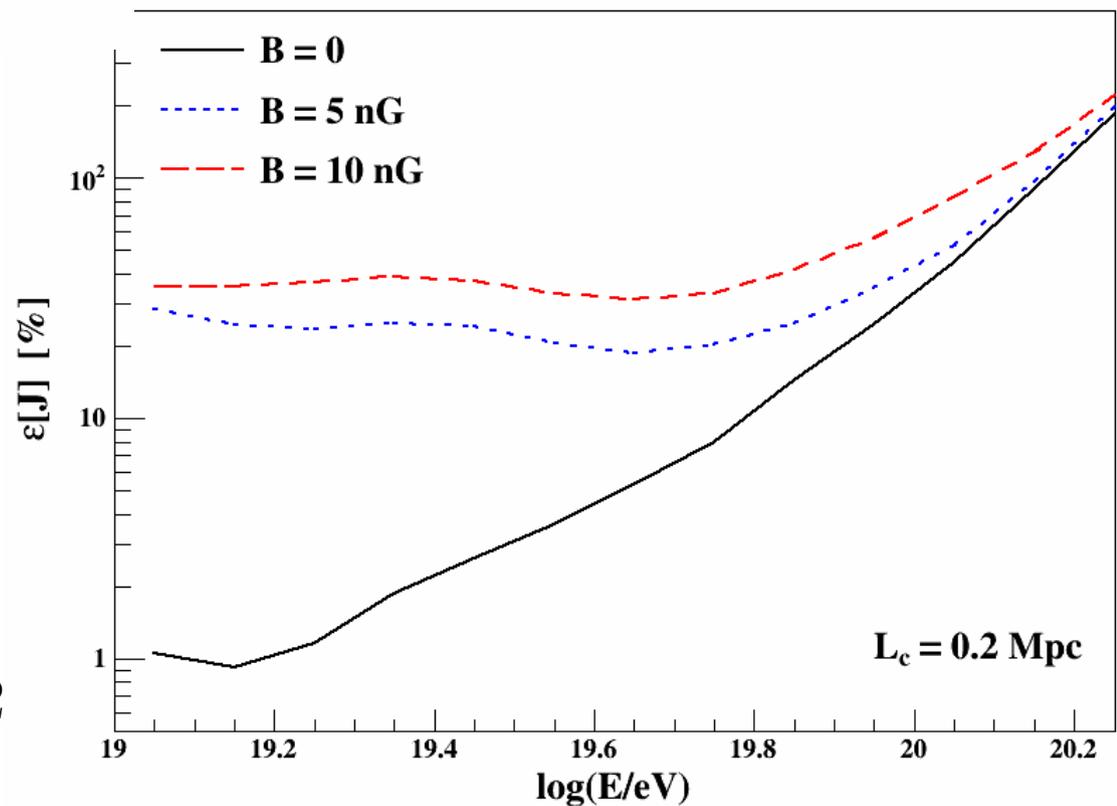


$\gamma_{pr} = 2.2$

$E_{cut} = 10^{21} \text{ eV}$

$\rho = 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$

$\gamma_{fe} = 2.2$



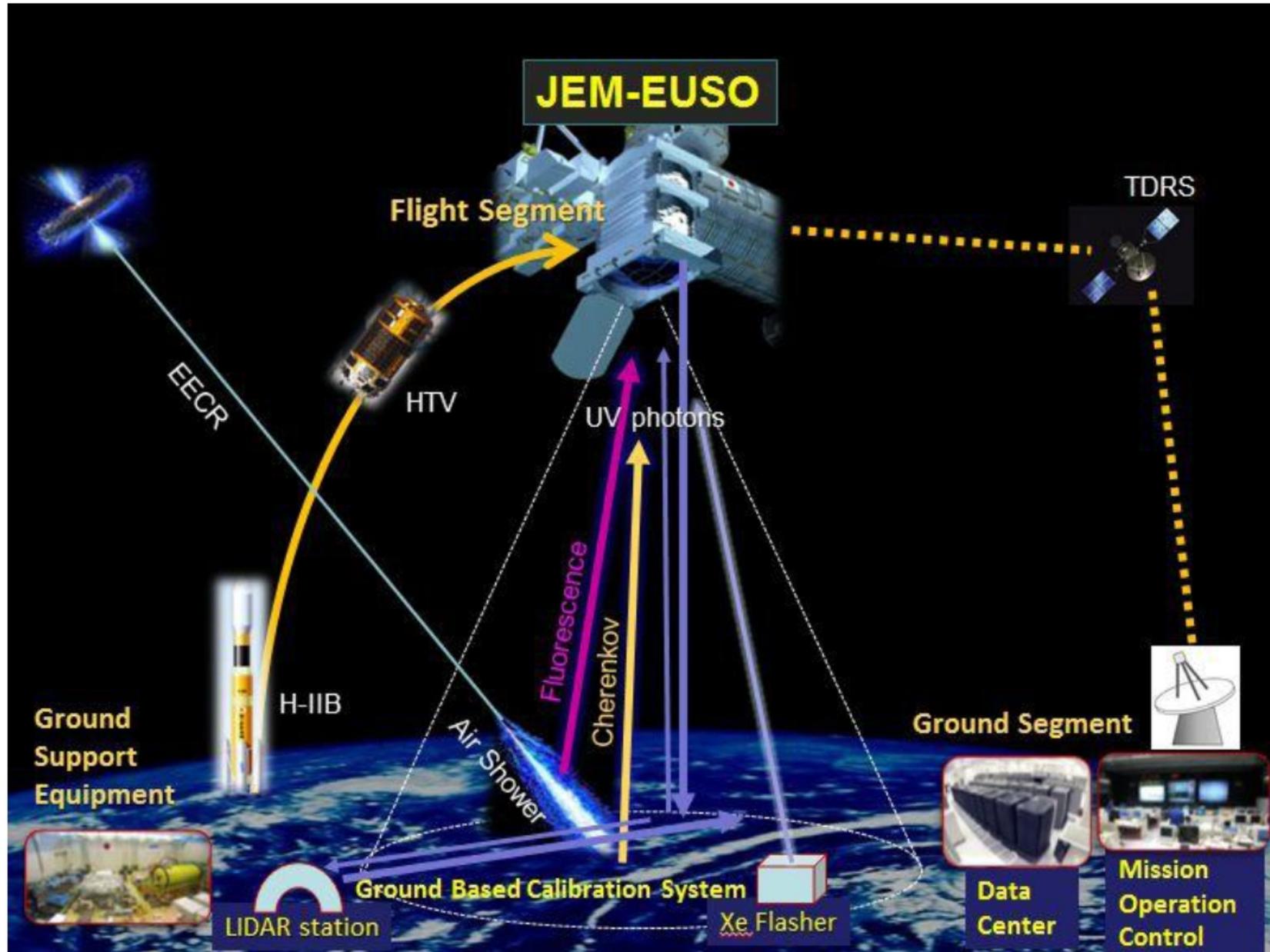
# La misión JEM-EUSO

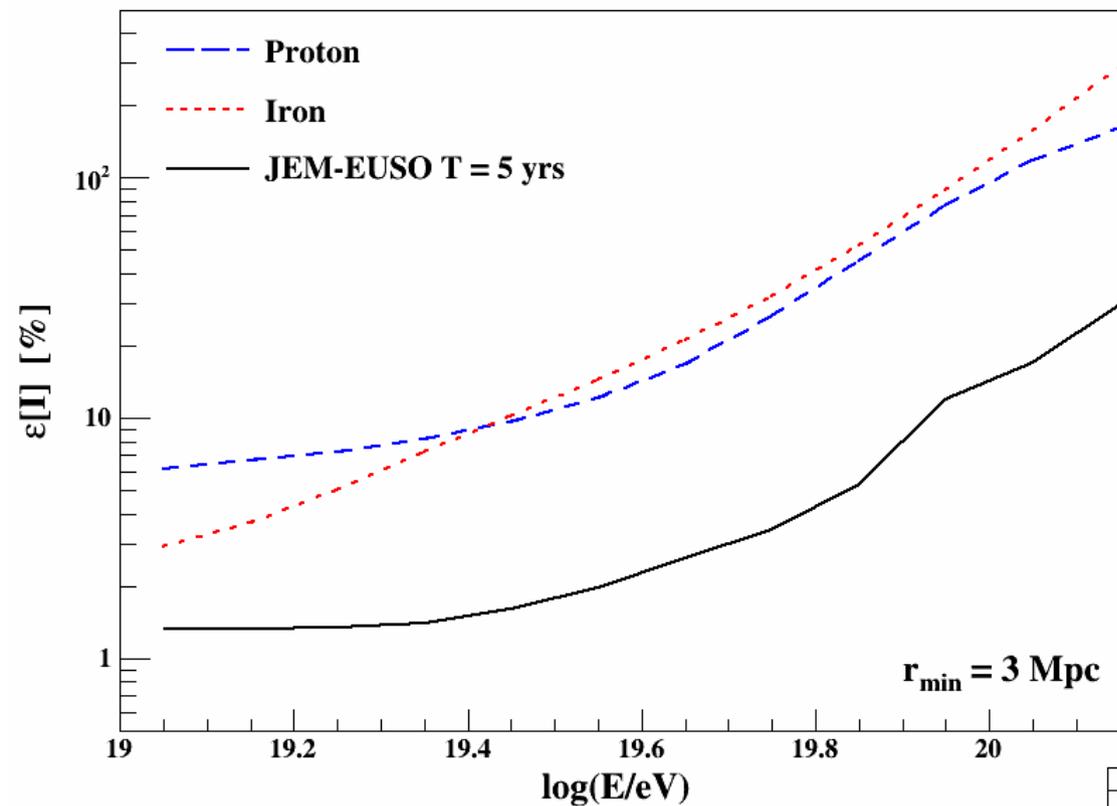
La exposición de JEM-EUSO será ~10 veces mayor que la de Auger.

Telescopio de fluorescencia instalado en la Estación Espacial Internacional.

Superficie focal con  $3 \times 10^5$  pixeles.

Campo de visión de  $60^\circ$ .





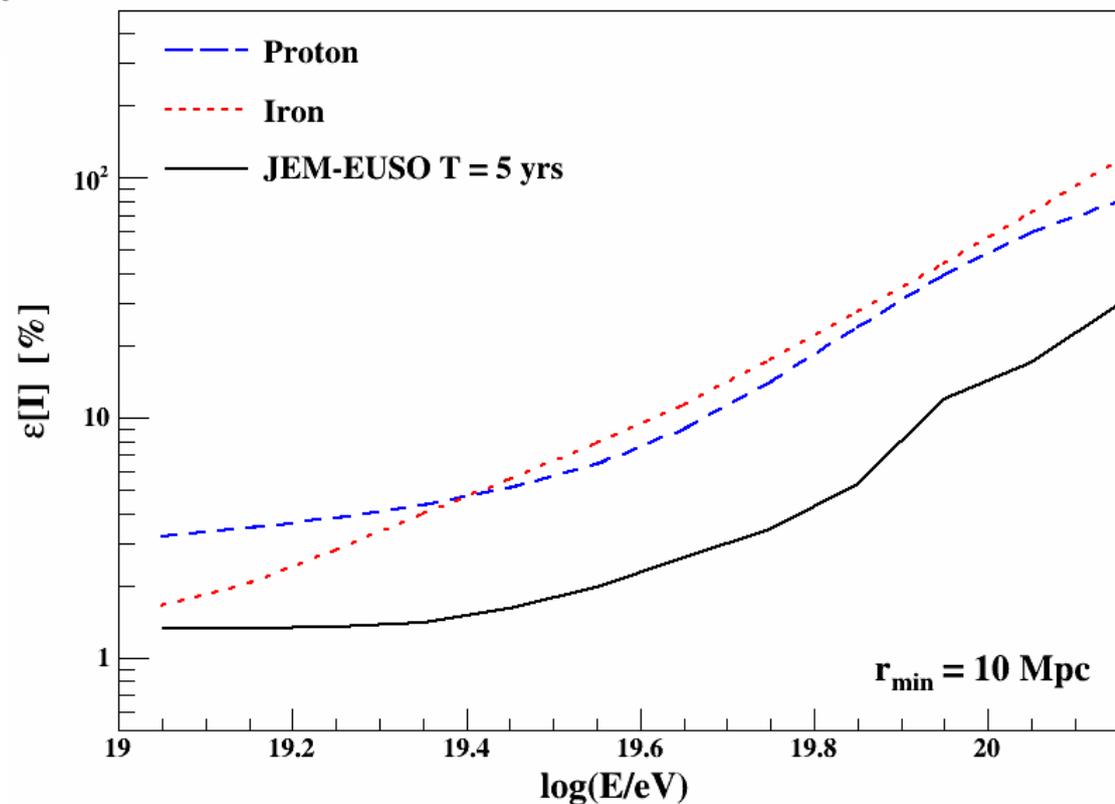
## Flujo integral

$$I(E) = \int_E^{\infty} dE' J(E')$$

$$B = 0$$

**5 años de observación  
en modo Nadir.**

$$\rho = 10^{-5} \text{ Mpc}^{-3}$$



## Conclusiones

- Se han estudiado las fluctuaciones de conjunto en el flujo de rayos cósmicos de ultra alta energía.
- Se ha demostrado que las fluctuaciones aumentan en presencia de campo magnético turbulento en el medio intergaláctico.
- Las fluctuaciones son mayores para núcleos más pesados debido a que sus trayectorias se ven más afectadas por la presencia de campo magnético en medio intergaláctico.
- También se ha encontrado que se incrementan las fluctuaciones en el perfil de composición observado en la tierra.
- Se espera poder observar dichas fluctuaciones con el telescopio espacial JEM-EUSO, dependiendo de la densidad de fuentes.