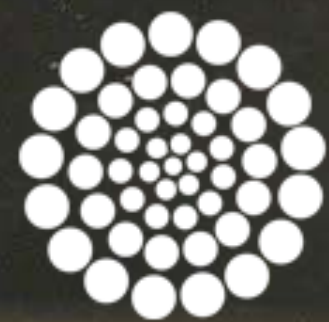




Astrofísica de rayos gamma

Alberto Carramiñana

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica
Luis Enrique Erro 1, Tonantzintla, Puebla, México



CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

Rayos gamma @ LA-CoNGA Physics - 27 de junio de 2023

Astrofísica de rayos gamma

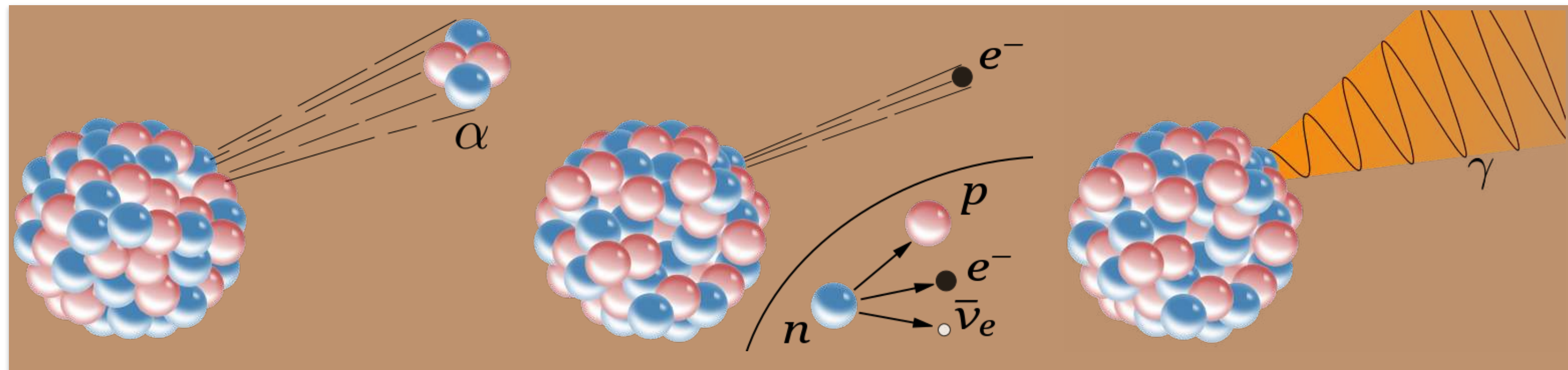
1. Rayos cósmicos.
2. Rayos gamma: producción, bandas astrofísicas y observatorios.
3. Fuentes de rayos gamma en la Galaxia.
4. Fuentes de rayos gamma más allá de la Galaxia.

Astrofísica de rayos gamma

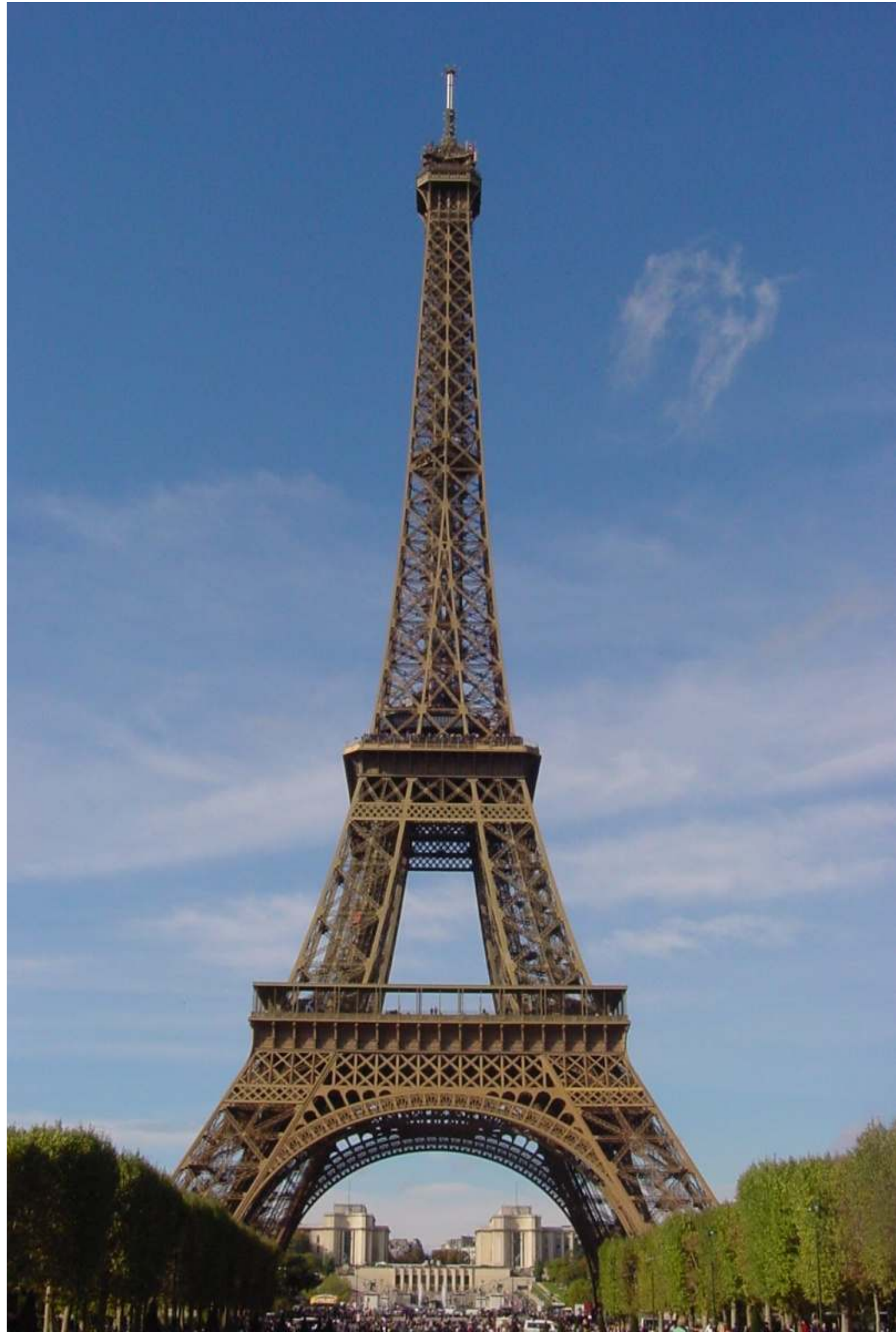
1. Rayos cósmicos.
2. Rayos gamma: producción, bandas astrofísicas y observatorios.
3. Fuentes de rayos gamma en la Galaxia.
4. Fuentes de rayos gamma más allá de la Galaxia.

La ionización del aire

- Alrededor de 1785 Coulomb observó la descarga espontánea de electros copios.
- A finales del siglo XIX se descubrió que la tasa de descarga aumenta con la presión del aire \implies el aire causa la descarga del electros copio debido a la presencia de iones.
- En 1900, Elster & Geitel muestran que la radioactividad es una causa de la ionización del medio ambiente.



De Angelis - arxiv 1208.6527

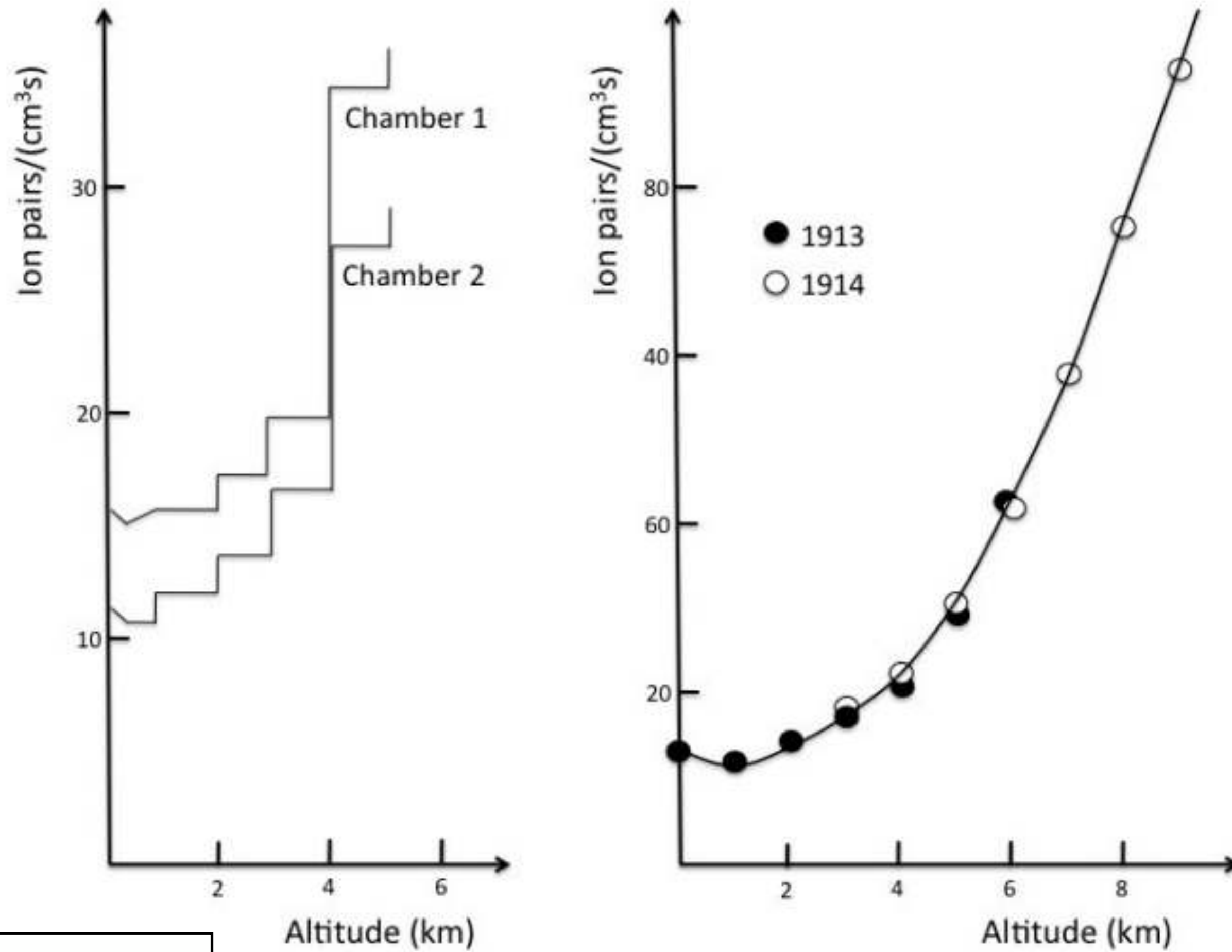


Theodor Wulf 1910

Victor Hess 1912



Radiación cósmica

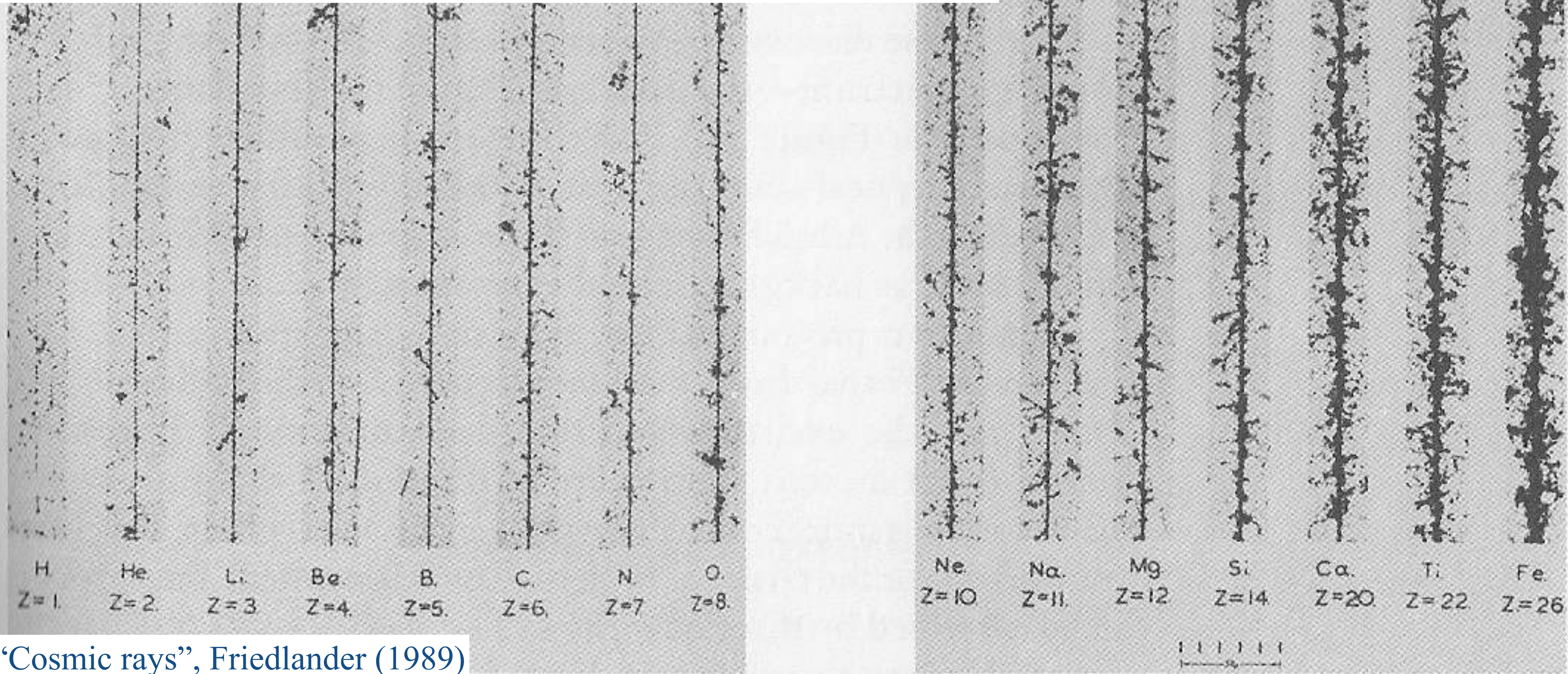


Panetta 2017

Figure 1.1: Increase of ionization with altitude as measured by Hess in 1912 (left) and by Kolhorster (right).

17 de abril 1912

En los 1910s - 1930s se estableció que los rayos cósmicos son en su gran mayoría cargas positivas, núcleos atómicos (90% protones, 9% helio).



“Cosmic rays”, Friedlander (1989)

Partículas elementales

Entre 1930 y 1950 los rayos cósmicos permitieron a los físicos investigar colisiones nucleares y nuevas partículas:

- El positrón (e^+) descubierto por Carl Anderson (1932), poco después de la teoría del electrón (Dirac 1928).
- El muón (μ) fue reportado por Anderson y Neddermeyer (1936), año de la propuesta del mesón por Yukawa.
- El pión (mesón π): Powell & Occhialini (1947).
- Y muchas más partículas: K^\pm , K^0 , Λ , Ξ , Σ , ...

1950s: la física de partículas se traslada a los grandes aceleradores.



QUARKS	mass → $\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$ u up	mass → $\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$ c charm	mass → $\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ charge → $2/3$ spin → $1/2$ t top	mass → 0 charge → 0 spin → 1 g gluon	mass → $\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 0 H Higgs boson	
	mass → $\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$ d down	mass → $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$ s strange	mass → $\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ charge → $-1/3$ spin → $1/2$ b bottom	mass → 0 charge → 0 spin → 1 γ photon		
	mass → $0.511 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$ e electron	mass → $105.7 \text{ MeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$ μ muon	mass → $1.777 \text{ GeV}/c^2$ charge → -1 spin → $1/2$ τ tau	mass → $91.2 \text{ GeV}/c^2$ charge → 0 spin → 1 Z Z boson	GAUGE BOSONS	
	mass → $< 2.2 \text{ eV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$ ν_e electron neutrino	mass → $< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$ ν_μ muon neutrino	mass → $< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ charge → 0 spin → $1/2$ ν_τ tau neutrino	mass → $80.4 \text{ GeV}/c^2$ charge → ± 1 spin → 1 W W boson		

$$p = u\bar{u}d$$

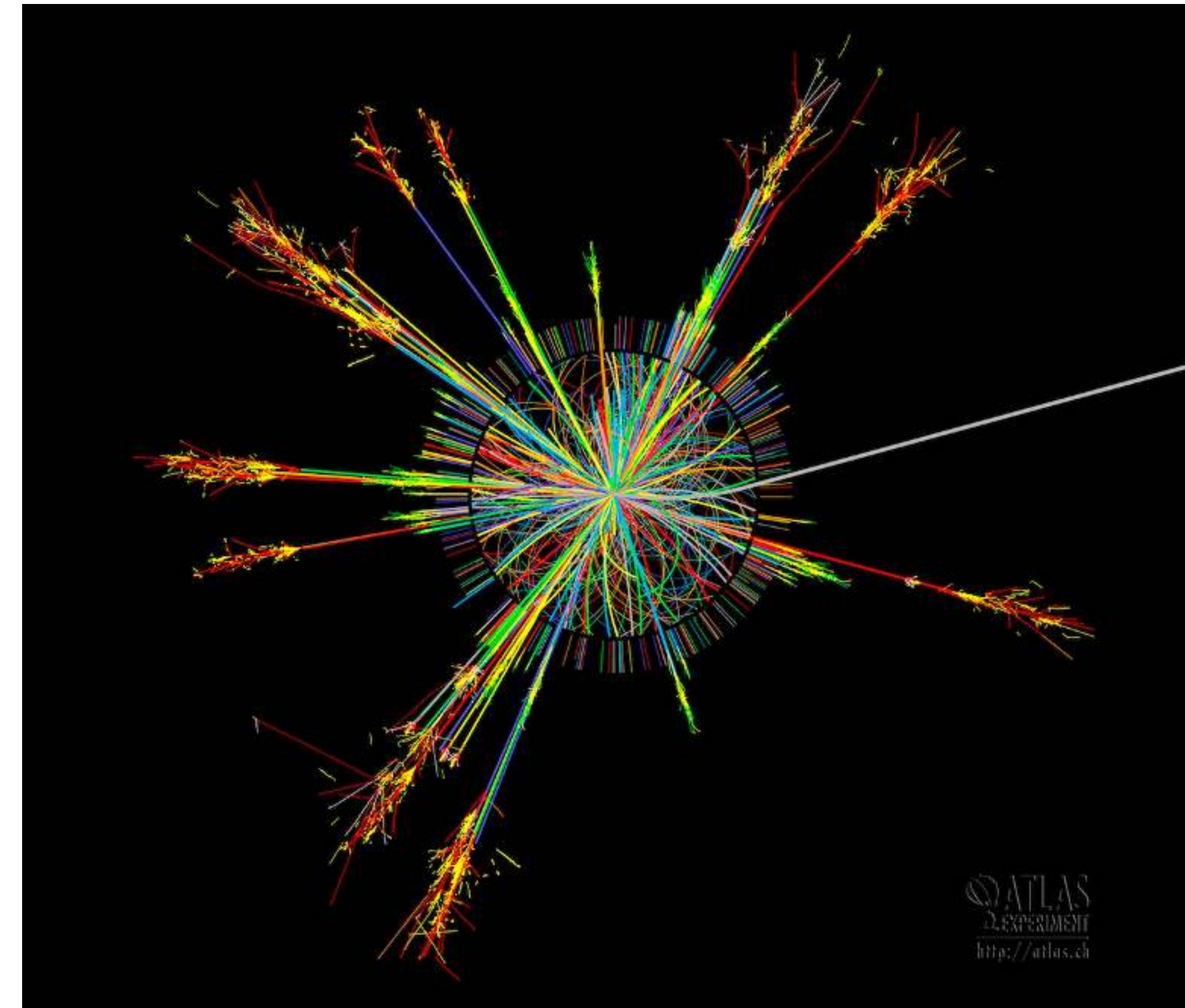
$$\pi^+ = ud$$

$$K^+ = u\bar{s}$$

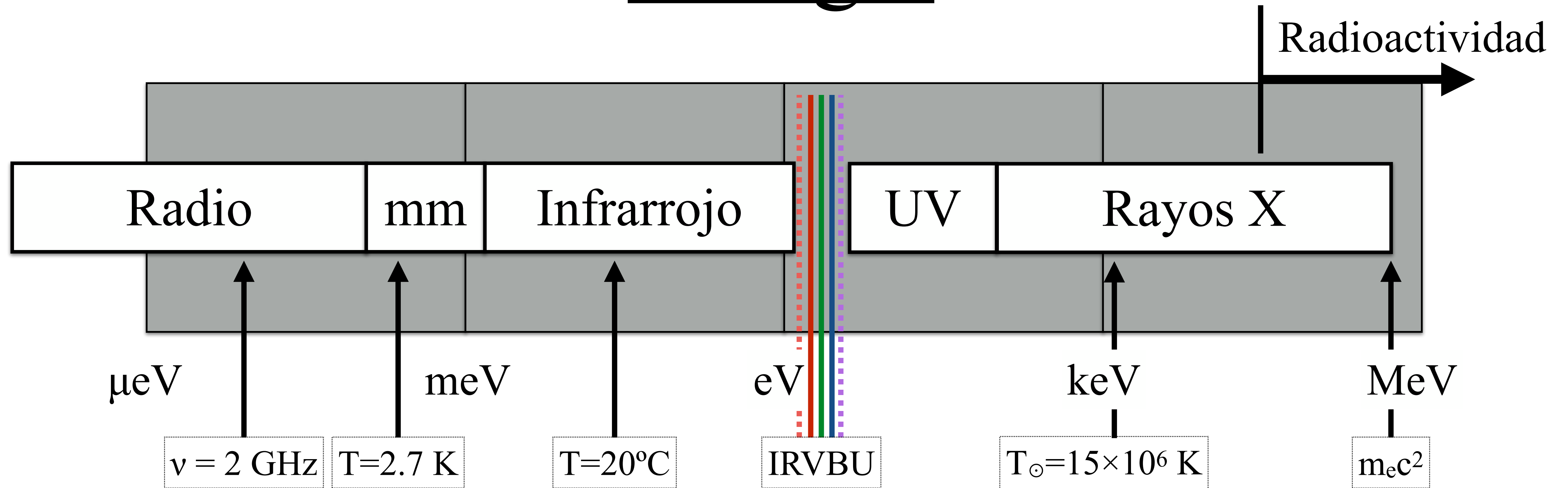
$$n = udd\bar{d}$$

$$\pi^0 = d\bar{d} + u\bar{u}$$

$$K^0 = d\bar{s}$$

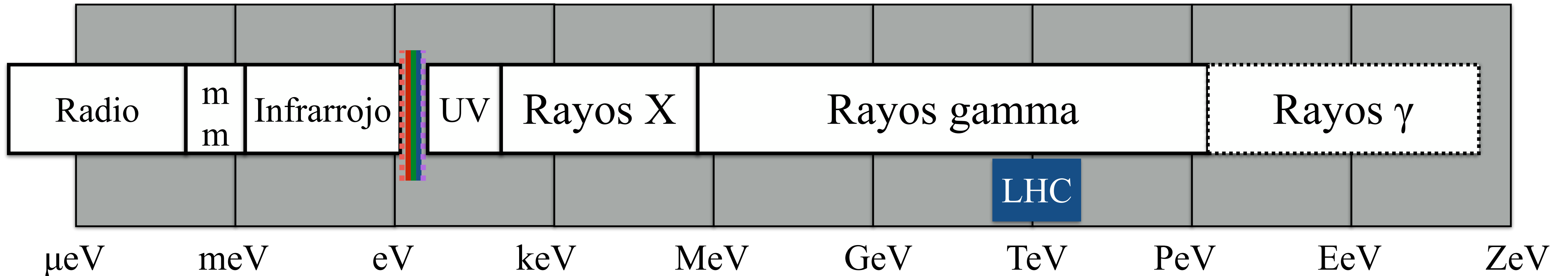


Energía



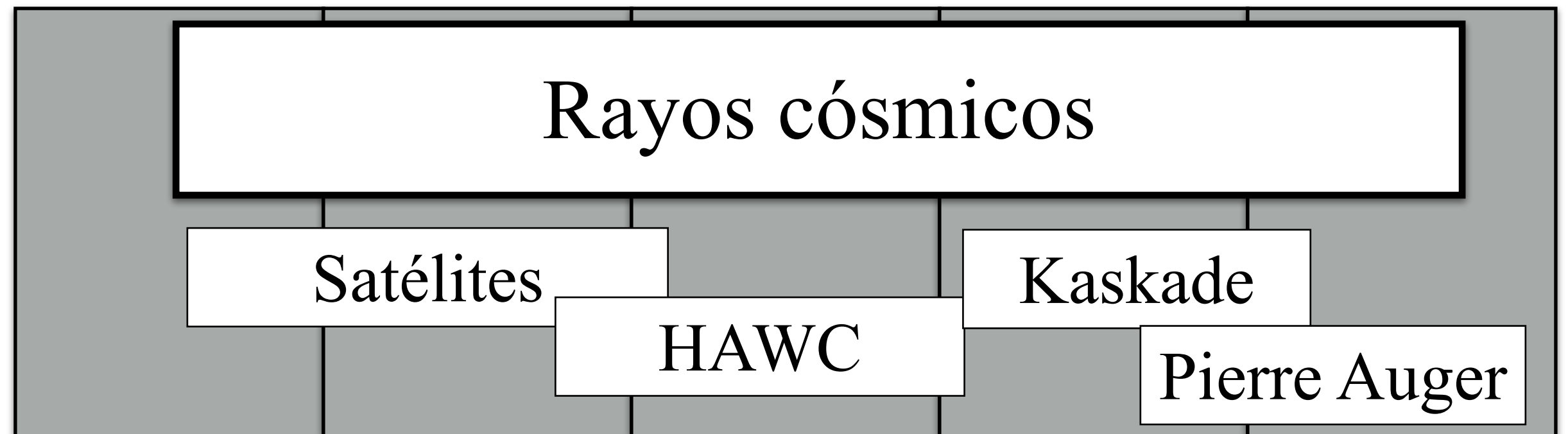
Energía cinética (clásica)	Energía térmica	Radiación	Energía - masa	Energía cinética (relativista)
$E = \frac{1}{2}mv^2$	$E = \frac{3}{2}kT$	$E = h\nu$	$E = mc^2$	$E = \gamma mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$

¡Altas energías!



Los rayos cósmicos son partículas con carga y masa.

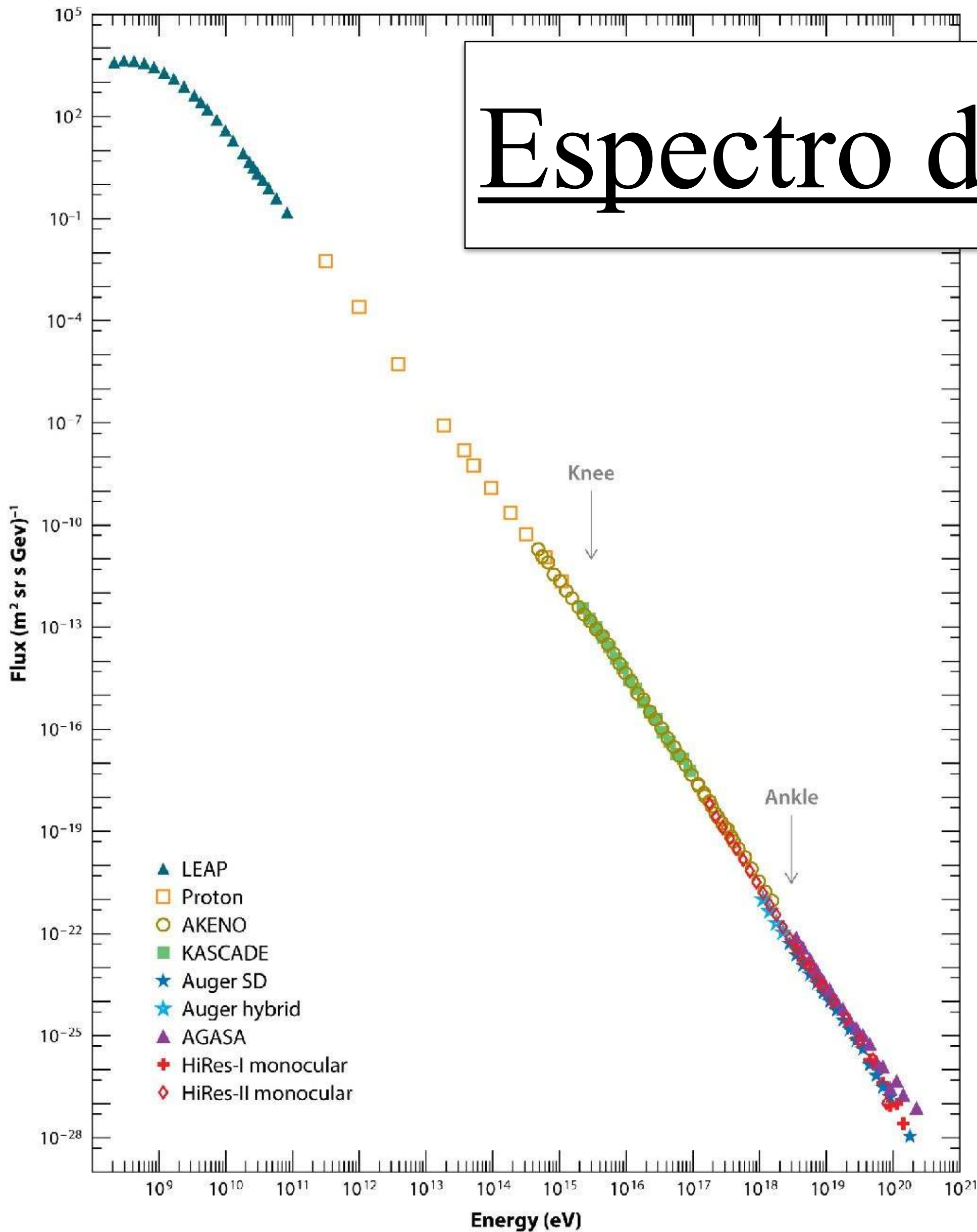
Los rayos gamma son radiación electromagnética, como la luz, pero de muy alta energía ($\geq \text{MeV}$).



Neutrinos

Neutrinos

Espectro de energía de los rayos cósmicos



- Los rayos cósmicos tienen un espectro de energía en forma de ley de potencias, a lo largo de doce órdenes de magnitud.

- Espectro de energía de los protones cósmicos:

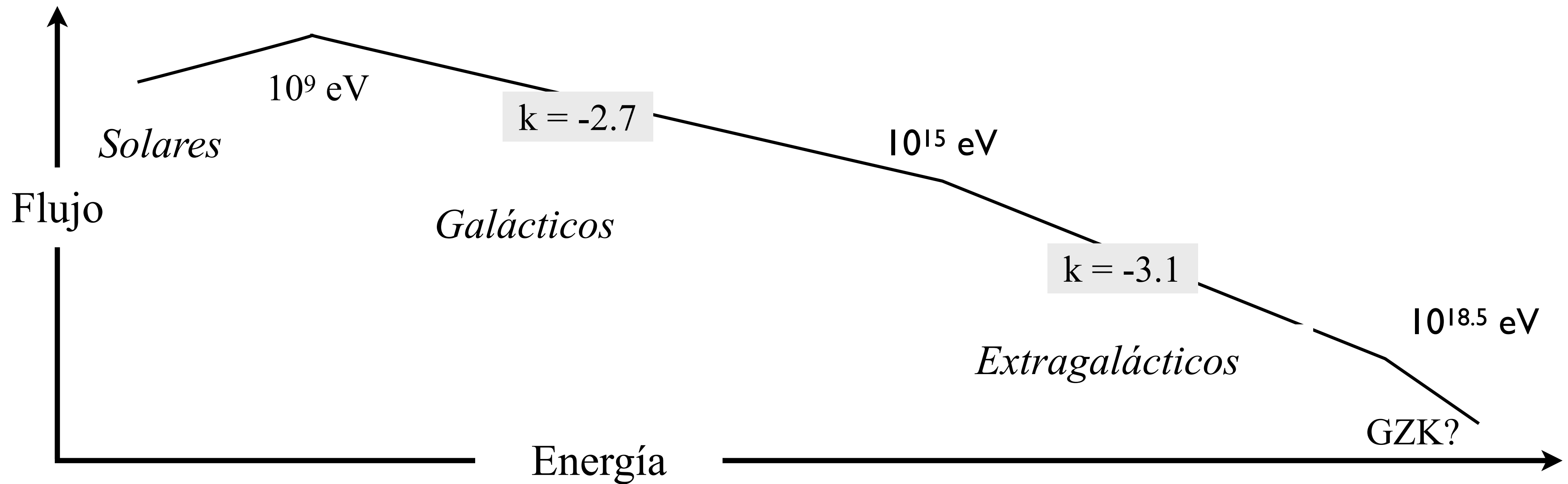
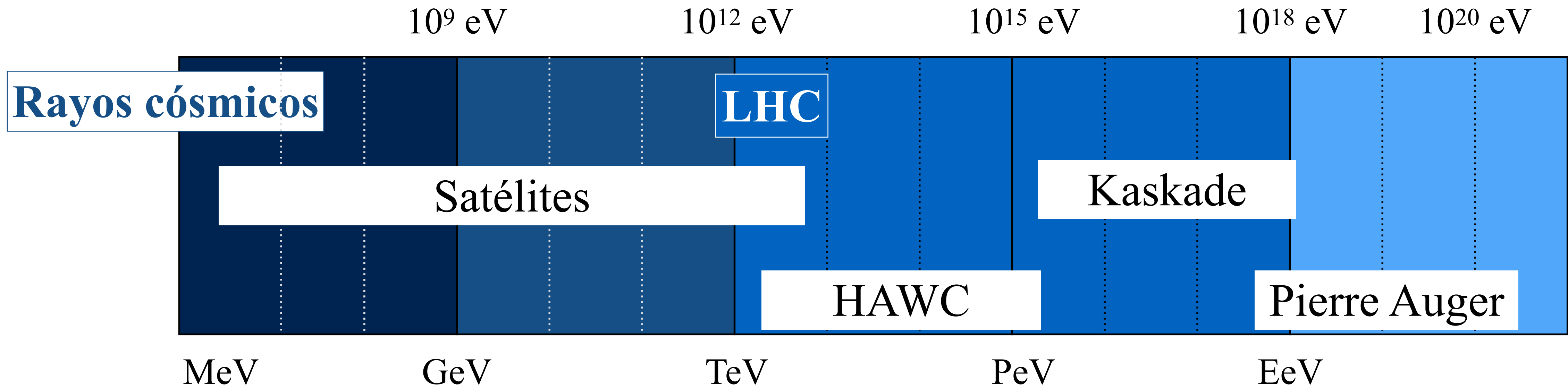
$$J_p(T_p, \Omega_p) = 2.2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ GeV}^{-1} \text{ sr}^{-1} E_p^{-2.75}$$

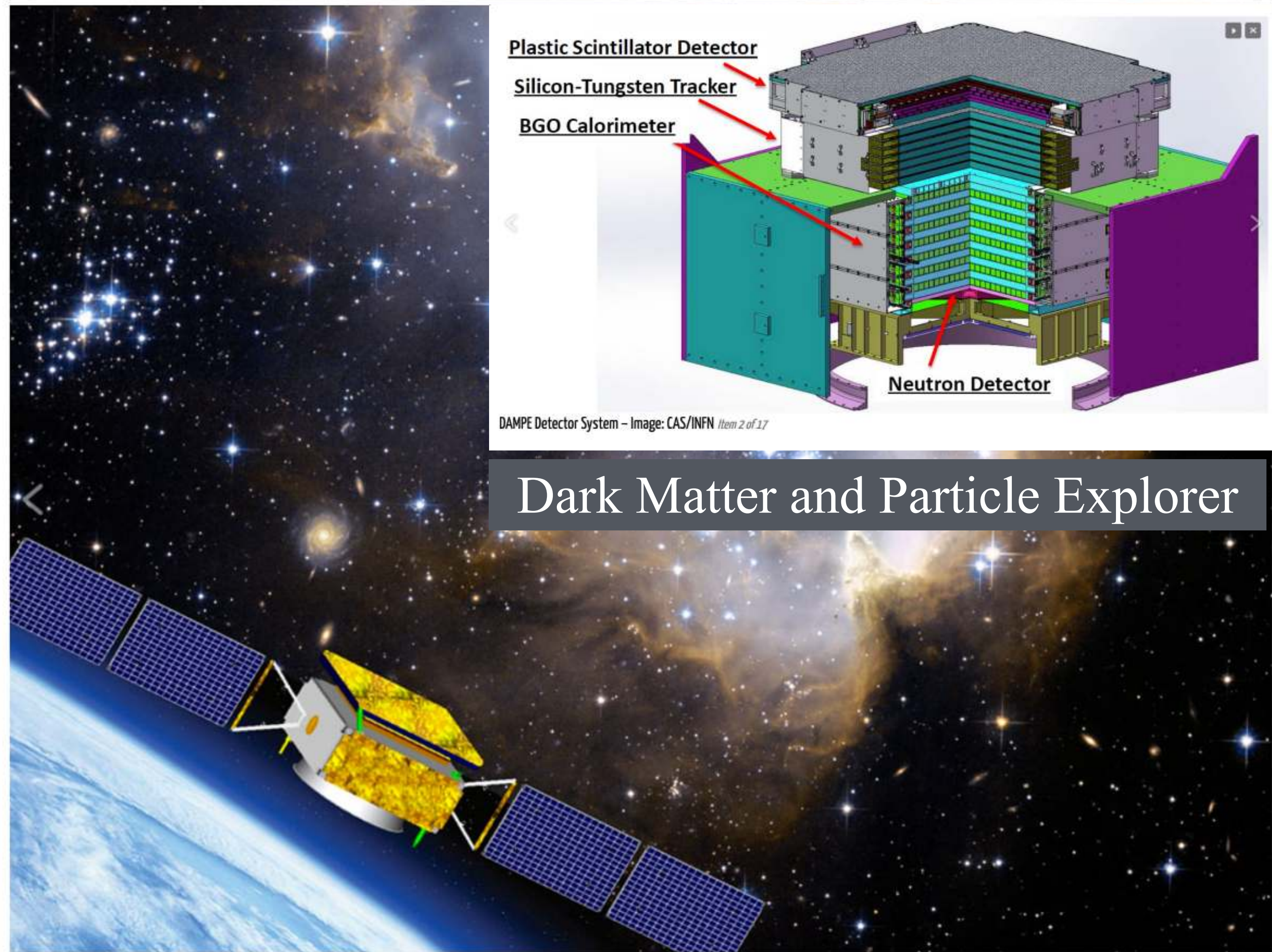
- Densidad de energía:

$$\langle u_{cr} \rangle = 0.8 \text{ eV cm}^{-3}$$

$$\langle u_B \rangle = 0.6 \text{ eV cm}^{-3}$$

$$\langle u_{cmb} \rangle = 0.25 \text{ eV cm}^{-3}$$

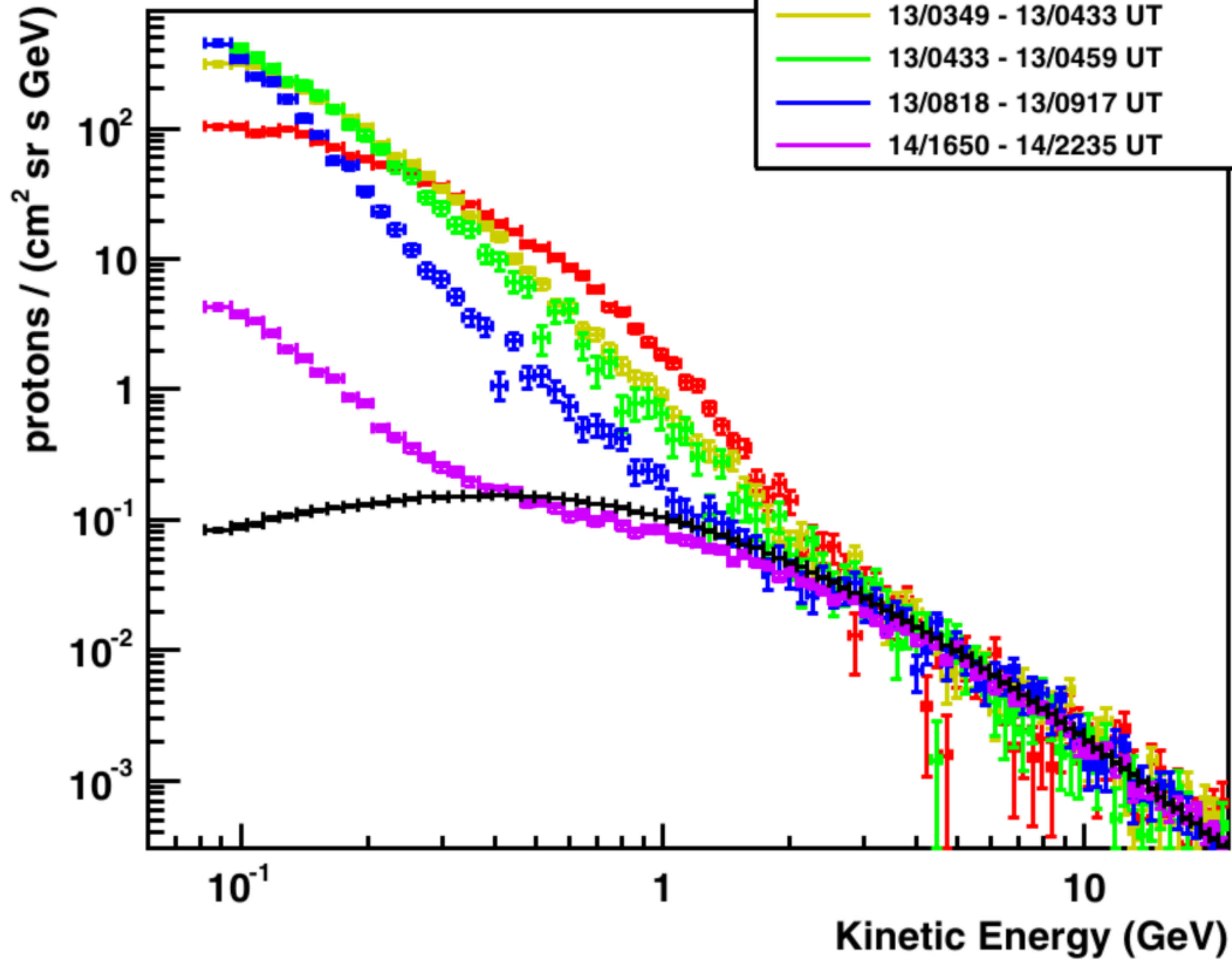




DAMPE Detector System – Image: CAS/INFN Item 2 of 17

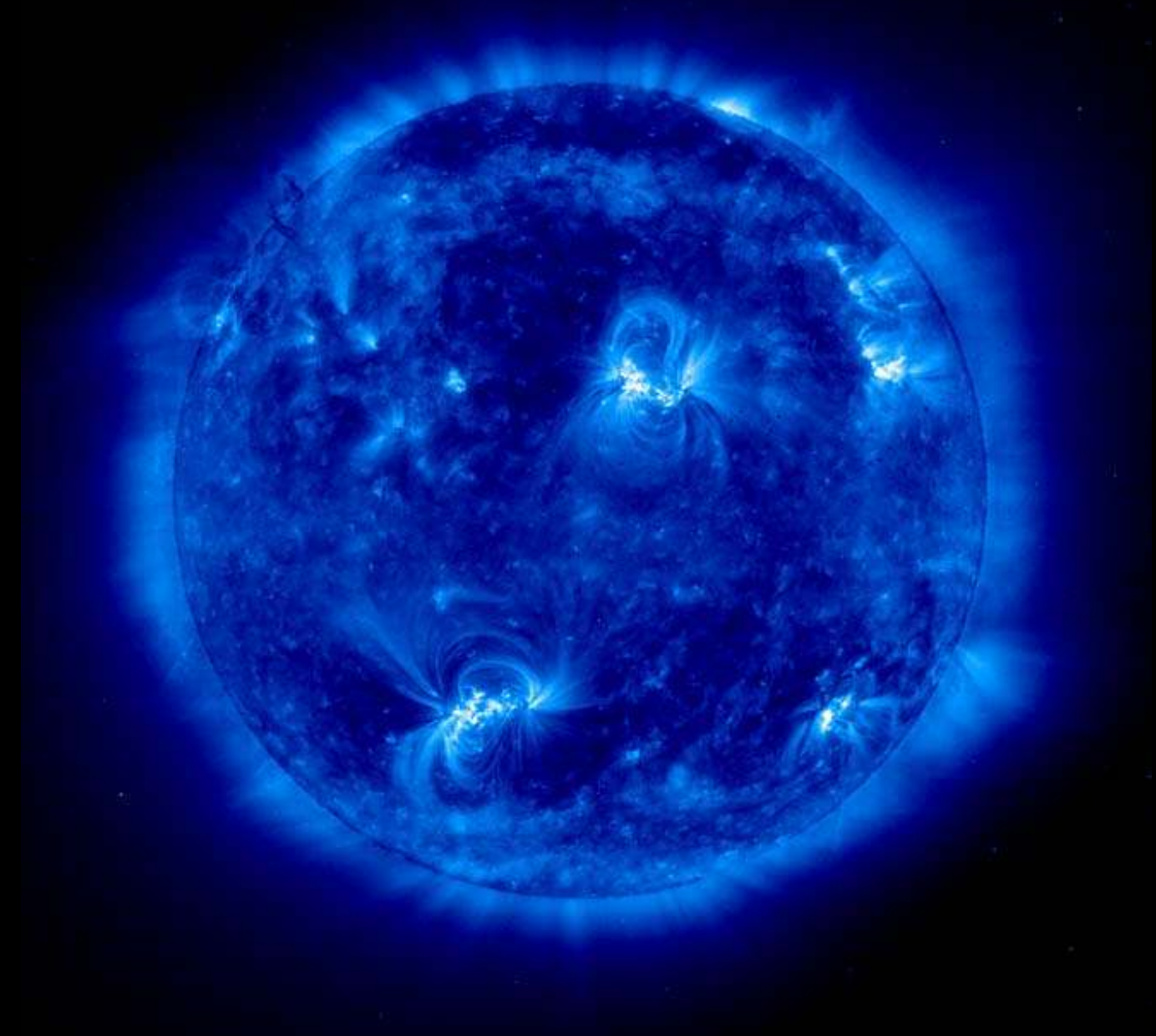
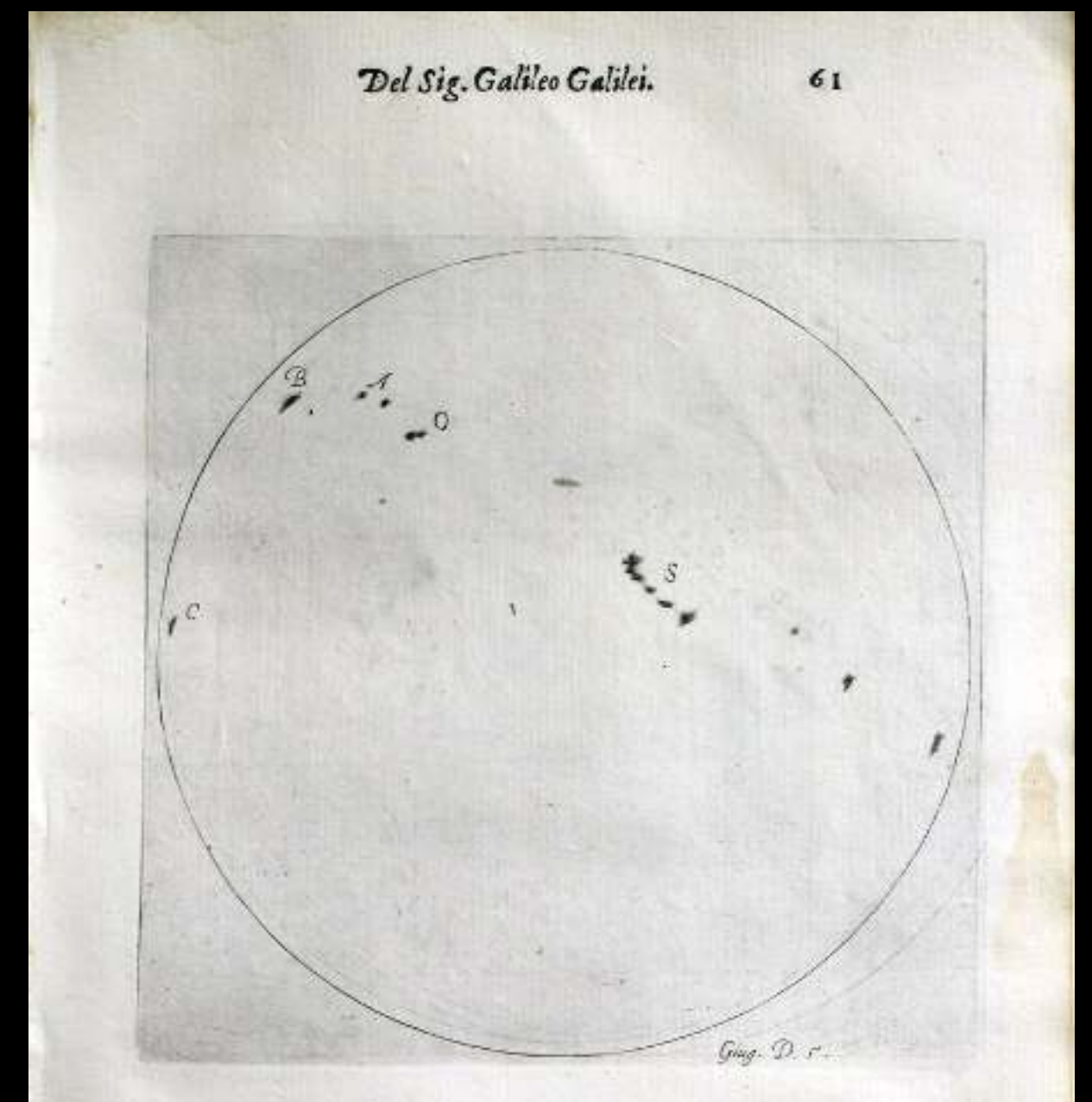
Image: Chinese Academy of Sciences / DAMPE Collaboration Item 1 of 17

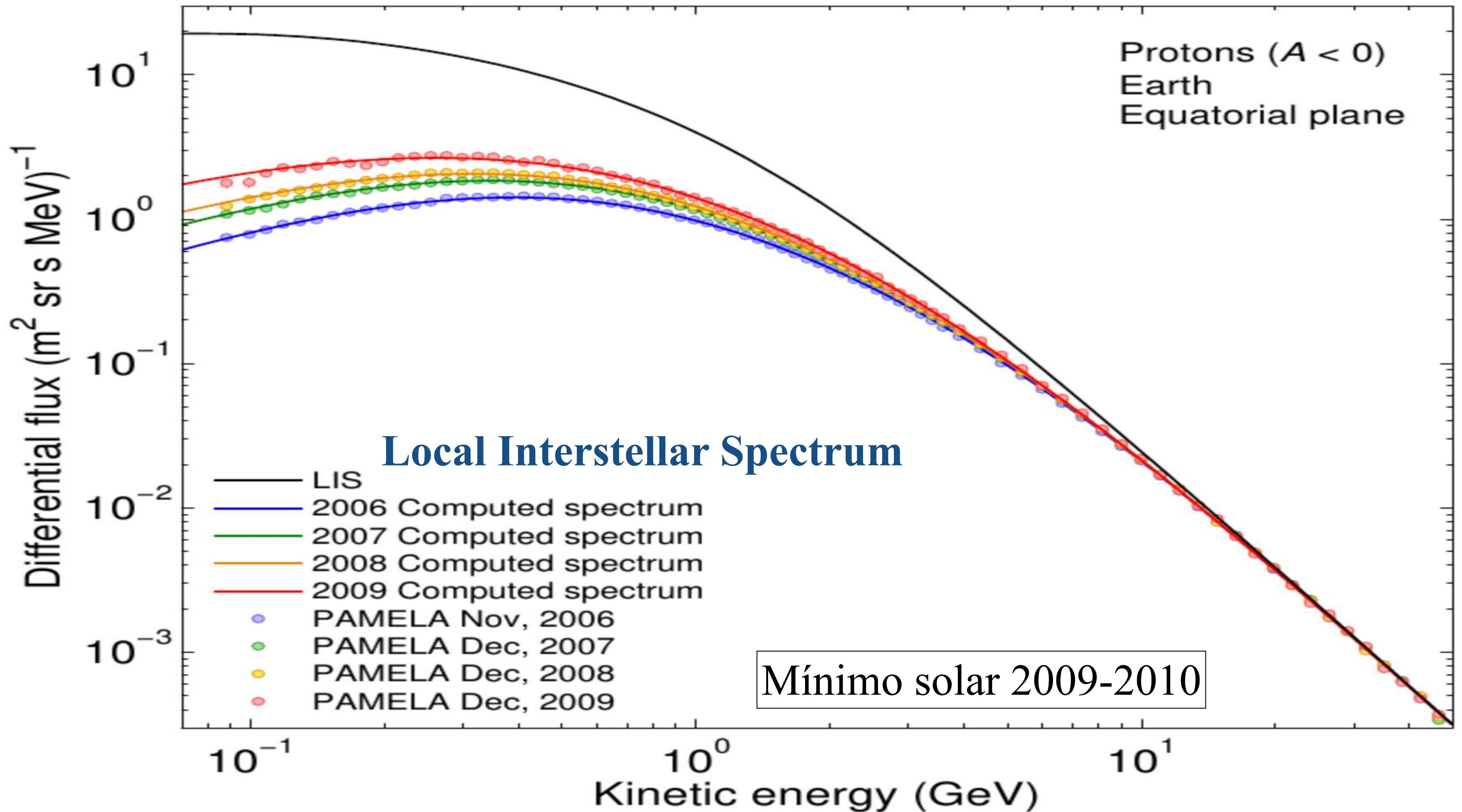
13-14 diciembre de 2006



SEP event of December 13, 2006 - Proton spectrum

CLOSE X





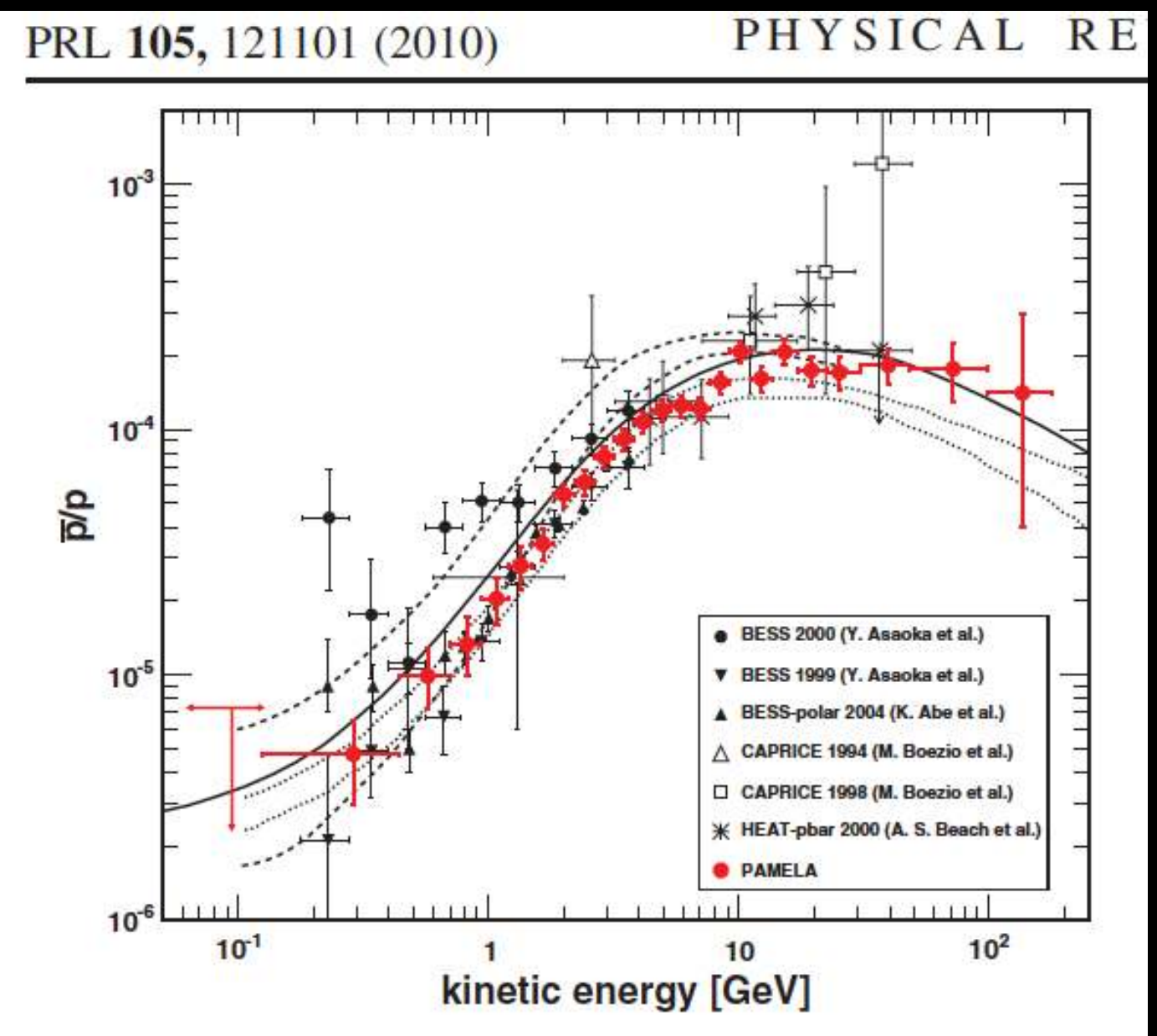
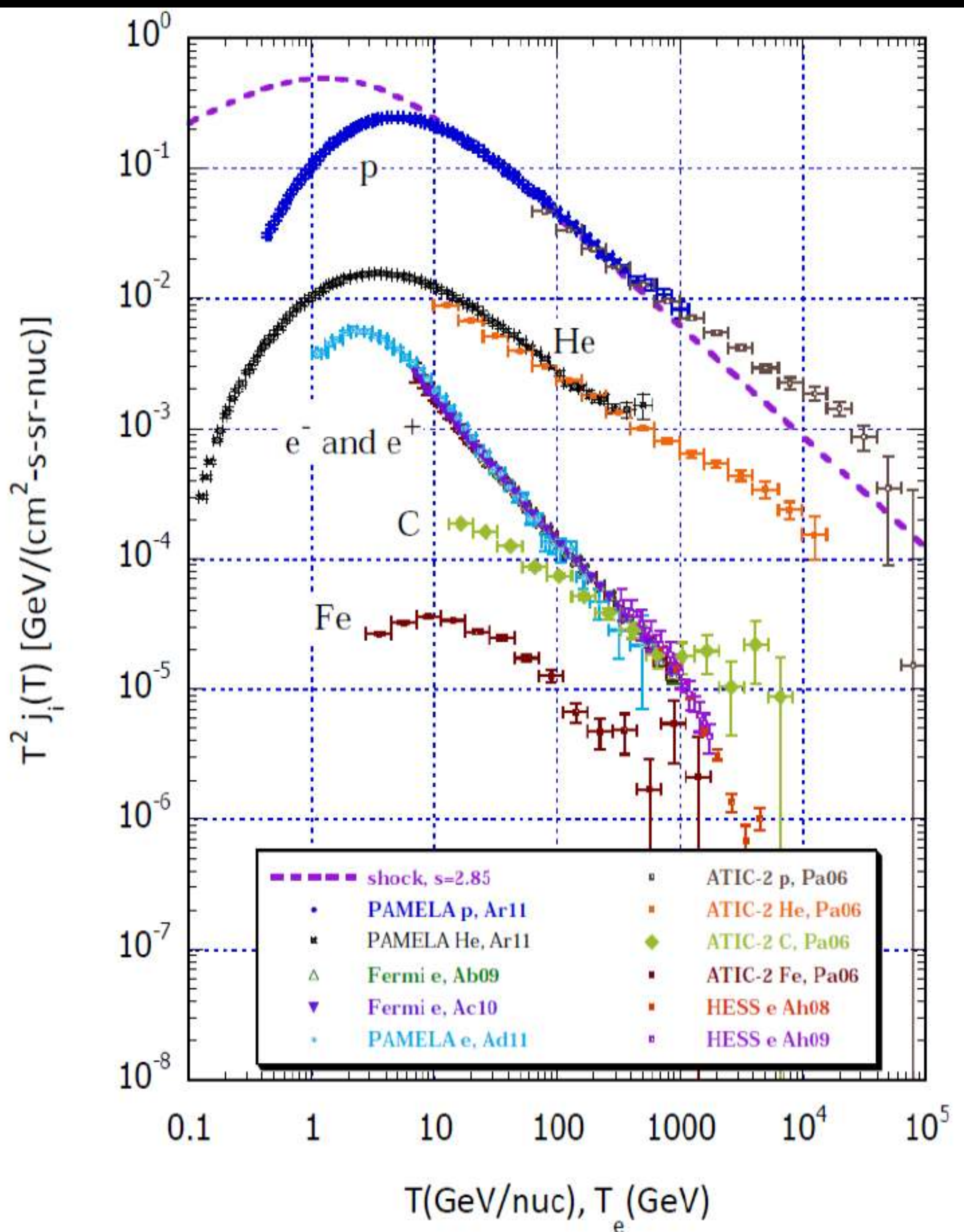
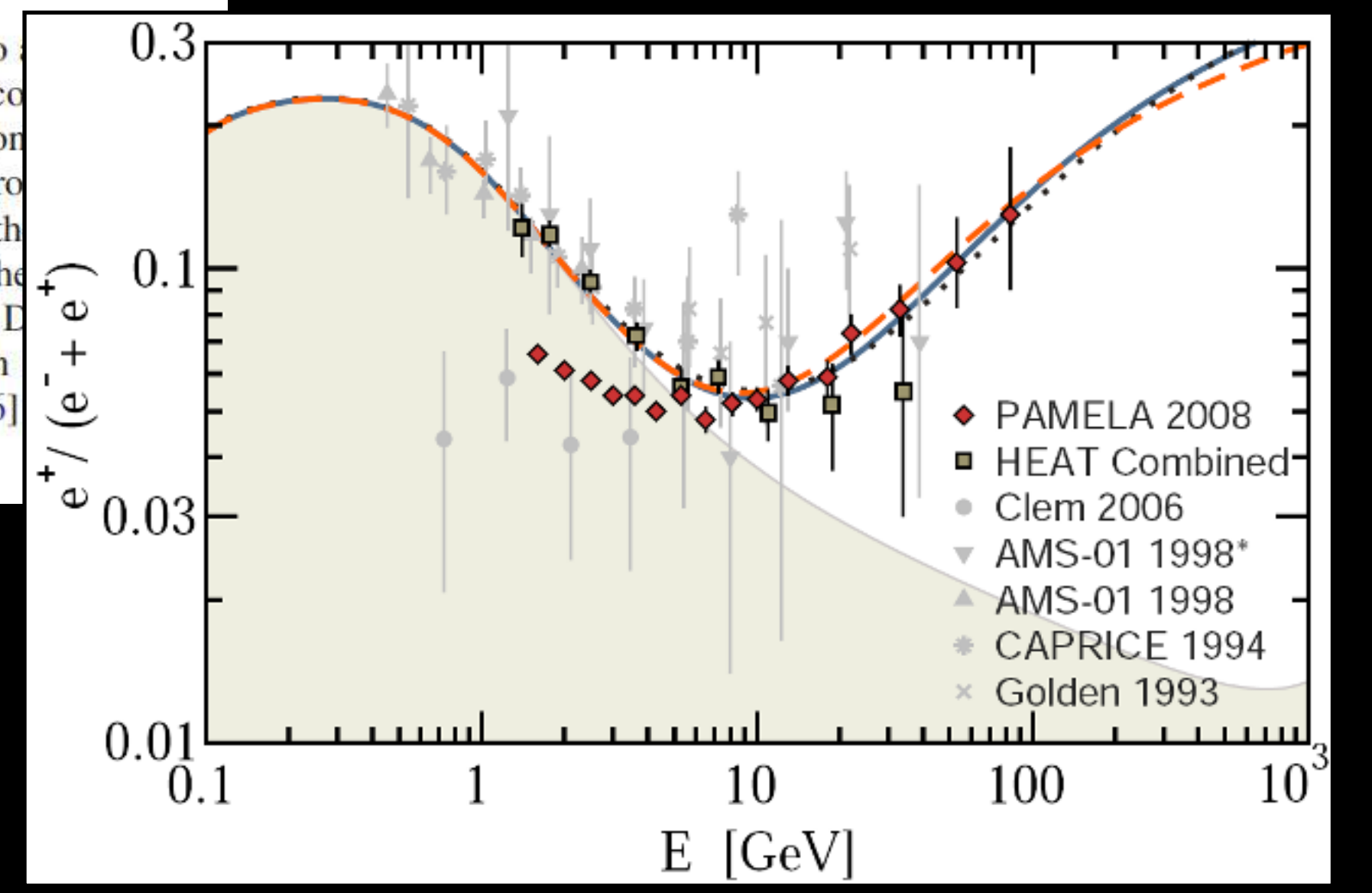


FIG. 2 (color). The antiproton-to-proton flux ratio, the payload obtained in this work compared with cosmic ray measurements [21–24,26] and theoretical calculation of secondary production of antiprotons during the propagation of cosmic rays in the Galaxy. The dashed lines show the lower limits calculated by Simon *et al.* [6] for the Model, while the dotted lines show the limits from [37] for a diffusion reacceleration with convection. The solid line shows the calculation by Ptuskin *et al.* [36] of a plain diffusion model.

Composición, antipartículas, búsqueda de materia oscura



Exceso “anómalo” de positrones:
¿fuentes “leptónica”? ¿materia oscura?

Rayos cósmicos en la atmósfera



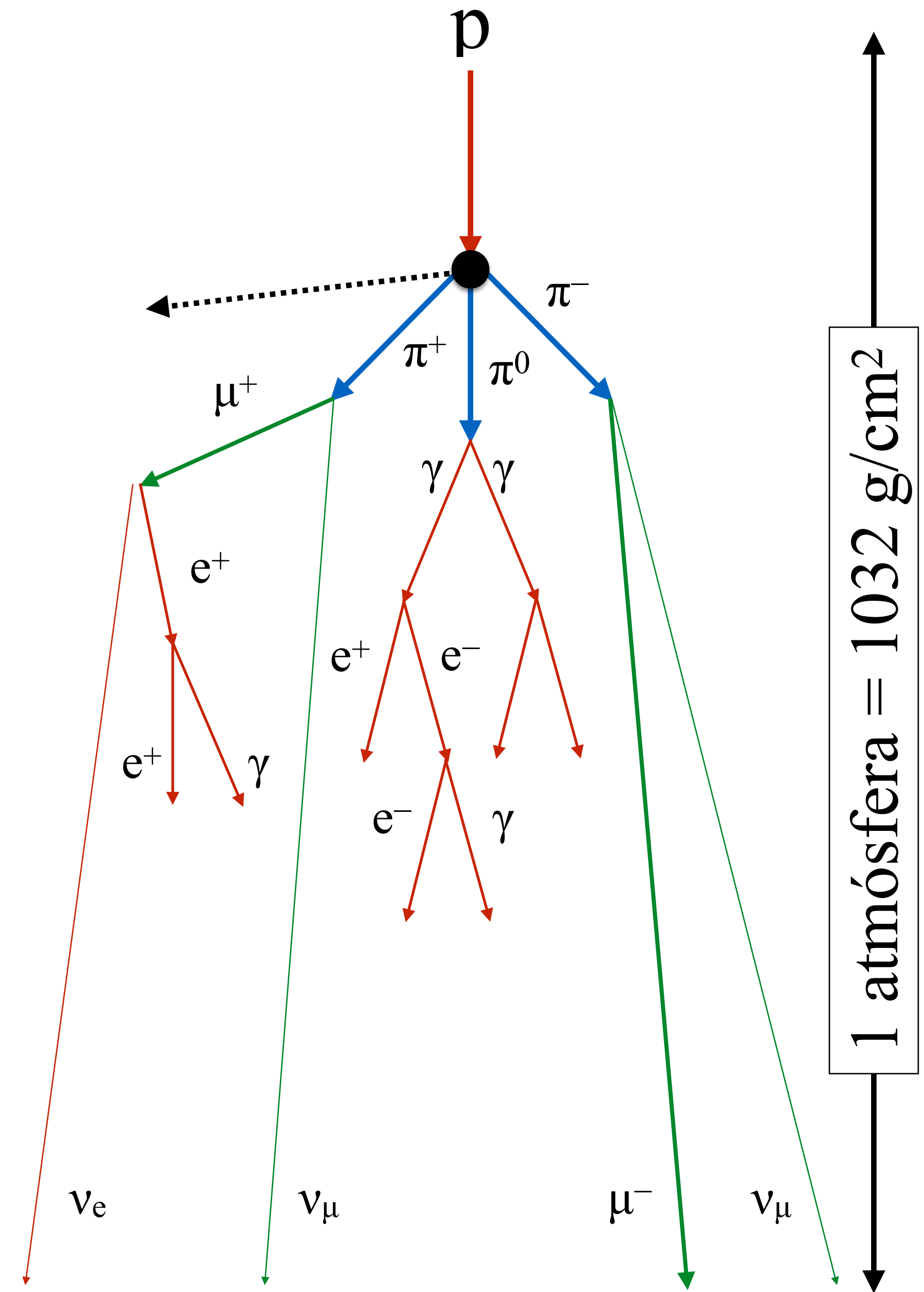
Cascadas atmosféricas

- Los rayos cósmicos provocan cascadas de (miles, millones) de partículas (secundarias) en la atmósfera.
- La mayoría son iniciadas por una colisión nuclear:

$$p + \text{núcleo} \rightarrow \pi^{\pm} + \pi^0 + \text{fragmentos},$$

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}; \quad \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e + \underline{\nu}_{\mu},$$

$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma.$$
- Una cascada hadrónica desarrolla componentes nucleares, muónicas y electromagnéticas.
- Los neutrinos y muones se pueden propagar por debajo del suelo.



Cascadas electromagnéticas

- Los fotones y electrones y fotones inician un proceso puramente electromagnético:

- Producción de pares:

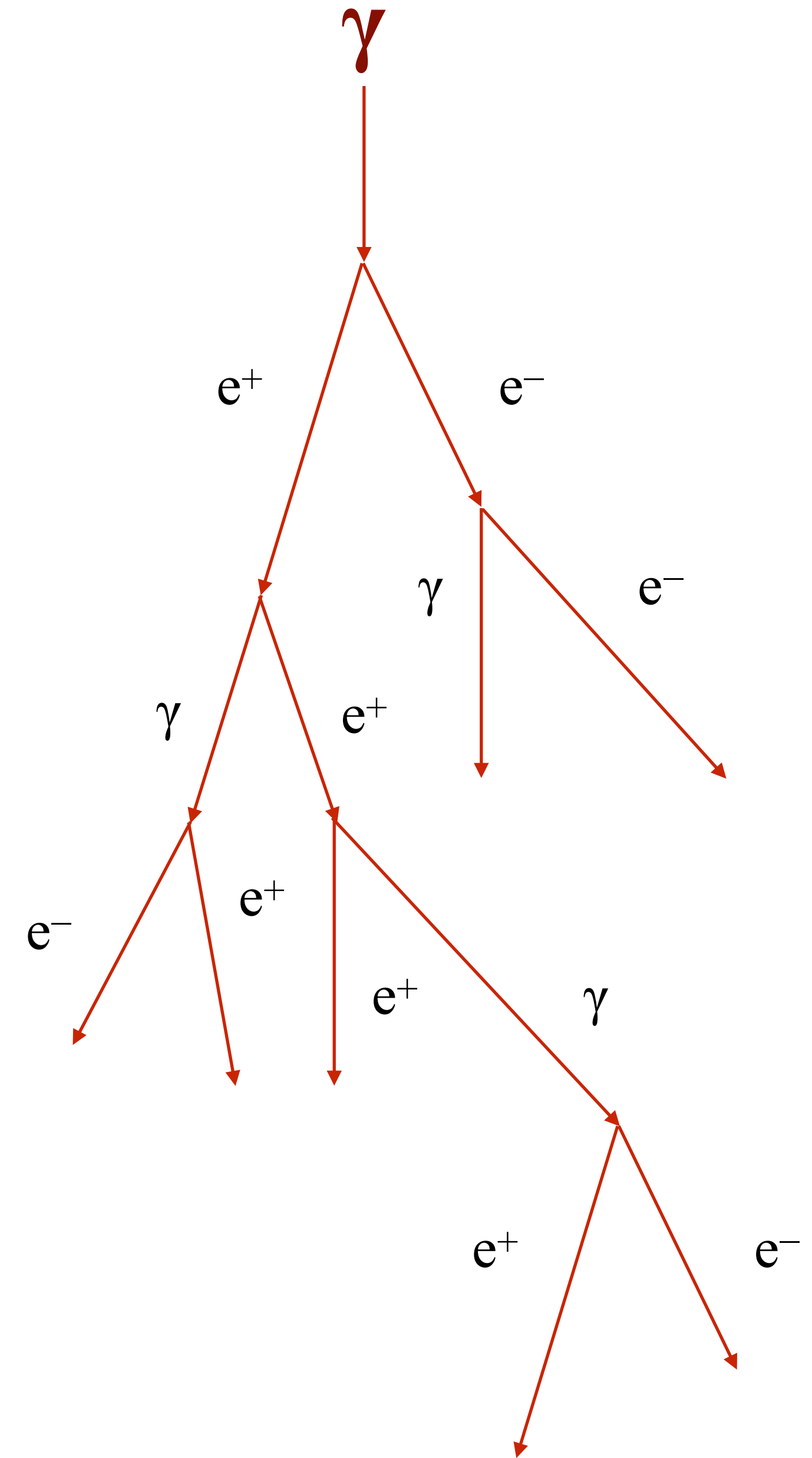


La producción de pares cesa cuando la energía no es suficiente para competir con Compton ($E_\gamma \approx 80 \text{ MeV}$).

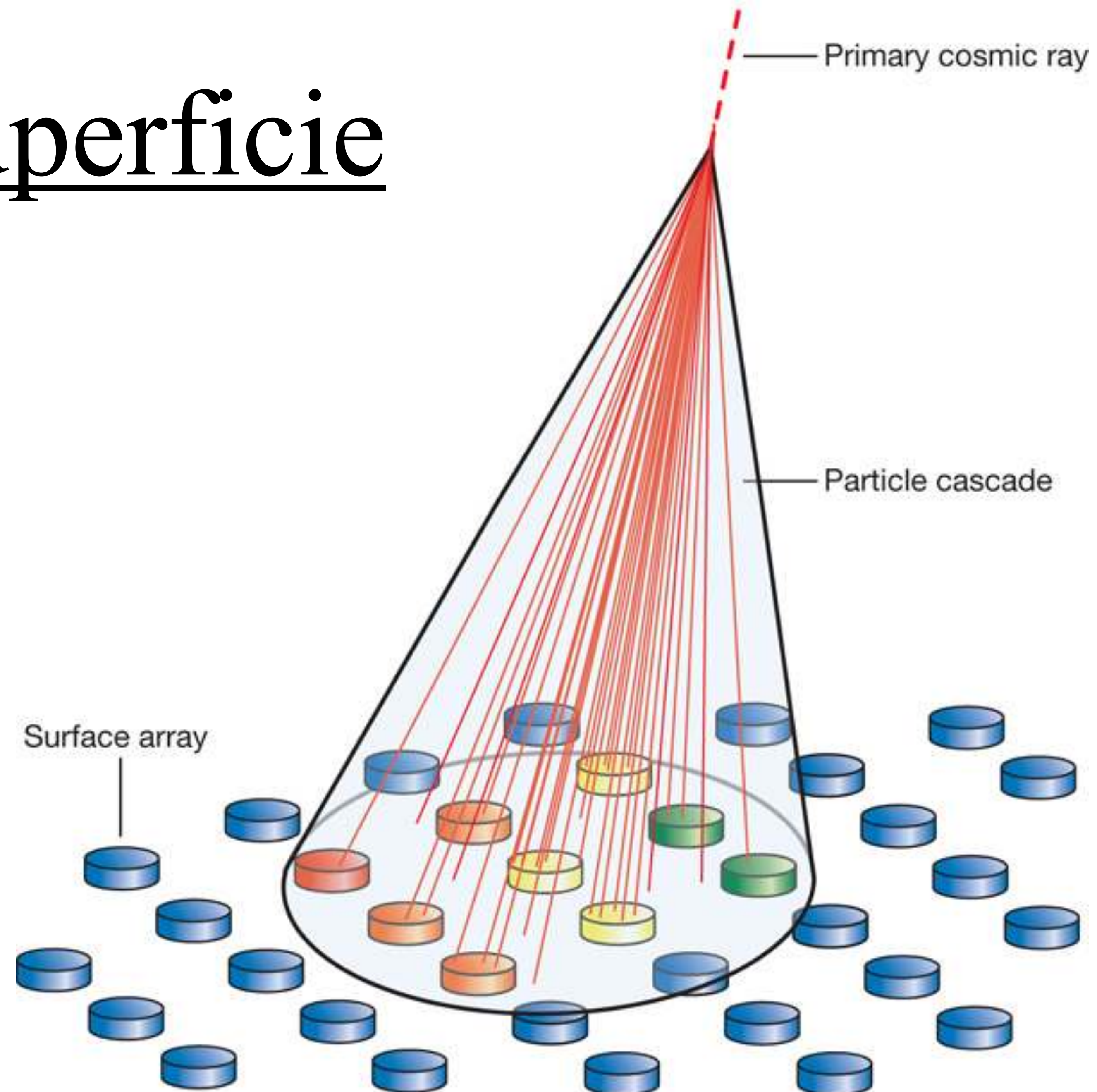
- Bremsstrahlung:



Bremsstrahlung cesa cuando la ionización empieza a competir ($E_e \approx 35 \text{ MeV}$).



Detectores de superficie



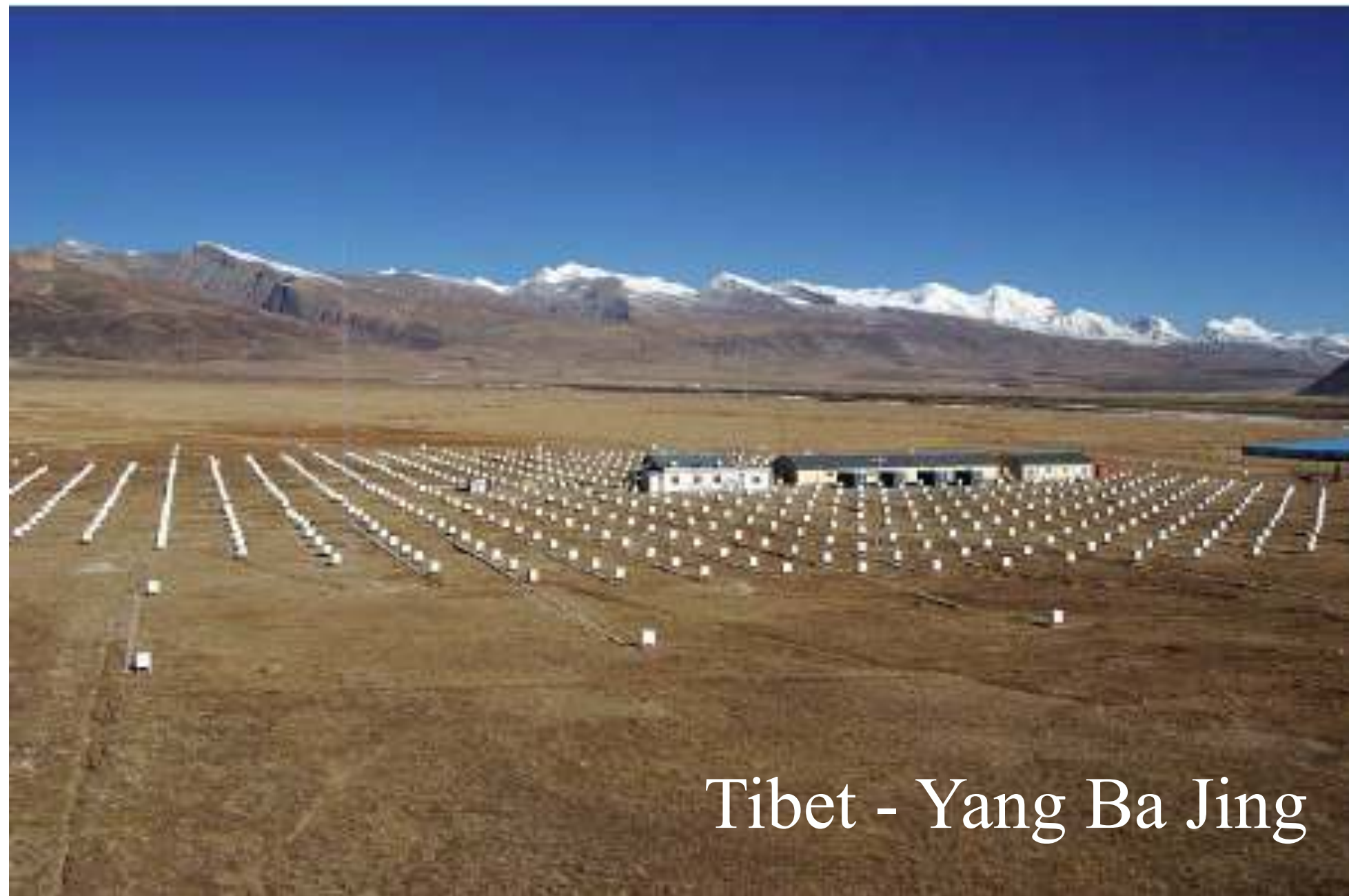


HAWC

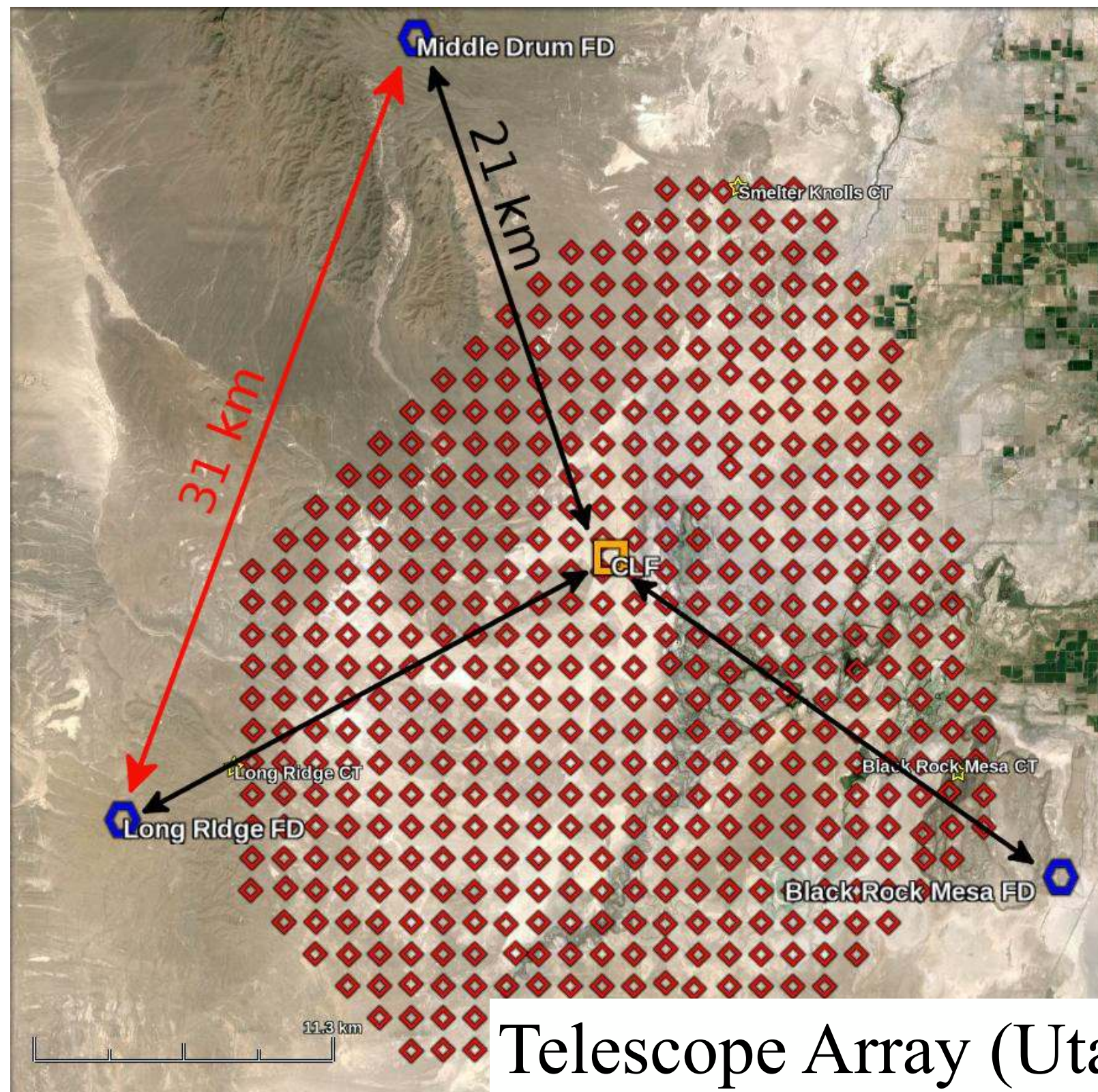


Kascade

Mayor densidad
Menor energía



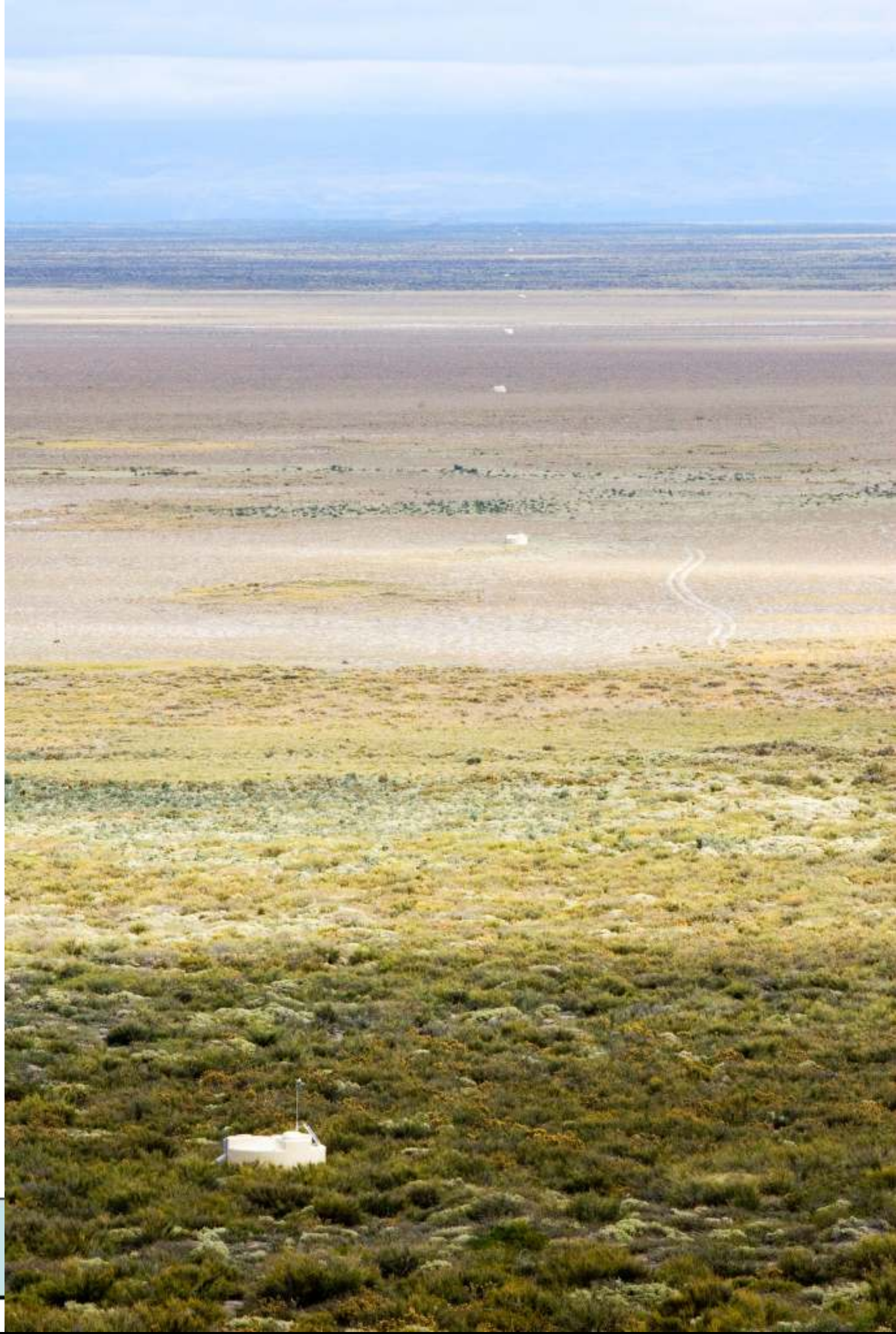
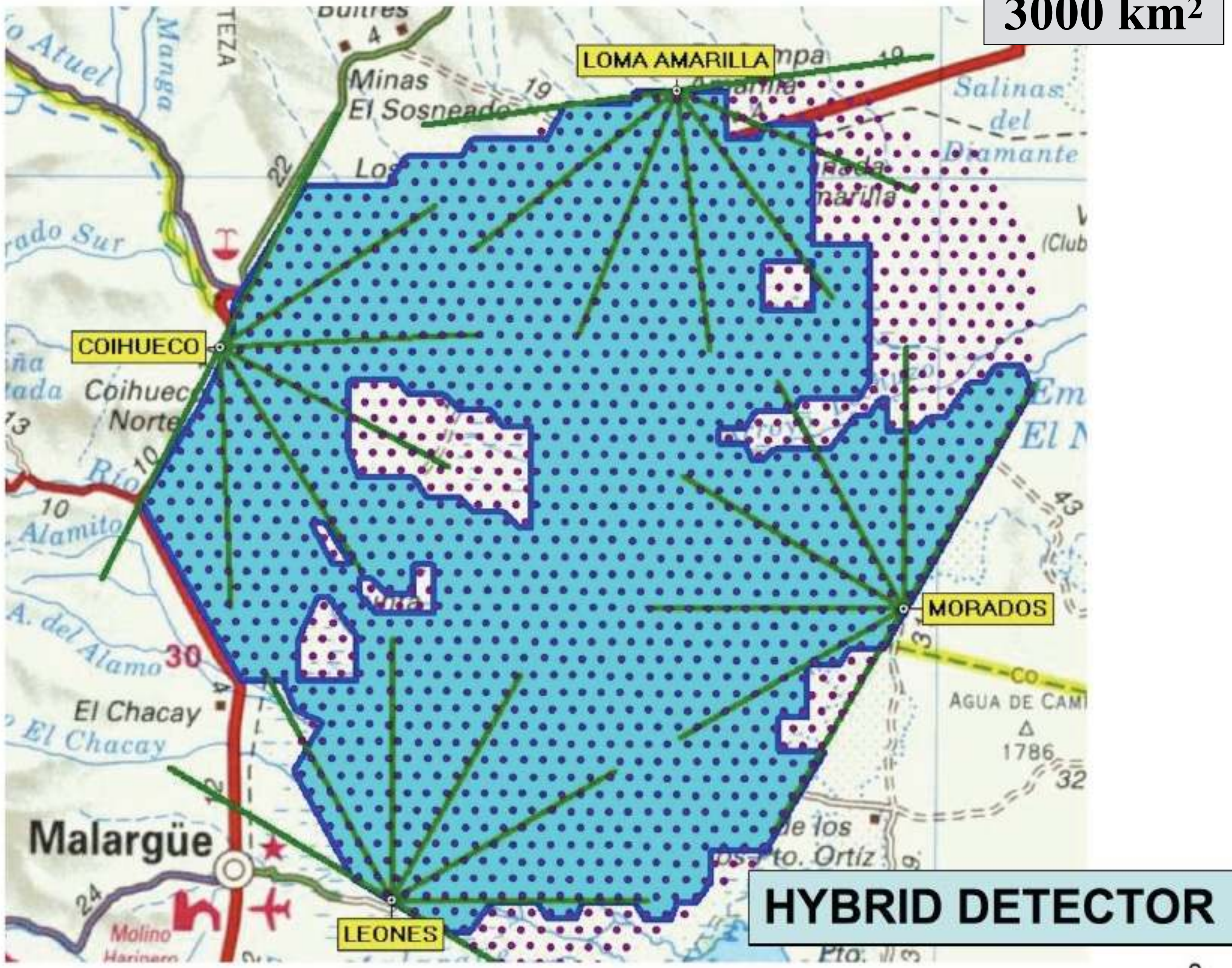
Tibet - Yang Ba Jing



Telescope Array (Utah)

Mayor área
Mayor energía

3000 km²



1. Rayos cósmicos

- El descubrimiento de los rayos cósmicos y su naturaleza.
- La energía de los rayos cósmicos; su observación fuera y dentro de la atmósfera.
- La propagación y aceleración de rayos cósmicos en la Galaxia.
- Rayos cósmicos con energías ultra altas (UHE).



Carga en campo magnético

Campos geomagnético, heliosférico, Galáctico.
Para partículas relativistas:

$$E \approx pc = r_\ell Ze B$$

- ▶ La fuerza de Lorentz,

$$\frac{d(\gamma mc^2)}{dt} = q\vec{E} \cdot \vec{v}, \quad \frac{d(\gamma m\vec{v})}{dt} = q \left(\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B}, \right), \quad (3)$$

para $\vec{E} = 0$ resulta en γ constante y $d\vec{v}/dt = \vec{\omega}_B \times \vec{v}$, con la frecuencia de sincrotrón, dada $\mathcal{E} = \gamma mc^2$,

$$\vec{\omega}_B = \frac{q\vec{B}}{\gamma mc} = \frac{q\vec{B}c}{\mathcal{E}}. \quad (4)$$

- ▶ El movimiento es helicoidal, superposición de rectilíneo uniforme en la dirección \vec{B} , circular uniforme en el plano perpendicular, con radio de giro,

$$r_\ell = v/\omega_B = \frac{\mathcal{E}v}{qBc} = \frac{pc}{qB} = R/B, \quad (5)$$

con $R = pc/q$ la rigidez magnética.



Campos magnéticos y propagación

- La propagación de los rayos cósmicos está gobernada por el campo magnético Galáctico que ocasiona trayectorias localmente helicoidales \implies mov. caótico.

$$r_\ell = \frac{v \sin \alpha}{\omega_B} = \frac{\gamma \beta m c^2}{q B} \sin \alpha = \left(\frac{pc/Z e}{B} \right) \sin \alpha$$
$$\simeq 400 \text{ AU} \left(\frac{pc/Z e}{\text{TV}} \right) \left(\frac{B}{5 \mu\text{G}} \right)^{-1} \simeq 2 \text{ pc} \left(\frac{pc/Z e}{\text{PV}} \right) \left(\frac{B}{5 \mu\text{G}} \right)^{-1}$$

- Partículas con energías de GeV y TeV tienen radios de curvatura menores que las distancias interestelares \implies distribución aleatoria (isotrópica).
- Los radios de curvatura a energías de PeV son comparables con las dimensiones de los mayores aceleradores de la Galaxia.

AN EXPERIMENT ON AIR SHOWERS PRODUCED BY HIGH-ENERGY COSMIC RAYS

By Drs. G. CLARK, J. EARL, W. KRAUSHAAR, J. LINSLEY, B. ROSSI and F. SCHERB

Department of Physics and Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

PROBLEMS of interest to both the physicist and the astrophysicist single out the high-energy component of cosmic rays as a particularly promising subject of research. On one hand, the shape of the spectrum and the directional distribution of the incoming particles depend critically on the structure of the galaxy and on the mechanism responsible for the acceleration of cosmic rays. On the other hand, despite the remarkable progress of accelerators, we still have to turn to cosmic rays in order to obtain information on the fundamental problem of nuclear interactions at energies which, in the centre of mass of the colliding particles, are greatly in excess of the rest-energy of nucleons.

The cosmic-ray spectrum falls off rapidly with increasing energy. Thus particles of very high energies are exceedingly rare; for example, the rate of arrival of particles with more than 10^{16} eV. energy is of the order of one per year per square metre. Hence direct methods of detection are ruled out, and the only practical approach is the study of the giant showers that are produced in the atmosphere by high-energy cosmic-ray particles.

The essential features of this phenomenon are well known. After a comparatively short path through air, the primary particle collides against an atomic nucleus, producing a number of high-energy secondary particles. Among these are π^0 -mesons, which immediately decay into photons, and nuclear-active particles (charged π -mesons, nucleons, etc.), which go on to produce further interactions, so that a nuclear cascade develops. At each step a certain fraction of the energy goes into photons via the decay of π^0 -mesons; photons initiate electronic cascades and soon electrons and photons become the dominant component of the shower. Some of the charged π -mesons, however, decay before interacting and thus contribute an appreciable number of μ -mesons to the

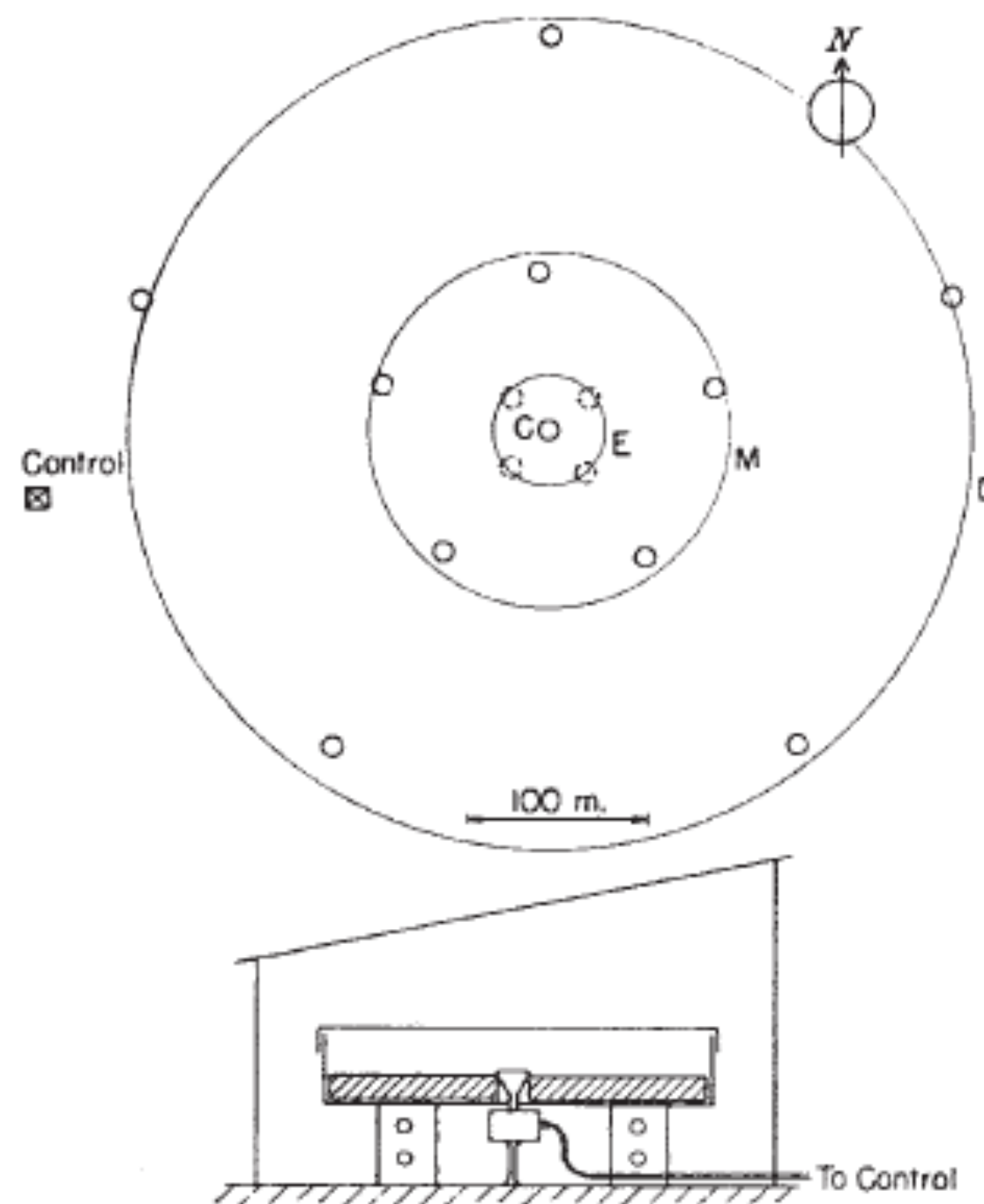


Fig. 1. Detector array and schematic diagram of a scintillation counter

detectors (*C*, *M* and *D* in Fig. 1), but during a short period we had four additional detectors placed near the centre of the array (*E* in Fig. 1) in order to extend our measurements to showers of smaller size than those which could be recorded in the main experiment. The detectors are connected by cables to separate oscilloscopes, which are situated in a control station and arranged one next to the other so that

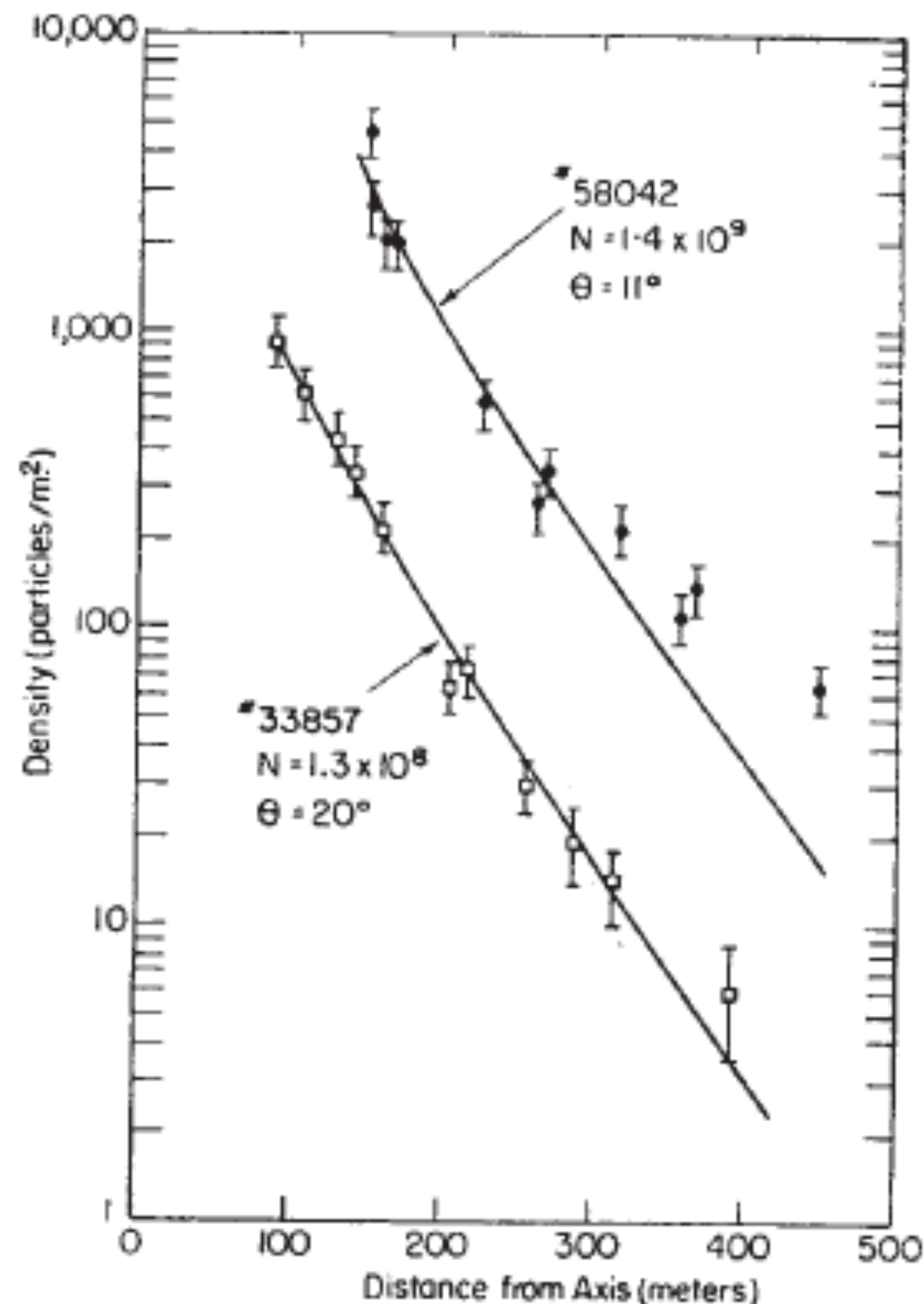
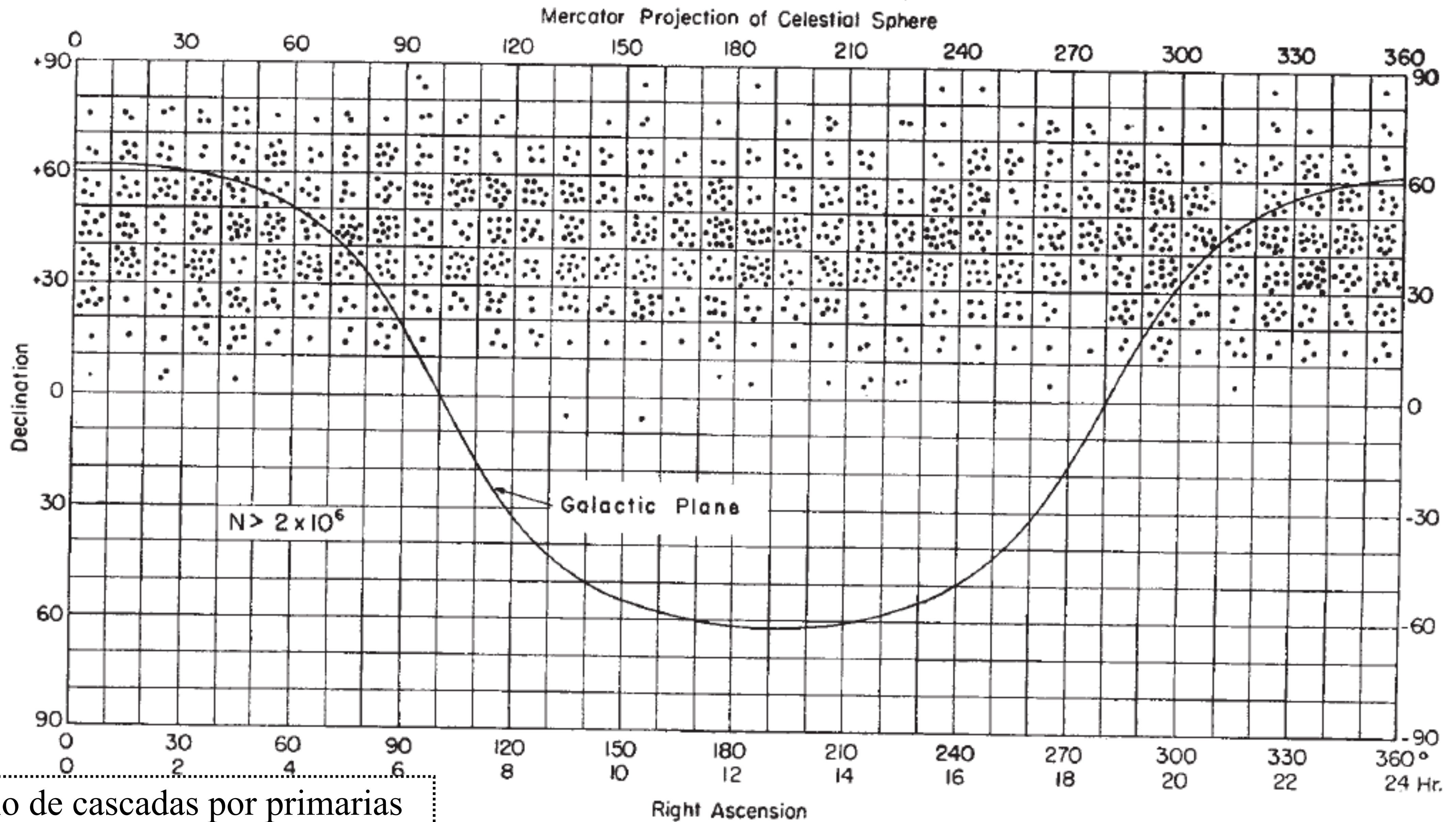


Fig. 3. Lateral density distributions of two large showers

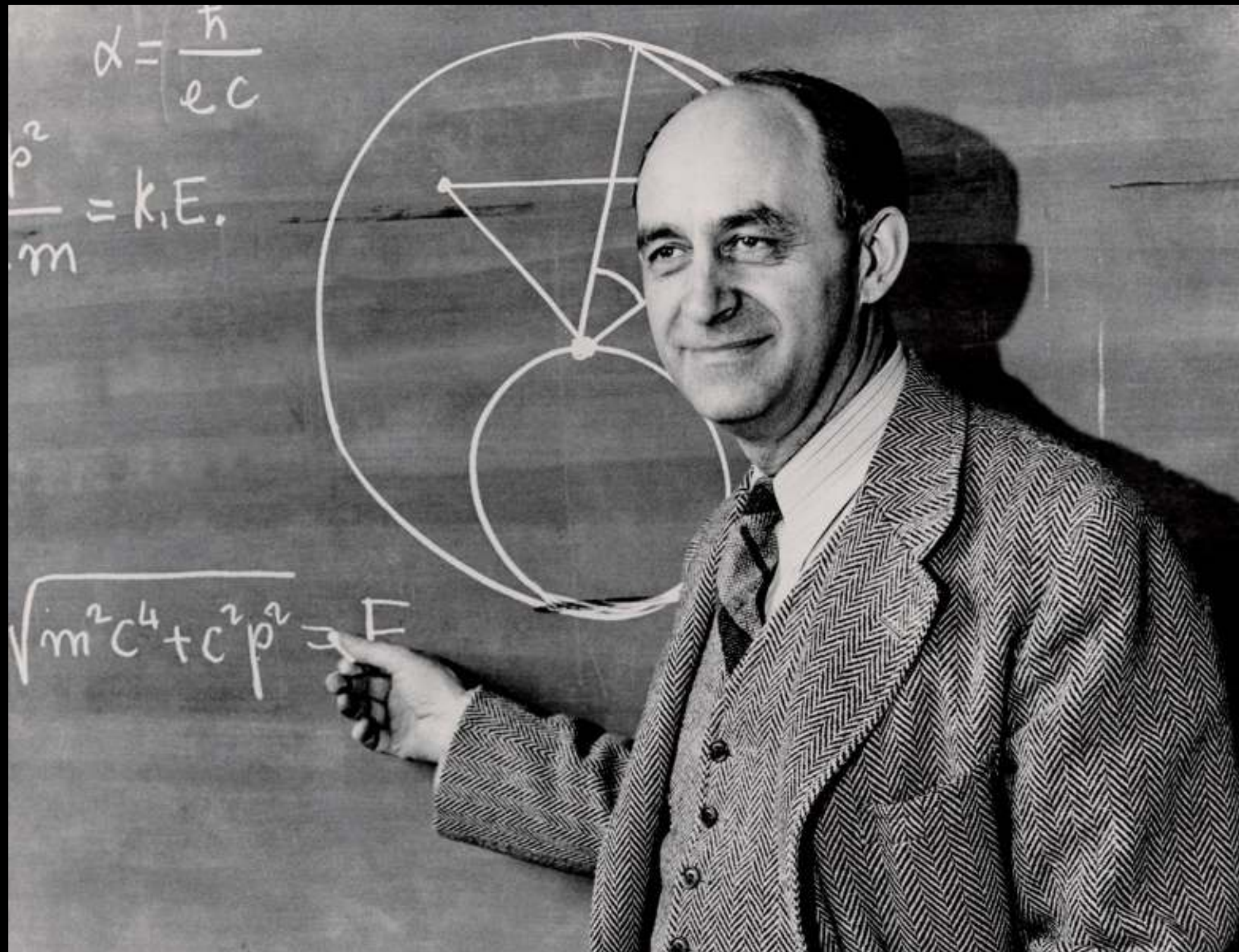


Estudio de cascadas por primarias
con $E \geq 10^{16}$ eV (Clark 1957)

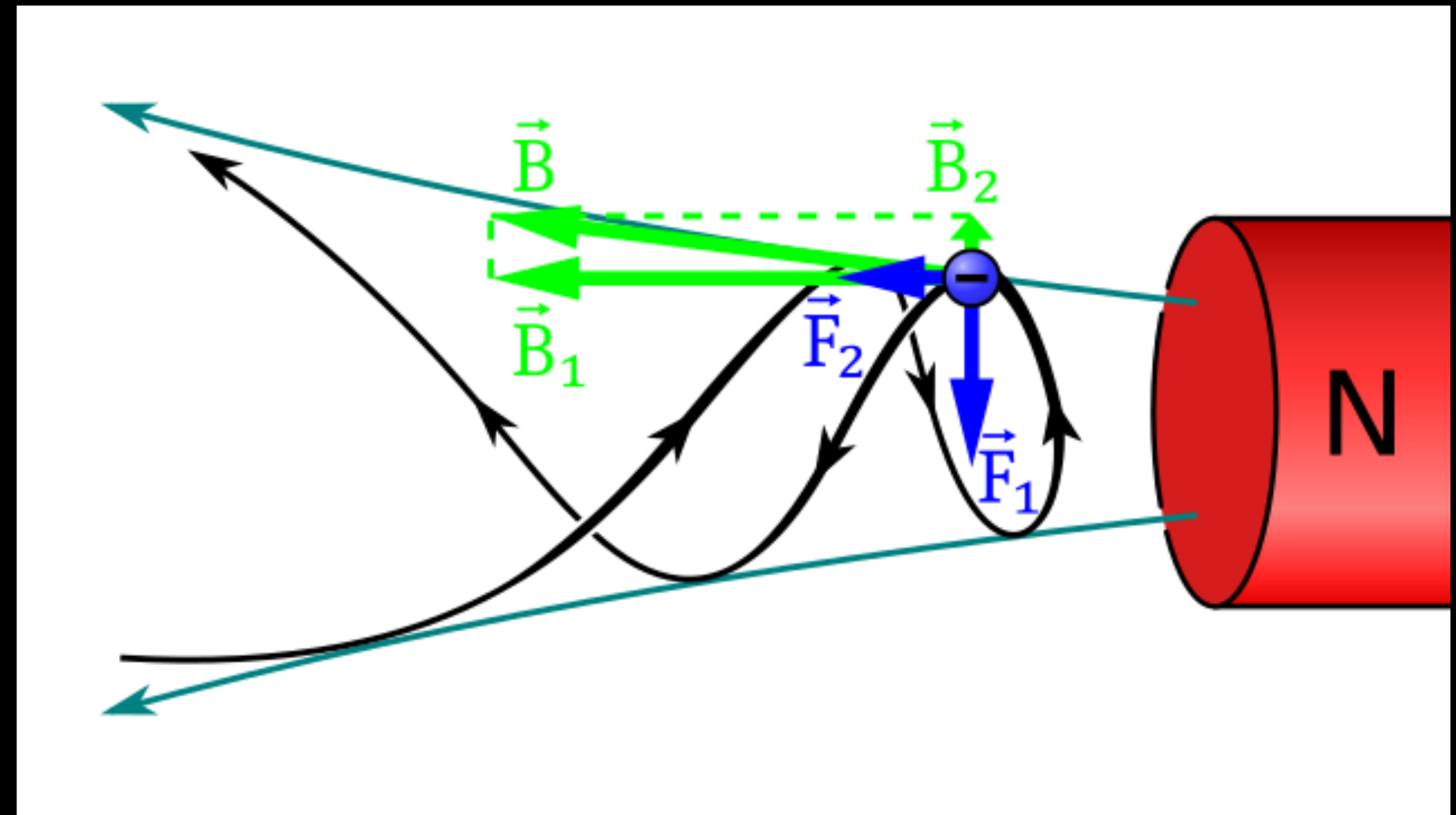
Locations of arrival of 1,286 showers with more than 2×10^6 particles

¿El origen de los rayos cósmicos?

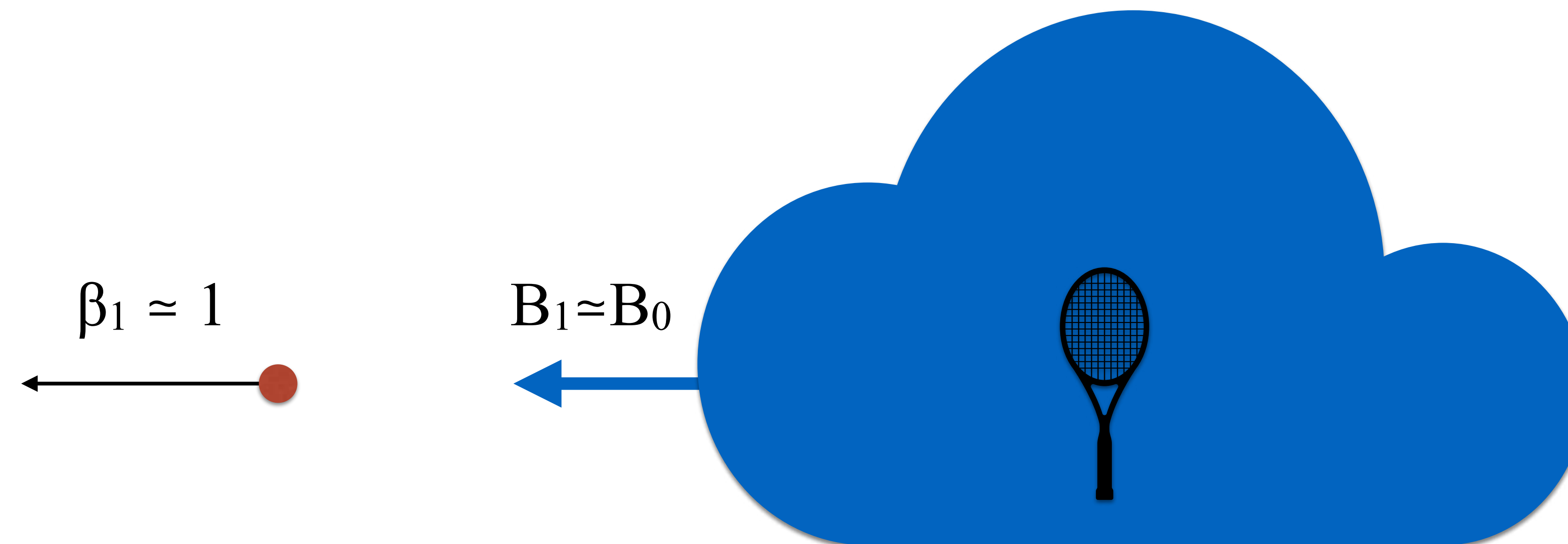
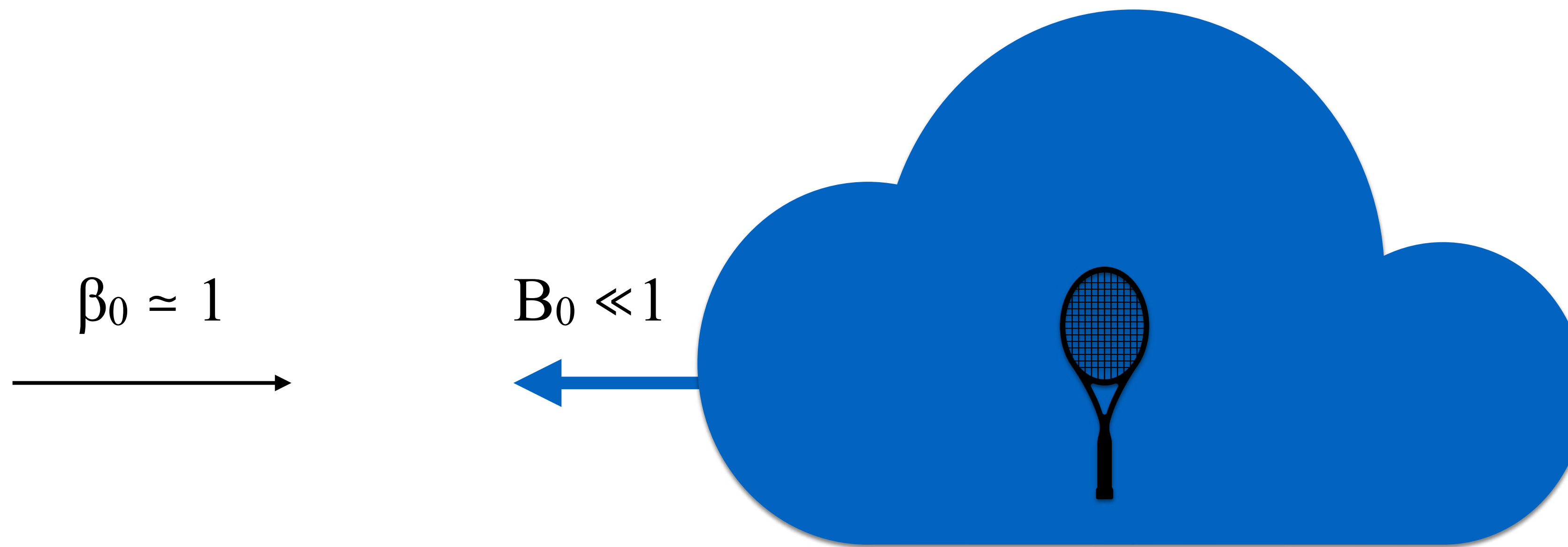
¿Cómo puede funcionar un acelerador cósmico?



Enrico Fermi (1901-1954)



Espejos magnéticos



The Strange Case of the Cosmic Rays (1957) - https://www.youtube.com/watch?v=k_wt5AFjRQo



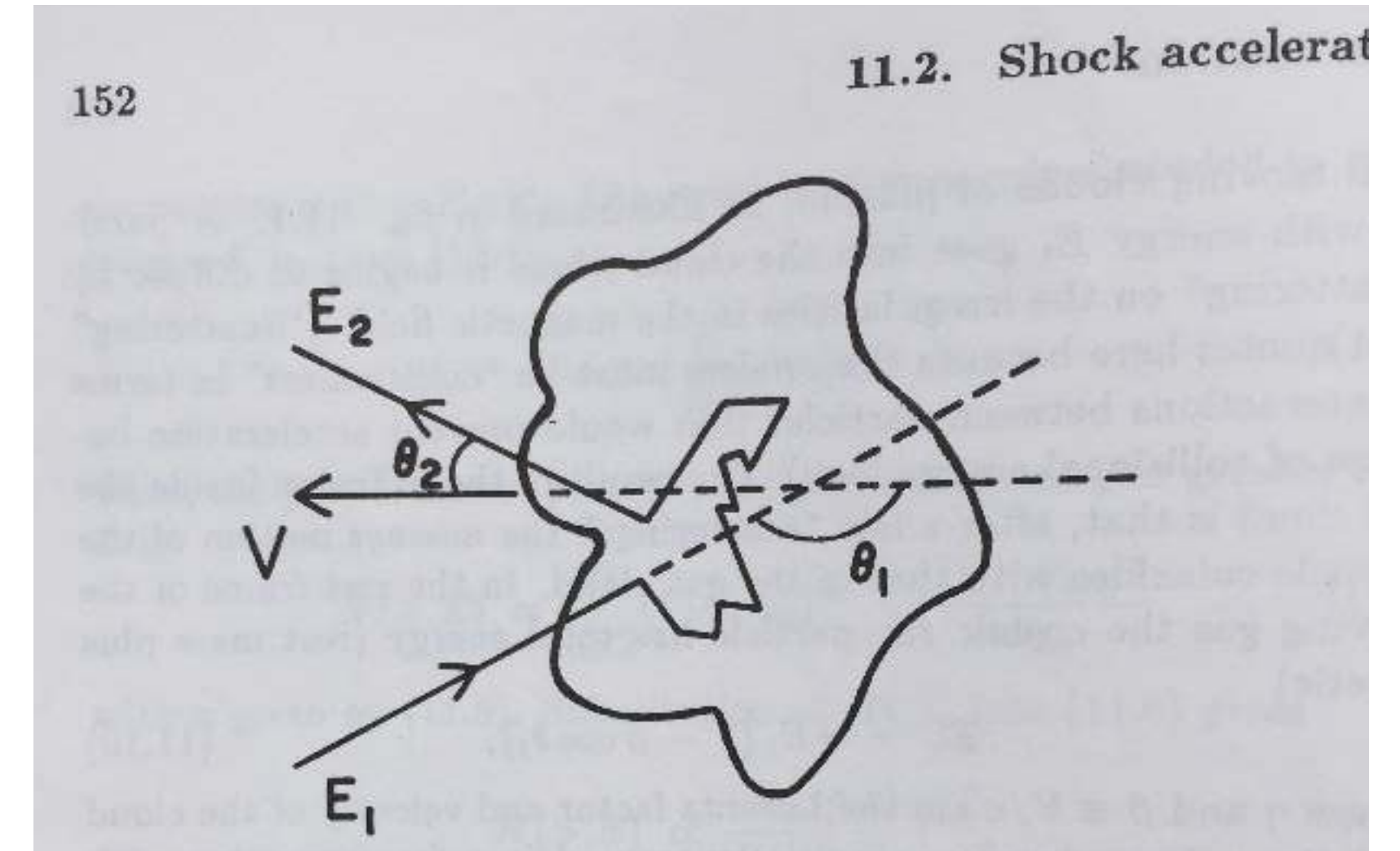
Rayos gamma @ LA-CoNGA Physics - junio 2023



Aceleración de Fermi

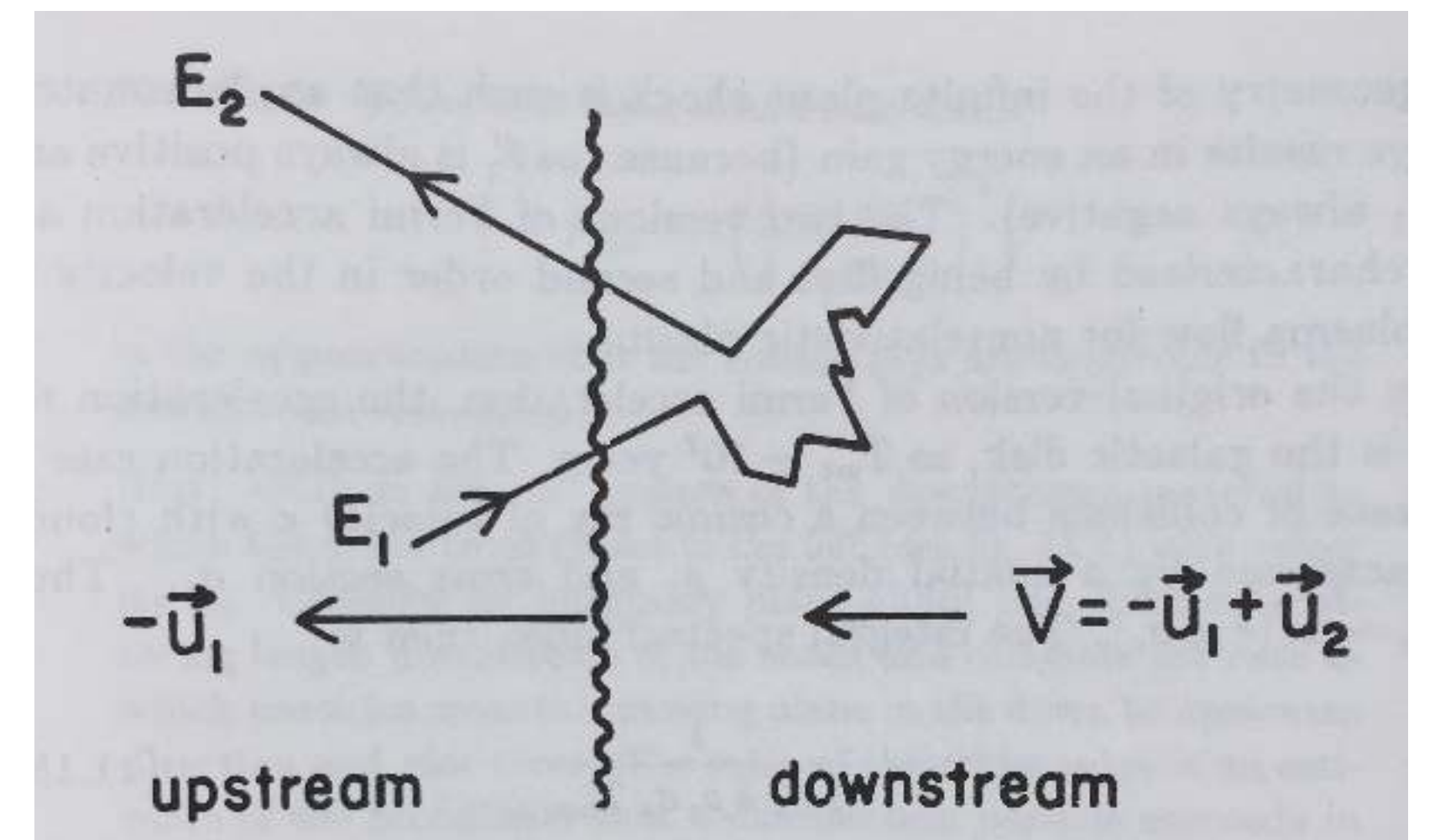
Encuentro de una partícula relativista con una nube molecular

$$\left\langle \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right\rangle \propto \left(\frac{V}{c} \right)^2$$

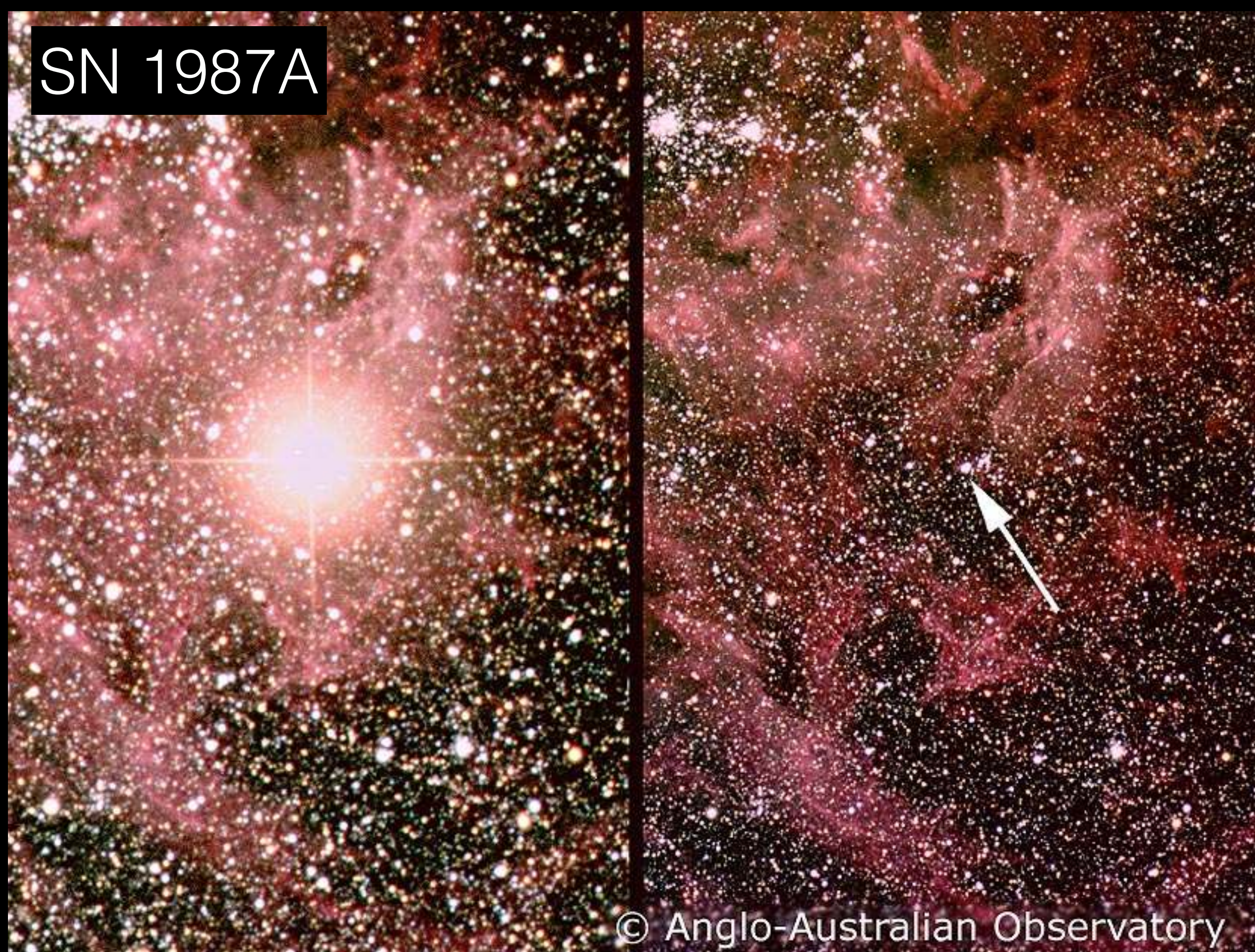


Encuentro de una partícula con un frente de choque

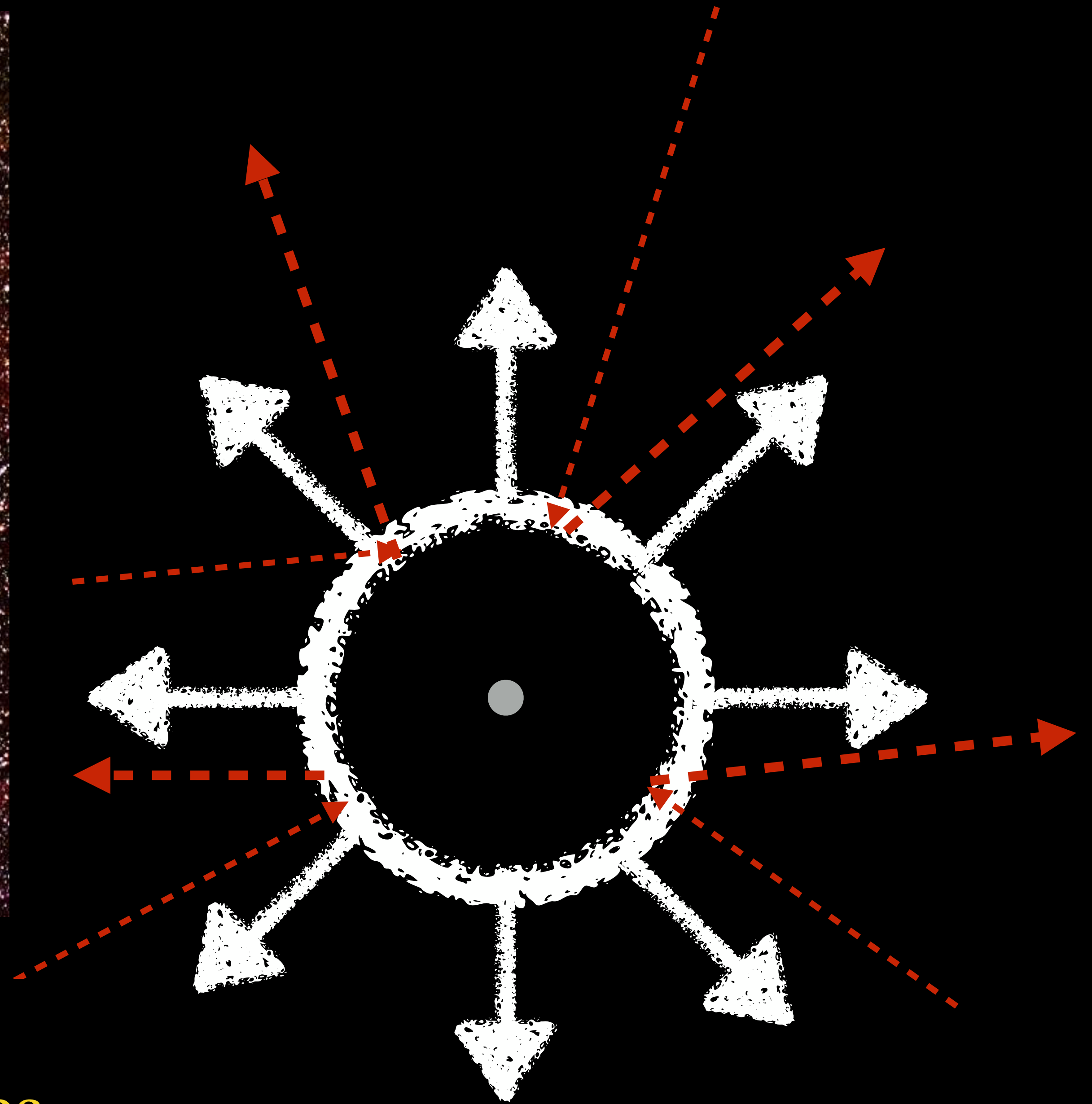
$$\left\langle \frac{\Delta\gamma}{\gamma} \right\rangle \propto \left(\frac{V}{c} \right)$$



SN 1987A



© Anglo-Australian Observatory



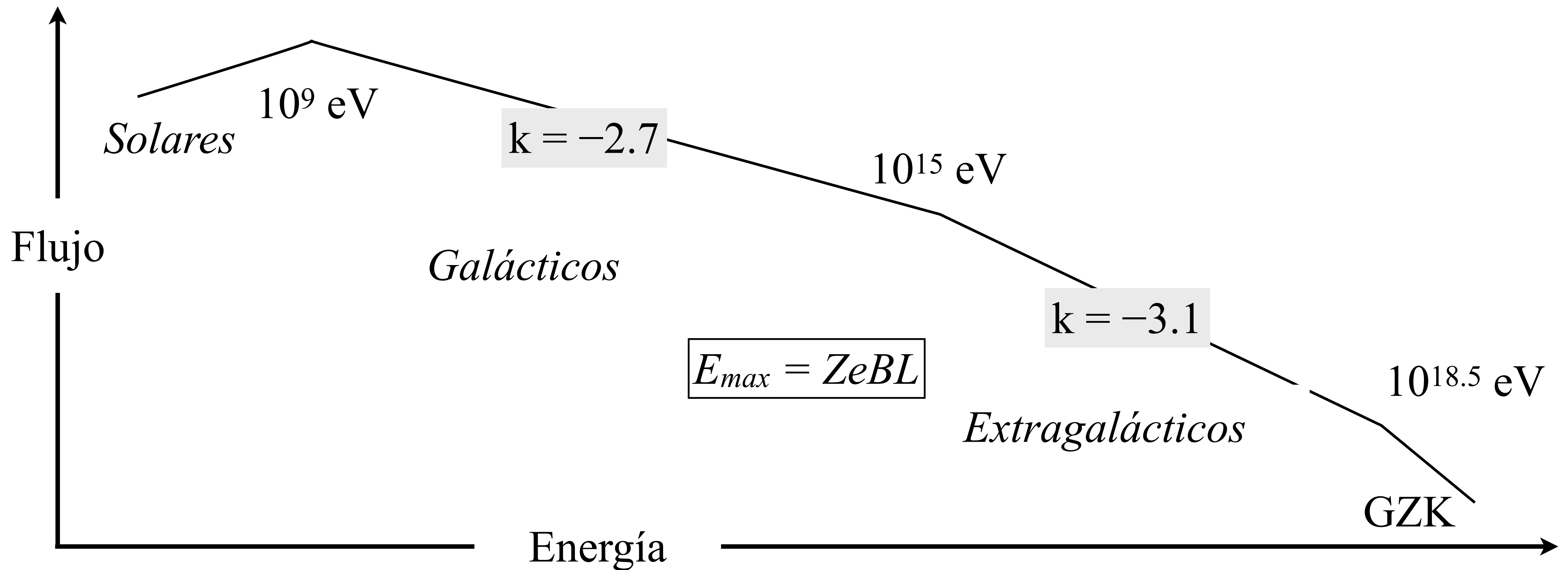
Las supernovas como los grandes aceleradores de partículas en la Vía Láctea

Aceleración de Fermi

- El proceso es más eficiente en frentes de choque que en nubes moleculares.
- Al considerar aceleraciones sucesivas, hasta el escape de la partícula de la región de aceleración, se obtiene un espectro de energías en ley de potencias.
- En frentes de choque obtiene: $dN/dE \propto E^{-k}$ con $k = 2$.
 - ➔ $\Delta k \approx +0.7$ se atribuye a la dependencia de la propagación con la energía.
- La energética y tasa de las supernovas es suficiente para cumplir con los requerimientos de producción de rayos cósmicos,

$$u_{cr} \approx 0.03 \left(\frac{E_{sn}/t_{sn}}{V_{gal}} \right) t_{esc}$$

Rayos cósmicos ultra energéticos



Producción de piones por protón - fotón (corte GZK)

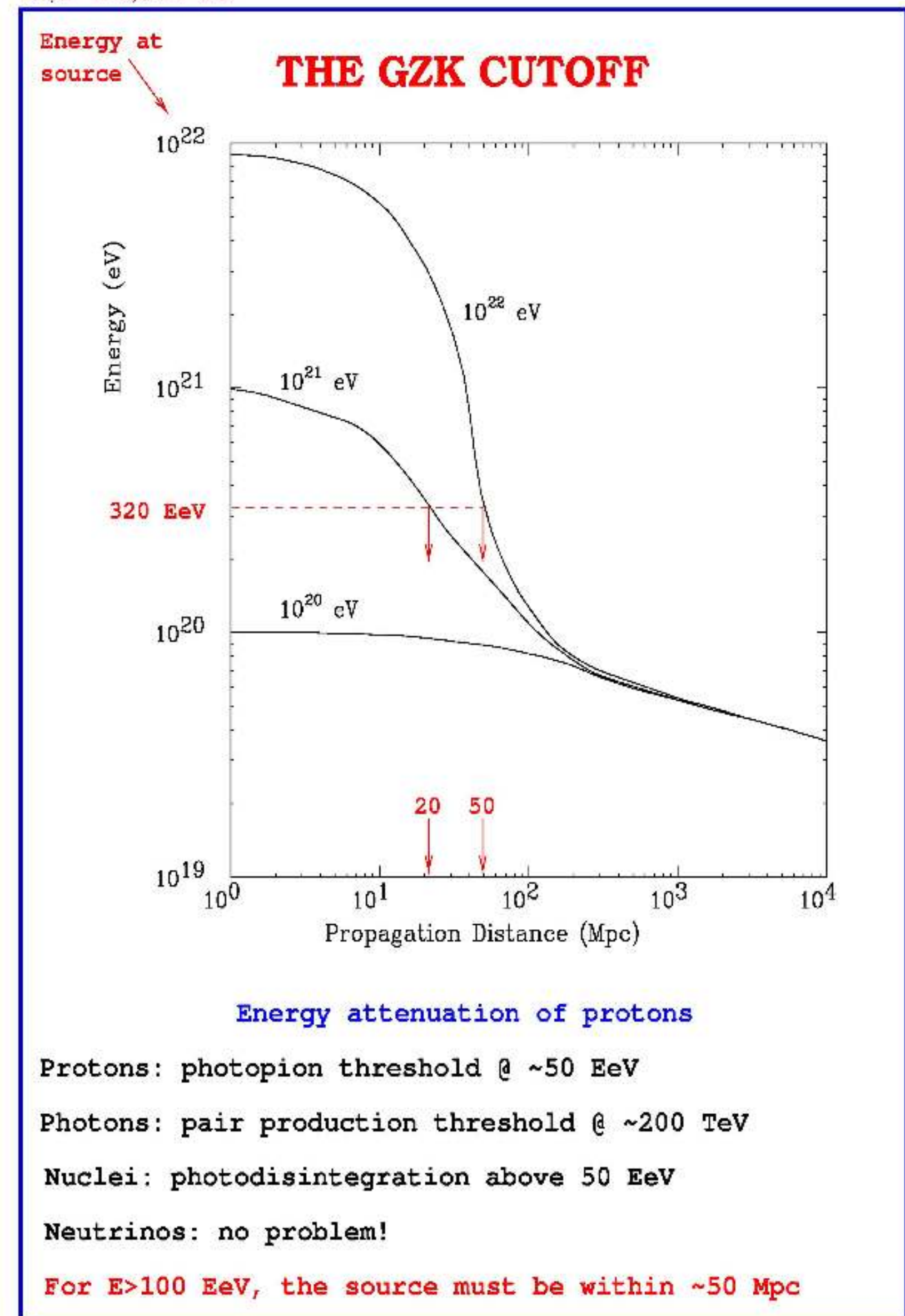
- ▶ El proceso $p + \gamma \rightarrow p + \pi$, tiene como energía-momento en el laboratorio y en el centro de momento,

$$\begin{pmatrix} \gamma m_p + \omega \\ \gamma m_p \beta + \omega \hat{k} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \sqrt{s} \\ 0 \end{pmatrix},$$

donde $s = -p_\alpha p^\alpha = m_p^2 + 2m_p \gamma \omega (1 - \vec{\beta} \cdot \hat{k})$, y se usan unidades $\hbar = 1, mc^2 = 1$.

- ▶ El umbral para la producción de piones ($\sqrt{s} = m_p + m_\pi$) en encuentro frontal ($1 - \vec{\beta} \cdot \hat{k} = 1 + \beta \simeq 2$) con fotones del CMB ($\omega \simeq 1.2 \cdot 10^{-3}$ eV) es,

$$\gamma m_p \simeq \frac{m_\pi}{2\omega} (m_p + m_\pi/2) \simeq 5.4 \times 10^{19} \text{ eV}.$$



UHECRs: aceleradores

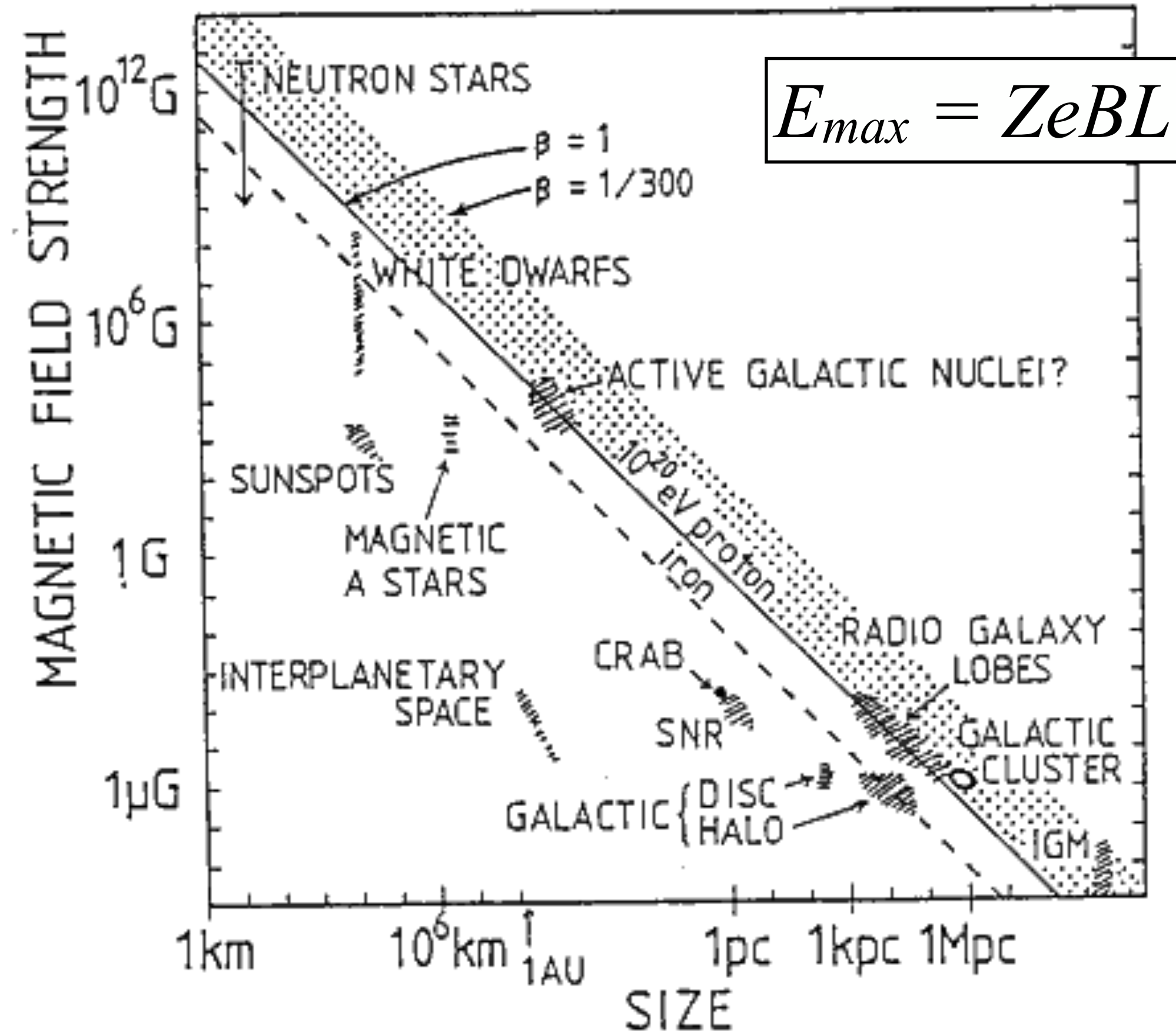
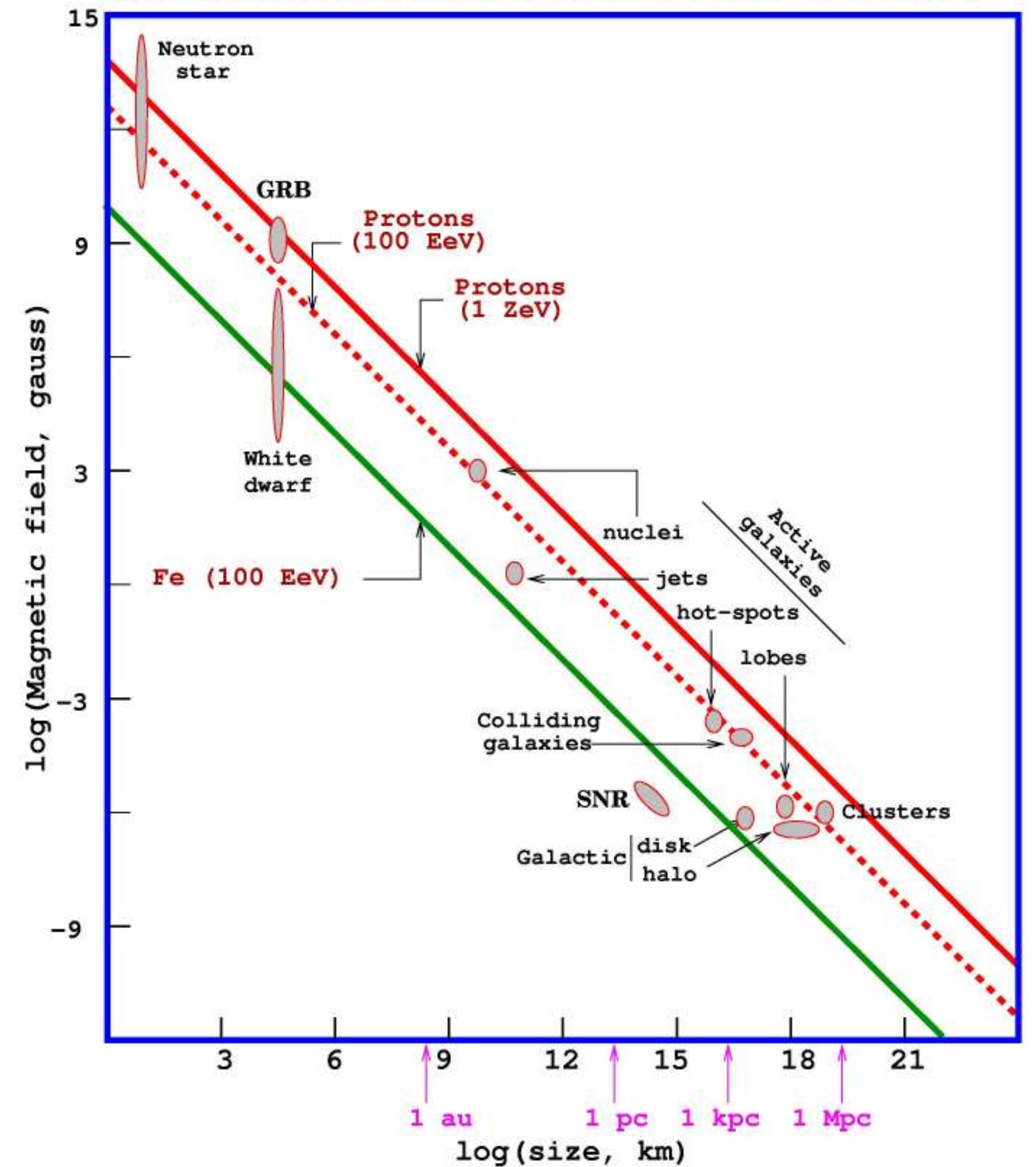


Figure 1. Size and magnetic field strength of possible sites of particle acceleration. Objects below the diagonal line cannot accelerate protons to 10^{20} eV.

Hillas-plot
(candidate sites for $E=100$ EeV and $E=1$ ZeV)



$E_{max} \approx ZBL$ (Fermi)
 $E_{max} \approx ZBL\Gamma$ (Ultra-relativistic shocks-GRB)

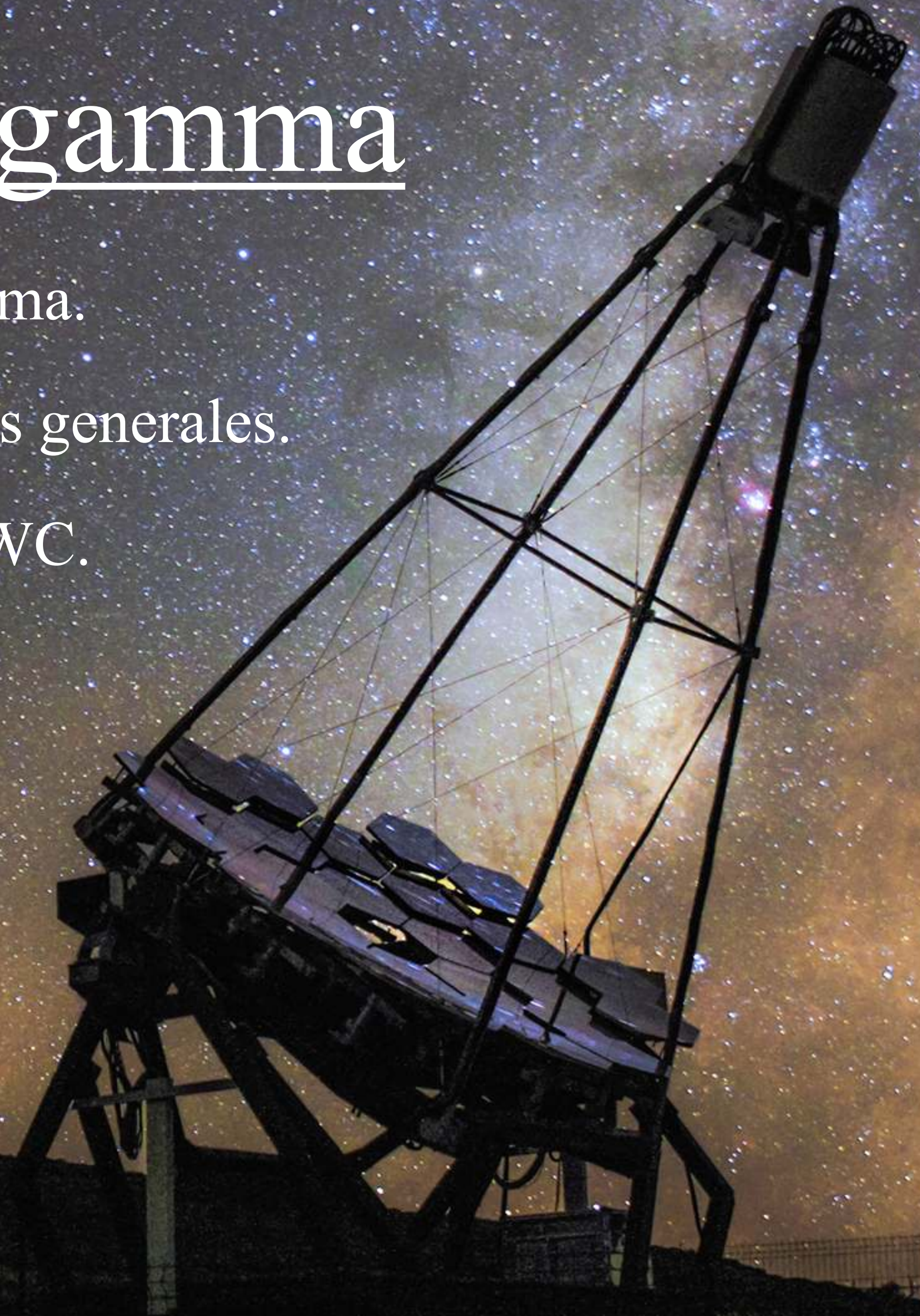
¡Fin de la parte 1!

Astrofísica de rayos gamma

1. Rayos cósmicos.
2. Rayos gamma: producción, bandas astrofísicas y observatorios.
3. Fuentes de rayos gamma en la Galaxia.
4. Fuentes de rayos gamma más allá de la Galaxia.

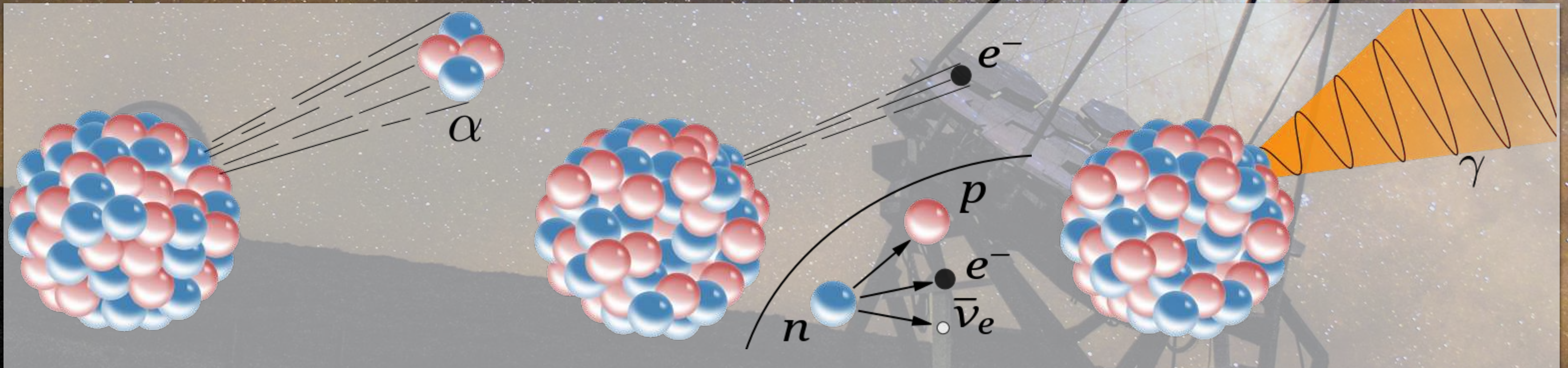
2. Rayos gamma

1. Producción e interacciones de rayos gamma.
2. Bandas astrofísicas, detectores, resultados generales.
3. Arreglos de superficie a gran altura: HAWC.



2. Rayos gamma

1. Producción e interacciones de rayos gamma.
2. Bandas astrofísicas, detectores, resultados generales.
3. Arreglos de superficie a gran altura: HAWC.



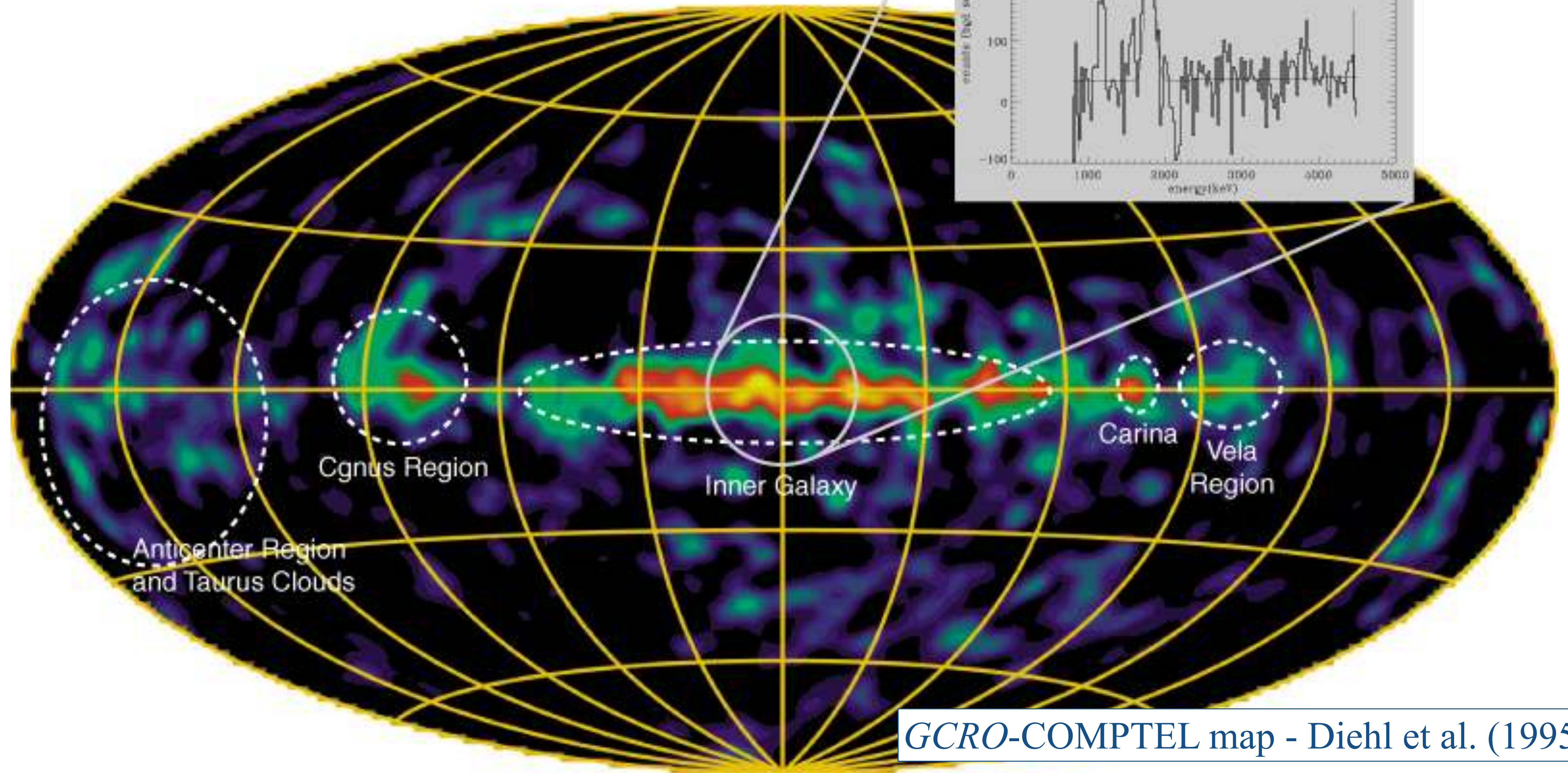
Producción de rayos gamma

- Interacción nuclear fuerte \Rightarrow decaimiento nuclear
 - Primera definición de la radiación gamma (junto con alfa y beta).
 - Los núcleos atómicos tienen niveles de energía separados por ~ 1 MeV.
- Interacción electromagnética:
 - procesos entre fotones y electrones.
 - producción por hadrones: vía decaimiento $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
- Interacción débil:
 - producción hadrónica secundaria por $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \rightarrow e^\pm + \text{neutrinos}$.

Algunas transiciones nucleares de interés astrofísico

^{26}Al	$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg} + e^+ + \nu_e + \gamma$	0.7 Myr	1.806 MeV	Estrellas masivas
^{44}Ti	$^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc} + e^+ + \nu_e$ $^{44}\text{Sc} \rightarrow ^{44}\text{Ca} + e^+ + \nu_e + \gamma$	60 yr 4 hr	1.157 MeV	SNR
^{22}Na	$^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne} + e^+ + \nu_e + \gamma$	2.6hr	1.277 MeV	Novas
^{60}Fe	$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co} + e^- + \nu_e$ $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \nu_e + 2\gamma$	2.6 Myr 5.2 yr	1.173 MeV 1.332 MeV	ISM, SNR, SNe
^{56}Co	$^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe} + e^+ + \nu_e + \gamma$	77 d	847 keV 1238 keV	SNe

^{26}Al en la Galaxia

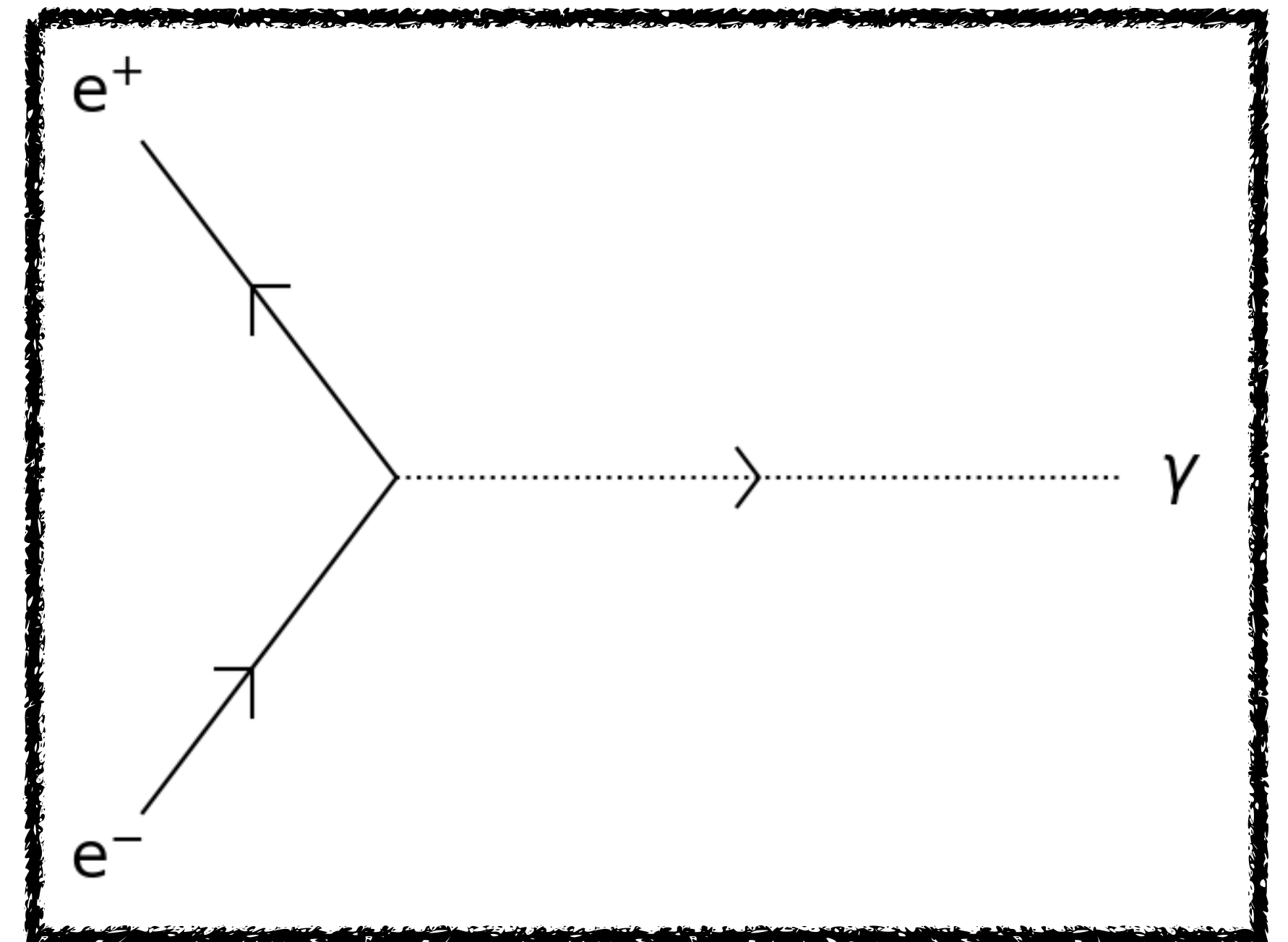


GCRO-COMPTEL map - Diehl et al. (1995)

Procesos electromagnéticos

Para electrones altamente relativistas

- Interacciones electrón - fotón:
 - aniquilación: $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$
 - efecto Compton: $\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-$
 - producción de pares (absorción): $\gamma \gamma \rightarrow e^+ e^-$
- Interacciones electrón / fotón con campos
 - campo electrostático: bremsstrahlung y producción de pares
 - campo magnético: sincrotrón y producción de pares



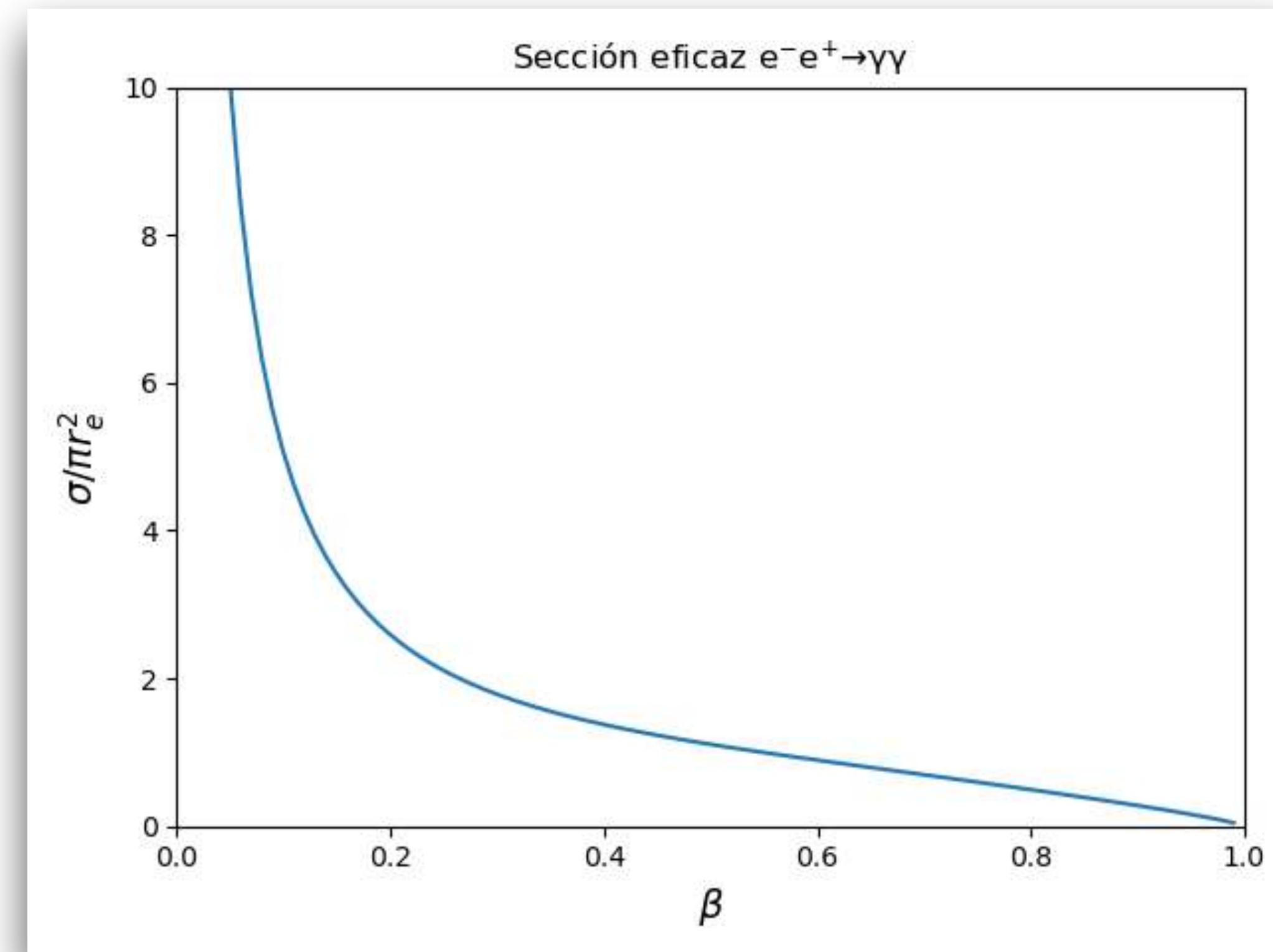
Aniquilación vía positronio

- ▶ Antes de aniquilarse, el par e^-e^+ puede formar un sistema ligado análogo al átomo de hidrógeno: el positronio.
- ▶ El estado base del positronio tiene dos configuraciones: parapositronio ($s = 0$) y ortopositronio ($s = 1$).
- ▶ El momento angular de dos fotones es $j \neq 1$, por lo que parapositronio decae de acuerdo a,

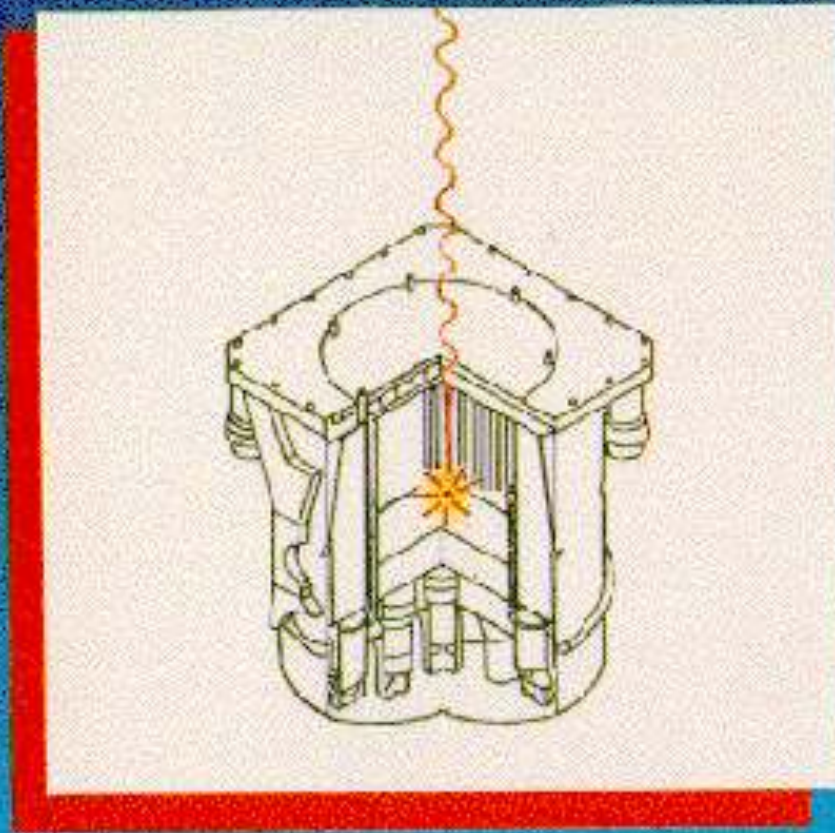
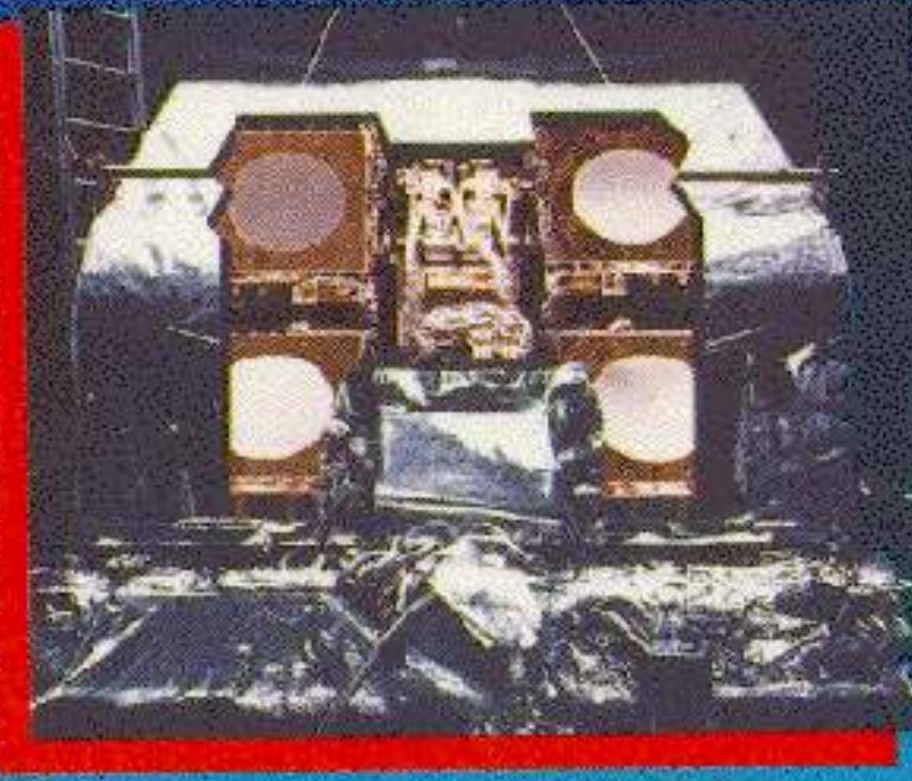
$$e^-e^+ \rightarrow 2\gamma \quad \Rightarrow \quad \tau = \alpha^{-5} \frac{2\hbar}{mc^2} = 1.23 \times 10^{-10} \text{ s.}$$

- ▶ El ortopositronio decae de acuerdo a,

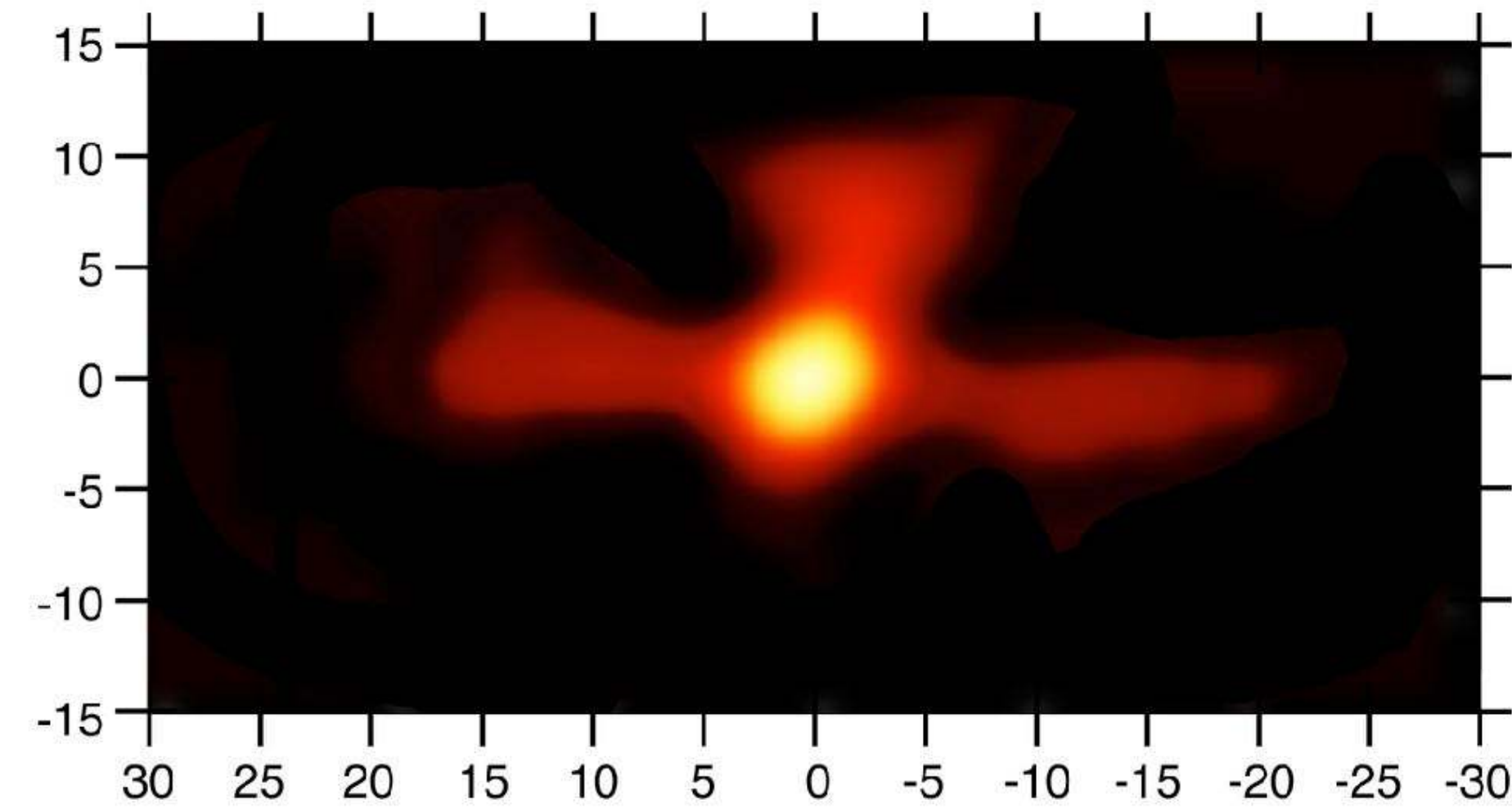
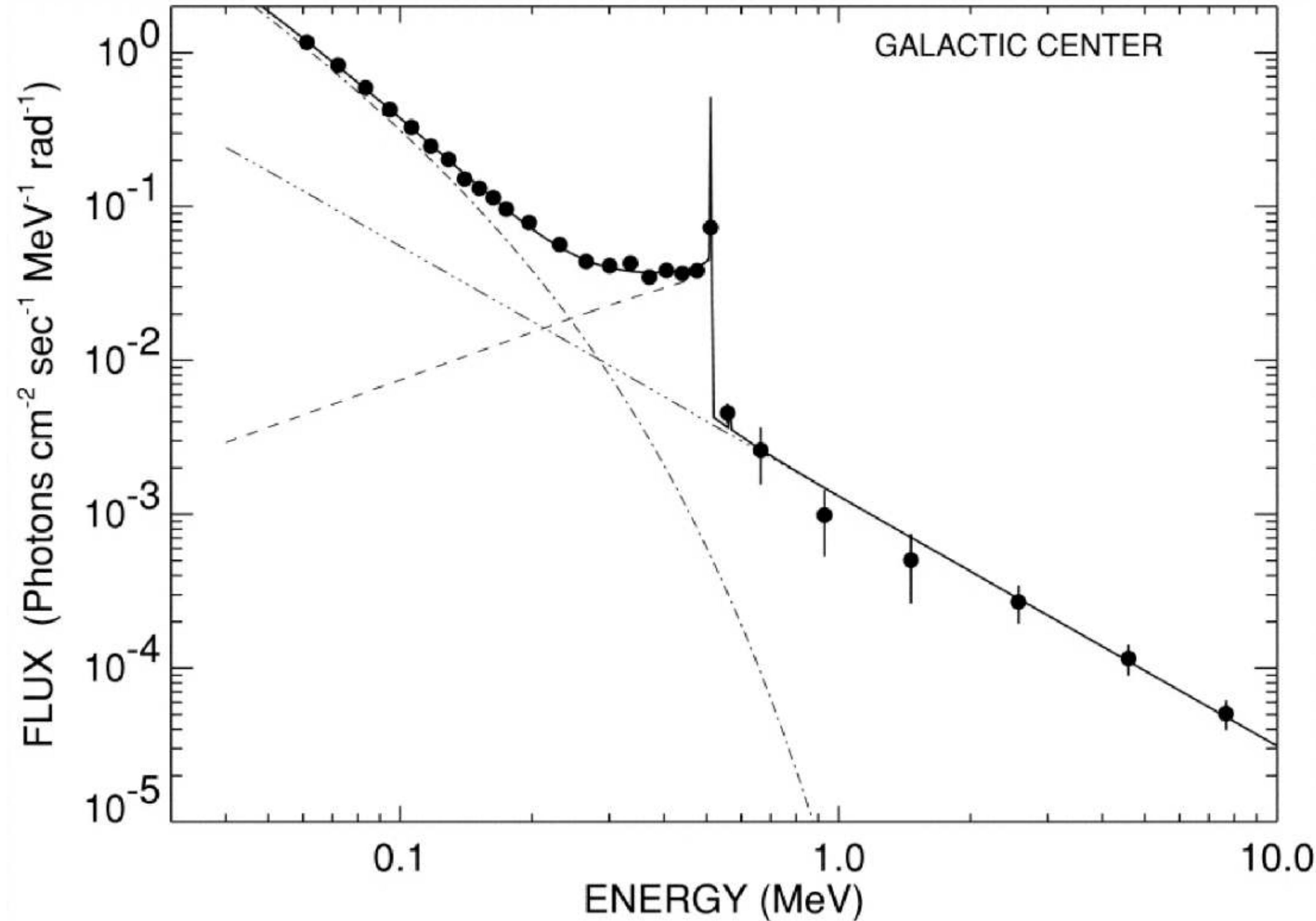
$$e^-e^+ \rightarrow 3\gamma \quad \Rightarrow \quad \tau \sim \alpha^{-6} \frac{\hbar}{mc^2} = 1.4 \times 10^{-7} \text{ s.}$$



Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (OSSE)



The annihilation fountain



Efecto Compton

- Se da como proceso de pérdida de energía para rayos γ interactuando con electrones no relativistas:
 - por ejemplo, la dispersión electrónica en interiores estelares.
- Producción de rayos γ ocurre por la interacción de fotones de baja energía con electrones muy energéticos (altamente relativistas),
$$\hbar\omega_1 \simeq \max(2\gamma^2 \hbar\omega_0, \gamma mc^2)$$
, con γ factor de Lorentz del electrón.
 - por ejemplo, un fotón de 1 eV puede alcanzar 800 MeV al interactuar con un electrón de 10 GeV.
 - acotado a la energía del fotón y por la sección eficaz.

Efecto Compton

Conservaci3n de momento energ3a (unidades $\hbar/mc^2 = 1$),

$$\begin{pmatrix} \omega_0 + \gamma_0 \\ \omega_0 \hat{k}_0 + \gamma_0 \vec{\beta}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \omega_1 + \gamma_1 \\ \omega_1 \hat{k}_1 + \gamma_1 \vec{\beta}_1 \end{pmatrix}.$$

Eliminando γ_1 , $\gamma_1 \vec{\beta}_1$, obtenemos la expresi3n general para la dispersi3n de Compton,

$$\omega_1 = \frac{\gamma_0 \omega_0 (1 - \vec{\beta}_0 \cdot \hat{k}_0)}{\gamma_0 (1 - \vec{\beta}_0 \cdot \hat{k}_1) + \omega_0 (1 - \hat{k}_0 \cdot \hat{k}_1)}. \quad (7)$$

Notamos que:

- ▶ Para un electr3n en reposo $\beta_0 = 0$, $\gamma_0 = 1$, recuperamos la f3rmula est3andar.
- ▶ Sunyaev-Zeldovich: dispersi3n del CMB por electrones no relativistas en c3mulos de galaxias.

Compton inverso

Si $\gamma_0 \gg \omega_0$ aproximamos $\hat{k}_1 \rightarrow \hat{\beta}_0$ en la expresi3n general (7),

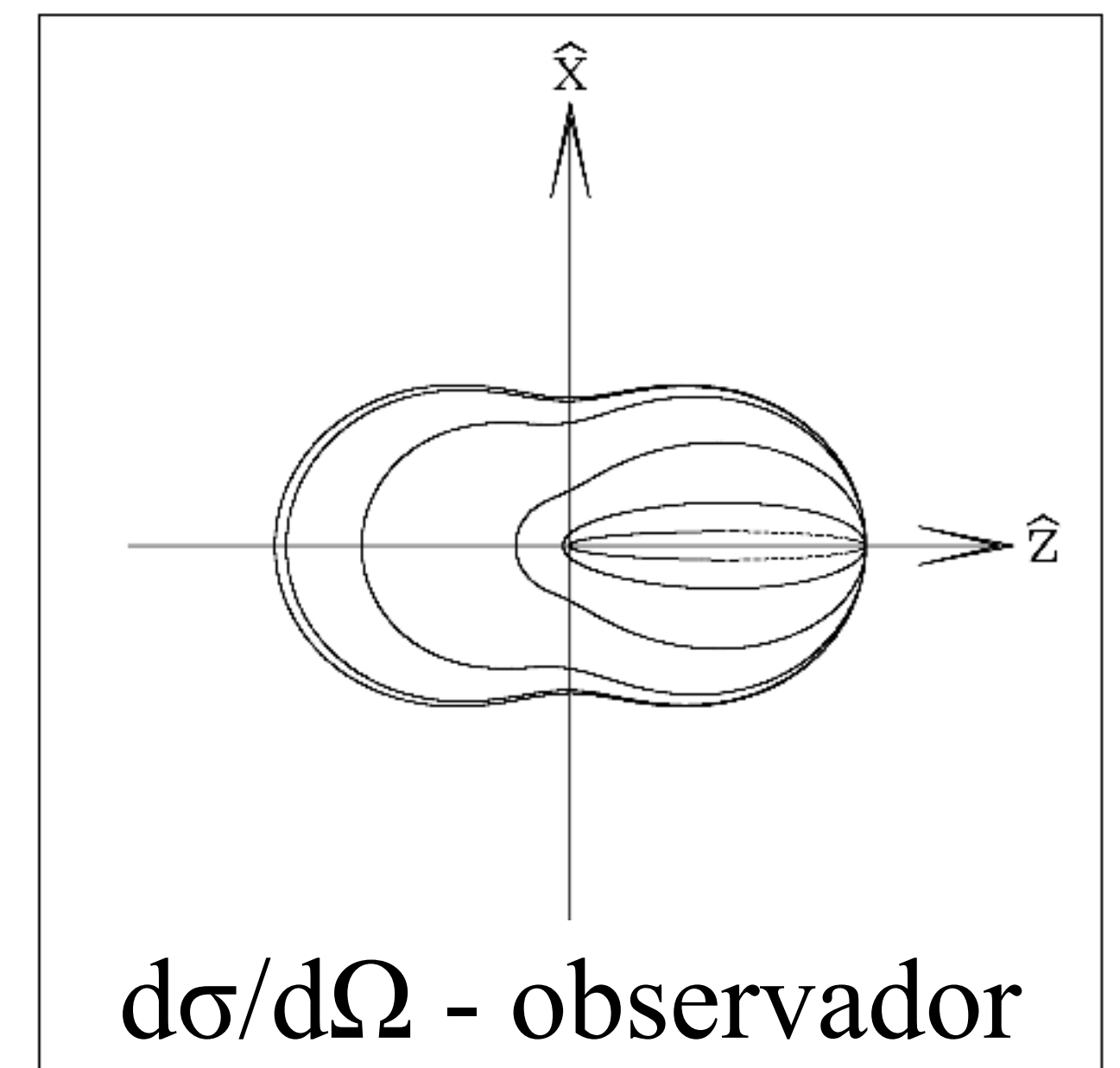
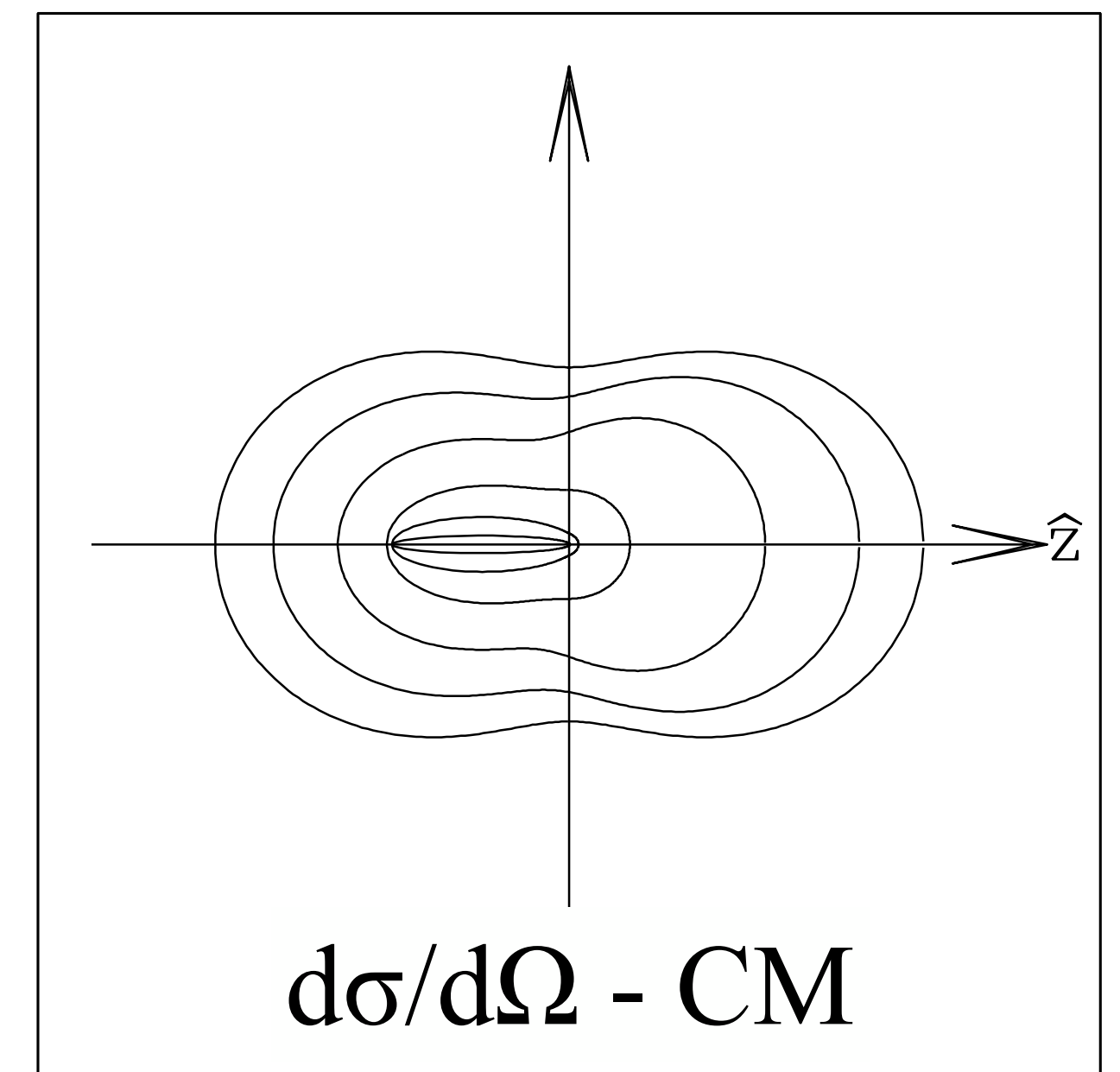
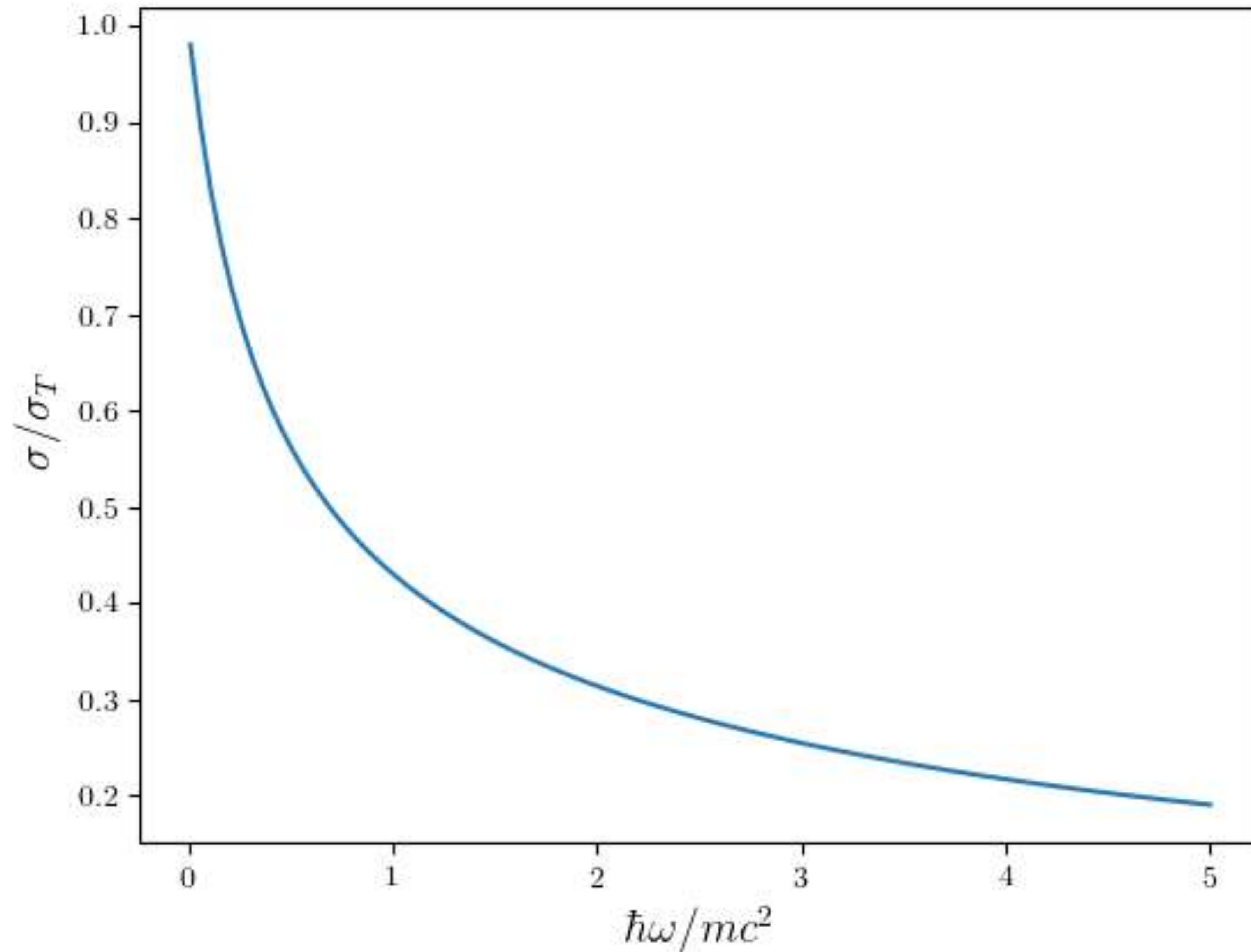
$$\omega_1 = \frac{\gamma_0 \omega_0 (1 - \beta_0 \cos \theta_0)}{\gamma_0 (1 - \beta_0) + \omega_0 (1 - \cos \theta_0)} = \frac{\gamma_0^2 \omega_0 (1 + \beta_0) (1 - \beta_0 \cos \theta_0)}{1 + \gamma_0 \omega_0 (1 + \beta_0) (1 - \cos \theta_0)}, \quad (10)$$

con $\cos \theta_0 = \hat{\beta}_0 \cdot \hat{k}_0$. La expresi3n describe el espectro en una colisi3n de electrones y fotones mono-energ3ticos Si $\gamma_0 \gg 1$,

$$\omega_1 \simeq \frac{2\gamma_0^2 \omega_0 (1 - \beta_0 \cos \theta_0)}{1 + 2\gamma_0 \omega_0 (1 - \cos \theta_0)}. \quad (11)$$

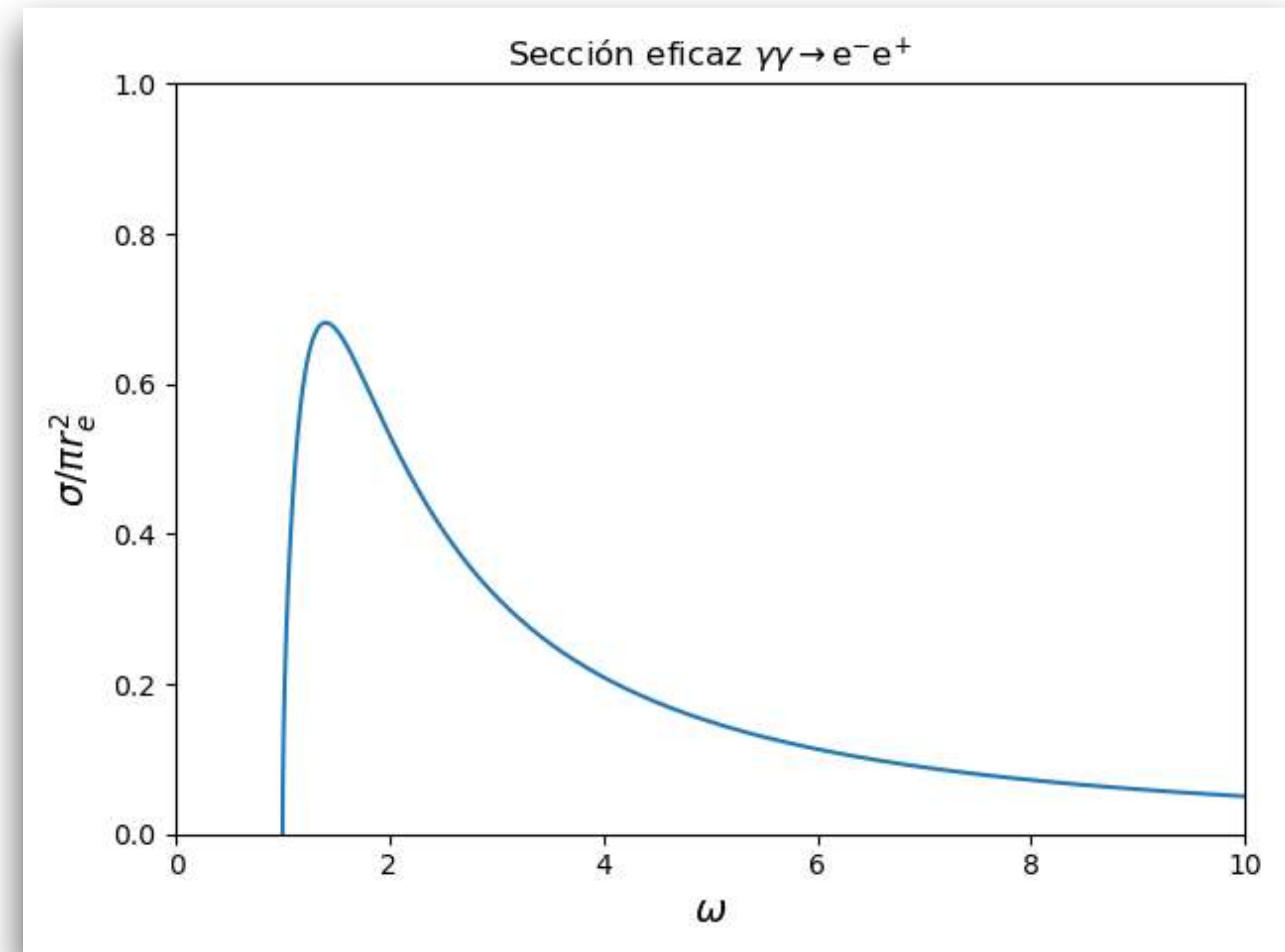
- ▶ $\gamma_0 \omega_0 (1 - \cos \theta_0) \ll 1$: $\omega_1 \simeq 2\gamma_0^2 \omega_0 (1 - \beta_0 \cos \theta_0)$. El fot3n adquiere una energ3a del orden $\gamma^2 \omega_0$, limitada a $4\gamma^2 \omega_0$.
- ▶ $\gamma_0 \omega_0 (1 - \cos \theta_0) \gg 1$: $\omega_1 \simeq \gamma_0$. El fot3n adquiere casi toda la energ3a del electr3n. La disminuci3n de la secci3n eficaz da lugar a la supresi3n de Klein-Nishina.

Sección eficaz Klein - Nishina



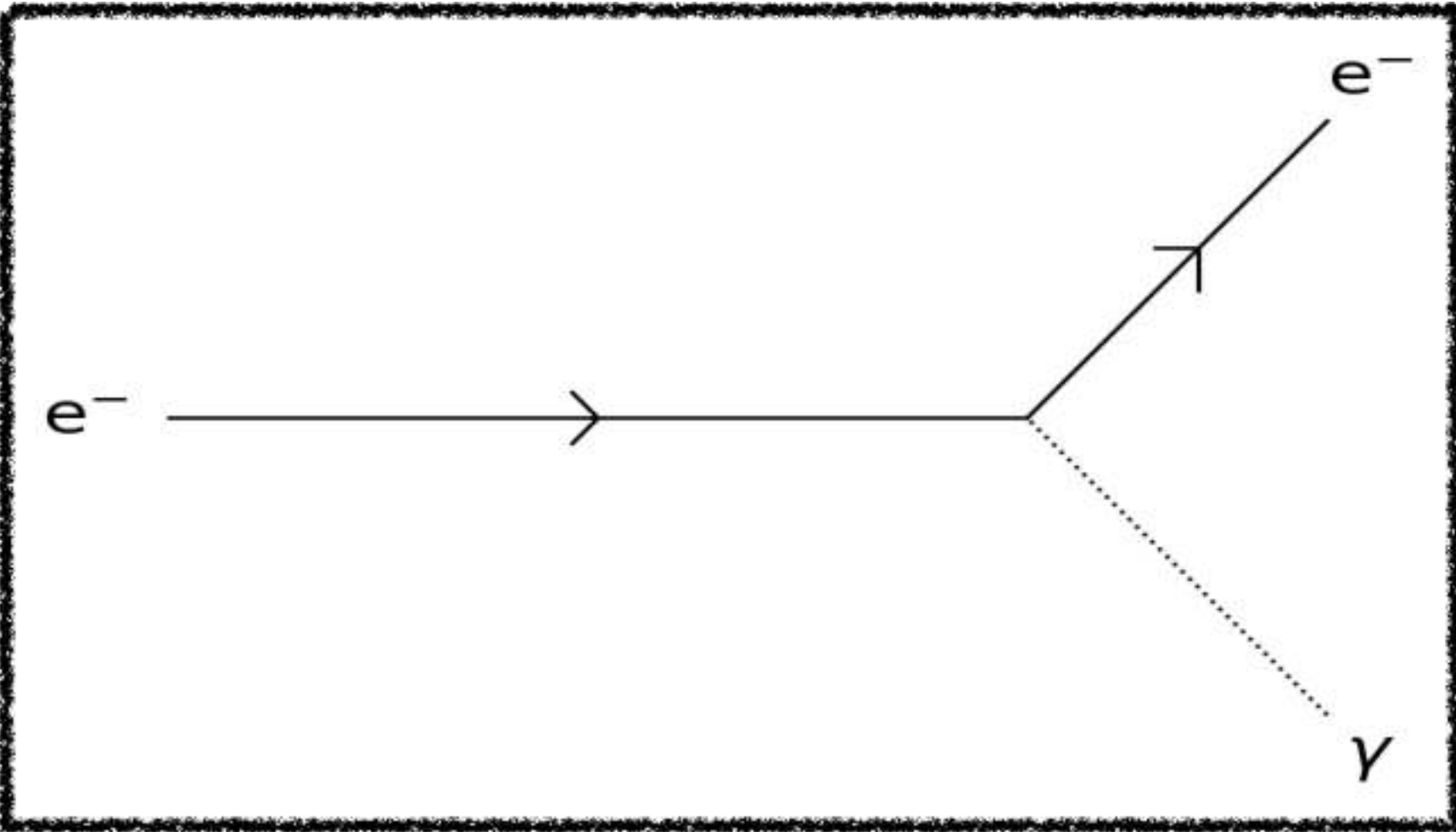
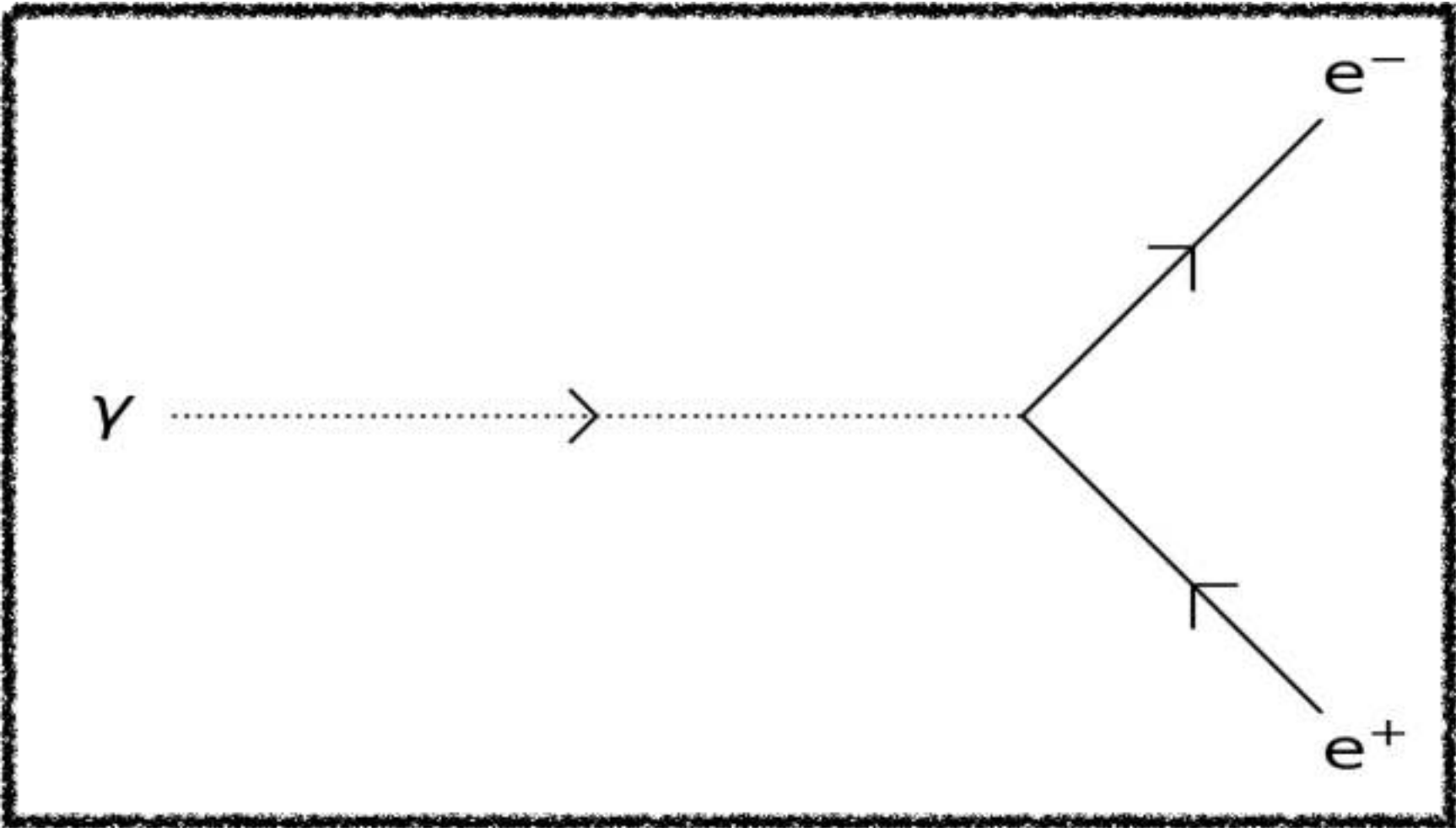
Producción de pares

- $\gamma \gamma \rightarrow e^+ e^-$ es una interacción importante para fotones con energías de TeV.
- La sección eficaz es máxima para
$$E\hbar\omega \simeq 2(mc^2)^2 \Rightarrow 0.5 \text{ eV} \cdot \text{TeV}.$$
- El camino libre medio para fotones de 100 TeV interactuando con el CMB es de 1 Mpc.
- El camino libre medio para fotones de 1 TeV interactuando con luz de fondo extragaláctica corresponde a $z \approx 0.1$.



Interacciones con campos EM

- En un campo electromagnético se puede cumplir la conservación de energía y momento en una interacción representada por un vértice.

		
Z	Bremsstrahlung	Producción de pares
B	Sincrotrón	Producción de pares

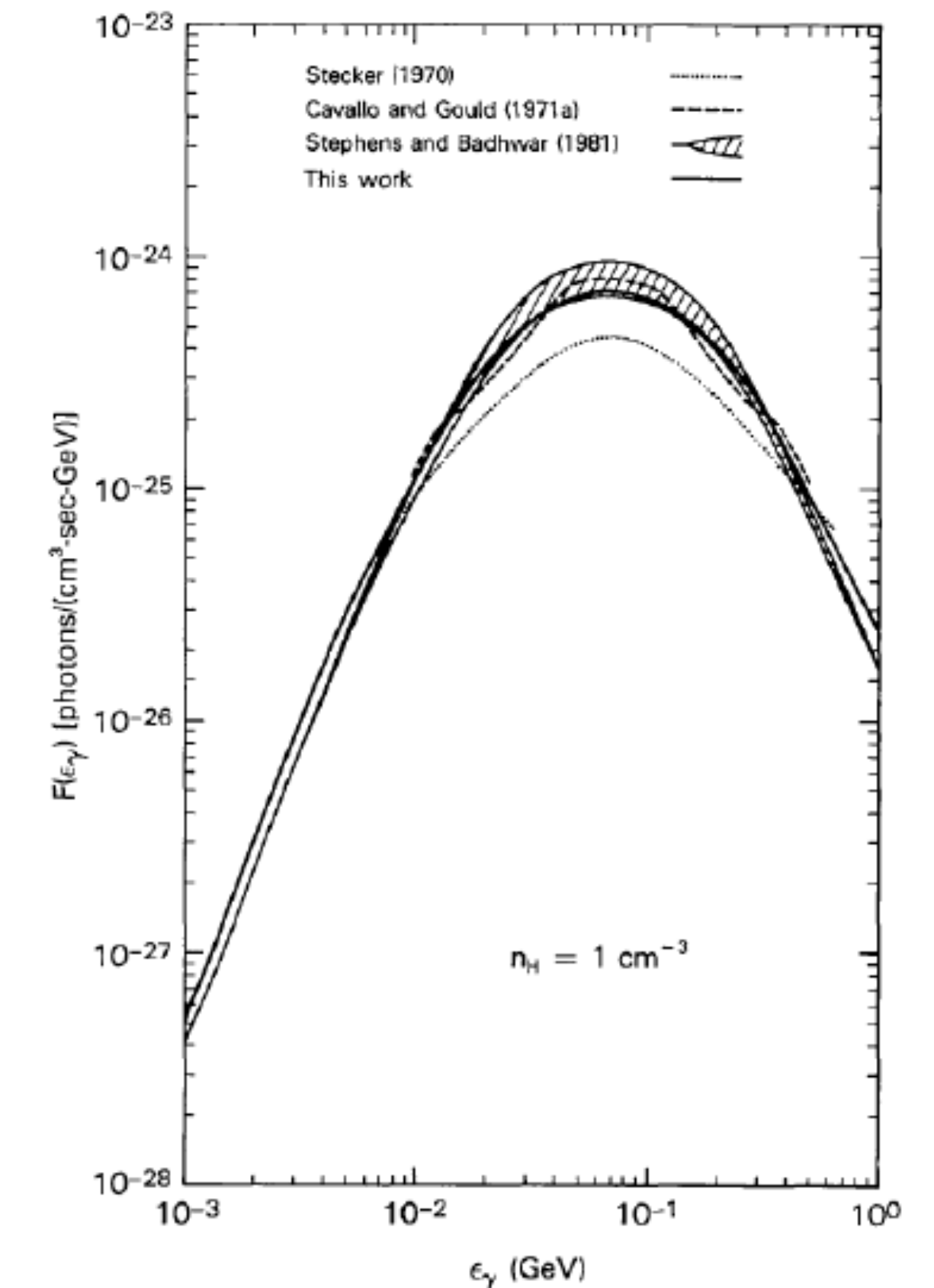
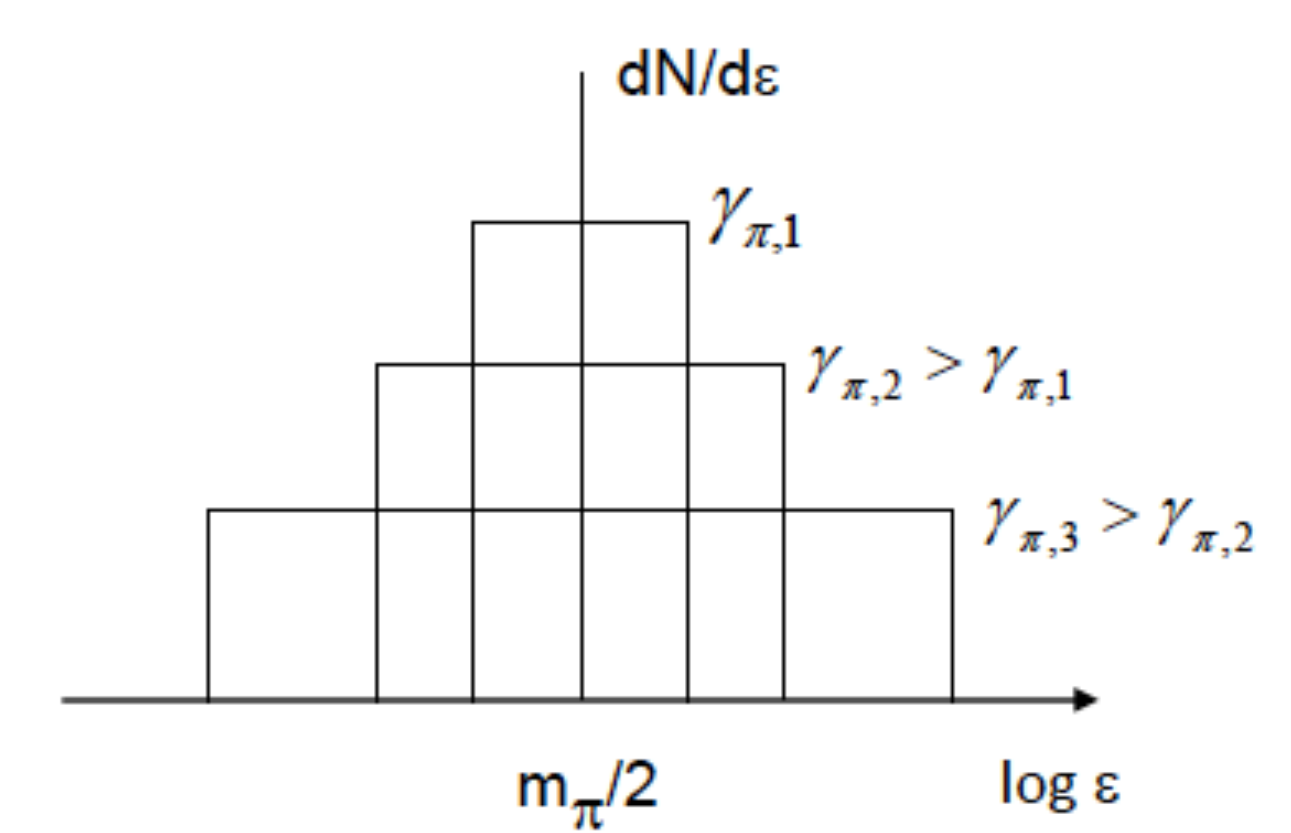
Piones neutros

- ▶ Piones neutros decaen en dos fotones, $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$.
- ▶ En el marco de referencia del pion los dos fotones tienen una energía $m_\pi/2 \simeq 67.5 \text{ MeV}$, y se propagan en direcciones opuestas, $\hat{k}_\pm = \mp \hat{z}$.
- ▶ Para un observador arbitrario tienen energías,

$$\gamma_\pm = \gamma_\pi m_\pi (1 \pm \beta_\pi \cos \theta) / 2,$$

siendo $\cos \theta$ aleatoria.

- ▶ La distribución de energía de los fotones es plana en el intervalo $[\gamma_\pi m_\pi (1 - \beta_\pi) / 2, \gamma_\pi m_\pi (1 + \beta_\pi) / 2]$.
- ▶ Para una población de π^0 en ley de potencias, resultante de una ley de potencias de rayos cósmicos, se obtiene una curva simétrica en $\log(E)$, con máximo en $m_\pi/2 \rightarrow$ "pion bump".

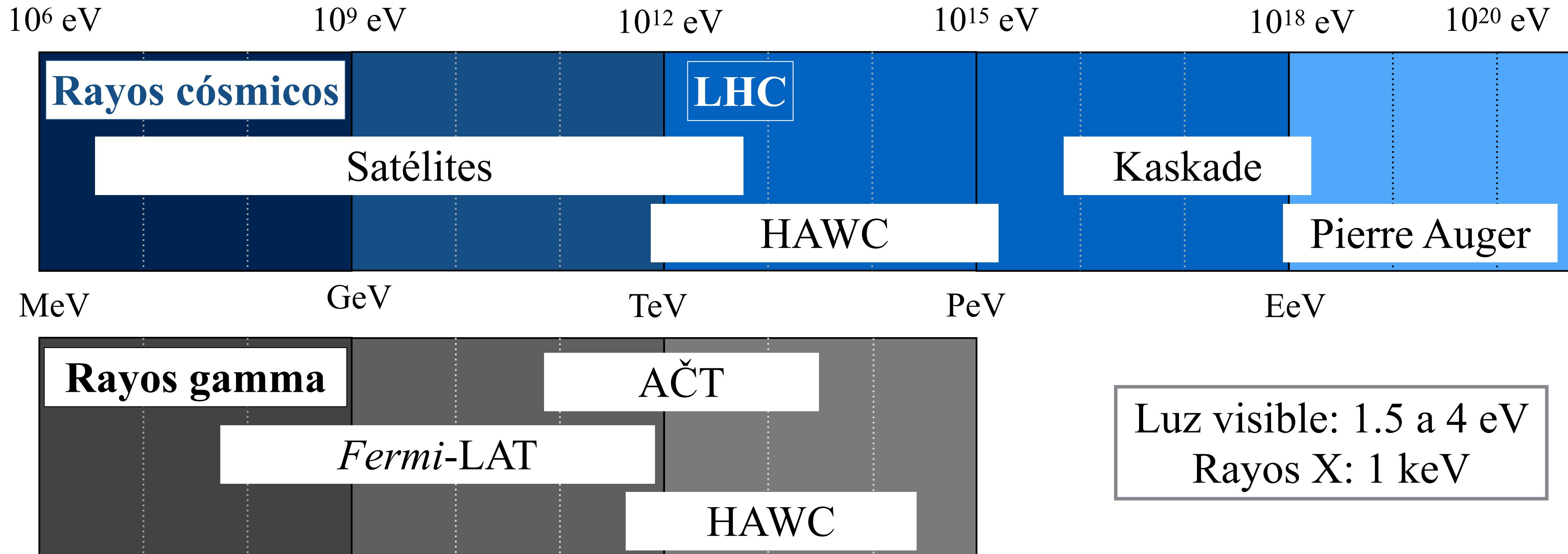


2. Rayos gamma

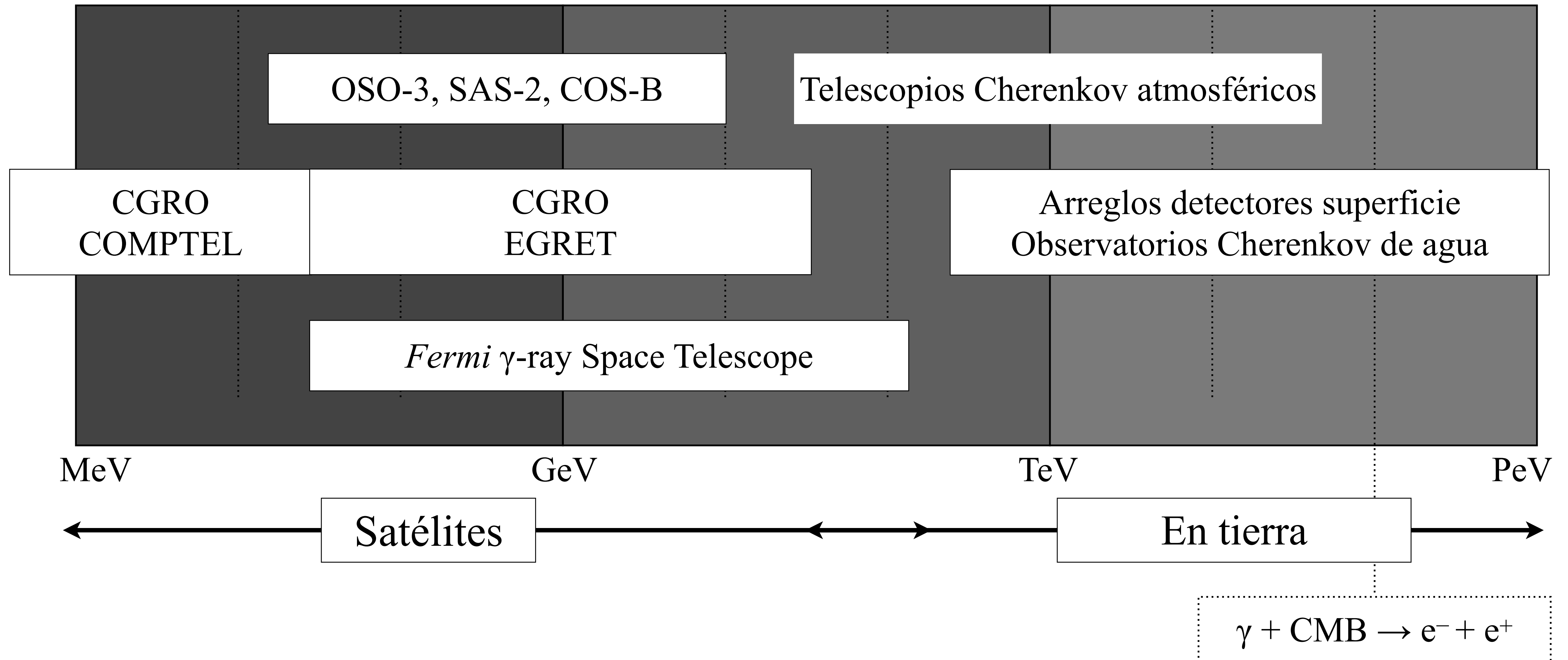
1. Producción, interacciones.
2. Bandas astrofísicas, detectores, resultados generales.
3. Arreglos de superficie a gran altura: HAWC.



Bandas astrofísicas



Bandas astrofísicas



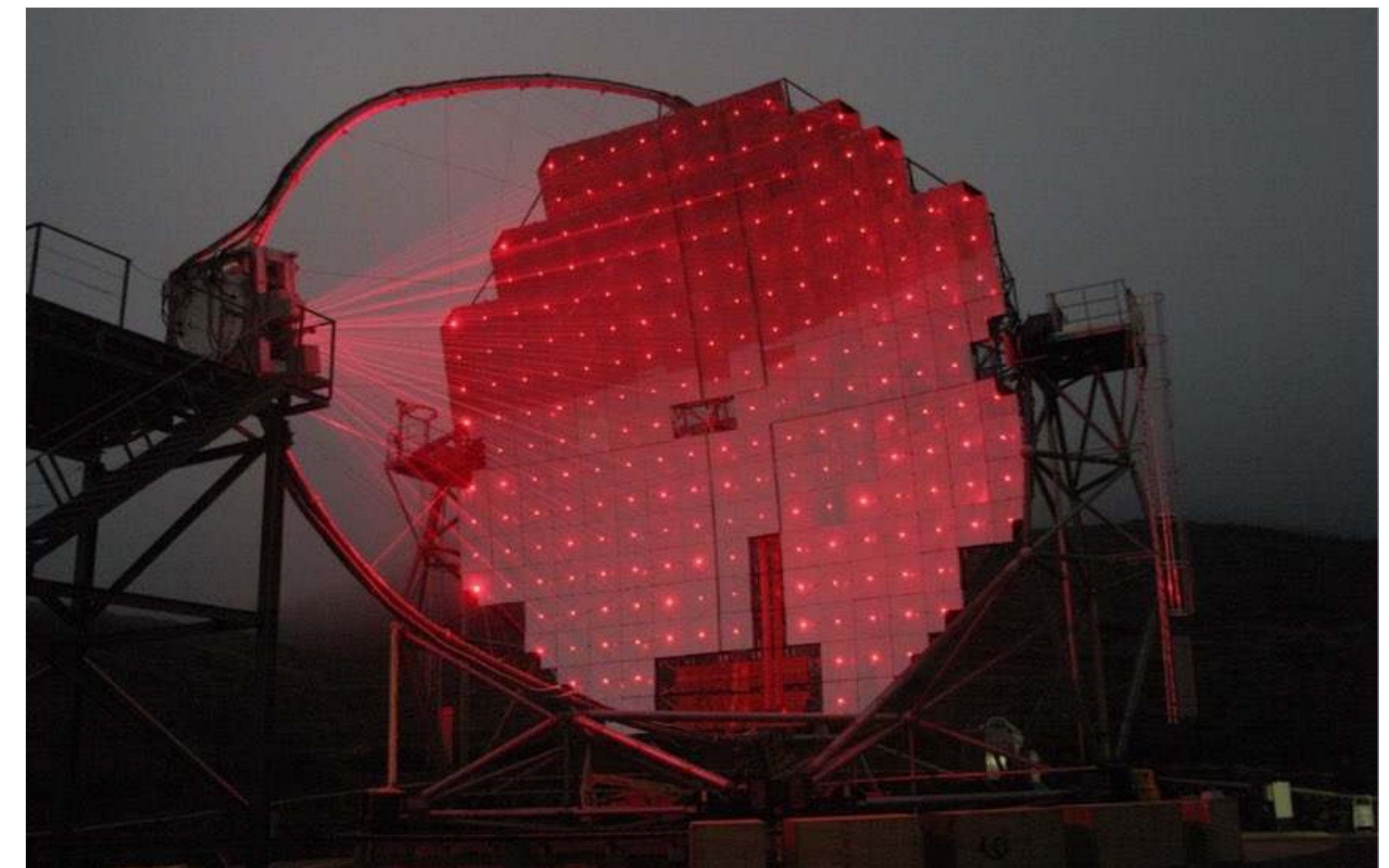
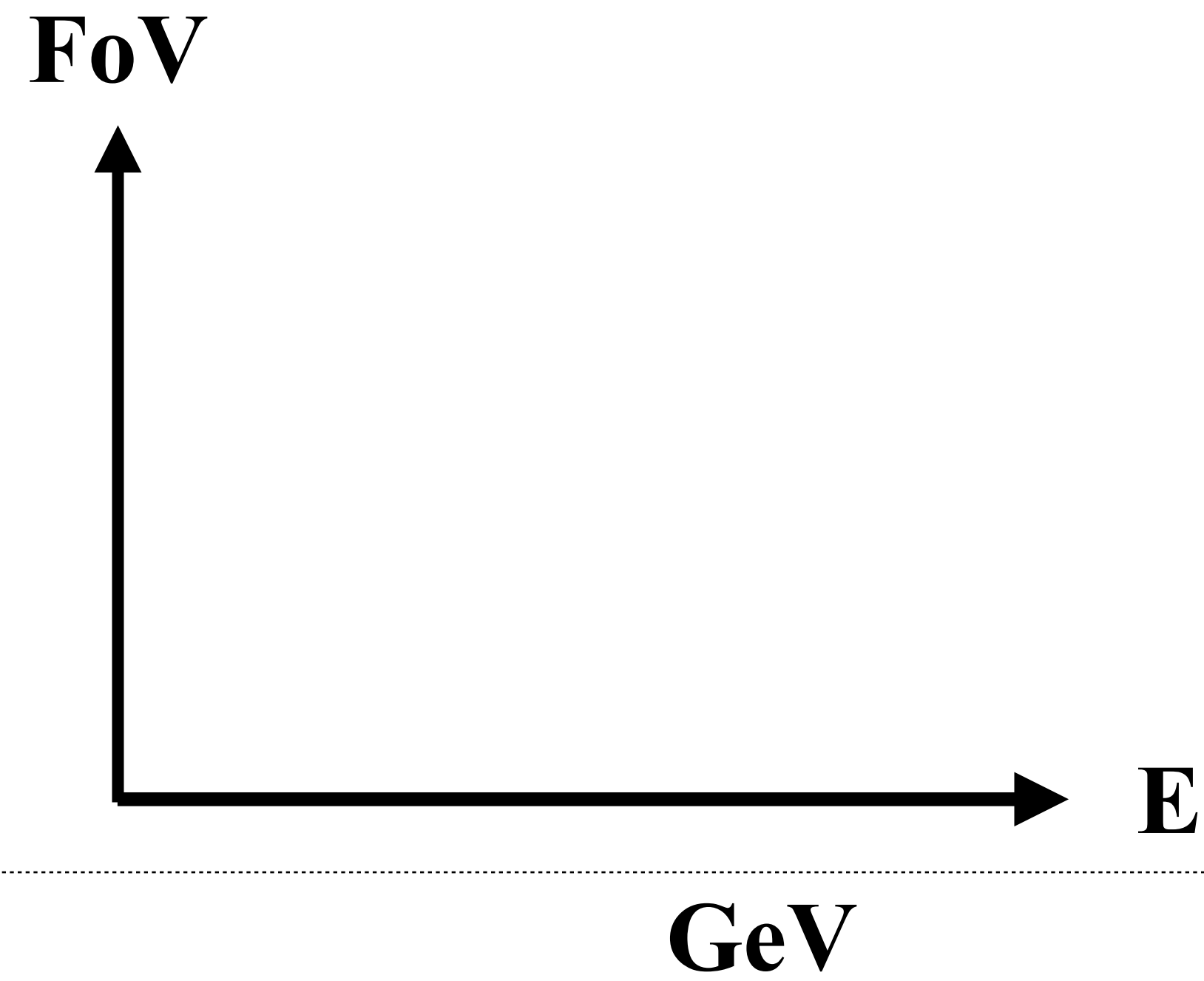
Observatorios de rayos γ

- Telescopios espaciales basados en:
 - efecto foto-eléctrico: BATSE, OSSE, Swift-BAT (misma tecnología que en telescopios de rayos X duros).
 - efecto Compton: COMPTEL.
 - producción de pares: OSO-3, SAS-2, COS-B, EGRET, Fermi-LAT.
- Observatorios en Tierra basados:
 - detección de luz Cherenkov en atmósfera: MAGIC, HESS, VERITAS, CTA.
 - detección directa de partículas secundarias: MILAGRO, Tibet AS- γ , HAWC, LHAASO, SWGO.

Sr



Deg



TeV

Telescopios de producción de pares

0.1 - 100 GeV

En órbita: area de detección limitada

Eliminación completa del ruido

Campo de visión grande, alto ciclo de operación

⇒ surveys y monitoreo

Emisión en ráfaga (AGN, GRB)

Fuentes extendidas y emisión difusa

Arreglos detectores de superficie

100 GeV - 100 TeV

Area de detección grande

Buena eliminación del ruido

Campo de visión grande y alto ciclo de operación

⇒ surveys, monitoreo y fuentes extendidas

Emisión en ráfaga (AGN, GRB)

Las energías más altas

Sr

FoV



Deg

GeV

Telescopios Cherenkov atmosféricos

50 GeV - 100 TeV

Area de detección grande

Excelente eliminación del ruido

Campo de visión limitado, bajo ciclo de operación

⇒ estudio detallado de fuentes conocidas

surveys profundos de regiones específicas

Espectros con alta resolución

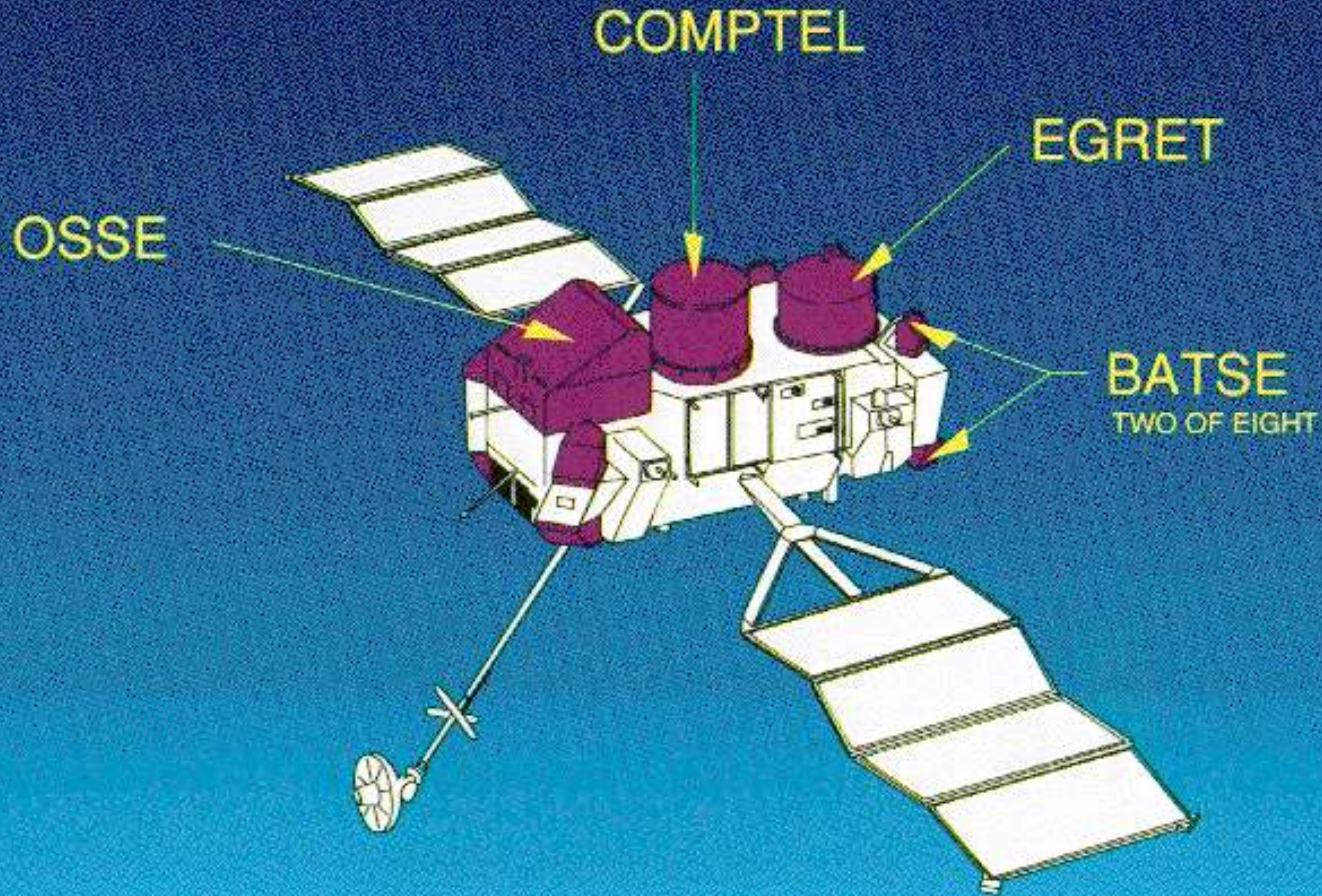
TeV

Telescopios espaciales



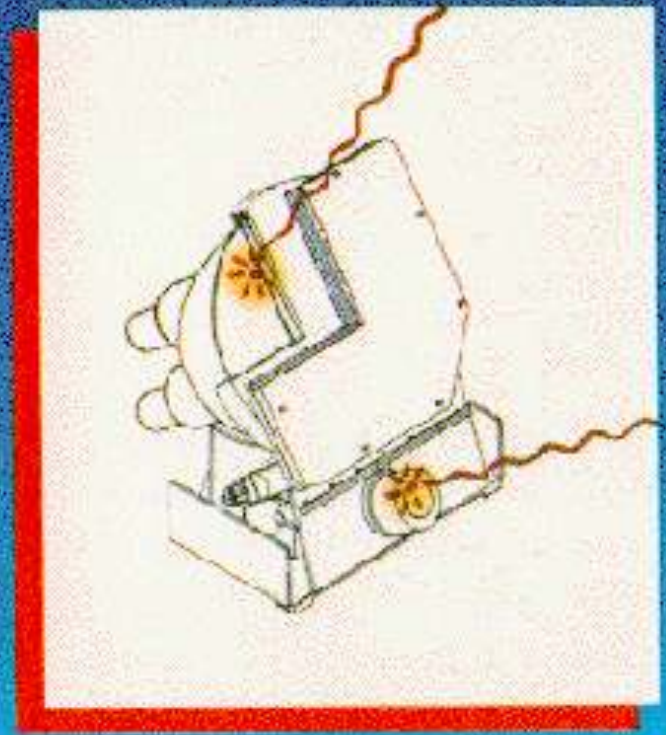
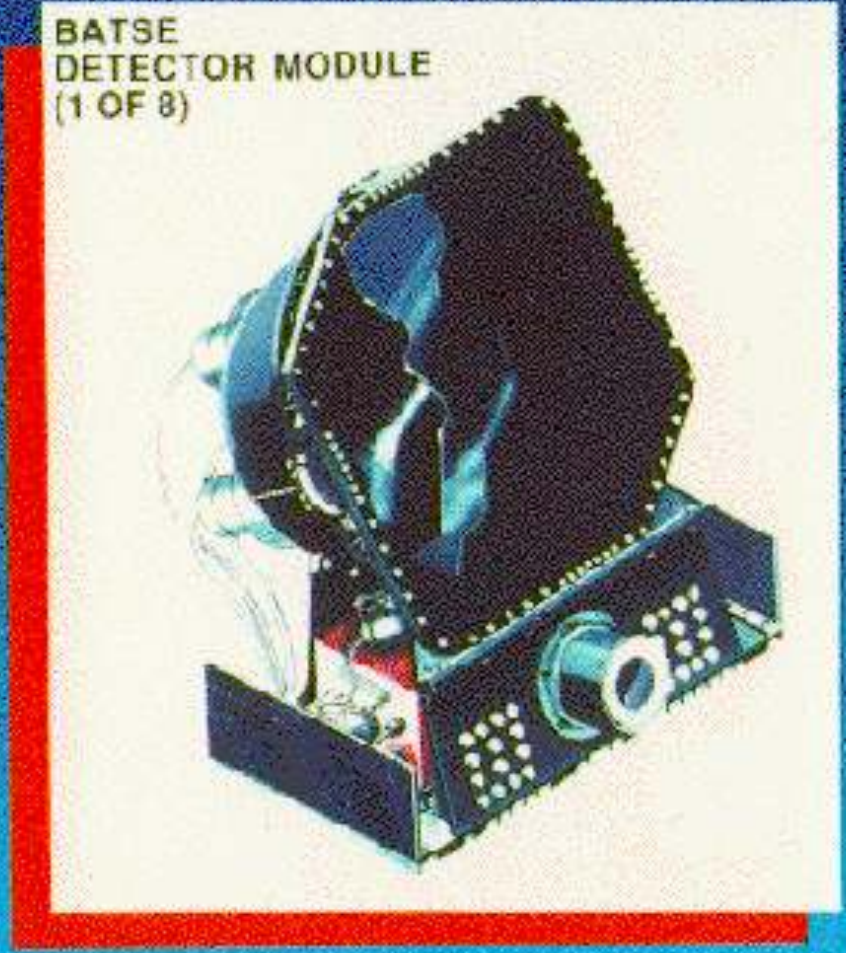
Compton Gamma-Ray Observatory
CGRO (1991-2000)

GRO Instruments



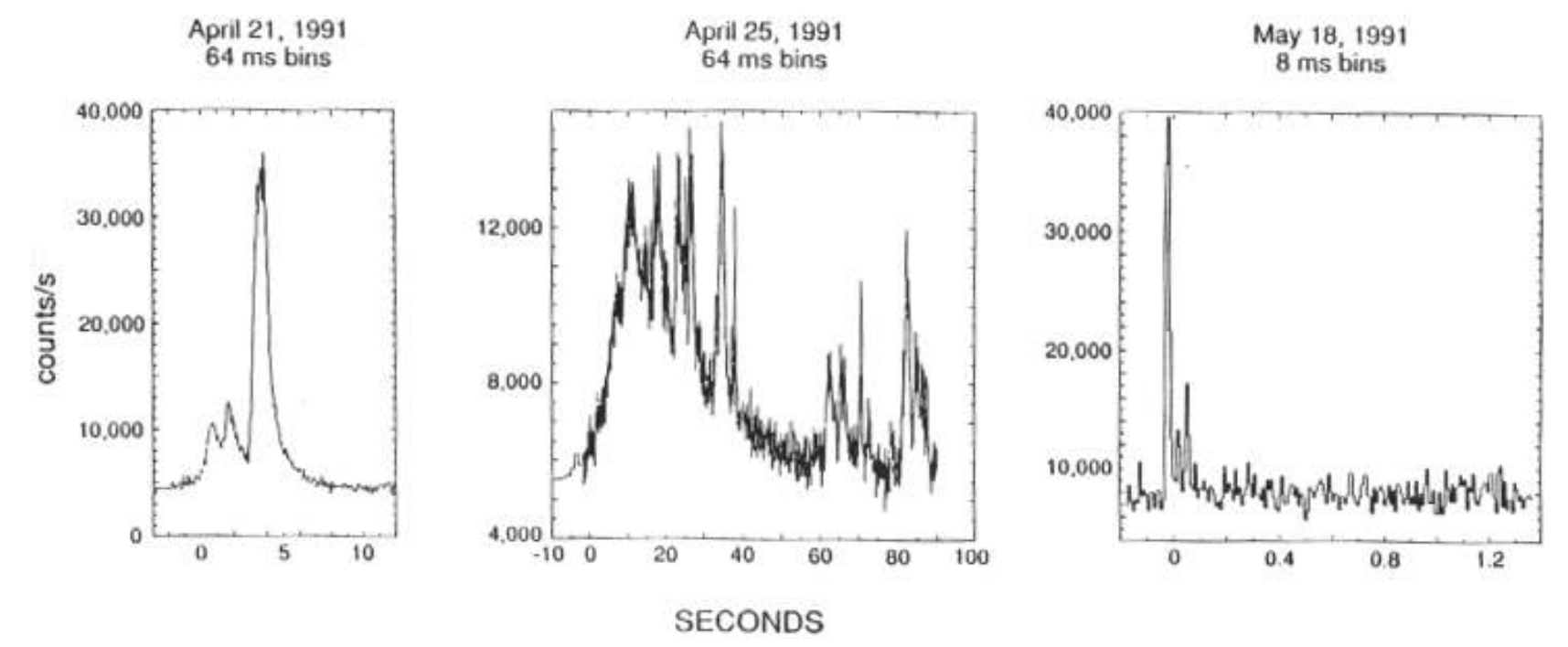
Compton Gamma-Ray Observatory
CGRO (1991-2000)

Burst and Transient Source Experiment (BATSE)

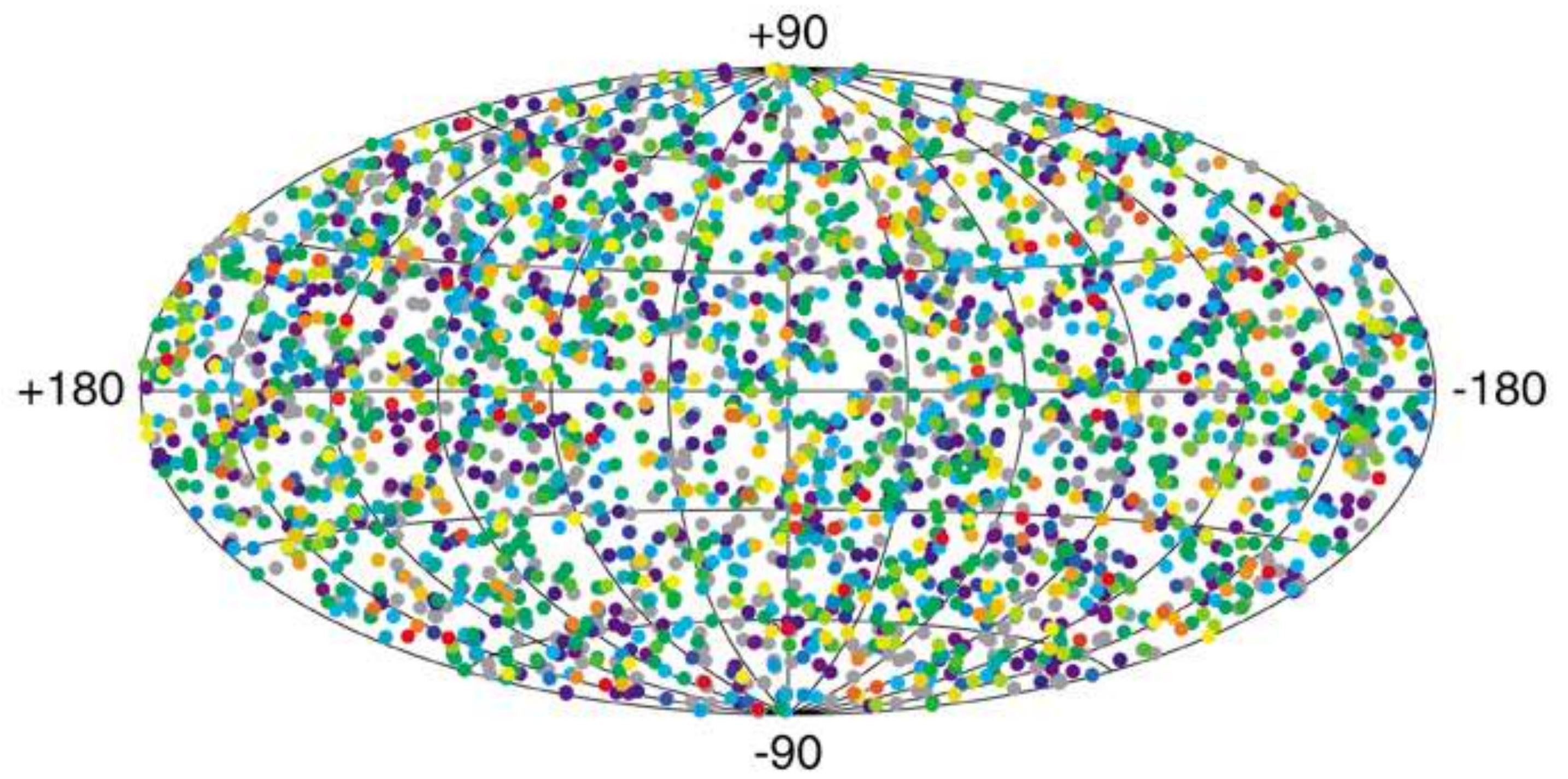
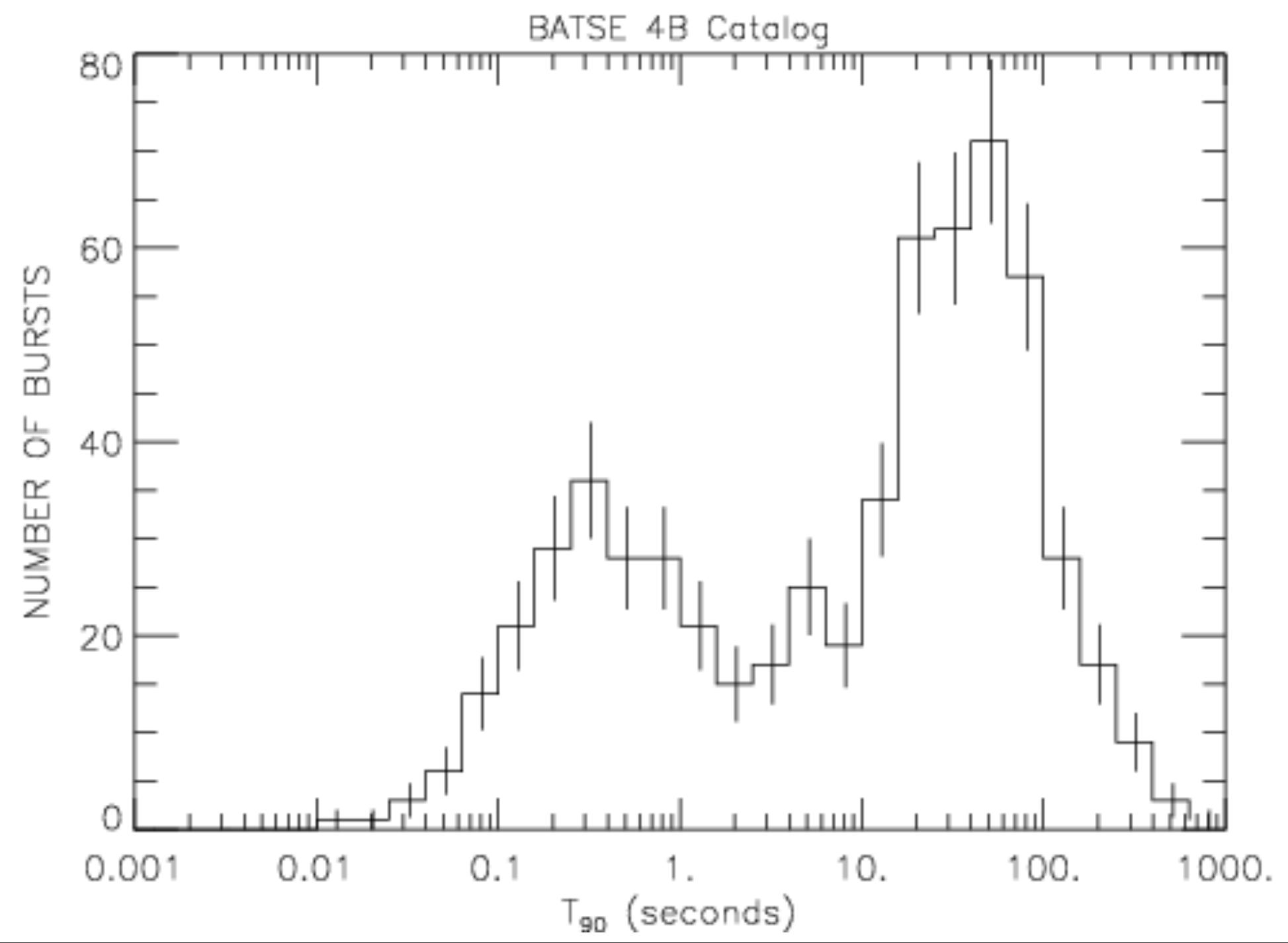


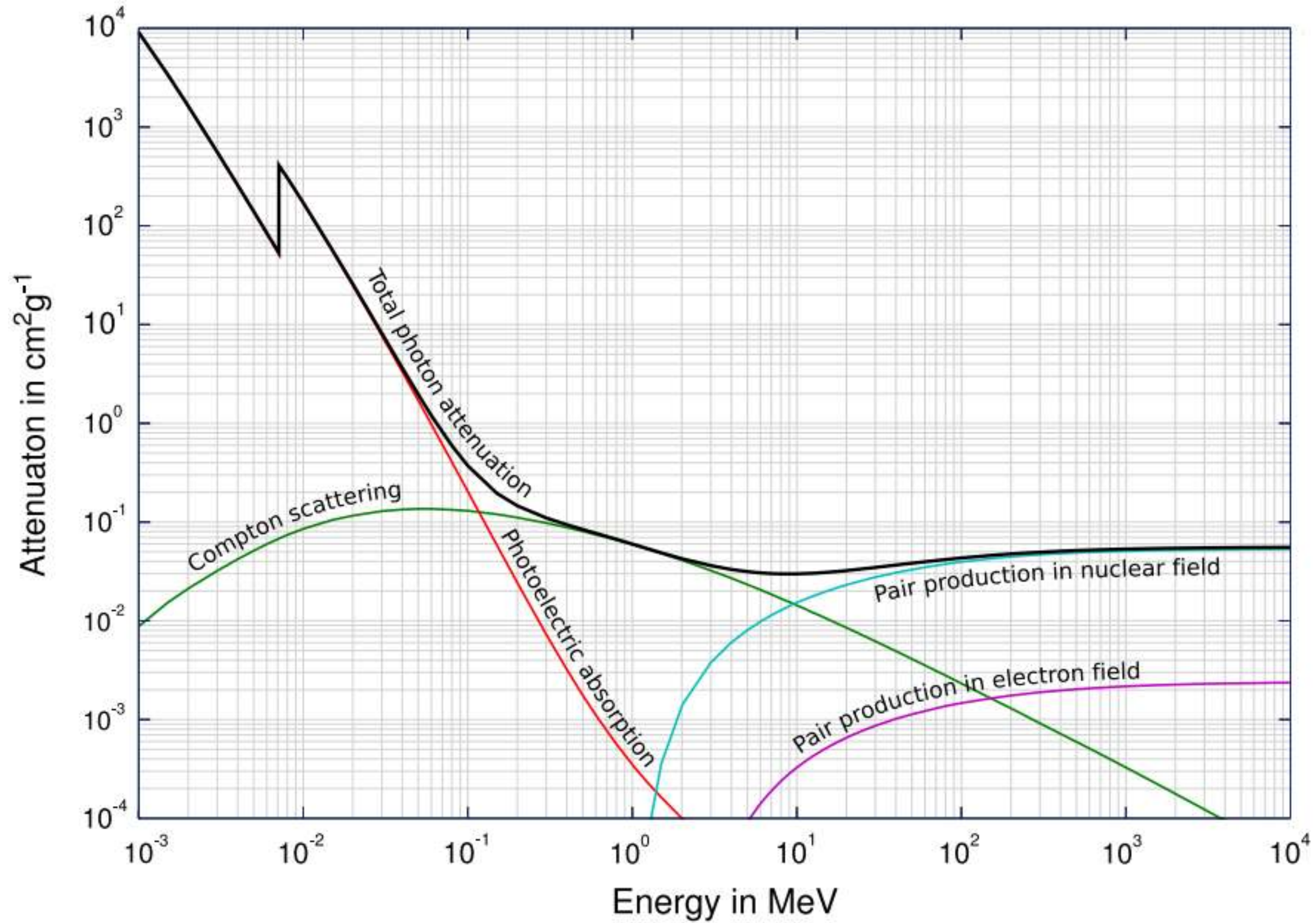
BATSE

BATSE—GRO 3 Types of Gamma-Ray Bursts 50-300 keV

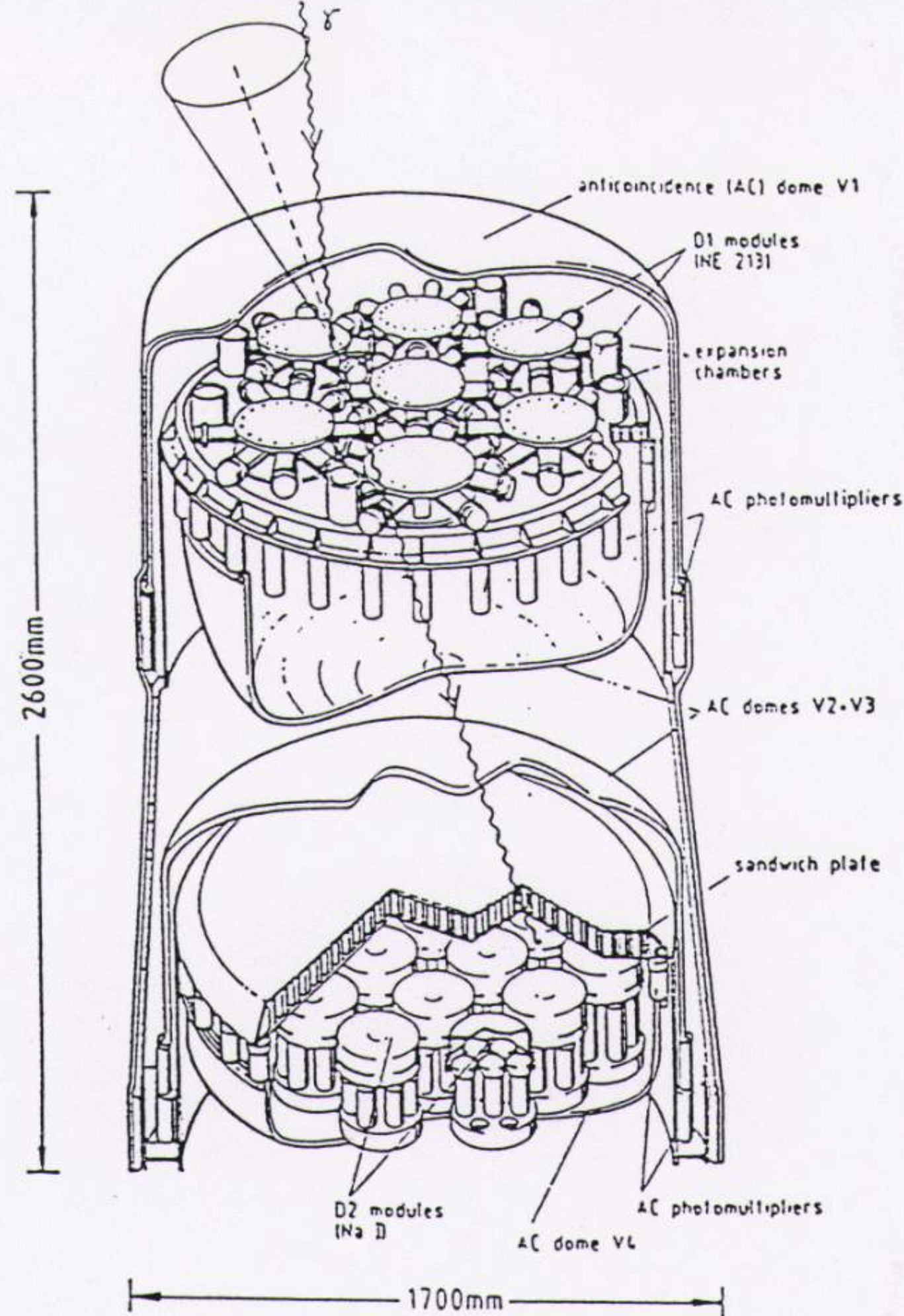


2704 BATSE Gamma-Ray Bursts





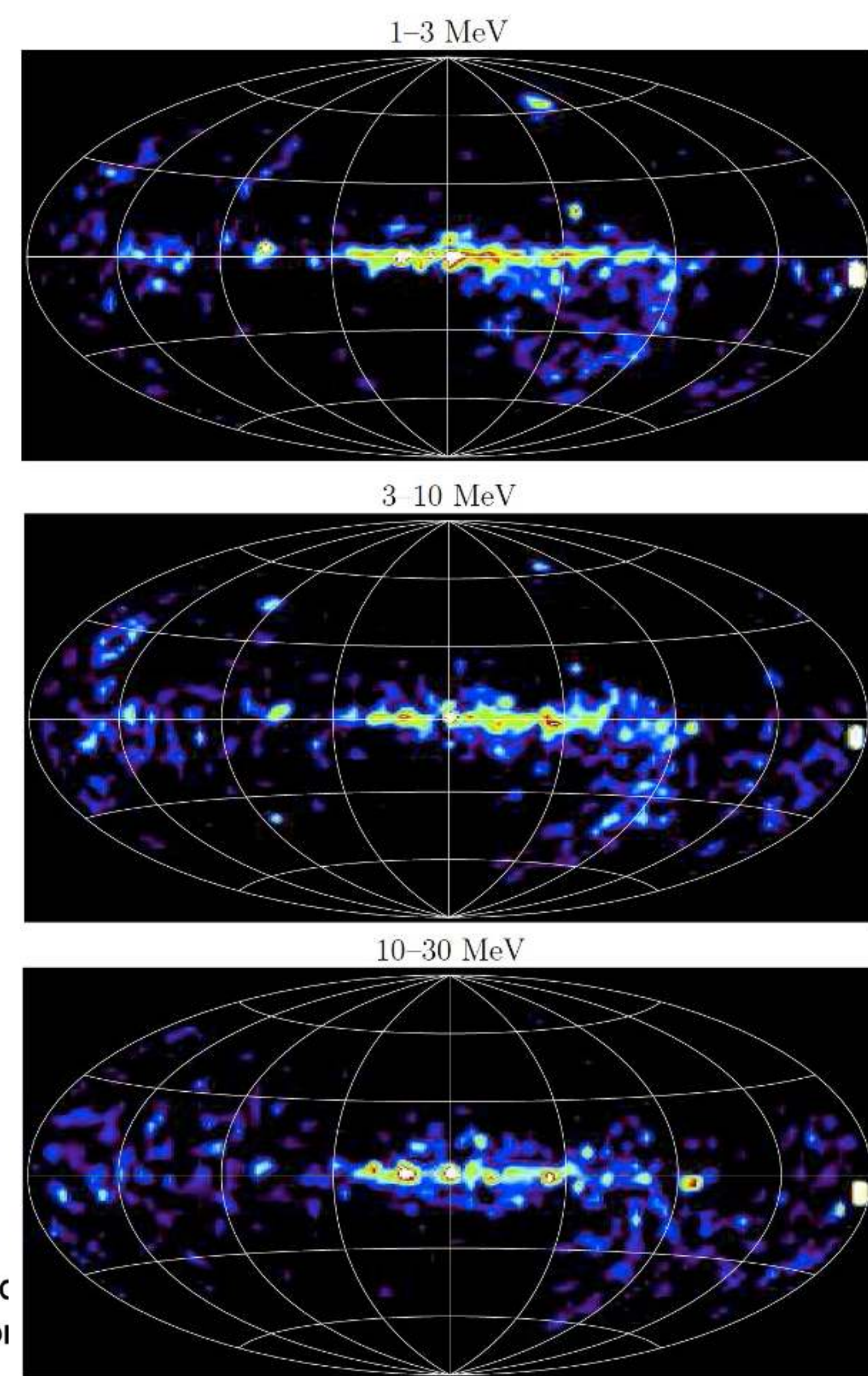
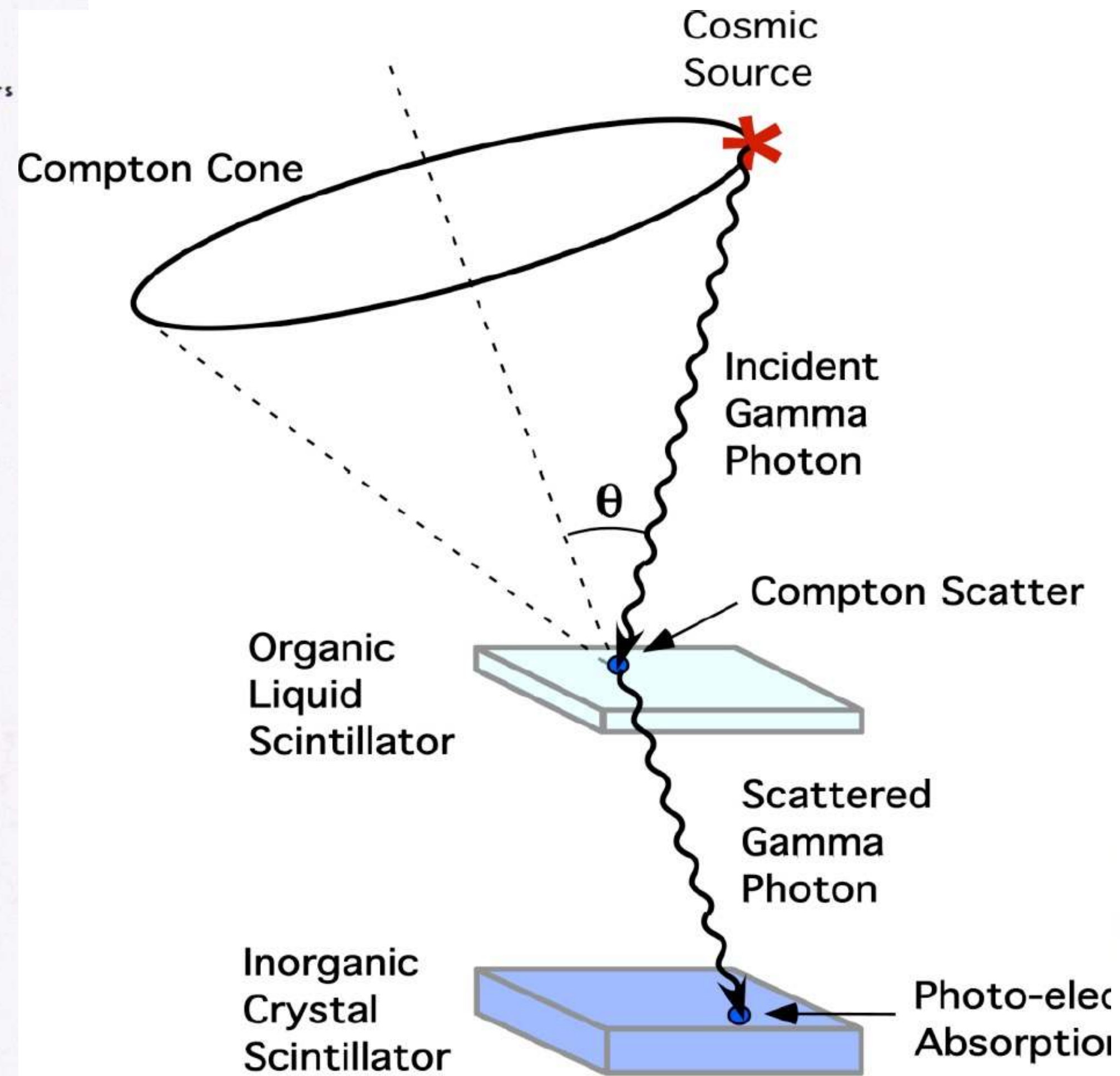
COMPTEL



Schematics of COMPTEL

$$E_T = E_1 + E_2$$

$$\cos \bar{\theta} = 1 - \frac{m_0 c^2}{E_2} + \frac{m_0 c^2}{E_1 + E_2}$$



Telescopios de producción de pares

- OSO-3 (1967-1969)
- SAS-2 (1972-1973)
- COS-B (1975-1982)
- EGRET - CGRO (1991-2000)
- Fermi γ -Ray Space Telescope (2008+)

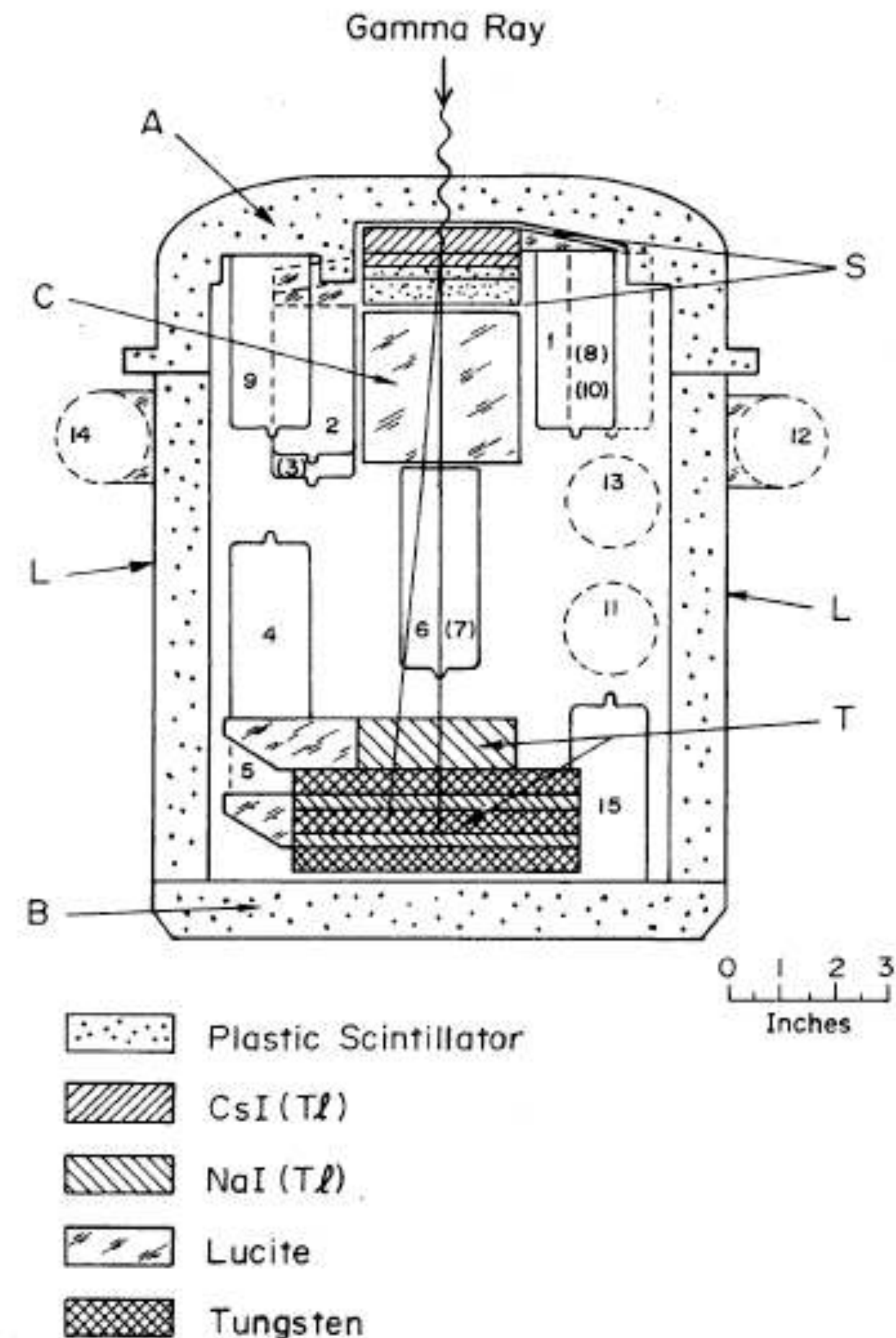
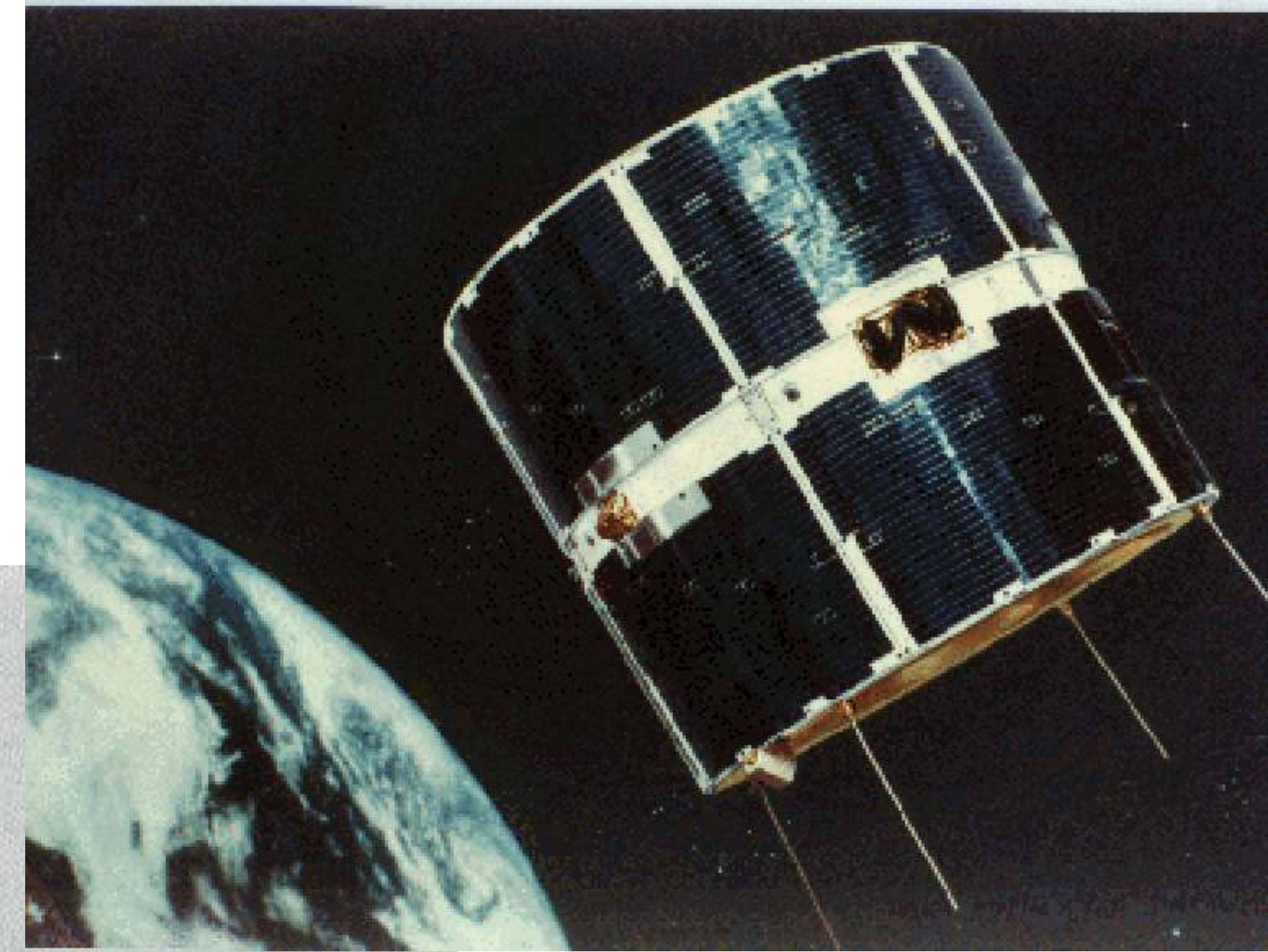
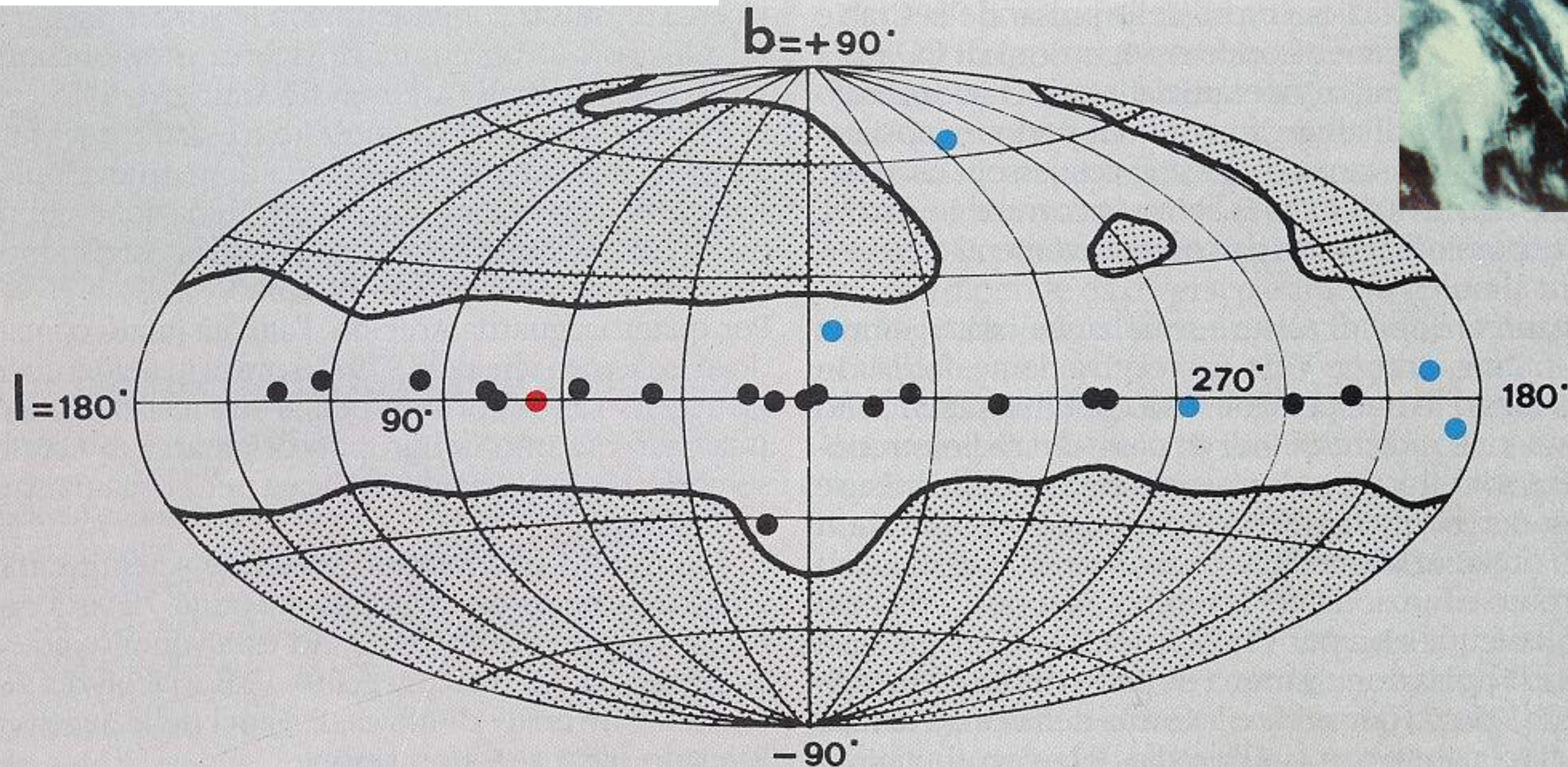


FIG. 1.—Scale drawing of the OSO-3 γ -ray instrument. The photomultipliers are labeled 1 through 15. A typical event in which an incident γ -ray produces a pair of electrons in S is indicated schematically.

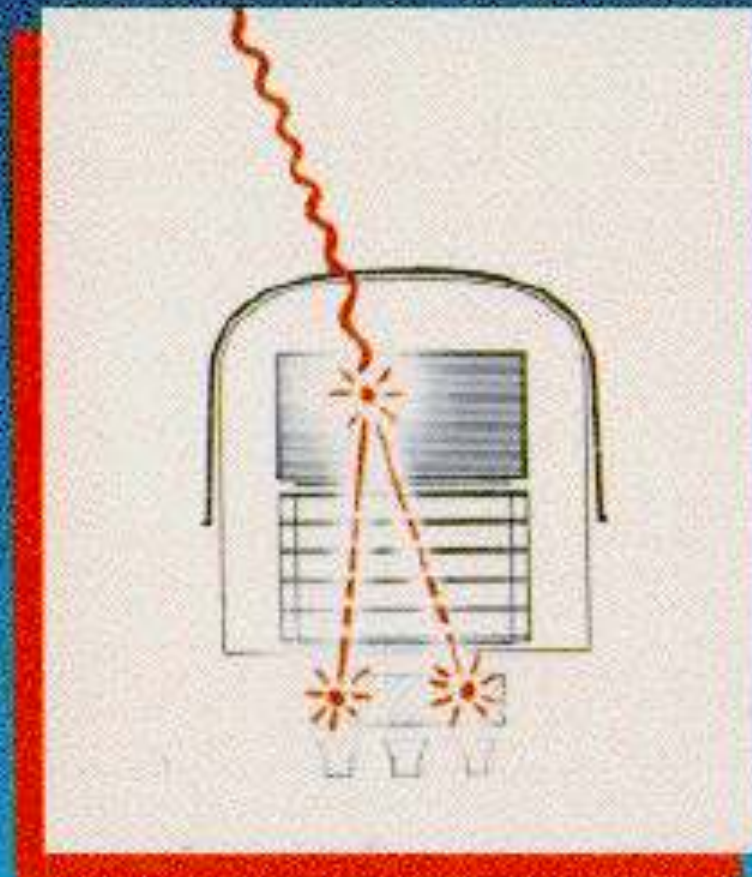
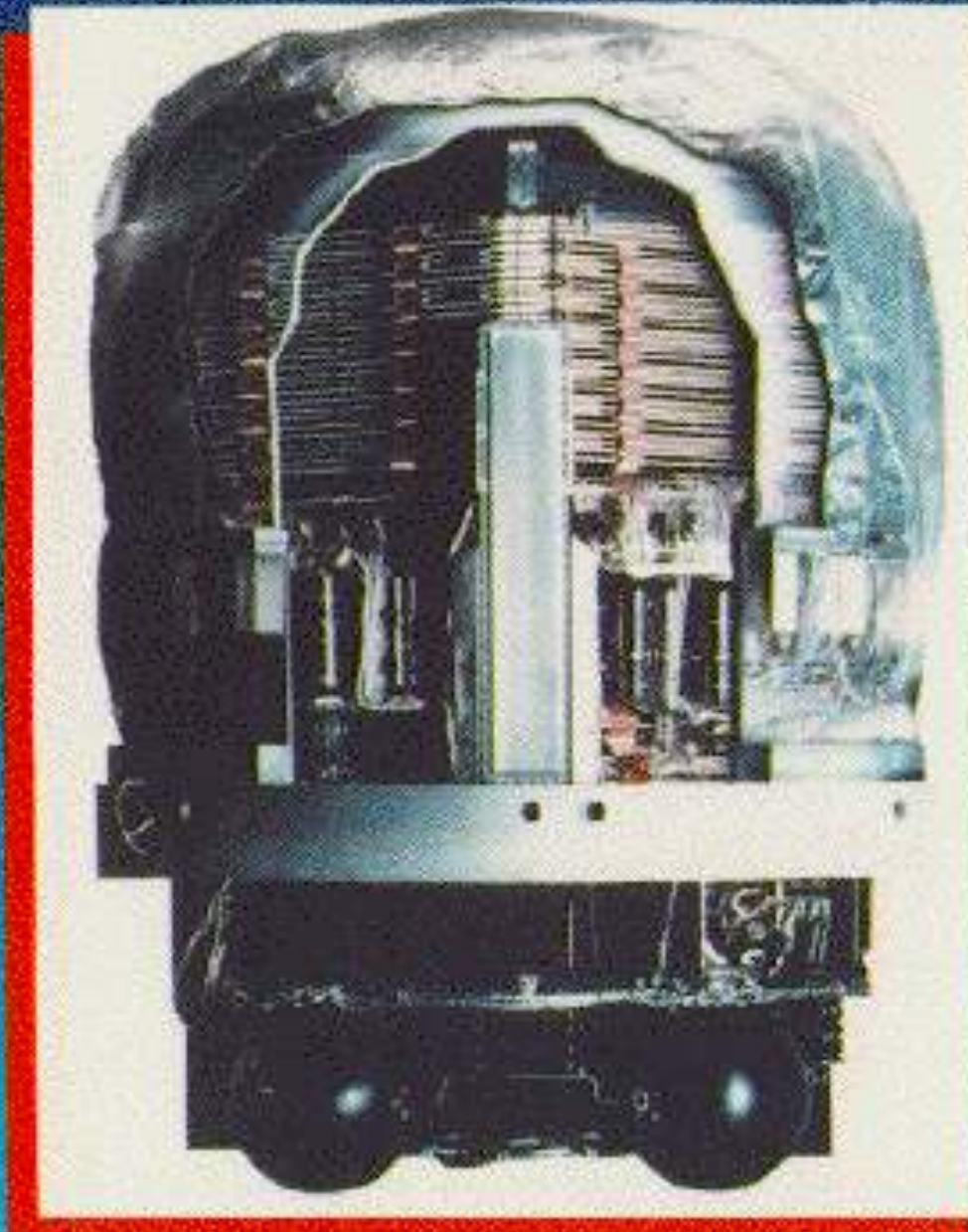
COS-B



2CG - Swanenburg et al. (1981)

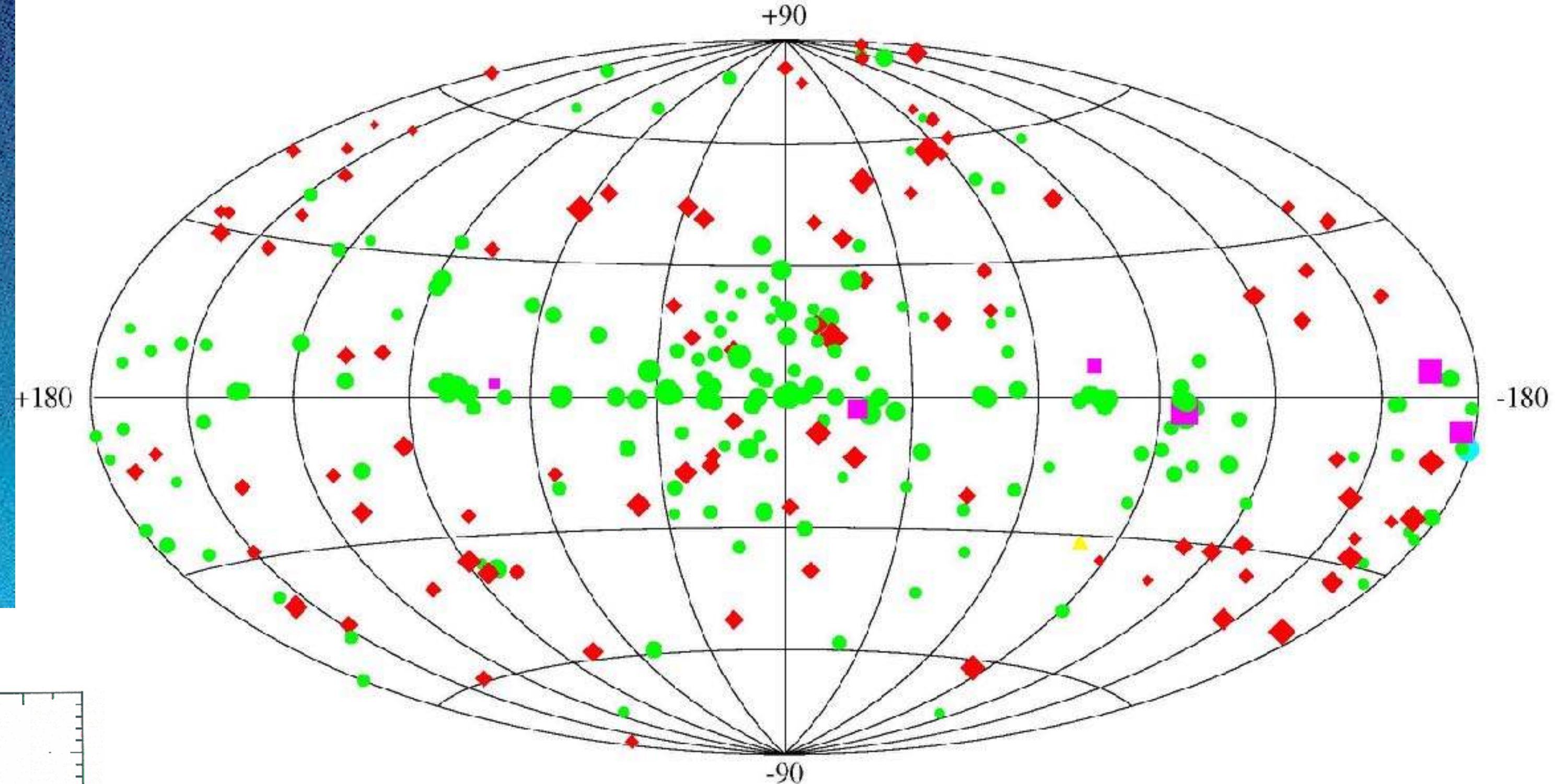


Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)



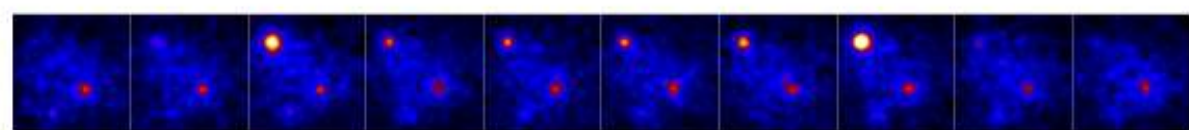
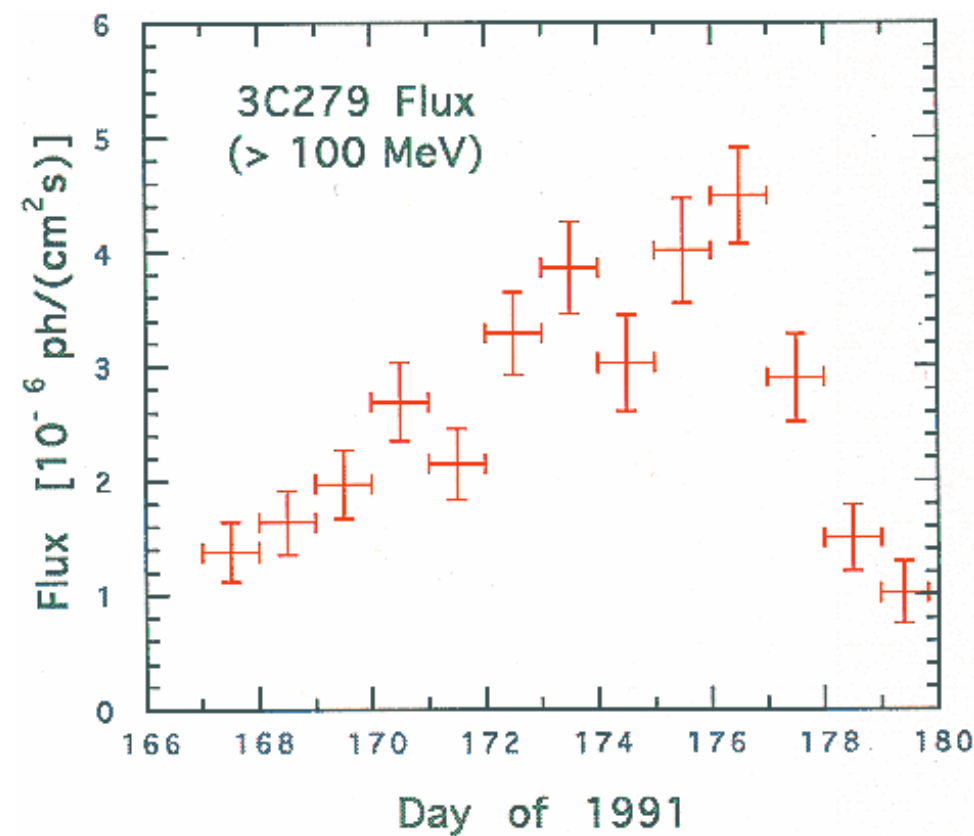
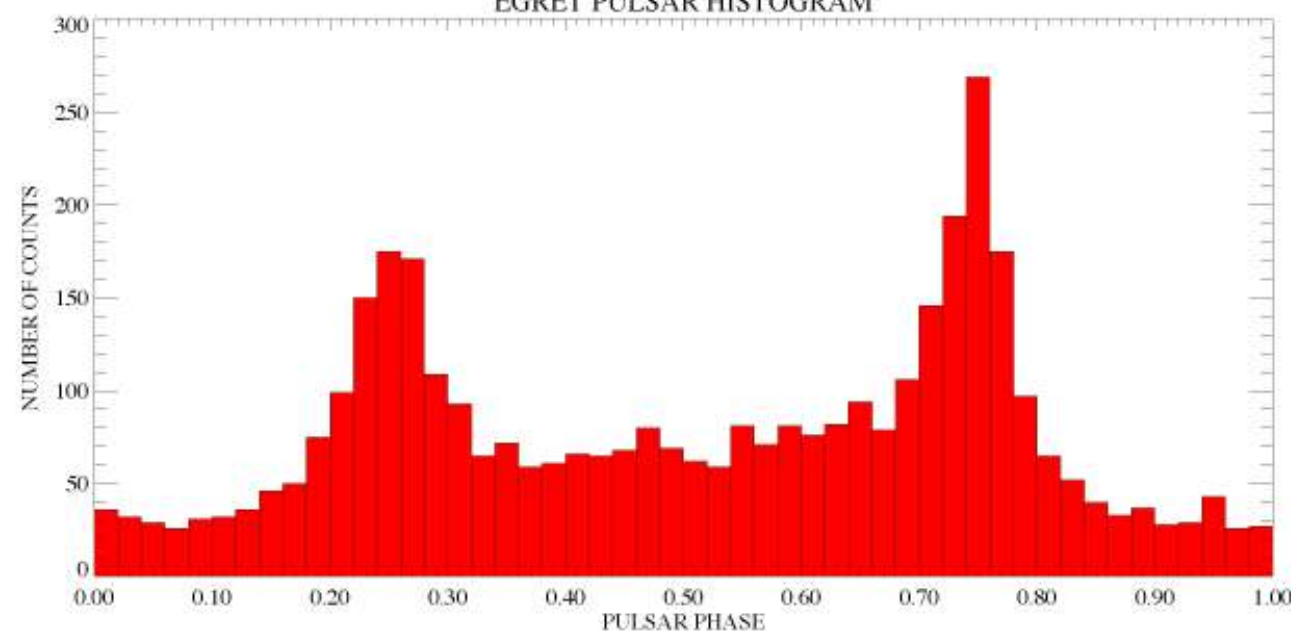
Third EGRET Catalog

$E > 100 \text{ MeV}$



- ◆ Active Galactic Nuclei
- Unidentified EGRET Sources
- Pulsars
- ▲ LMC
- Solar FLare

EGRET PULSAR HISTOGRAM



Pulsar Name: 0630+17 Galactic Coords: 195.13, 4.27 Period: 237.1ms Energy: >100 MeV Chi-Squared: 8332.54



CGRO
(1991-2000)

~~2000–2008~~

GLAST → Fermi γ -ST
(11 junio 2008)



Fermi Gamma-ray Space Telescope (2008–)

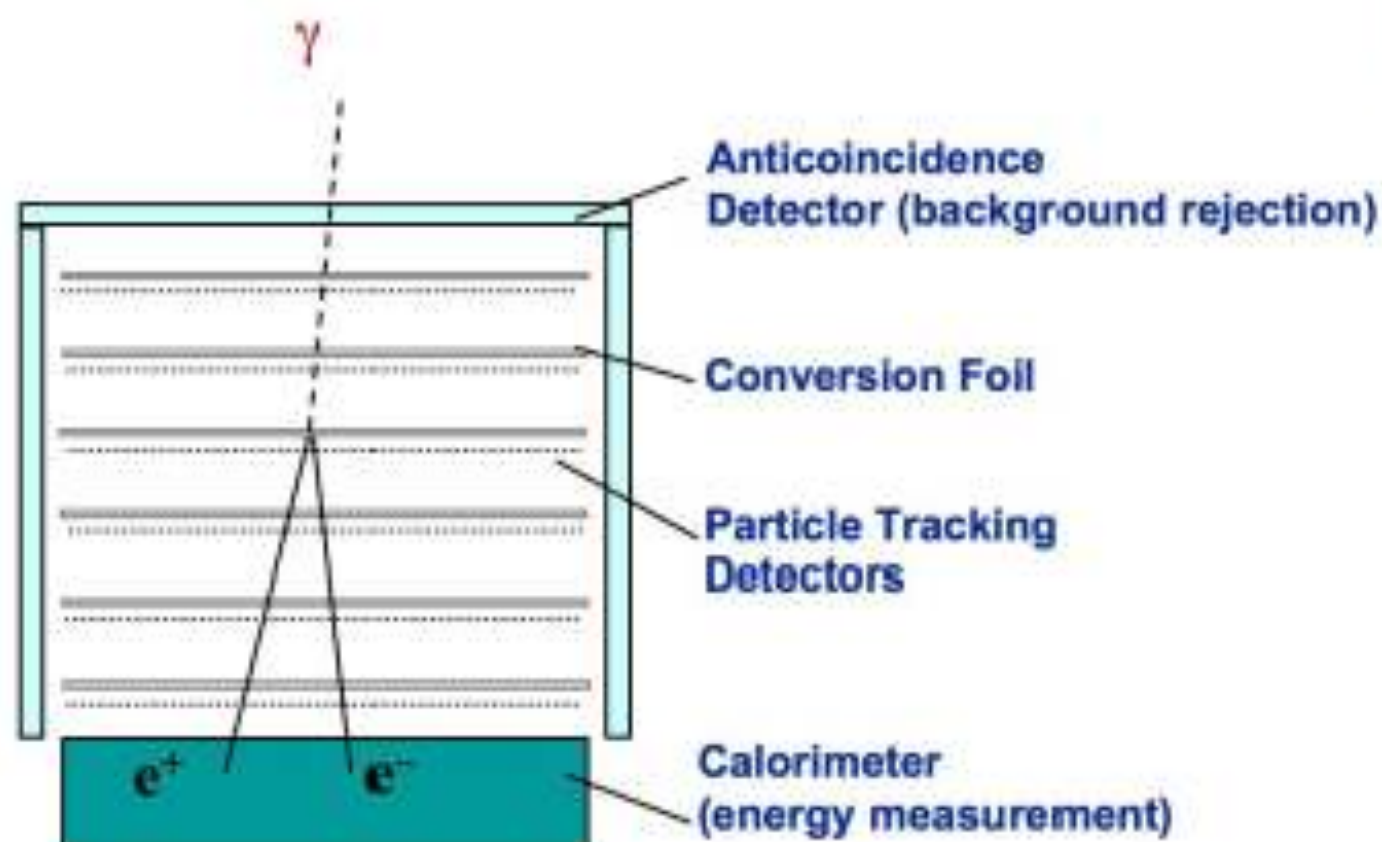
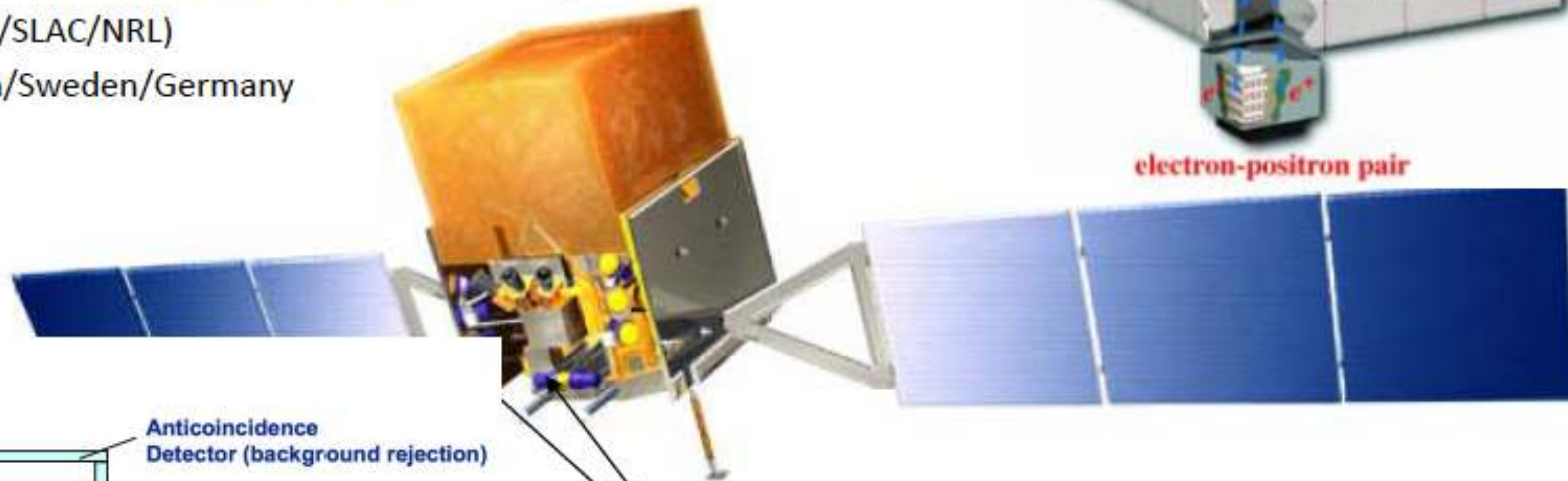
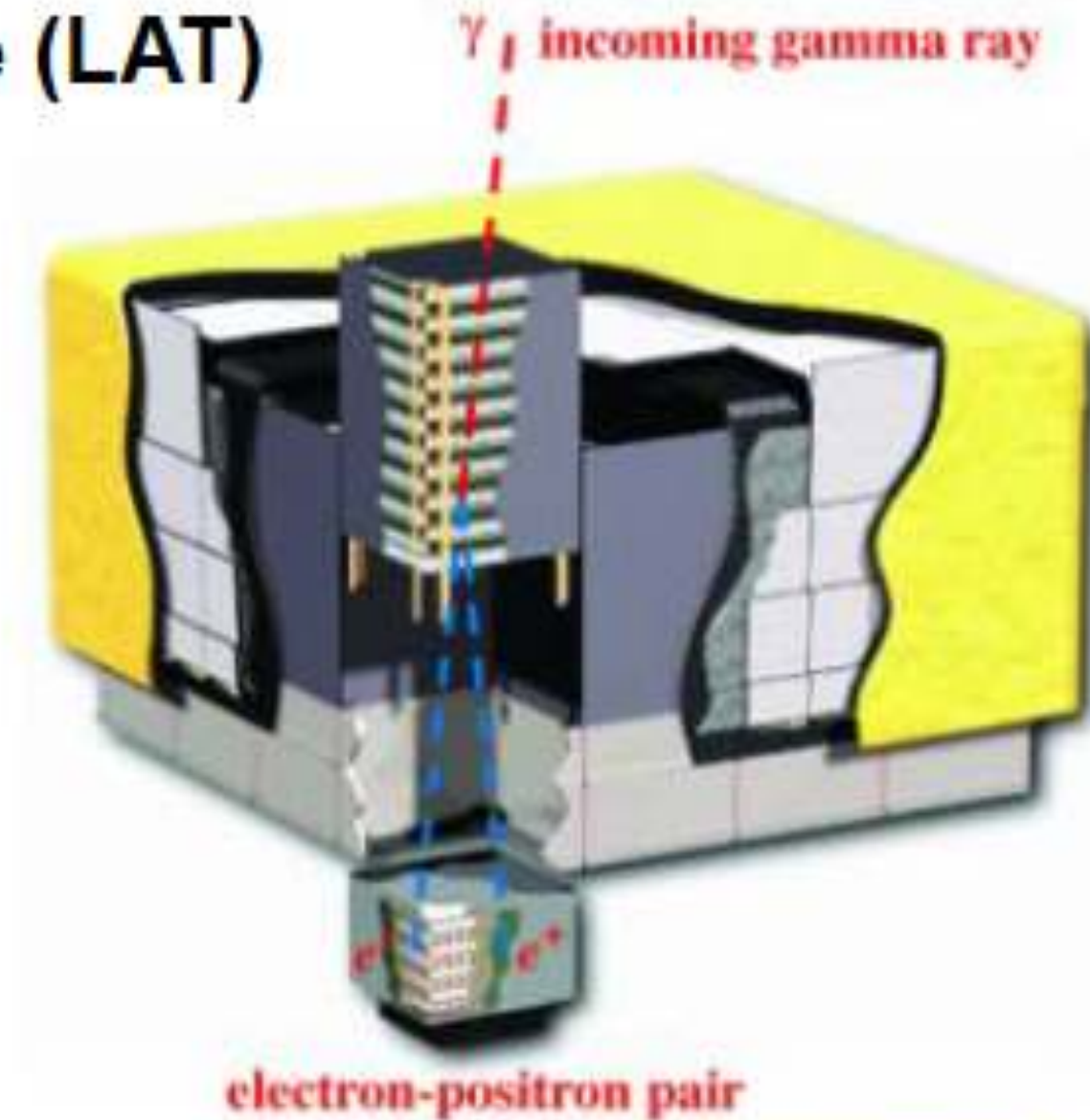
- ❑ NASA/DoE Project
- ❑ Launched June 11, 2008
- ❑ NRL Fermi Involvement
 - Calorimeter
 - Environmental testing
 - Interdisciplinary scientist

USA (GSFC/SLAC/NRL)

Italy/Japan/Sweden/Germany

Large Area Telescope (LAT)

20 MeV → 300 GeV
2.4 sr Field of View

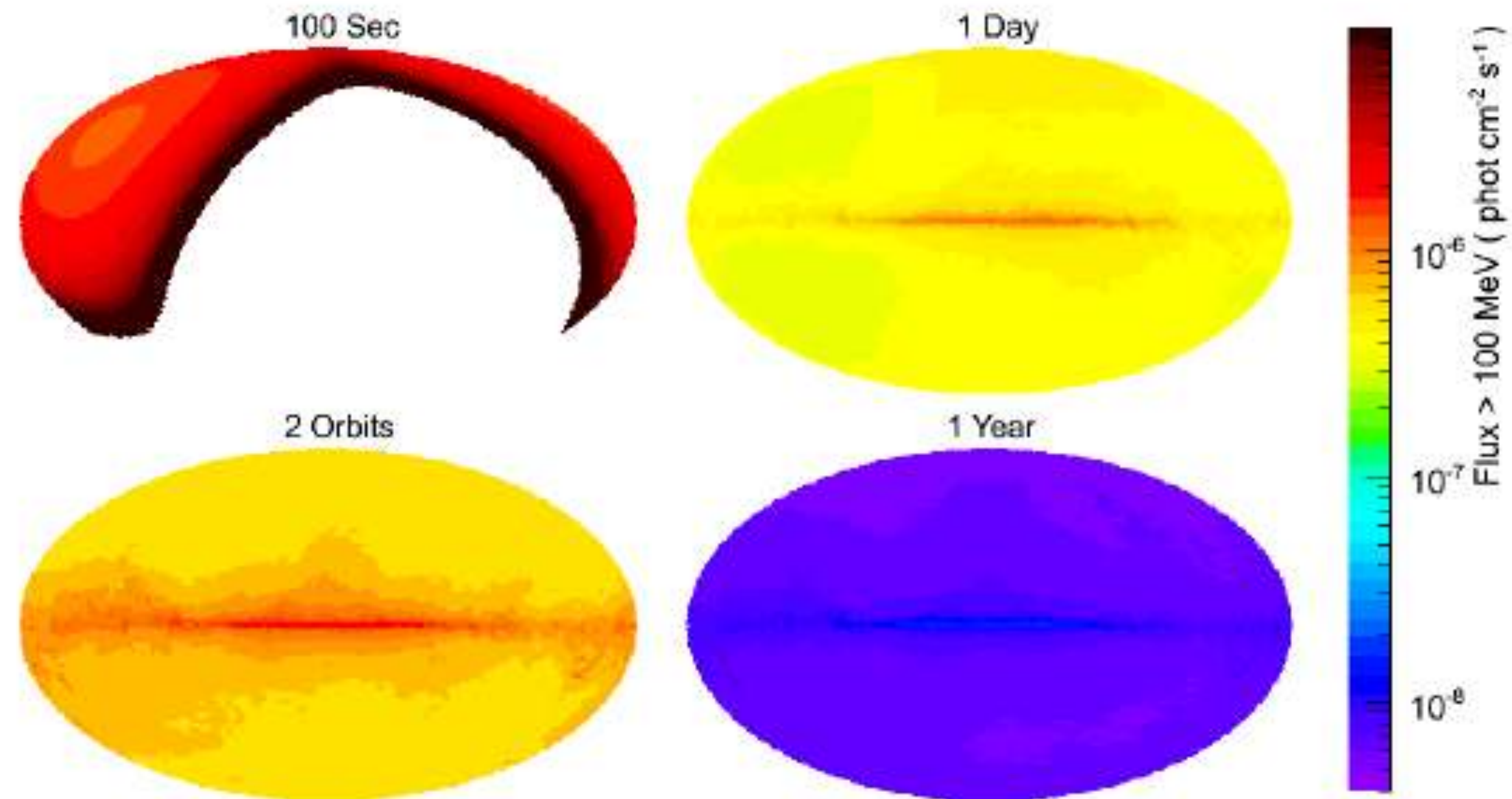


Gamma-ray Burst Monitor (GBM)

8 keV – 40 MeV (12+2 detectors)
Views entire unocculted sky



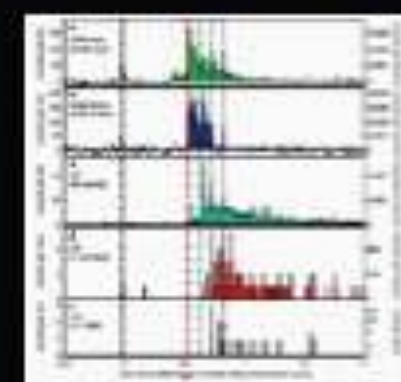
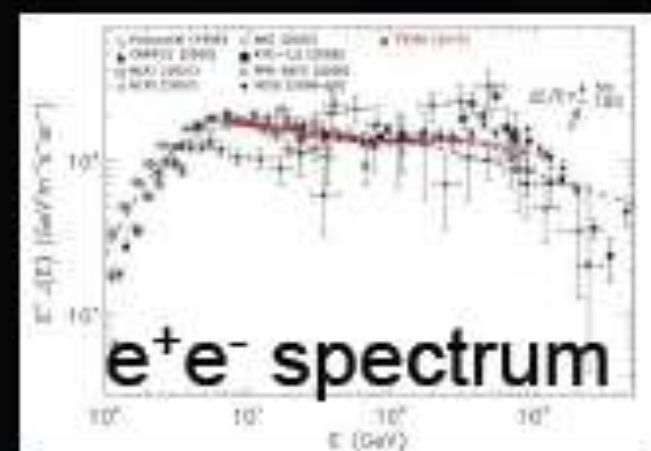
Operations and observing modes



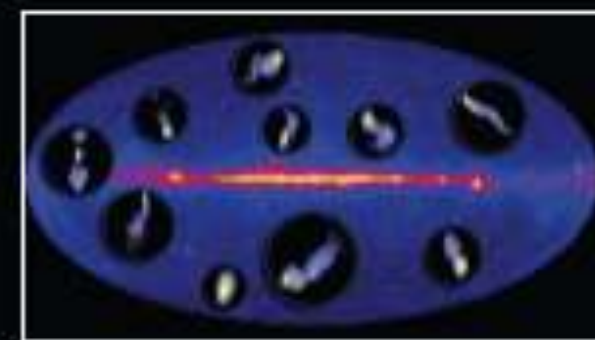
LAT sensitivity on 4 different timescales: 100 s, 1 orbit (96 mins), 1 day and 1 year

- ❑ Almost all observations in survey mode - the LAT observes the entire sky every two orbits (~3 hours), each point on the sky receives ~30 mins exposure during this time.
 - 39 deg rocking angle to Sept 2, 50 deg after September 3, 2009. Very high ontime! ,
- ❑ Autonomous Repointing
 - In response to bright GBM-detected GRBs, LAT-triggered GRBs
- ❑ Dedicated Pointings
 - Crab flares, bright blazars, γ -ray novae

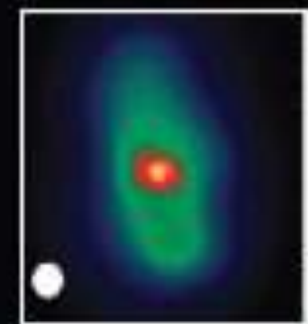
Fermi Highlights and Discoveries



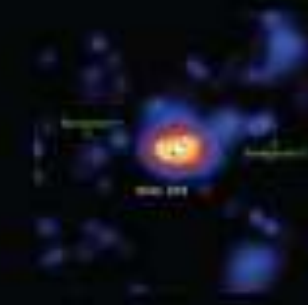
GRBs



Blazars

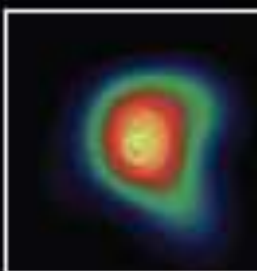
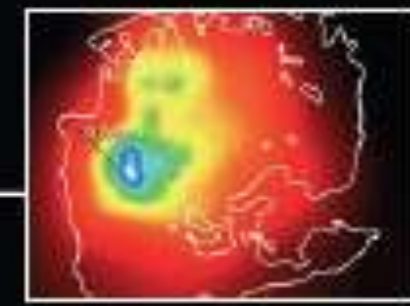


Radio Galaxies



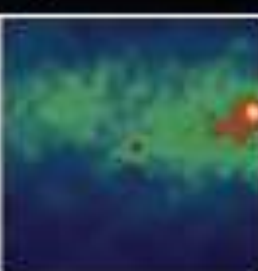
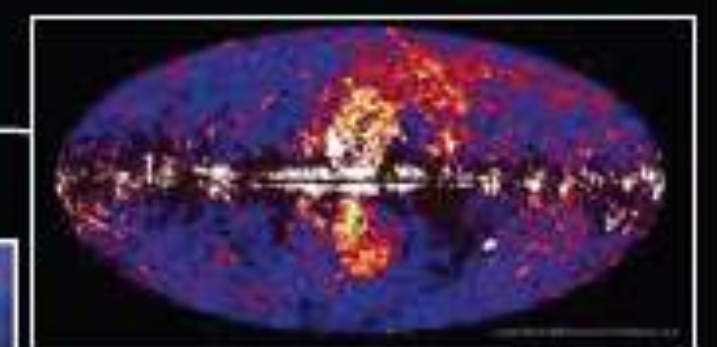
Starburst Galaxies

LMC & SMC



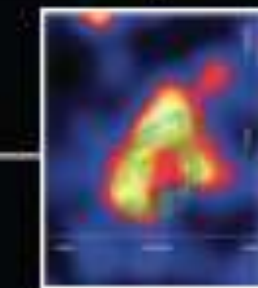
Globular Clusters

Fermi Bubbles

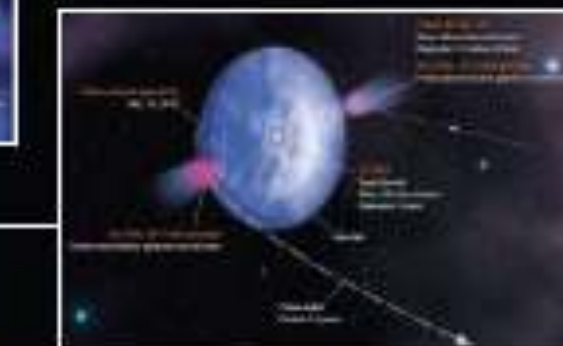


Nova

SNRs & PWN

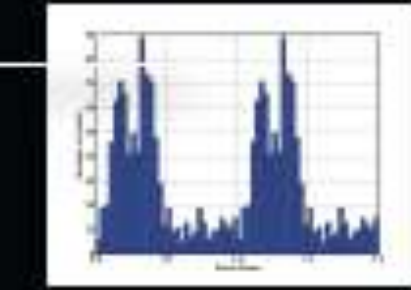


γ -ray Binaries



Galactic

Pulsars: isolated, binaries, & MSPs



Sun: flares & CR interactions



Terrestrial γ -ray Flashes



Unidentified Sources
(577/1873)

Extragalactic

Table 7. LAT 4FGL Source Classes

Description	Identified		Associated	
	Designator	Number	Designator	Number
Pulsar, identified by pulsations	PSR	231	...	...
Pulsar, no pulsations seen in LAT yet	...	...	psr	10
Pulsar wind nebula	PWN	12	pwn	6
Supernova remnant	SNR	24	snr	15
Supernova remnant / Pulsar wind nebula	SPP	2	spp	90
Globular cluster	GLC	0	glc	30
Star-forming region	SFR	3	sfr	0
High-mass binary	HMB	5	hmb	3
Low-mass binary	LMB	1	lmb	1
Binary	BIN	1	bin	0
Nova	NOV	1	nov	0
BL Lac type of blazar	BLL	22	bll	1080
FSRQ type of blazar	FSRQ	42	fsrq	639
Radio galaxy	RDG	6	rdg	35
Non-blazar active galaxy	AGN	1	agn	16
Steep spectrum radio quasar	SSRQ	0	ssrq	2
Compact Steep Spectrum radio source	CSS	0	css	5
Blazar candidate of uncertain type	BCU	3	bcu	1152
Narrow line Seyfert 1	NLSY1	3	nlsy1	5
Seyfert galaxy	SEY	0	sey	1
Starburst galaxy	SBG	0	sbg	7
Normal galaxy (or part)	GAL	2	gal	2
Unknown	UNK	0	unk	118
Total	...	359	...	3215
Unassociated	...	...	...	1525

Fuentes Galácticas

Fuentes extragalácticas

Desconocidas y no asociadas

NOTE—The designation ‘spp’ indicates potential association with SNR or PWN. Designations shown in capital letters are firm identifications; lower case letters indicate associations.



Gamma-ray astronomy

1947 Blackett estimates the contribution of cosmic-ray-induced **Cherenkov** light to be 0.01% of the total intensity of the night sky (general flux of cosmic rays)

1953 Bill Galbraith and John Jelley detect Cherenkov radiation from extended air showers with a dustbin, a 60 cm diameter mirror and a PMT at its focus in coincidence with a nearby Geiger-Müller array. They later confirm it is Cherenkov light in measurements at the Pic du Midi.



La radiación Cherenkov (Čerenkov)

- ▶ La radiación Cherenkov se produce cuando una partícula con carga viaja más rápido que la luz en un medio con índice de refracción n ,

$$\beta = \frac{v}{c} > \frac{1}{n}. \quad (1)$$

- ▶ La radiación está confinada a un cono de apertura $\cos \theta = 1/\beta n$.
- ▶ La energía emitida por unidad de longitud es,

$$\frac{dE}{d\ell} = \frac{2\pi e^2 \nu}{c^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2} \right). \quad (2)$$

	n	Umbral (γ)	θ ($^\circ$)	$dE/d\ell$ (eV/cm)
Aire	1.00029	40.8	1.4	0.34
Agua	1.335	1.5	41.2	327

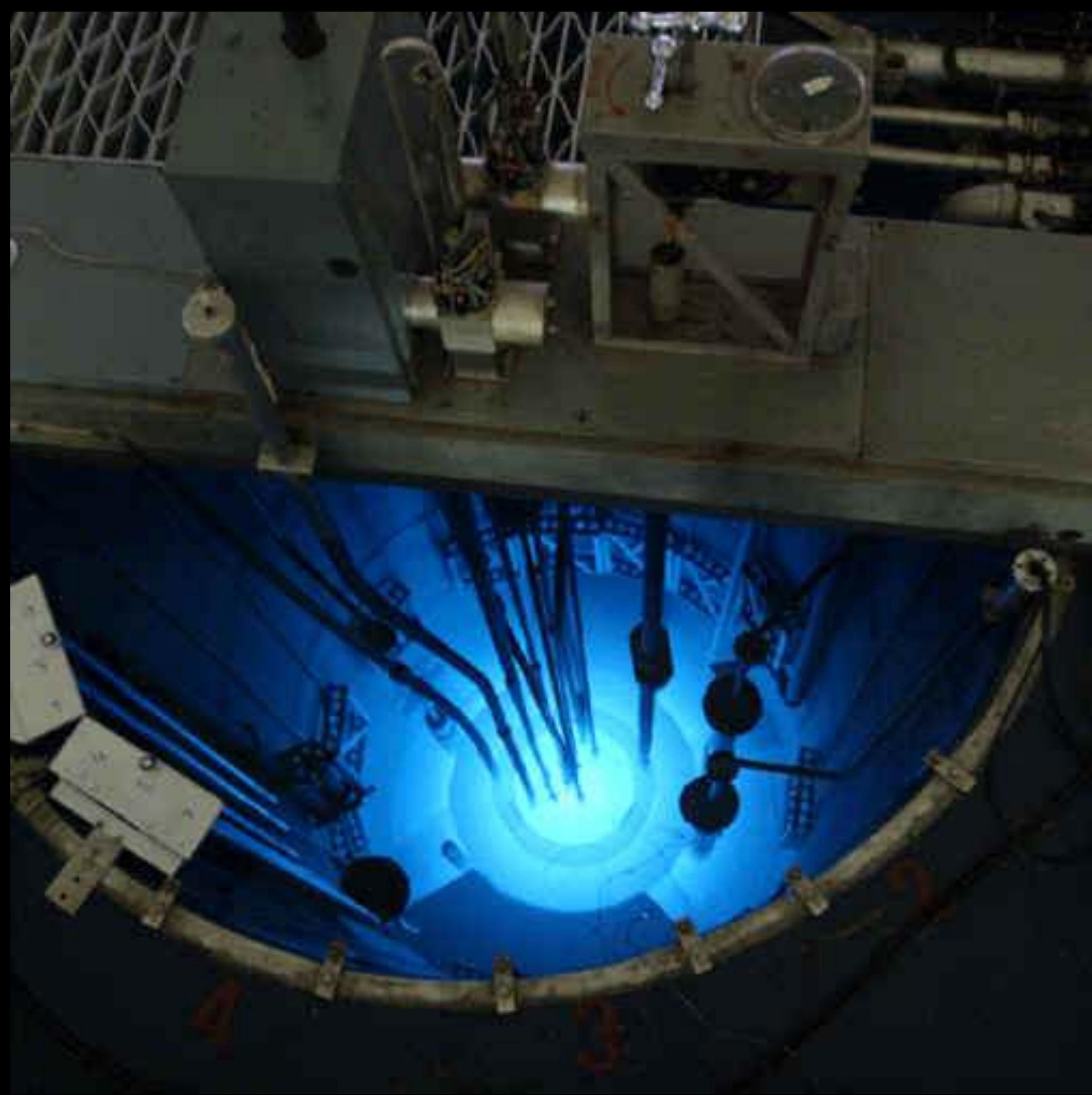


By H. Seldon - vlastni dilo, own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2557072>



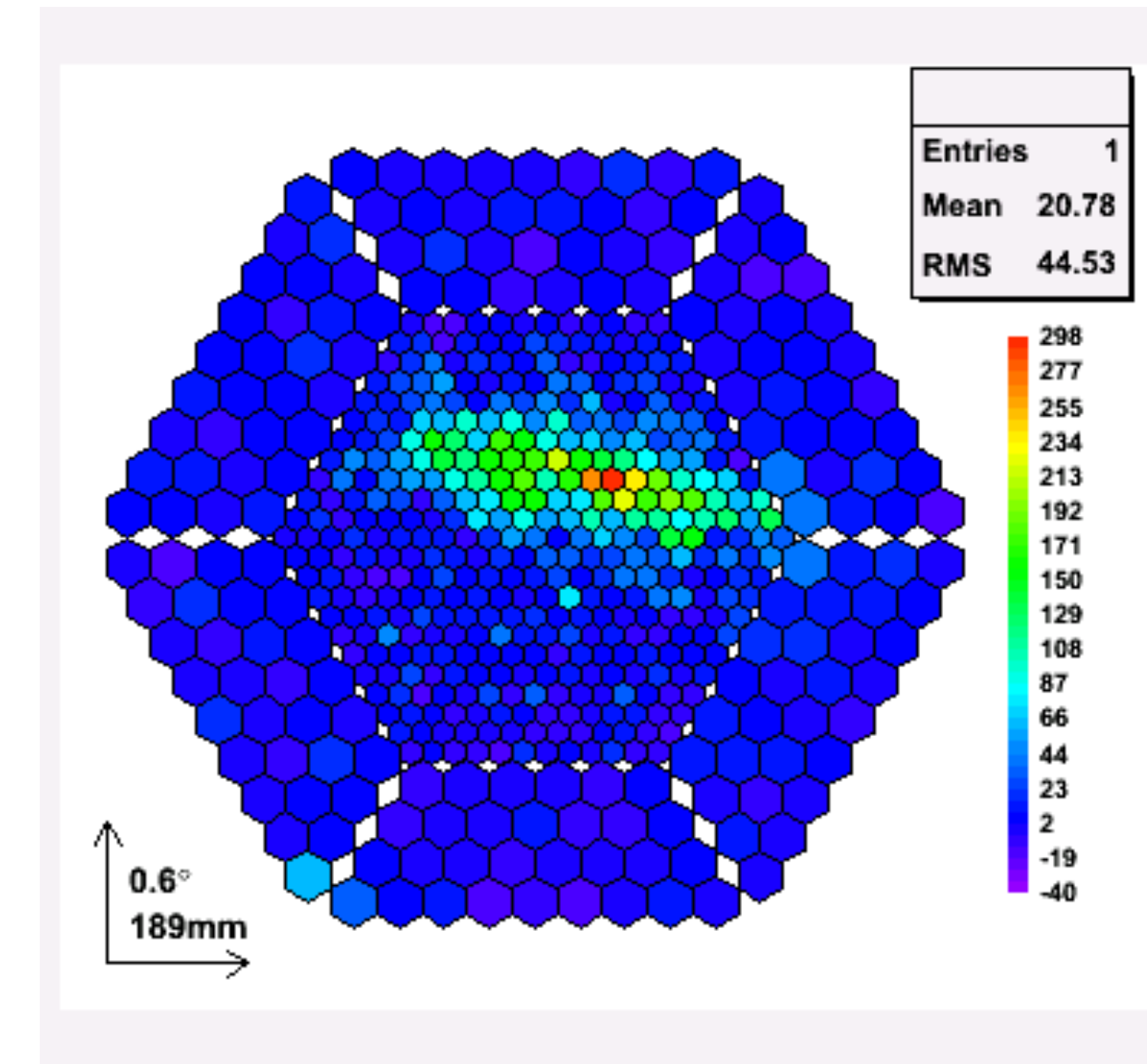
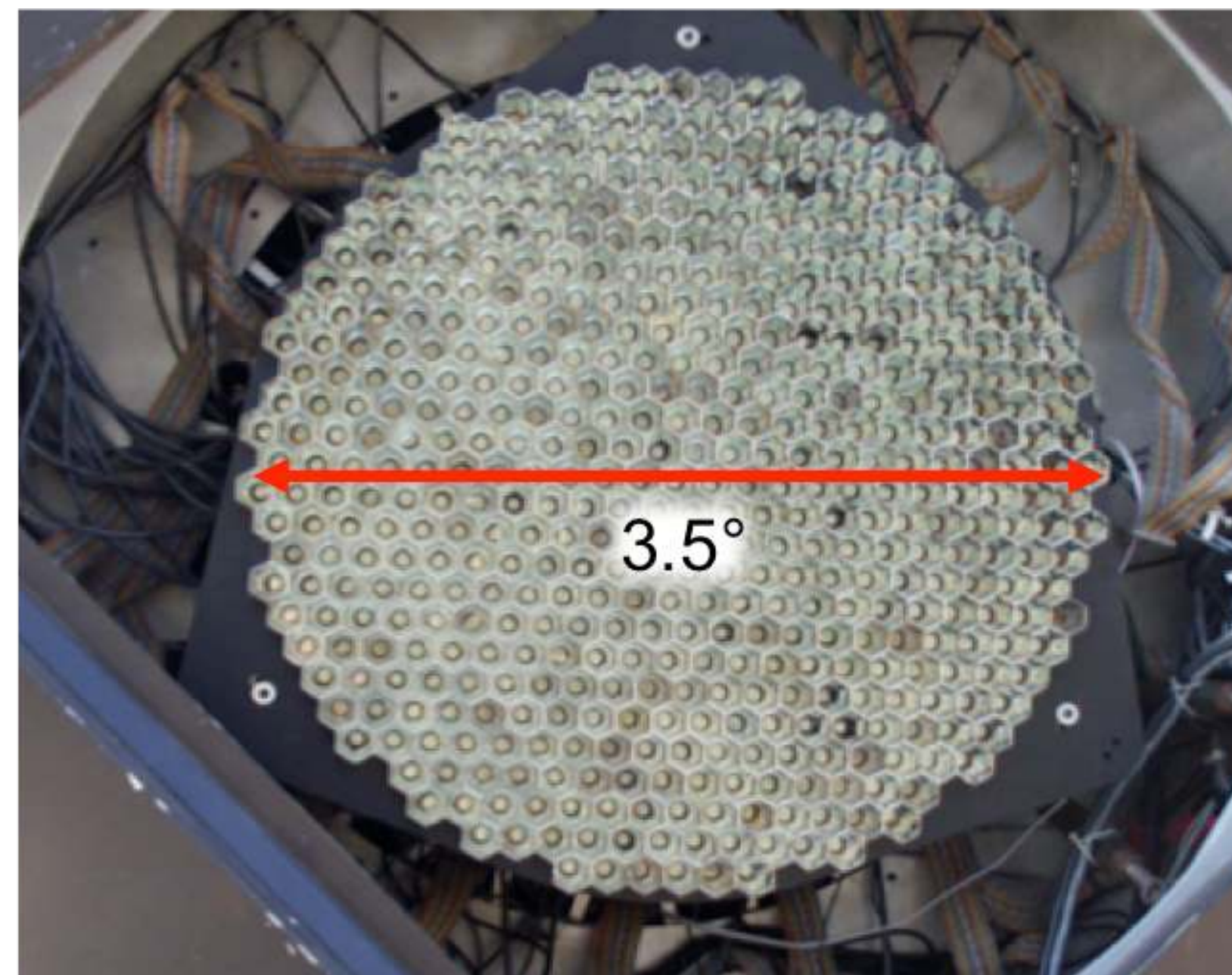
Rayos gamma @ LA-CoNGA Physics - junio 2023





Telescopios Cherenkov atmosféricos

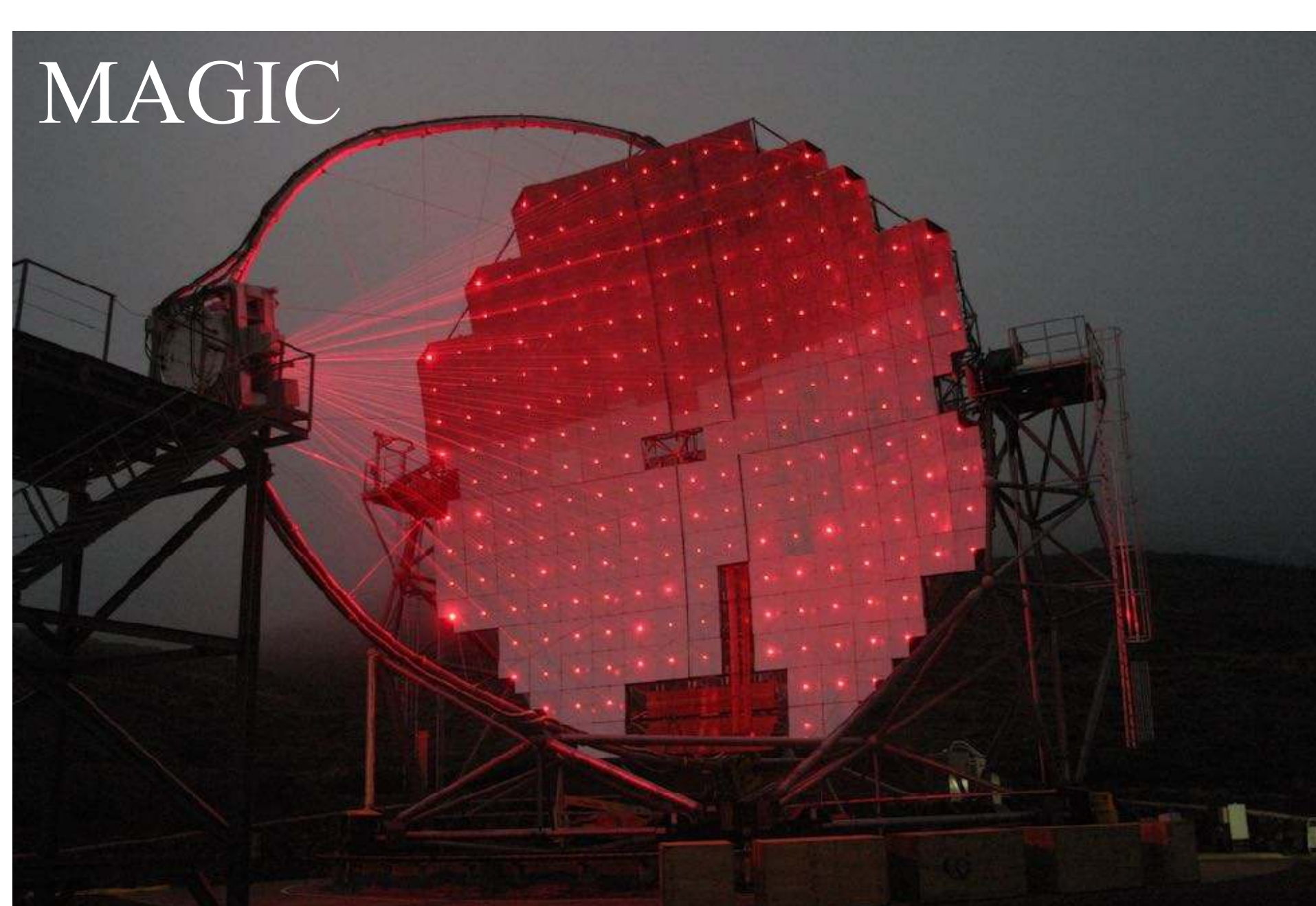
- Operan detectando la luz Cherenkov producida por cascadas de partículas secundarias en la atmósfera.
- Se estudia la imagen de la cascada ($\Delta t \sim \text{ns}$) para rechazar hadrones.



HESS



MAGIC

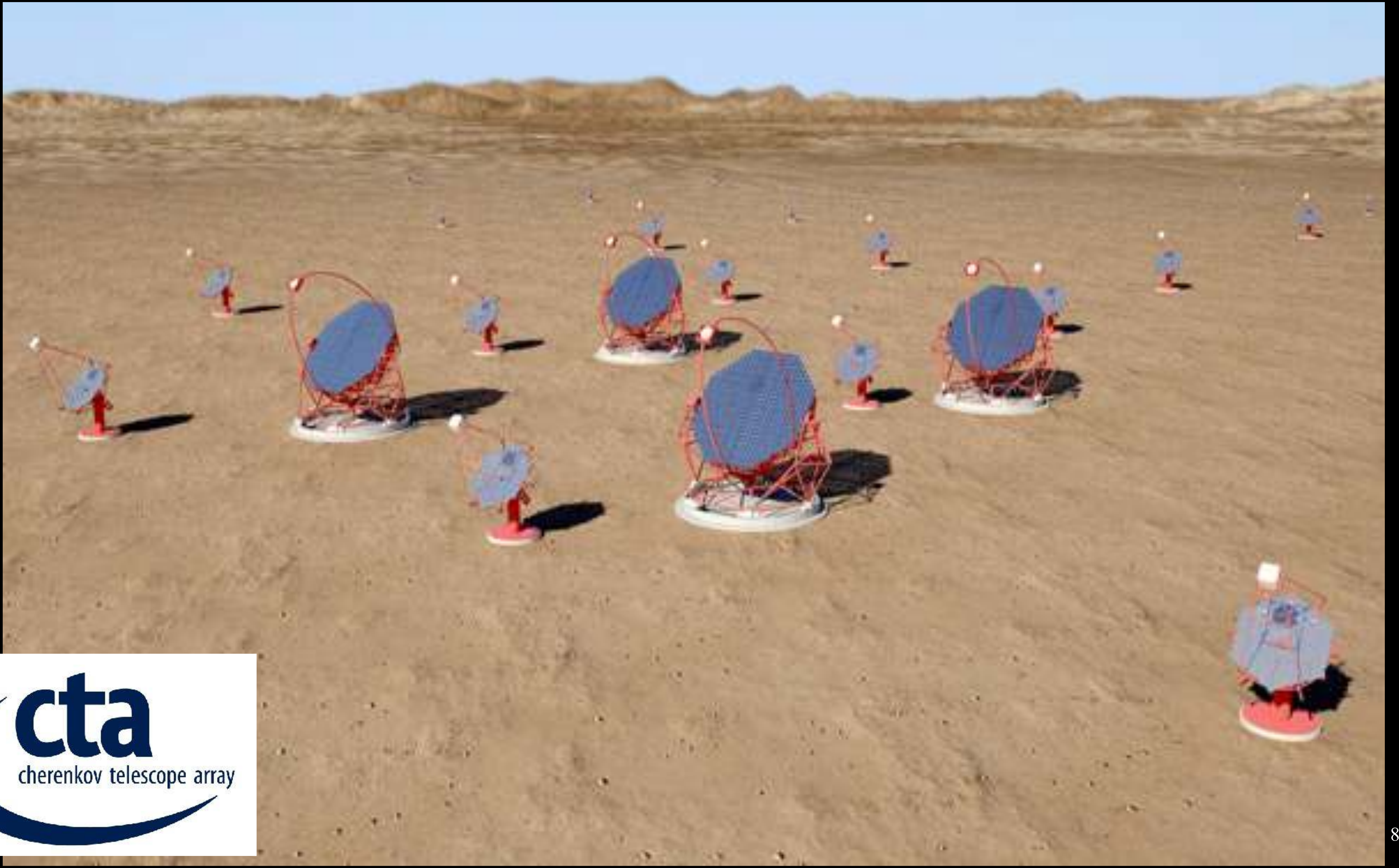


VERITAS

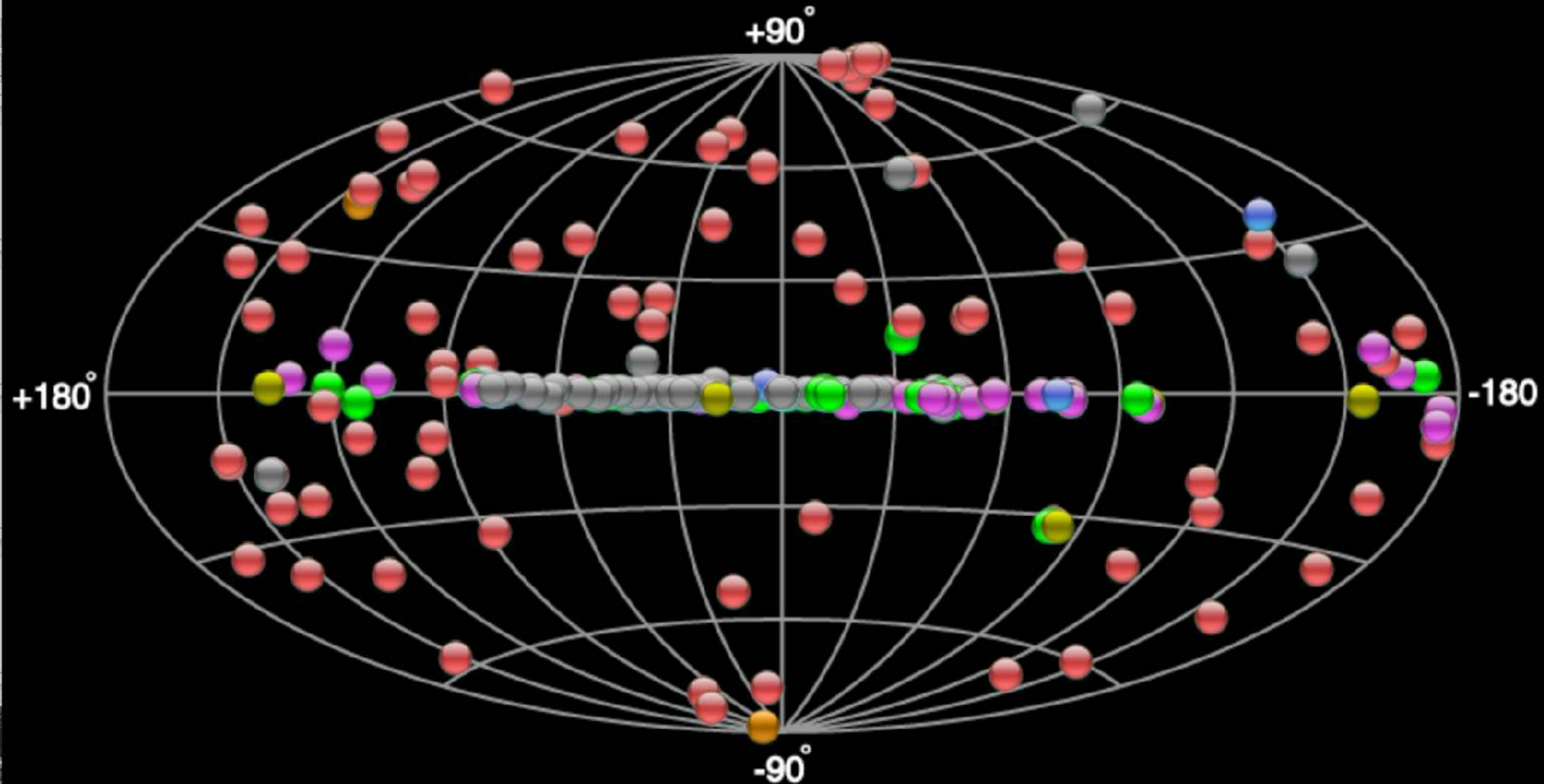


FACT





Welcome to TeVCat!



Try TevCat 2.0 Beta!

Table Control Map Control Tools Lege..

- Extended TeV Halo, PWN
- Starburst
- HBL, IBL, FRI, Blazar, FSRQ, LBL, AGN (unknown type)
- Globular Cluster, Star Forming Region, uQuasar, Cat. Var., Massive Star Cluster, BIN, BL Lac (class unclear), WR
- Shell, SNR/Molec. Cloud, Composite SNR, Superbubble
- DARK, UNID, Other
- Binary, XRB, PSR, Gamma BIN

Export Black Export White



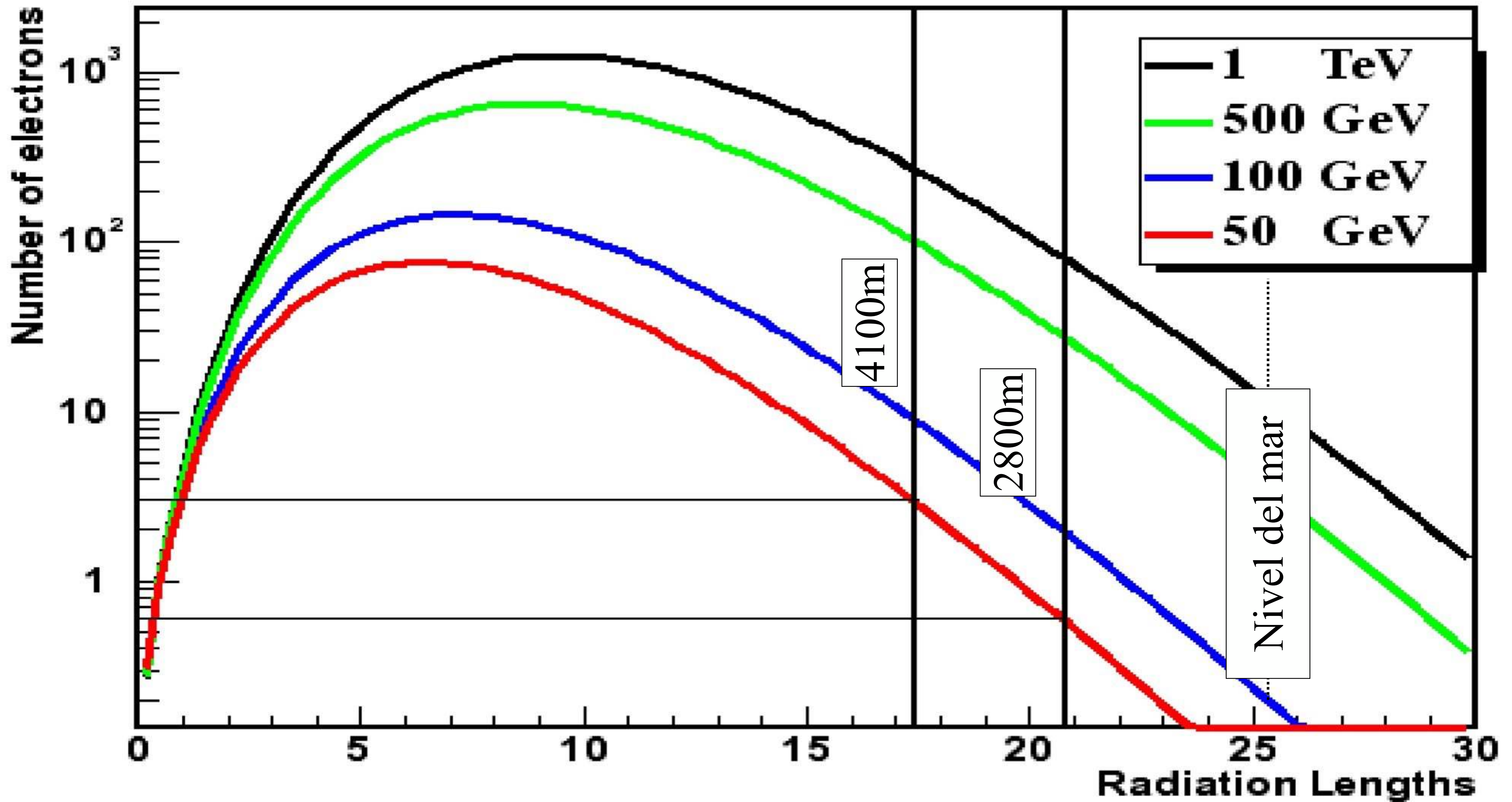
2. Rayos gamma

1. Producción, interacciones.
2. Bandas astrofísicas, detectores, resultados generales.
3. Arreglos de superficie a gran altura: HAWC.

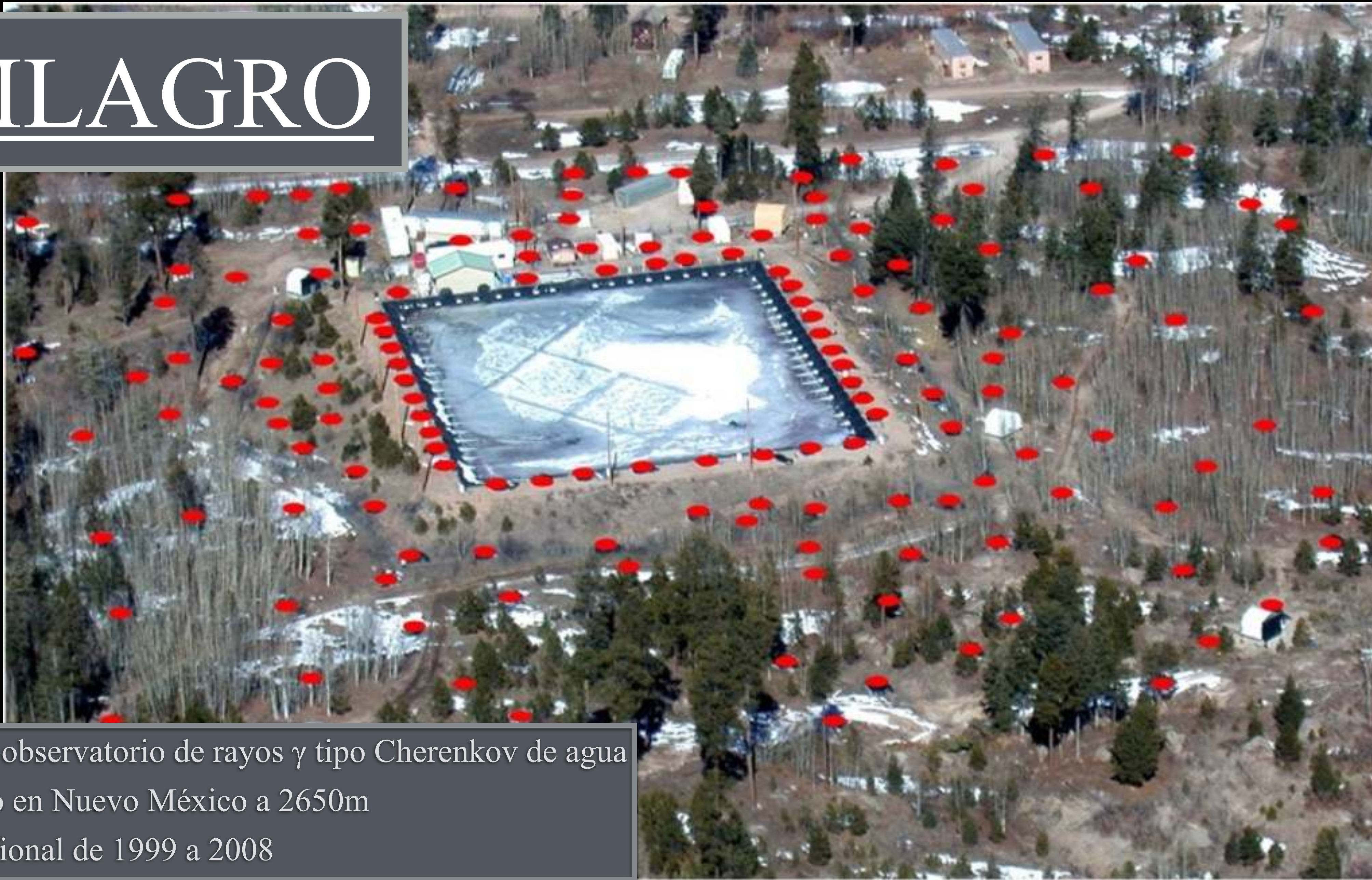


Observatorios de rayos γ a gran altura

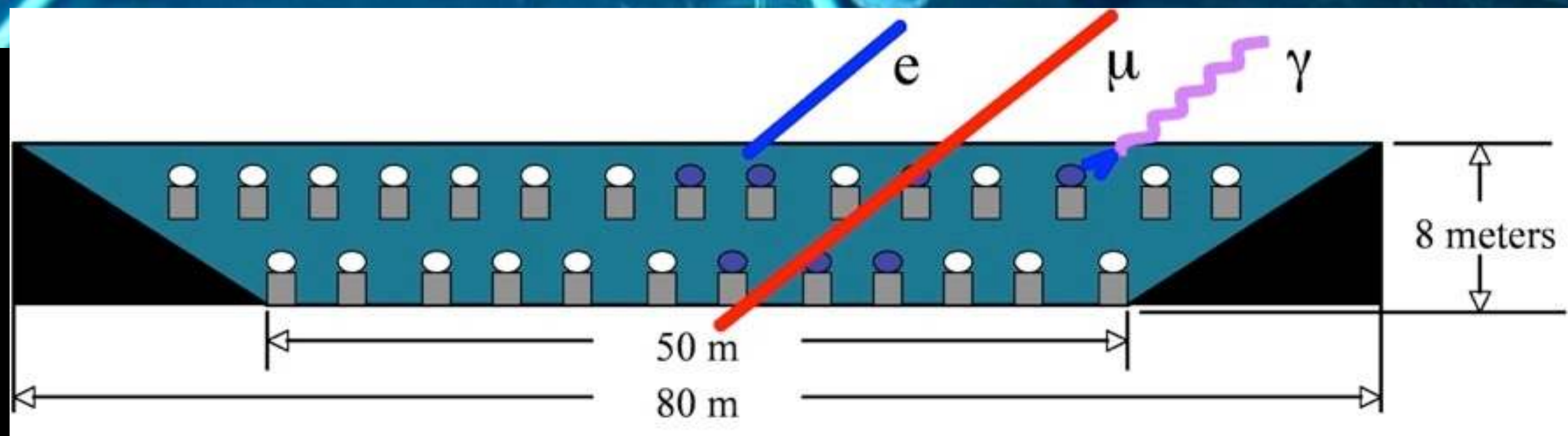




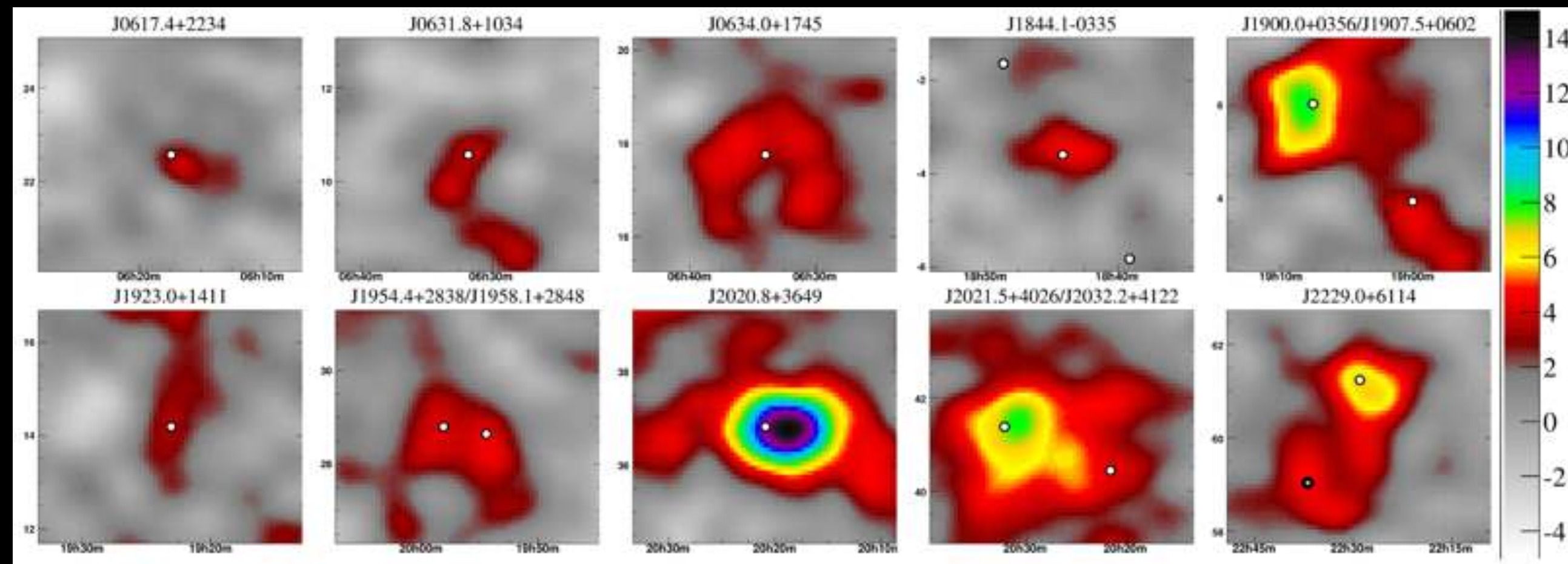
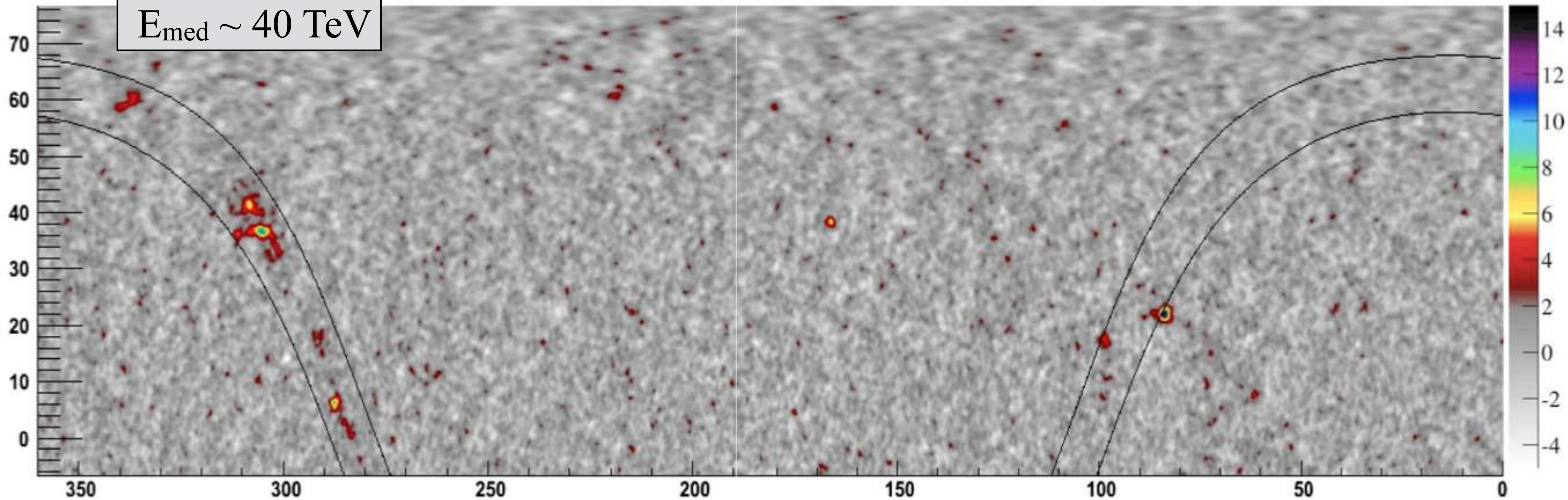
MILAGRO



- Primer observatorio de rayos γ tipo Cherenkov de agua
- Situado en Nuevo México a 2650m
- Operacional de 1999 a 2008



$E_{\text{med}} \sim 40 \text{ TeV}$

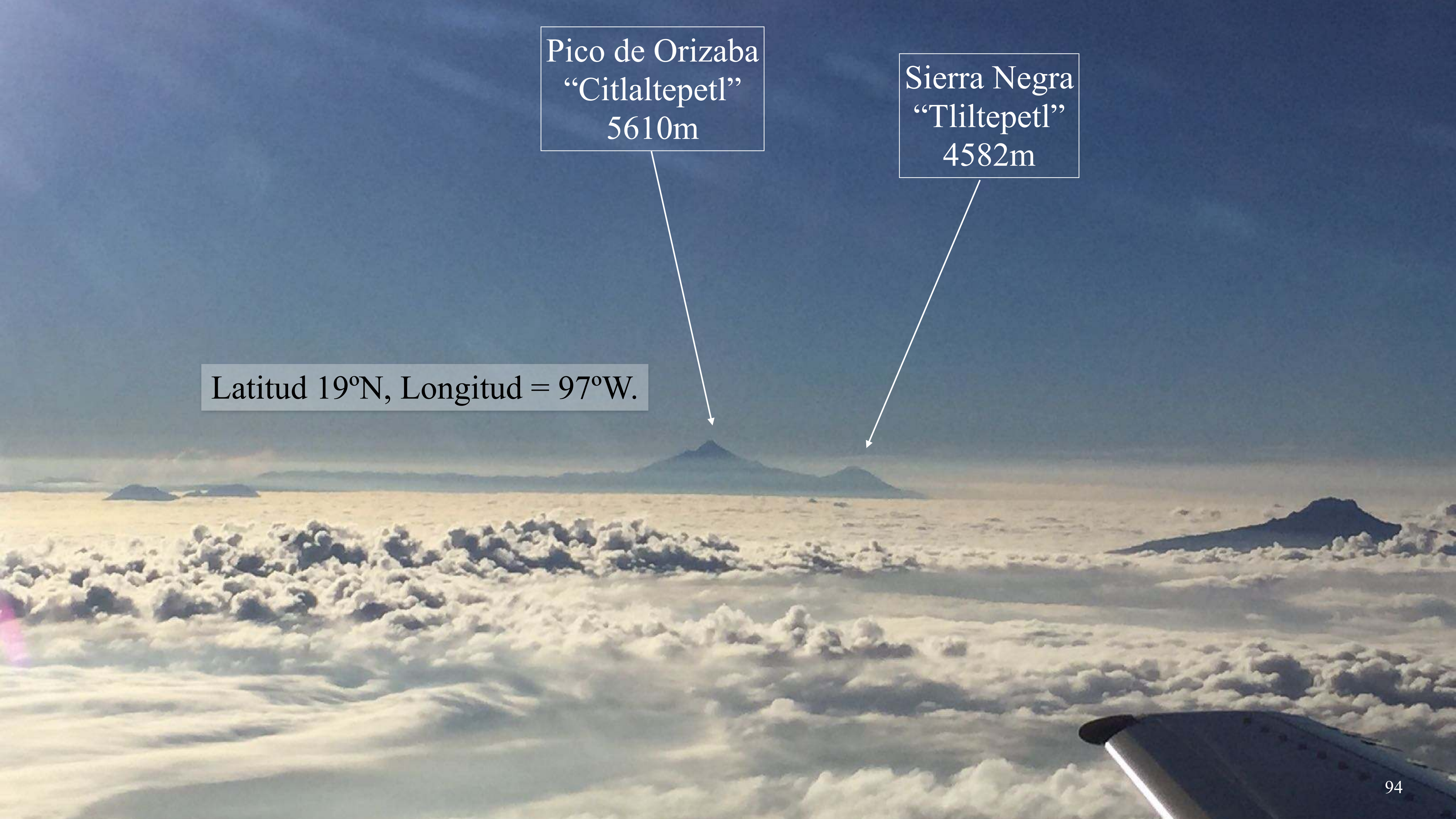




Pico de Orizaba
“Citlaltepetl”
5610m

Sierra Negra
“Tliltepetl”
4582m

Latitud 19°N, Longitud = 97°W.



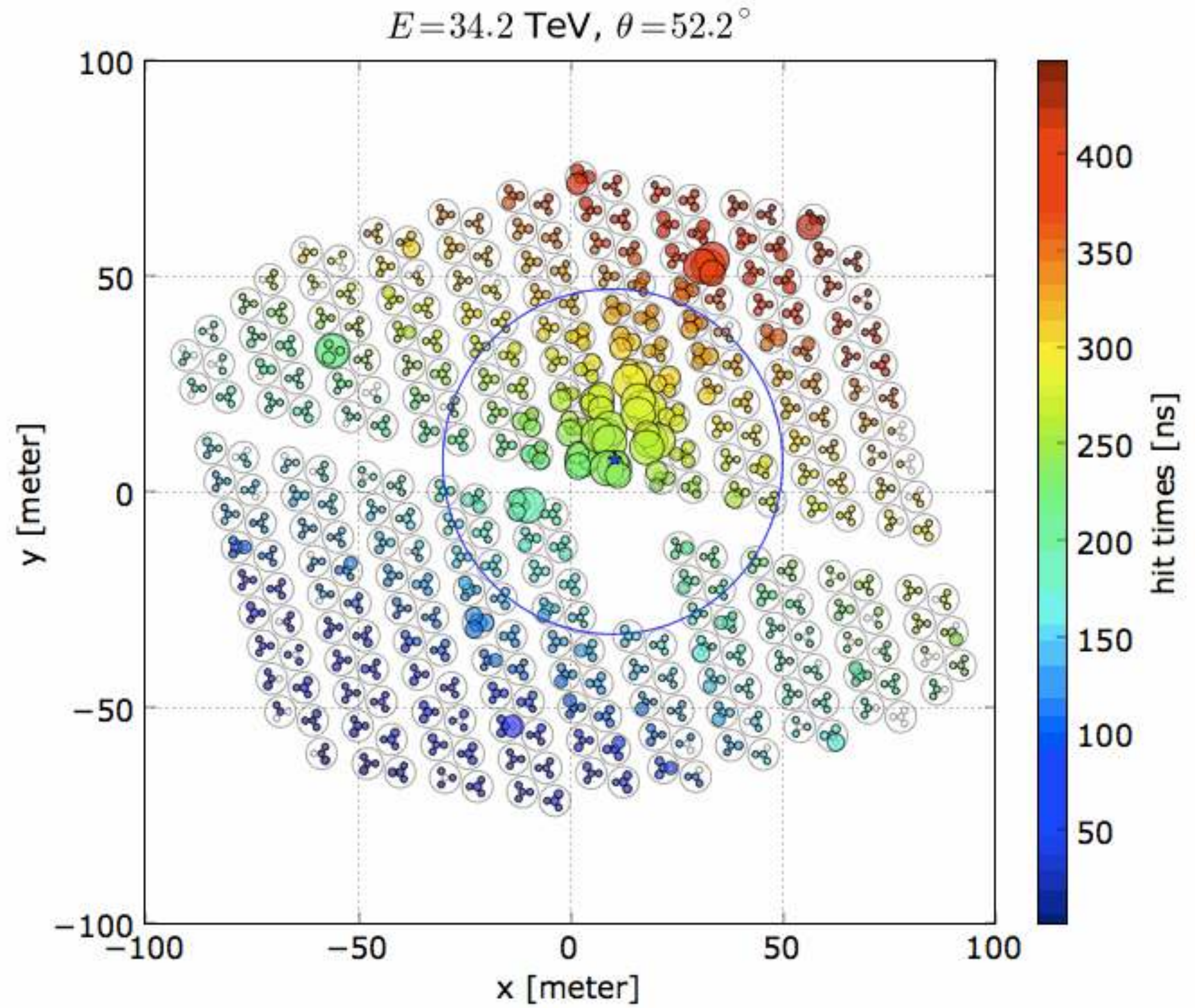
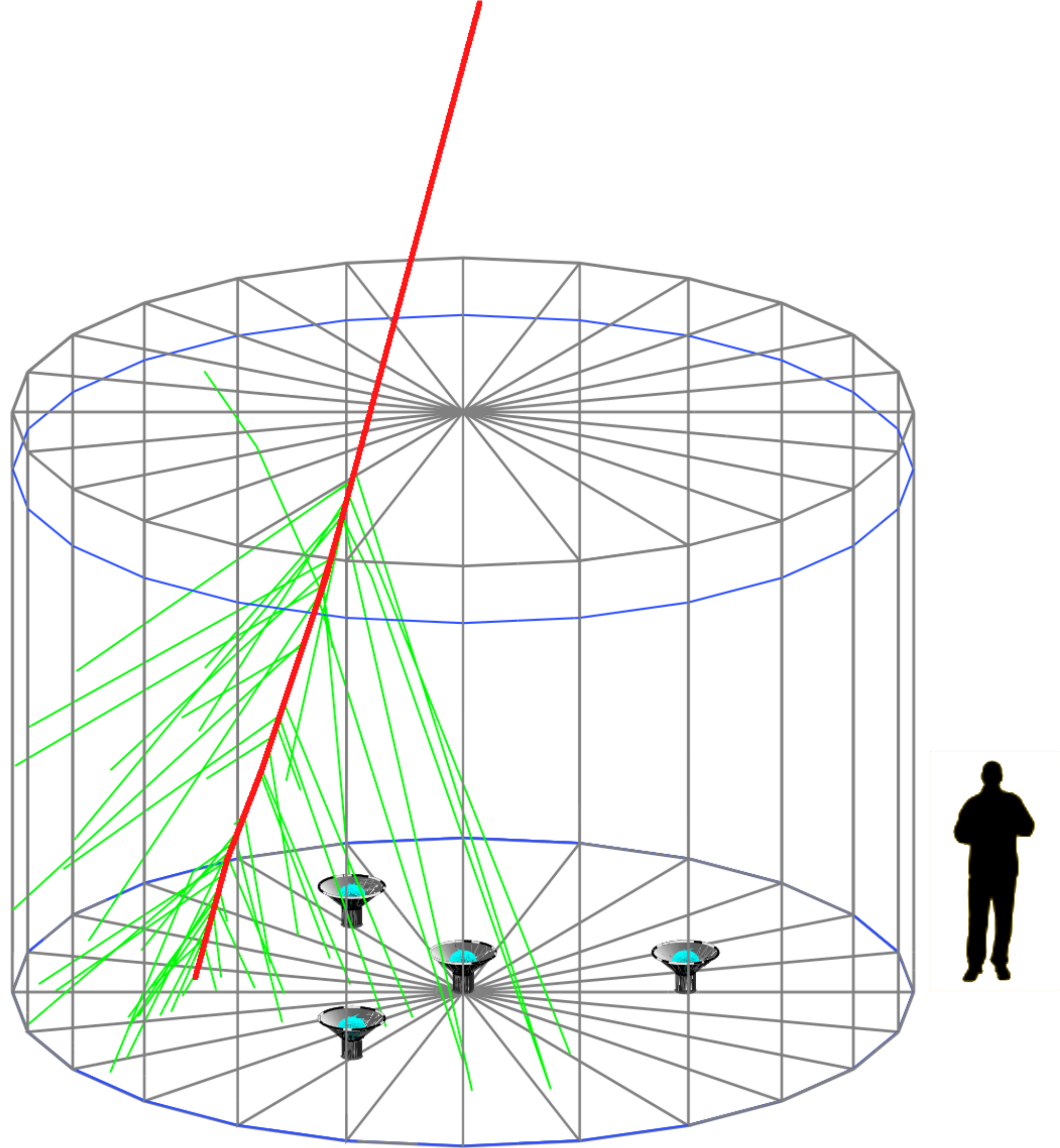
4600m

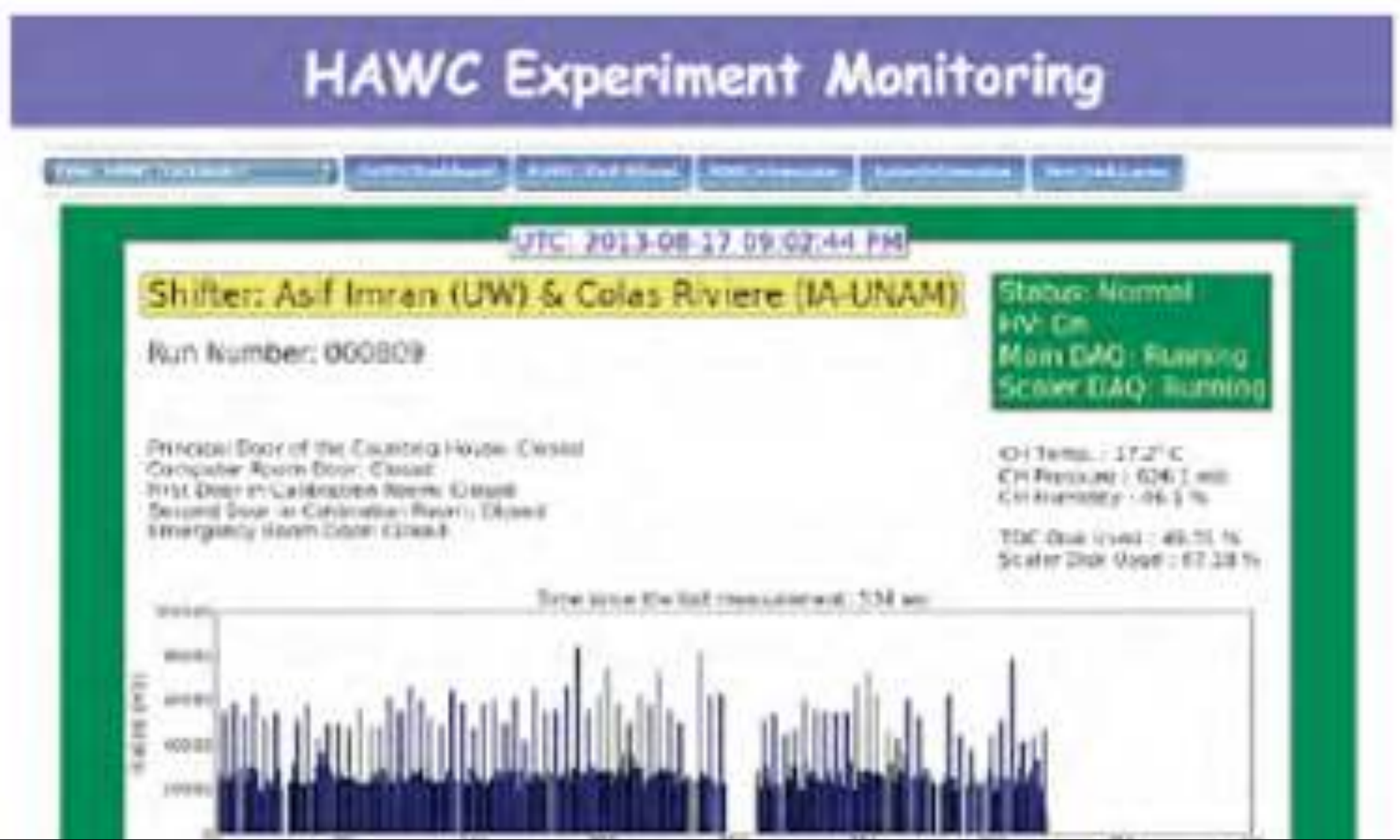
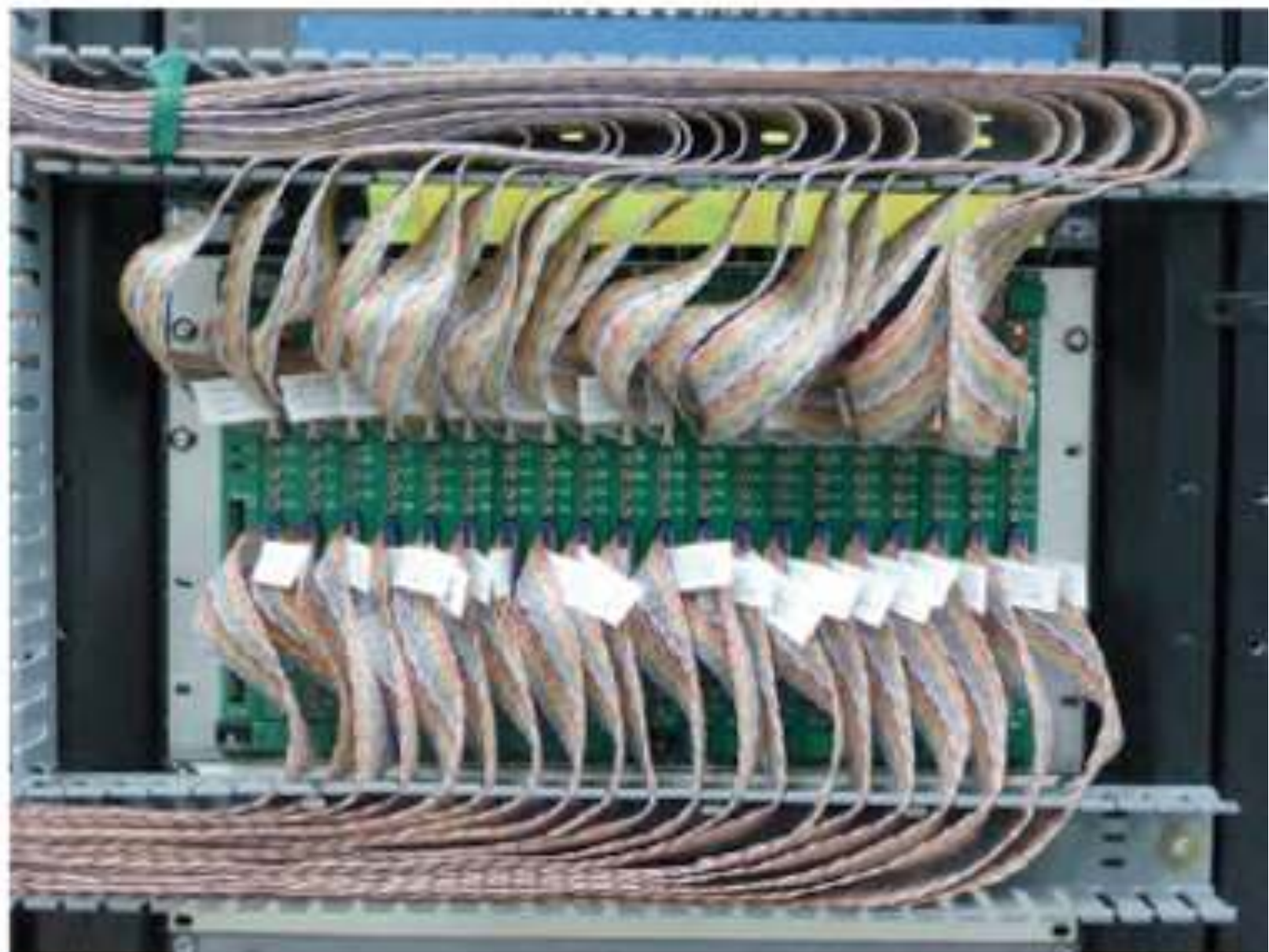


4100m



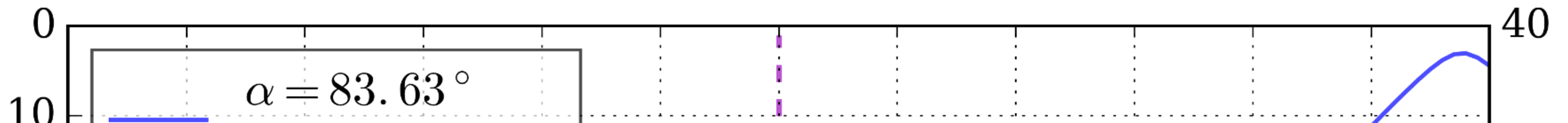
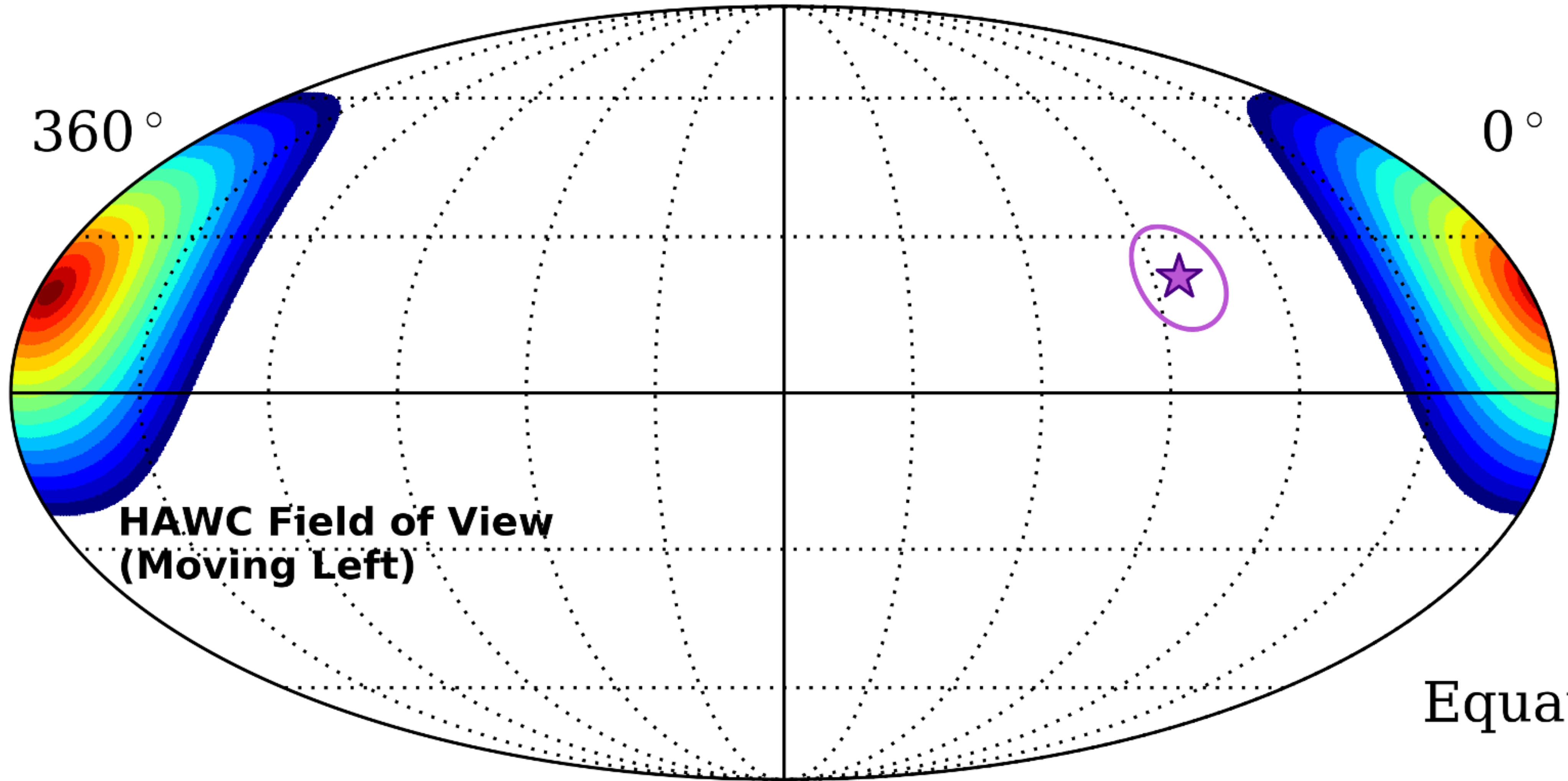


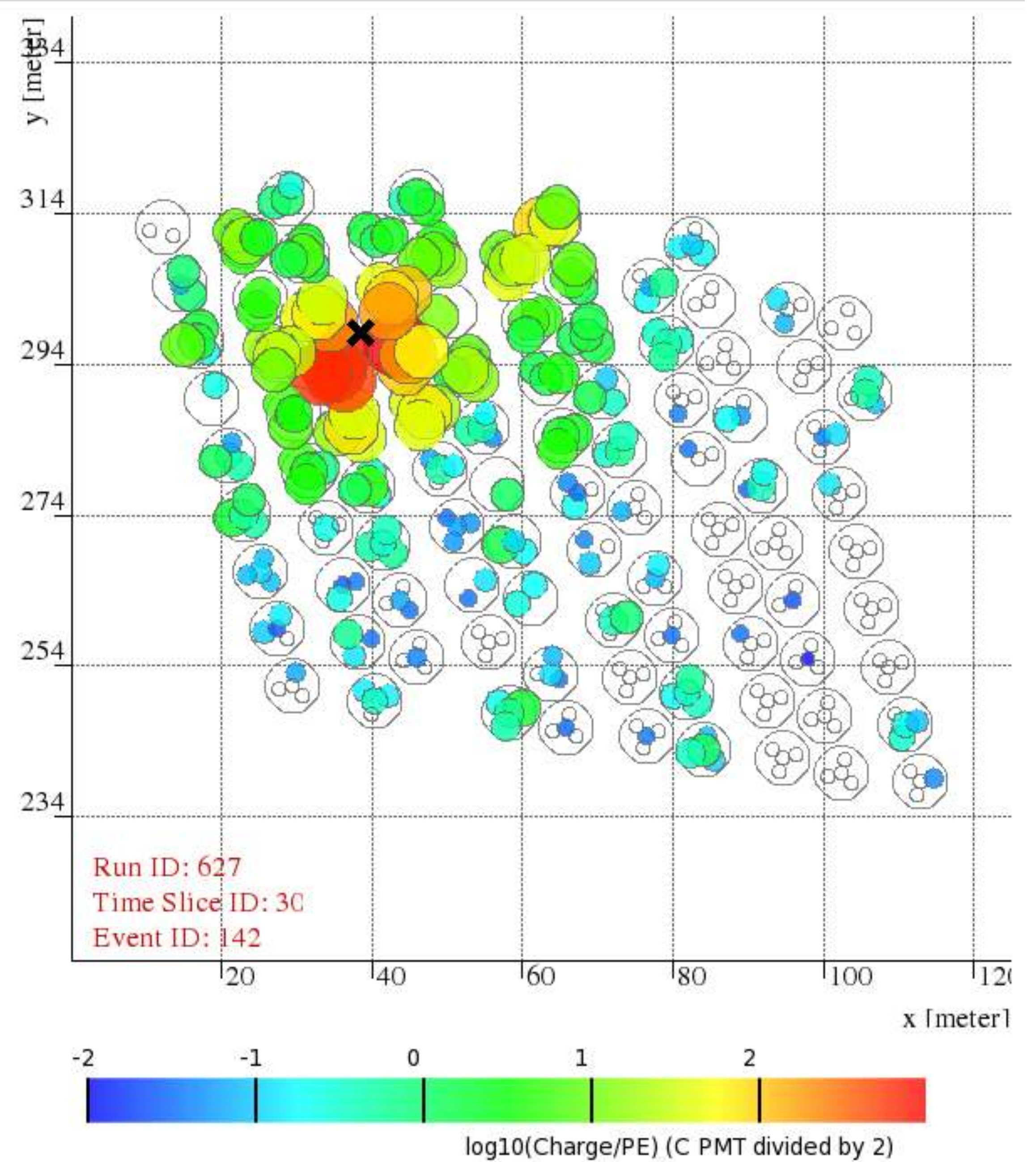
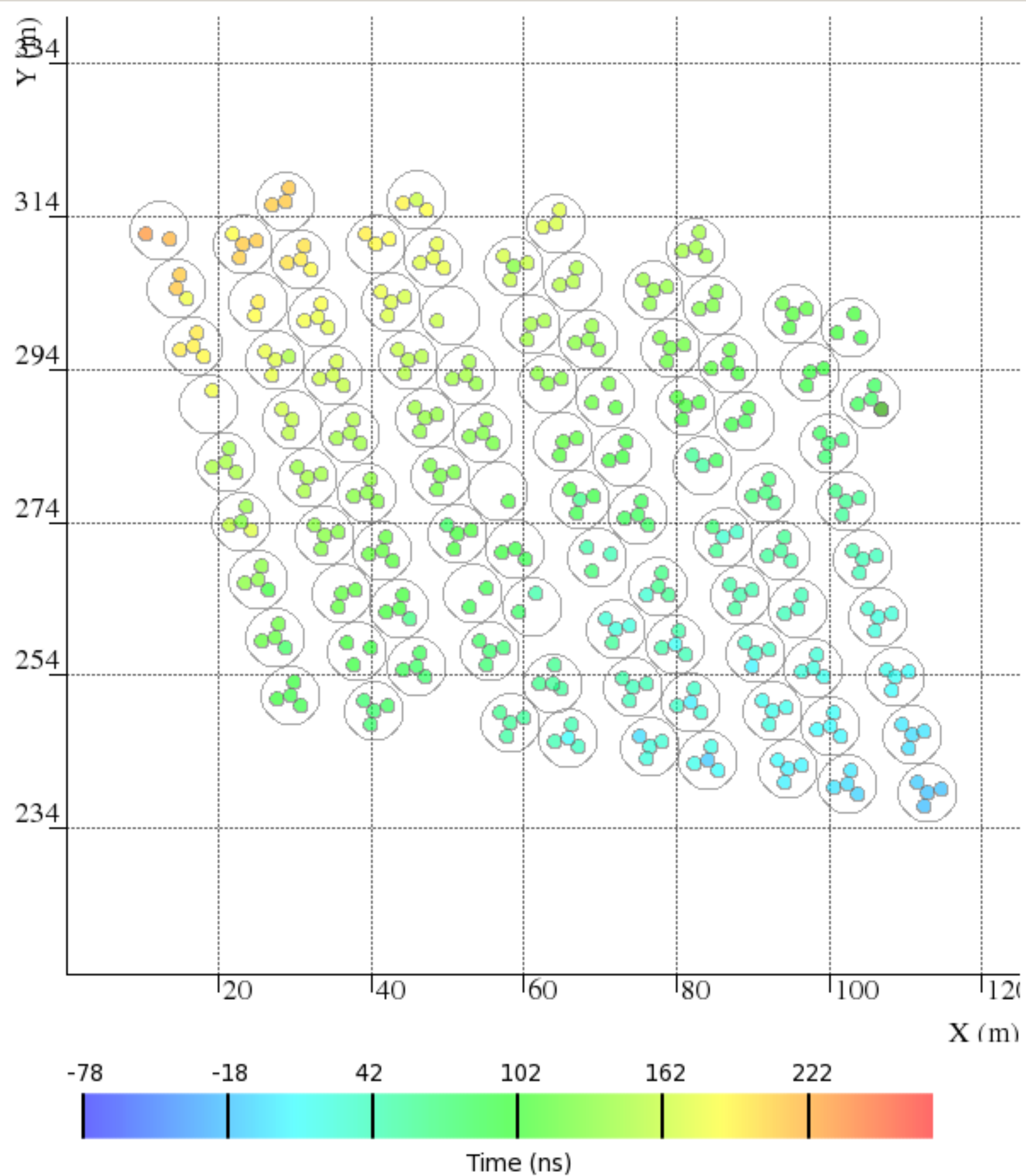




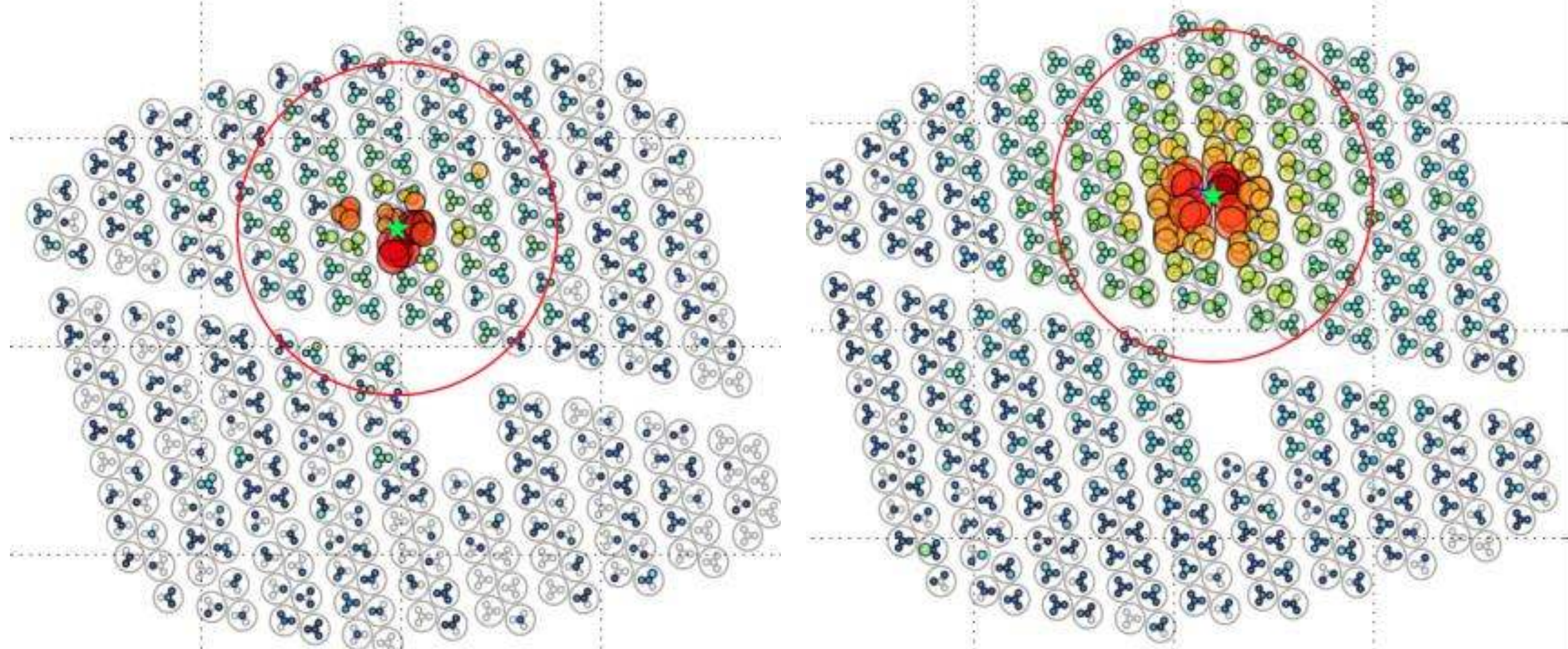
HAWC registra 20,000 rayos cósmicos por segundo, generando 2 Terabytes de datos cada día - todos los días.

2015-12-26 00:00:00 [UTC]

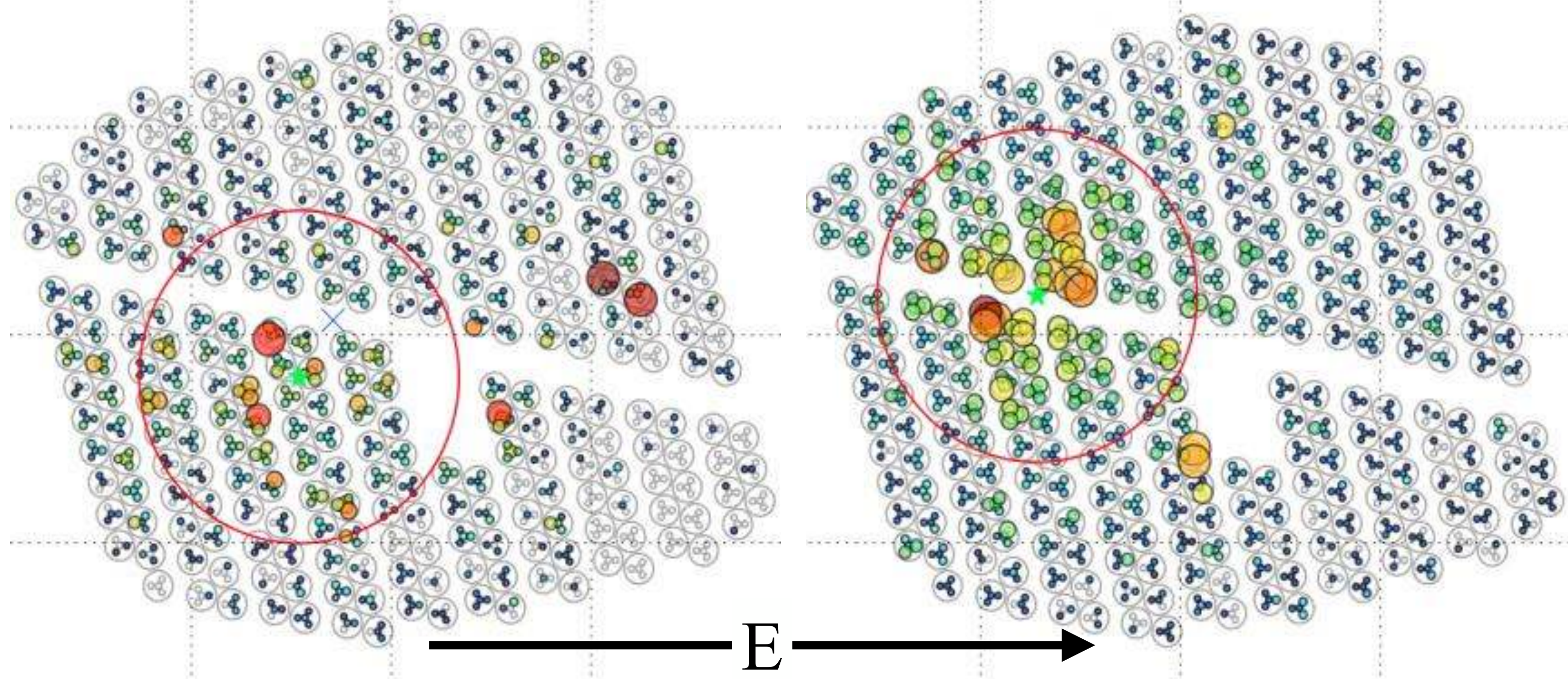




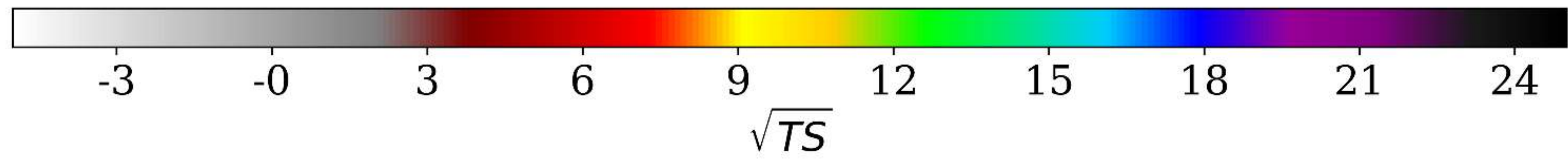
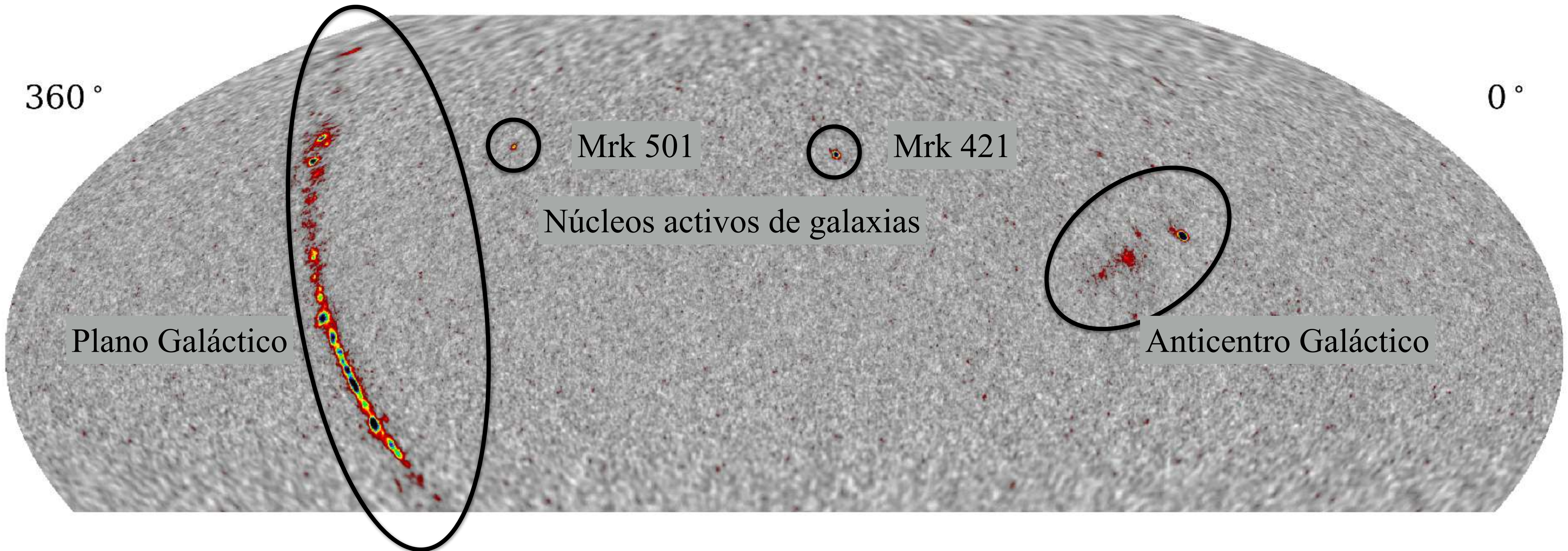
Fotón



Hadrón



All-sky view; 0.0 °; 1523 days

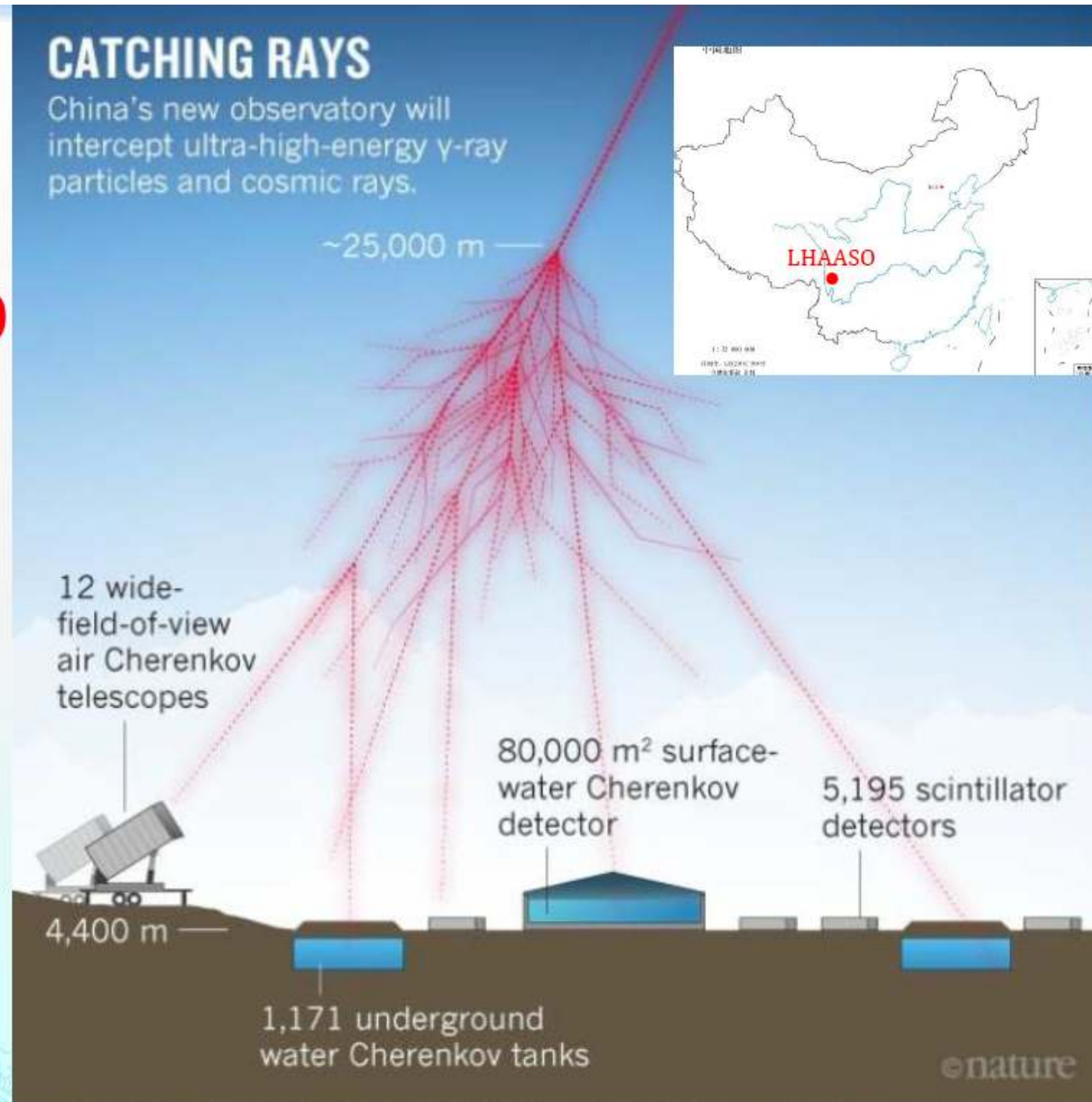




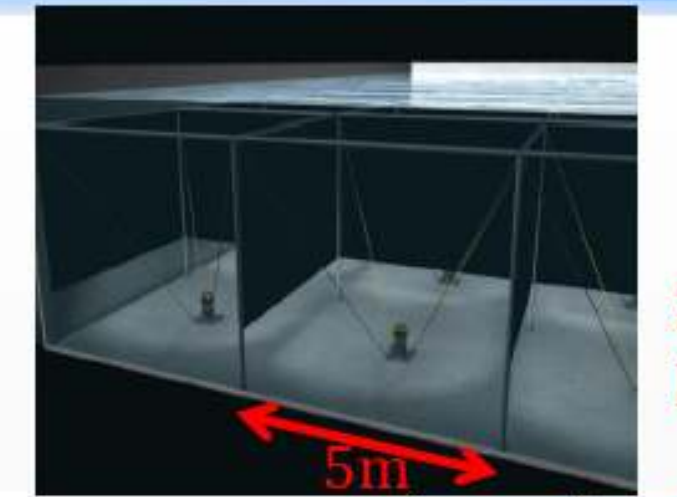
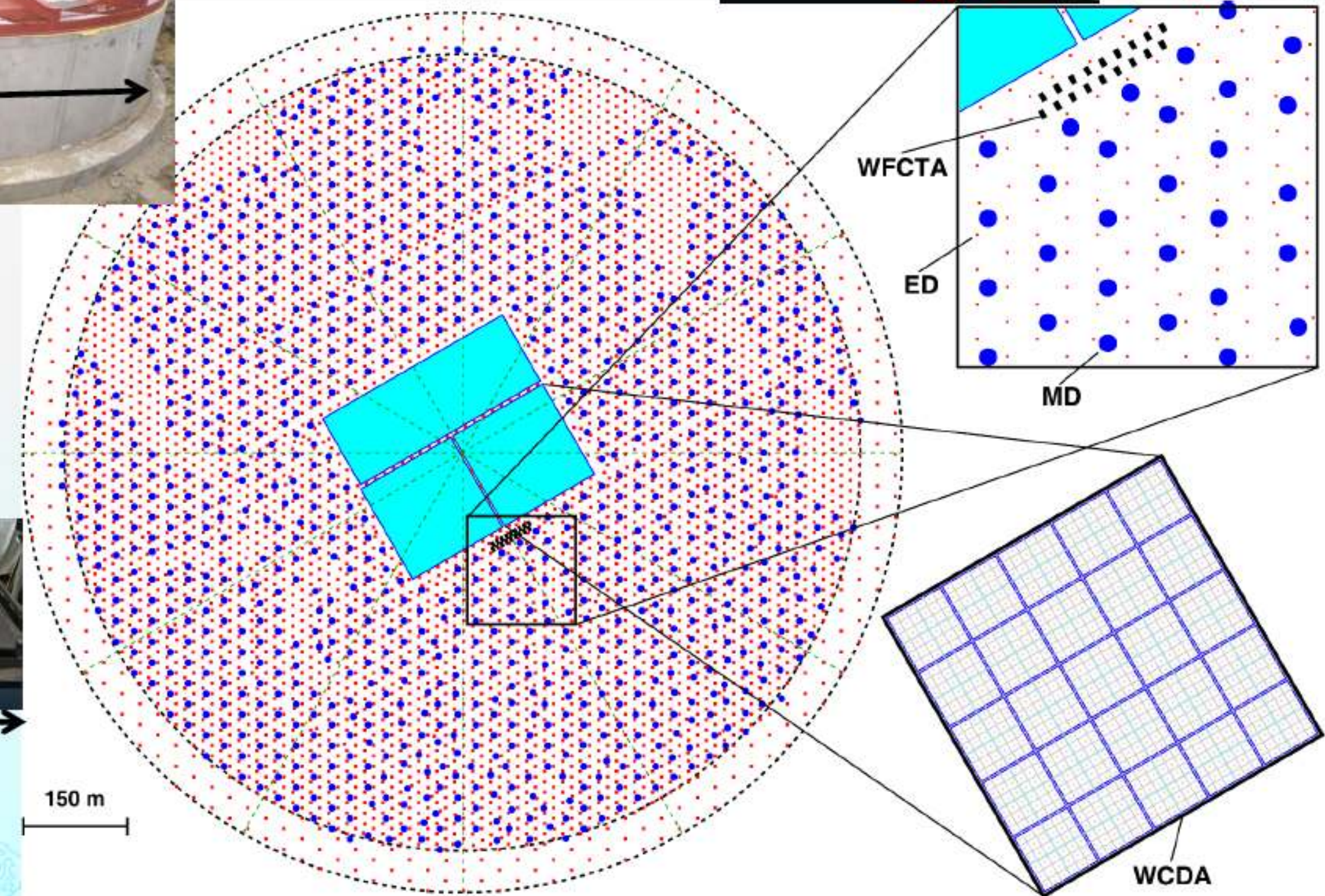
LHAASO



LHAASO
in the eyes of
reporters from
Nature



Detector Layout in LHAASO



Observatorios de rayos γ a gran altura



¡Fin de la parte 2!

Astrofísica de rayos gamma

1. Rayos cósmicos.
2. Rayos gamma: producción, bandas astrofísicas y observatorios.
3. Fuentes de rayos gamma en la Galaxia.
4. Fuentes de rayos gamma más allá de la Galaxia.

