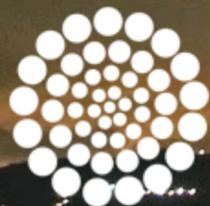




Astrofísica de rayos gamma

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 - julio 2021

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: introducción, bandas astrofísicas y observatorios.

3. Fuentes de rayos gamma en la Galaxia.

4. Fuentes de rayos gamma más allá de la Galaxia

1. Rayos cósmicos

- Descubrimiento y naturaleza.
- Espectro, detectores y cascadas atmosféricas.
- Propagación y aceleración.
- Energías ultra altas (UHE).

30th INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE
3-11 July 07 Mérida Yucatán México

INTERNATIONAL ADVISORY COMMITTEE
S. Swordy (USA), Chair
J. F. Valdés Galicia (México), Vice-Chair
J. H. Heintz (Germany), Secretary
E. Berezhko (Russia)
E. De Jager (South Africa)
H. Kueckiger (Switzerland)
P. Lipari (Italy)
Ma. Yu Qulan (China)
Y. Suzuki (Japan)
S. Tanwar (India)
B. Dawson (Australia)

NATIONAL ORGANIZING COMMITTEE
J.F. Valdés Galicia, Chair
A. Carramiñana
A. Menchaca
A. Hurtado
A. Lara
C. Acosta
D. Maravilla
E. Chavez
F. Sánchez
G. Medina-Tanco
H. Salazar
J. A. González
J. C. D. Olivo
J. Pérez-Peraza
L. X. González
L. Mironshchenko
L. Naiten
L. Villaseñor
M. González
M. de Cos
O. Martínez
O. Musalem
R. Caballero
R. Huerta
R. Pérez-Enríquez
V.M. Velasco

SCIENTIFIC PROGRAM COMMITTEE
Adrián Rovero (Argentina)
Alberto Carramiñana, OG Chair (México)
Alejandro Echegoien (Argentina)
Antonio Lara (México)
Arturo Leticia-Sevón (Brasil)
Dany Page (México)
Dolores Rodríguez (México)
Gustavo Rodríguez (Spain)
Humberto Medina Tanco, HE Chair (México)
Jorge Pérez Peraza, Contributed Papers, Chair (México)
José F. Valdés Galicia (México)
José Bellido (Australia)
Juan Américo González (México)
Leonny Mironshchenko (México)
Luis del Peral (Spain)
Luis Villaseñor (México)
Magda González (México)
Manuel Martínez (Spain)
Marco Martín (Spain)
Miguel Mostafa (USA)
Oscar Martínez (México)
Ropella Caballero, SH Chair (México)
Román Pérez Enríquez (México)
Teresa Dova (Argentina)

Scientific Secretariat:
Instituto de Geofísica U.N.A.M.
Circuito de la Investigación Científica, C.U.,
Coyoacán C.P. 04510, MEXICO
Tel: + 5255 5556 1623 +5255 5622 4122
Fax: + 5255 5550 2486
E-mail: icrc2007@icrc2007.unam.mx
Web: http://icrc2007.unam.mx

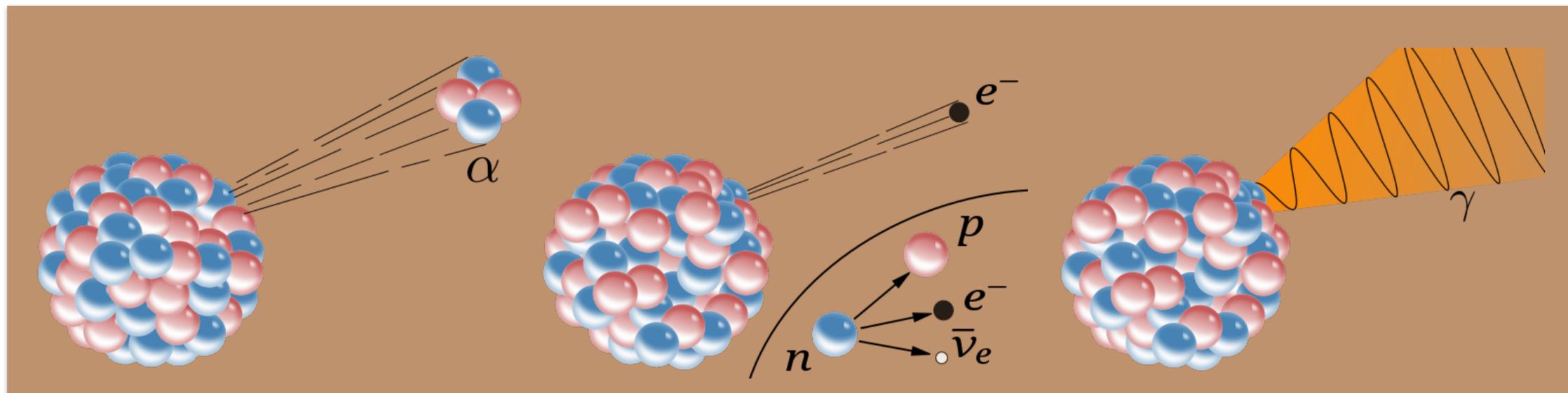
SPONSORS:
IUPAP, UNAM, CONACYT, INAOE,
BUAP, CINVESTAV, UADY, UMSNH

A composite image of a Cosmic Ray Shower falling on an ancient Mayan observatory.

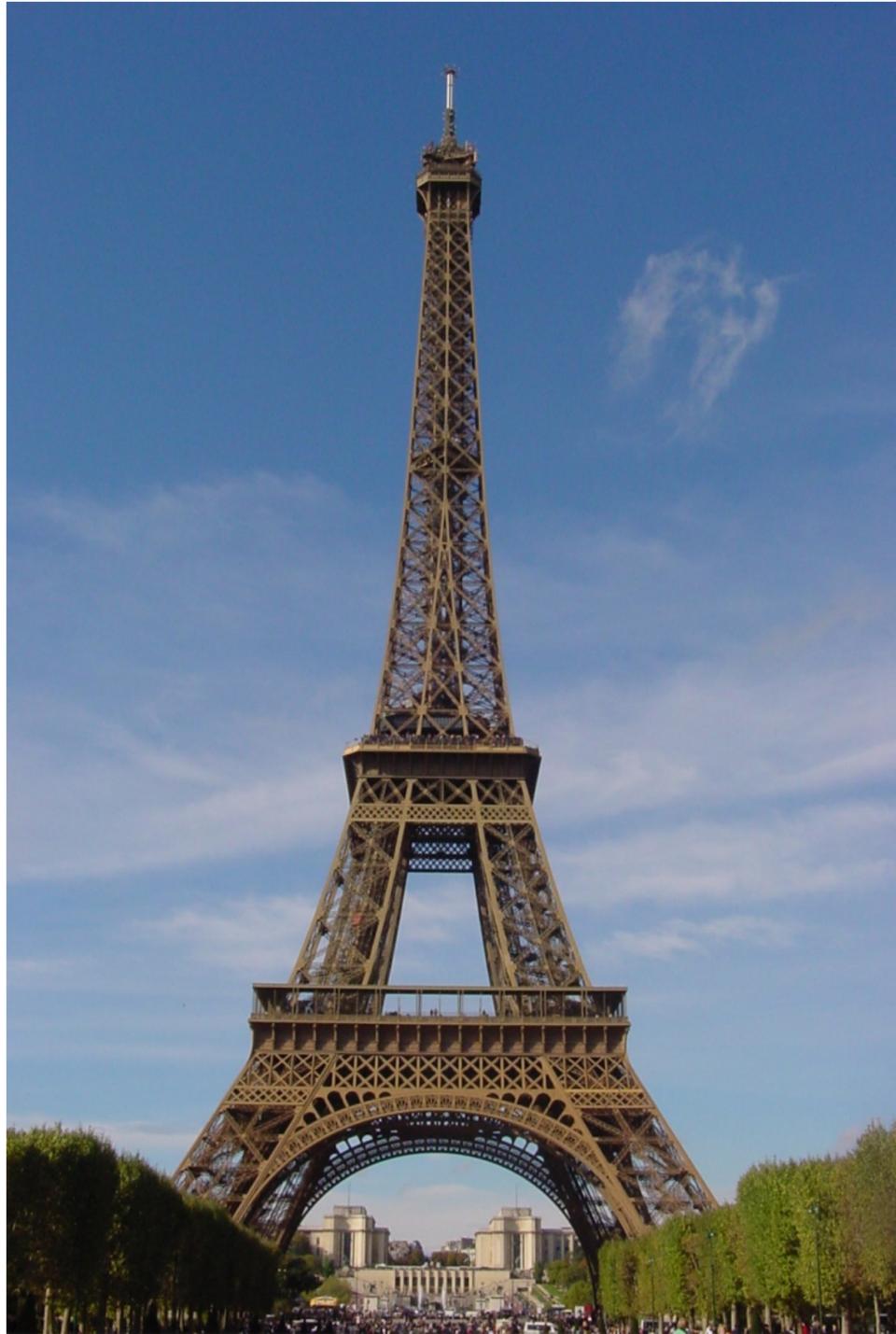
Design: Mara Sober, Luis Felipe Núñez.

Descubrimiento de los rayos cósmicos

- Alrededor de 1785 Coulomb observó la descarga espontánea de electros copios.
- A finales del siglo XIX se mostró que la tasa de descarga disminuye con la presión, asociando la descarga al aire.
- Elster & Geitel (1900) muestran que la radioactividad causa un exceso de ionización en el ambiente.



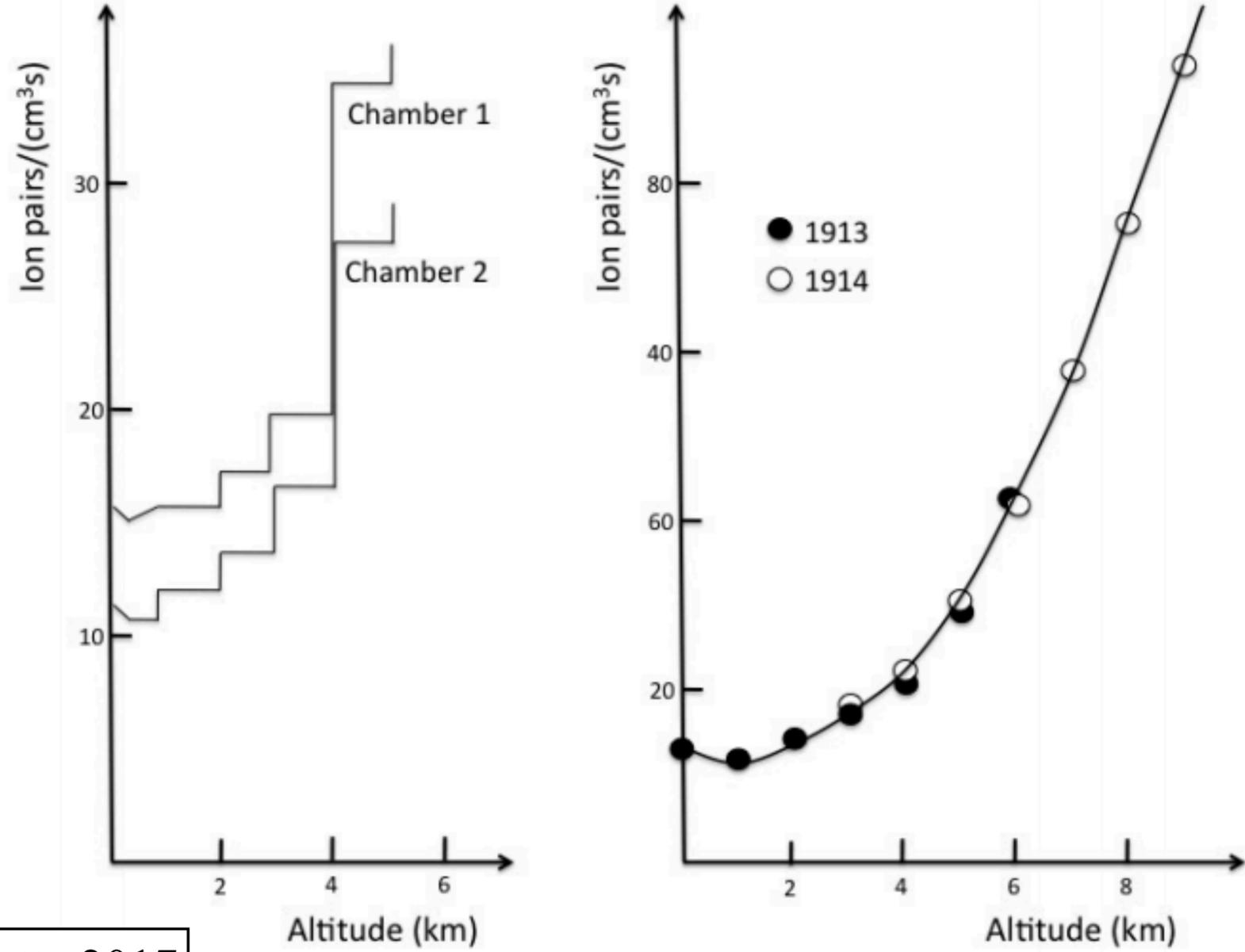
De Angelis - arxiv 1208.6527



Theodor Wulf 1910

Victor Hess 1912



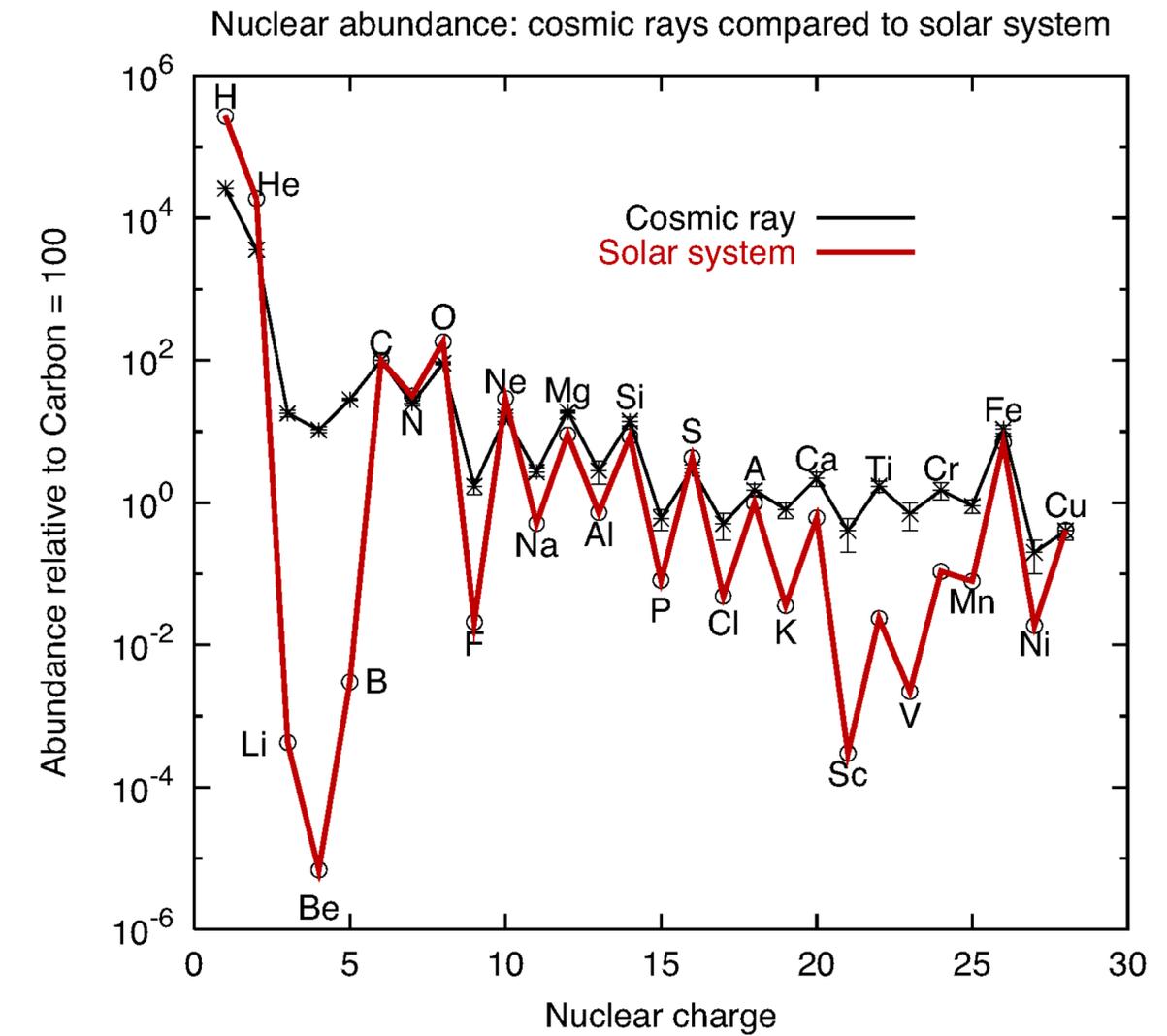
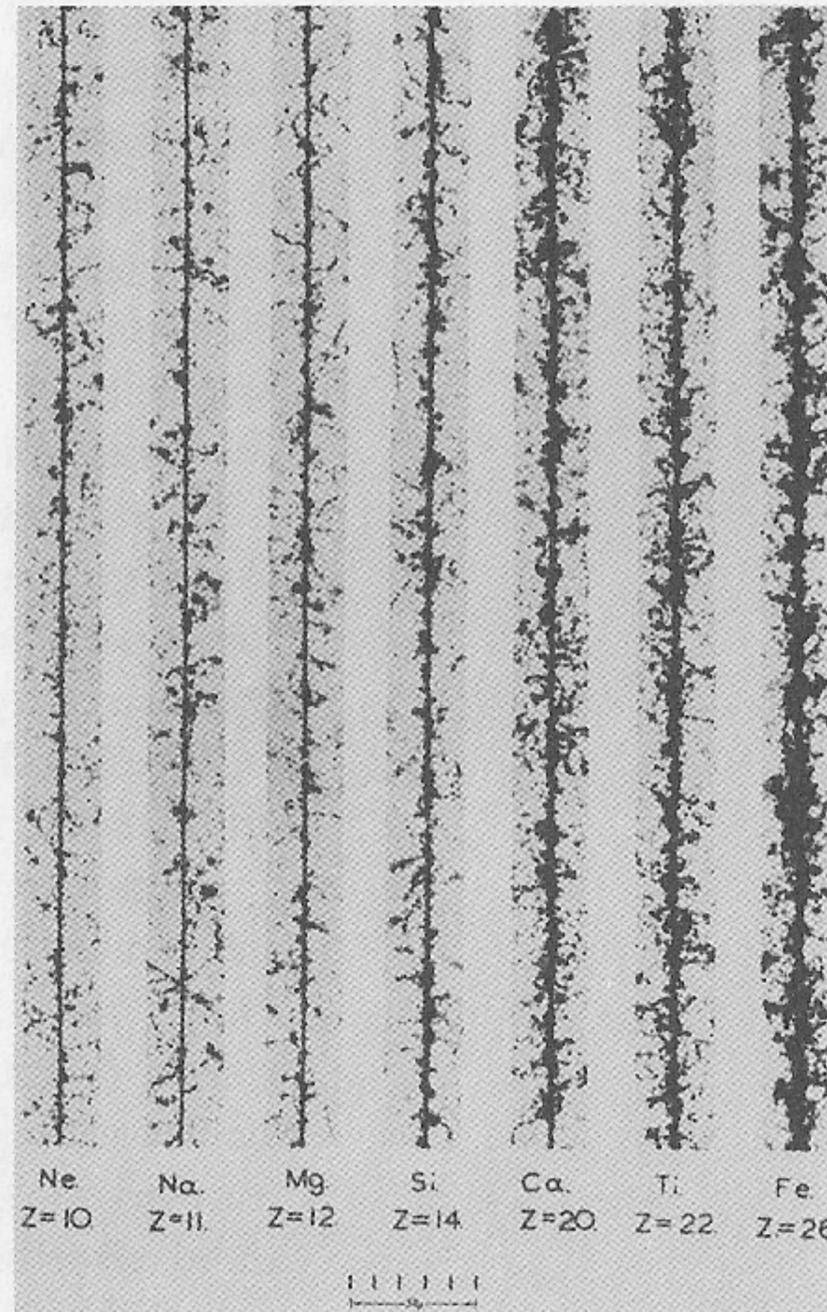
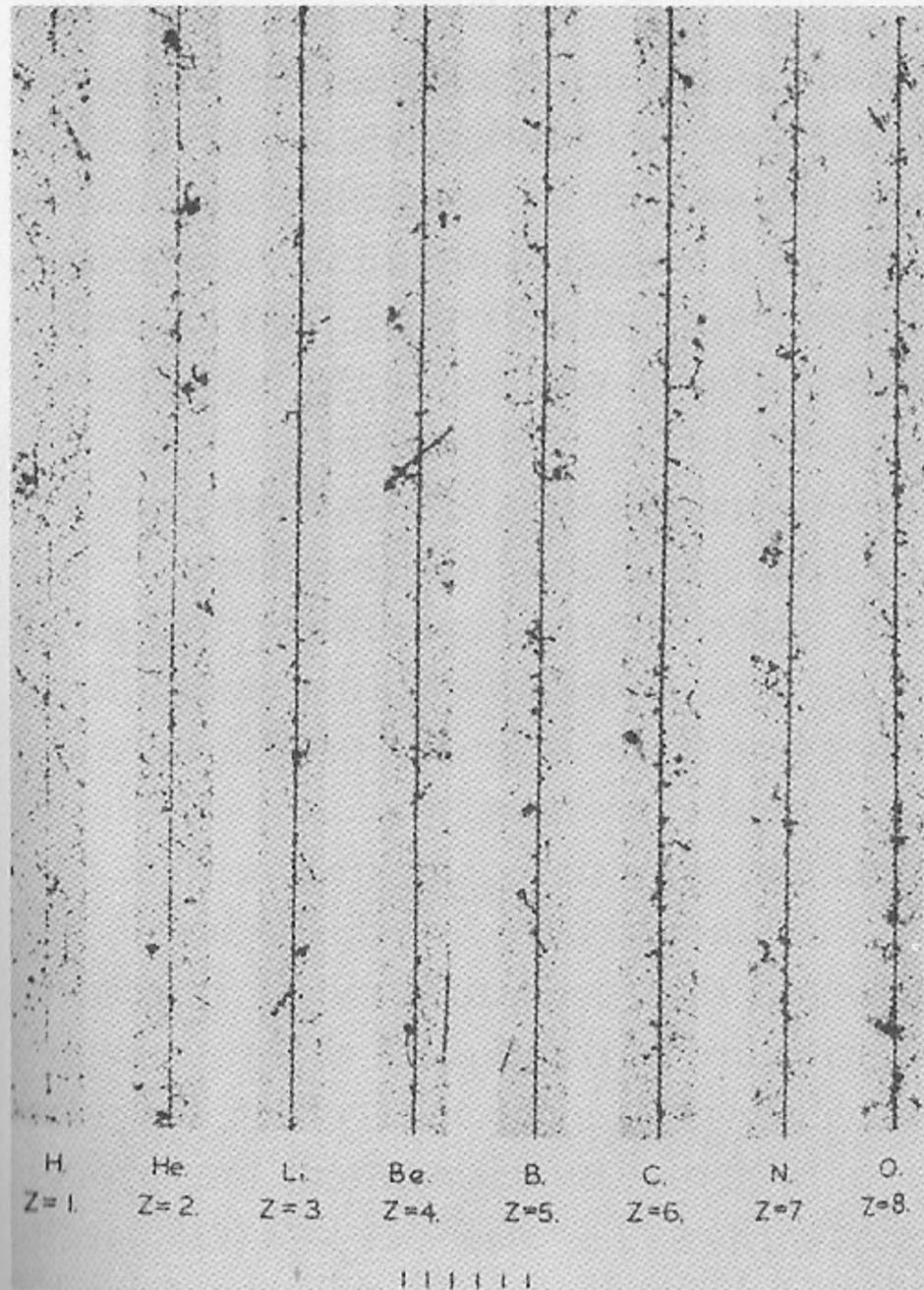


Panetta 2017

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

Radiación cósmica





Los rayos cósmicos son núcleos atómicos de muy alta energía:

- El 90% protones (H)
- El 9% helio (α)

“Cosmic rays”, Friedlander (1989)

Partículas elementales

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

- El positrón fue descubierto por Carl Anderson (1932), a la par del desarrollo de la teoría del electrón (Dirac 1928).
- El muón por Anderson y Neddermeyer (1936), coincidiendo con la propuesta de Yukawa (1936).
- El pión (mesón π) por Powell & Occhialini en 1947.
- Registro de más partículas: K^\pm , K^0 , Λ , Ξ , Σ , ...

En los 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		

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

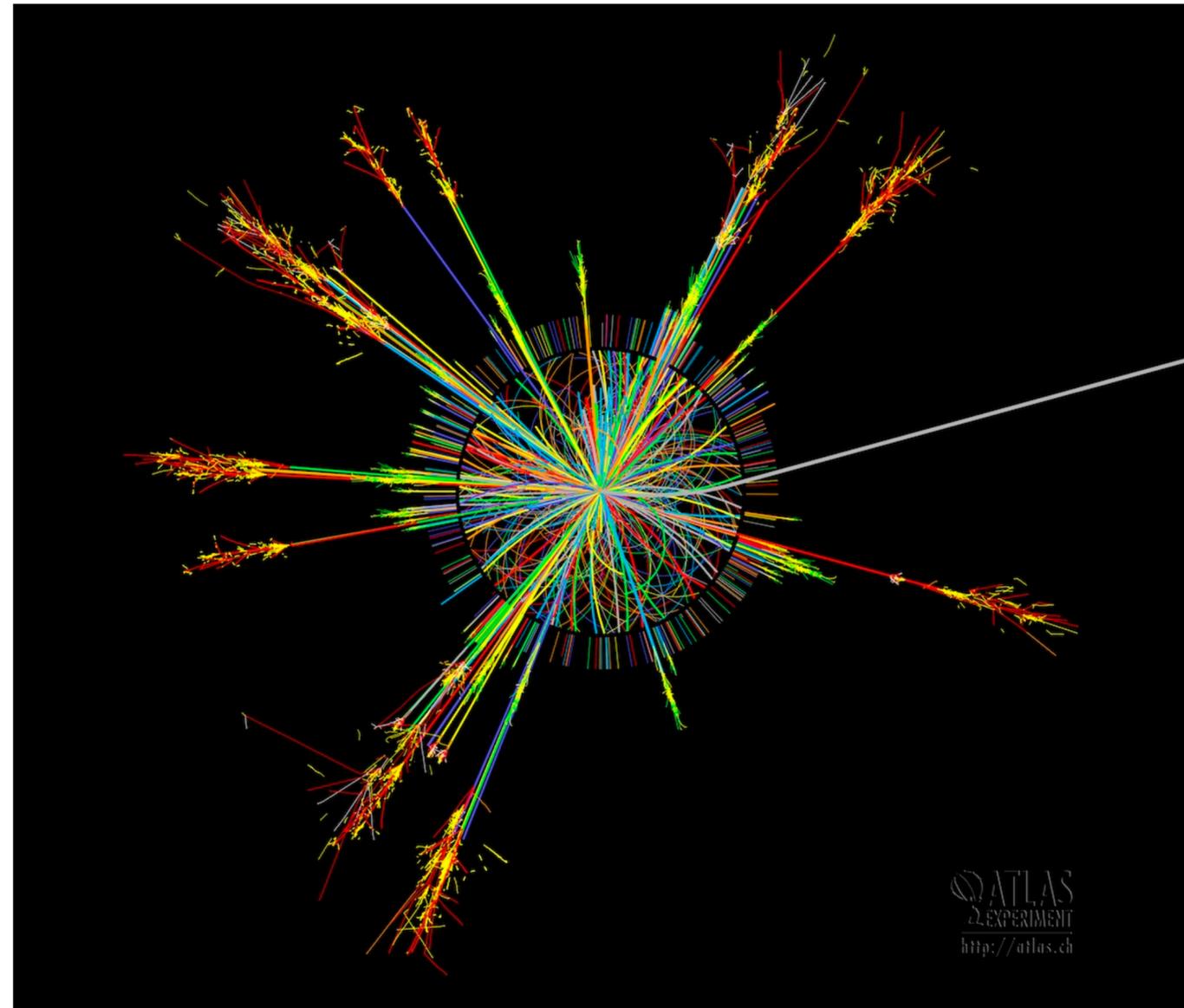
$$\pi^+ = ud$$

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

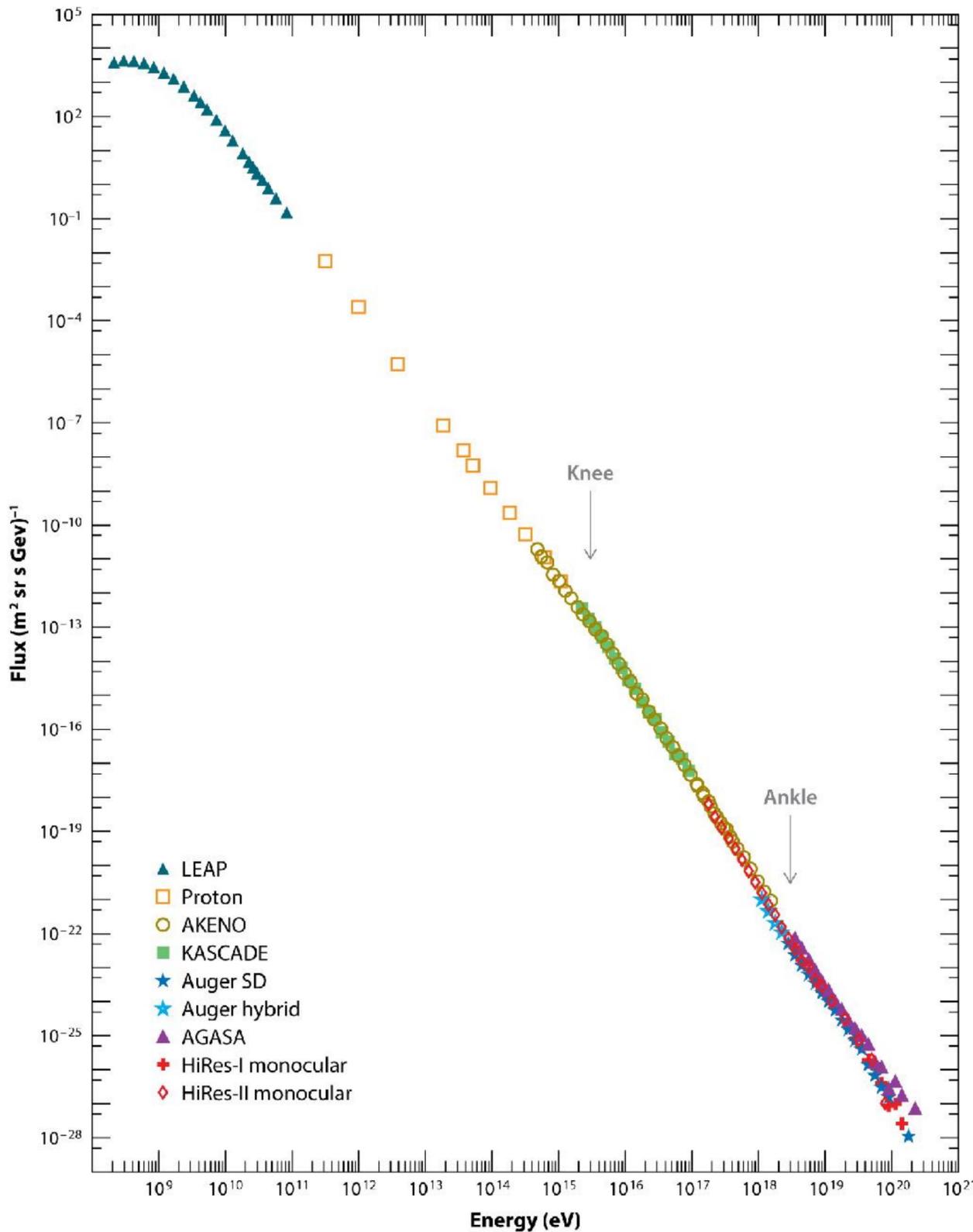
$$n = udd\bar{d}$$

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

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



Espectro



- Los rayos cósmicos siguen un espectro en ley de potencias (doce órdenes de magnitud en energía).

- Espectro de protones:

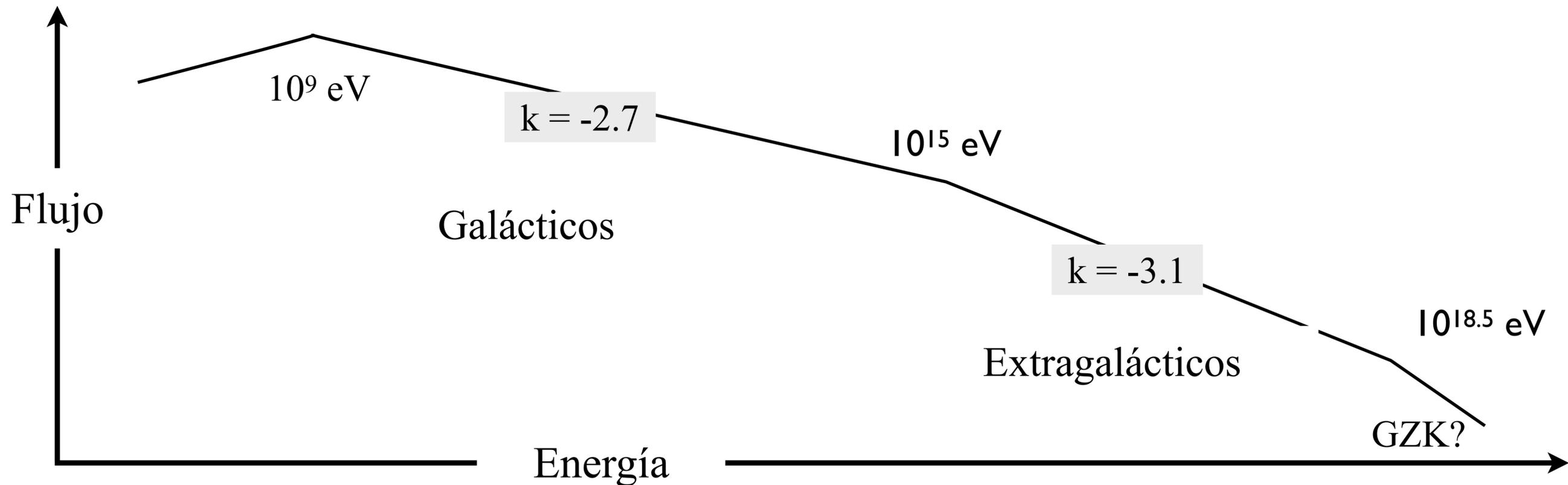
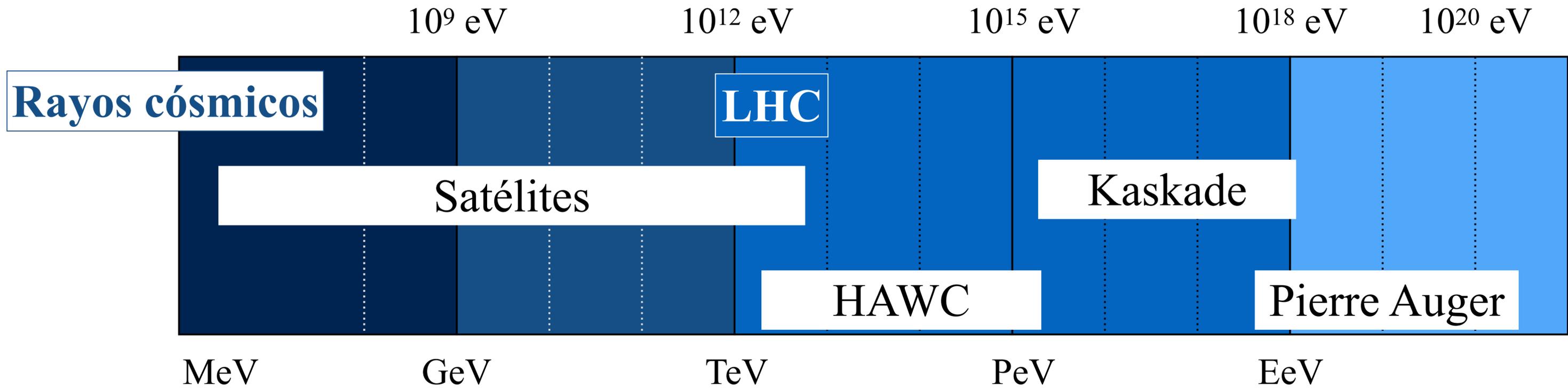
$$J_p(T_p, \Omega_p) = 2.2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ GeV}^{-1} \text{ sr}^{-1} E_p^{-2.75}$$

- Densidad de energía:

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

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

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





Plastic Scintillator Detector

Silicon-Tungsten Tracker

BGO Calorimeter

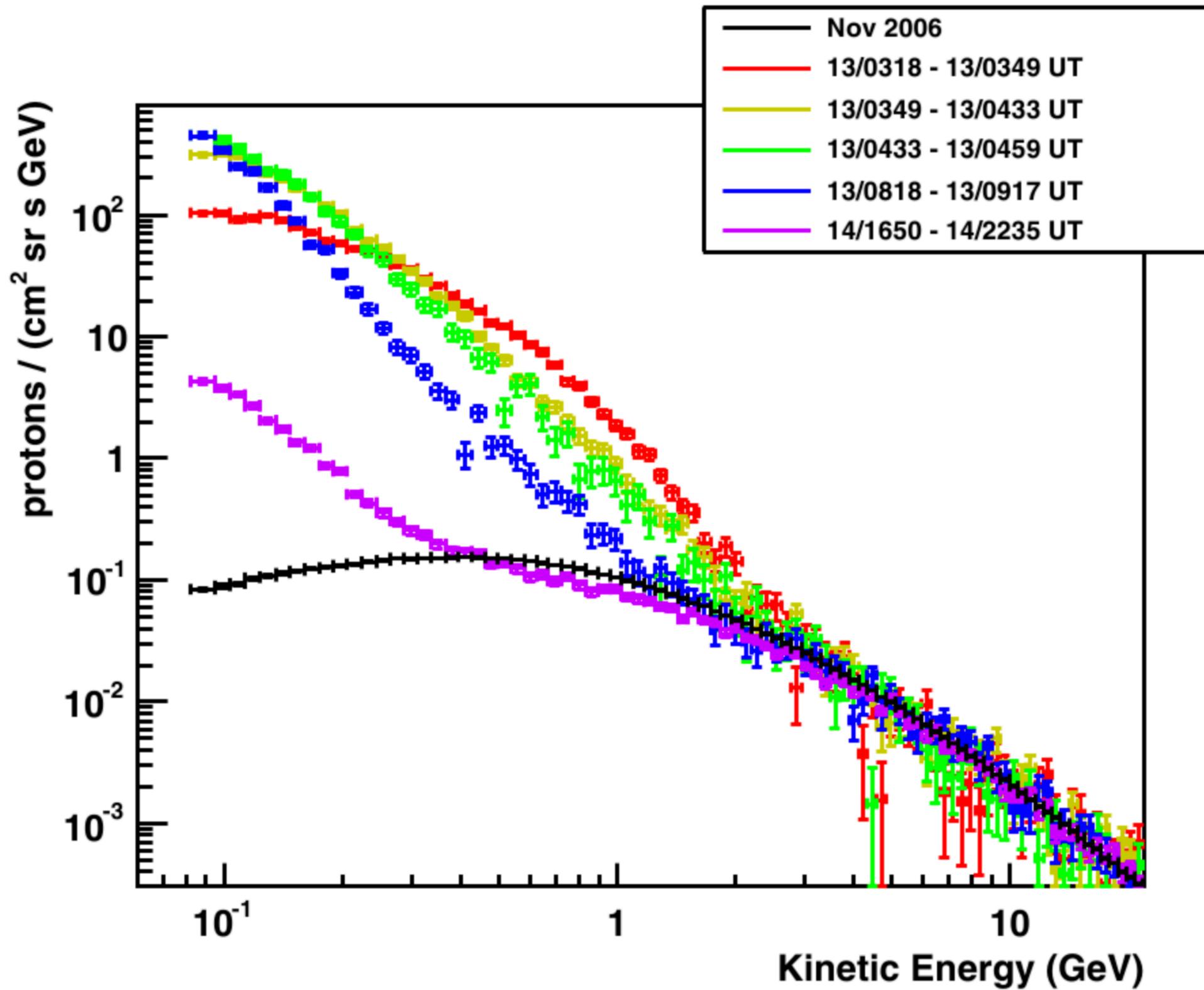
Neutron Detector

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

Dark Matter and Particle Explorer

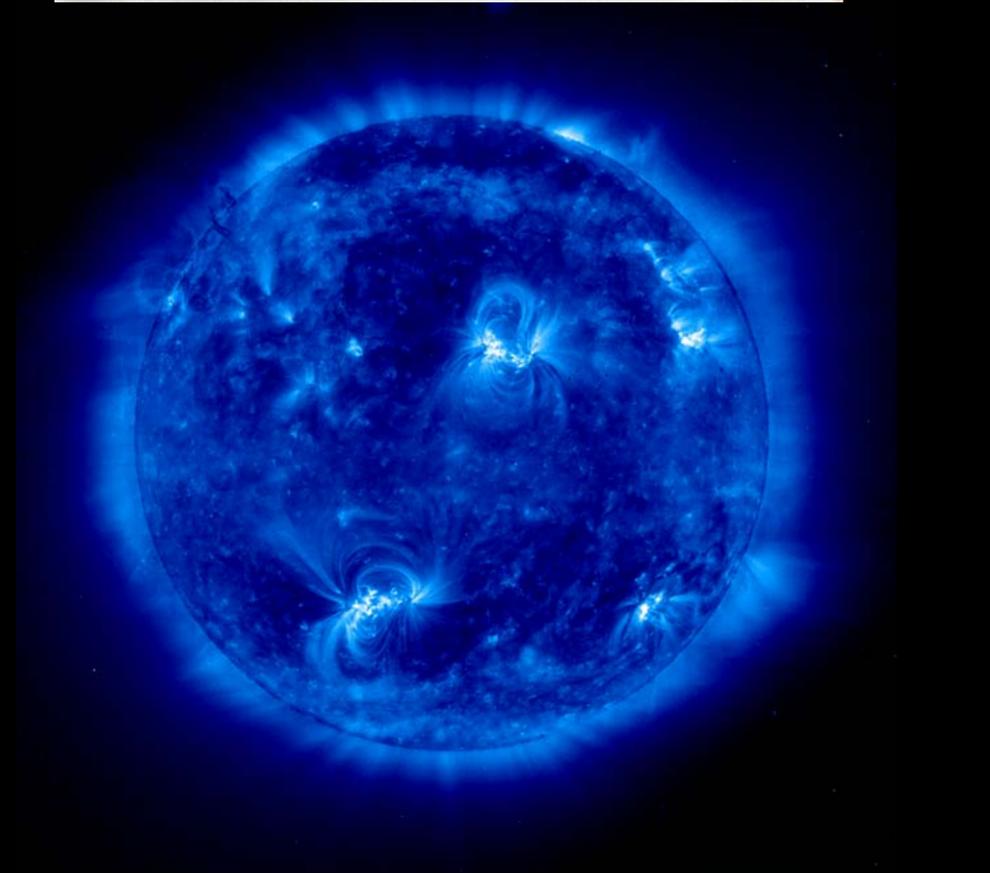
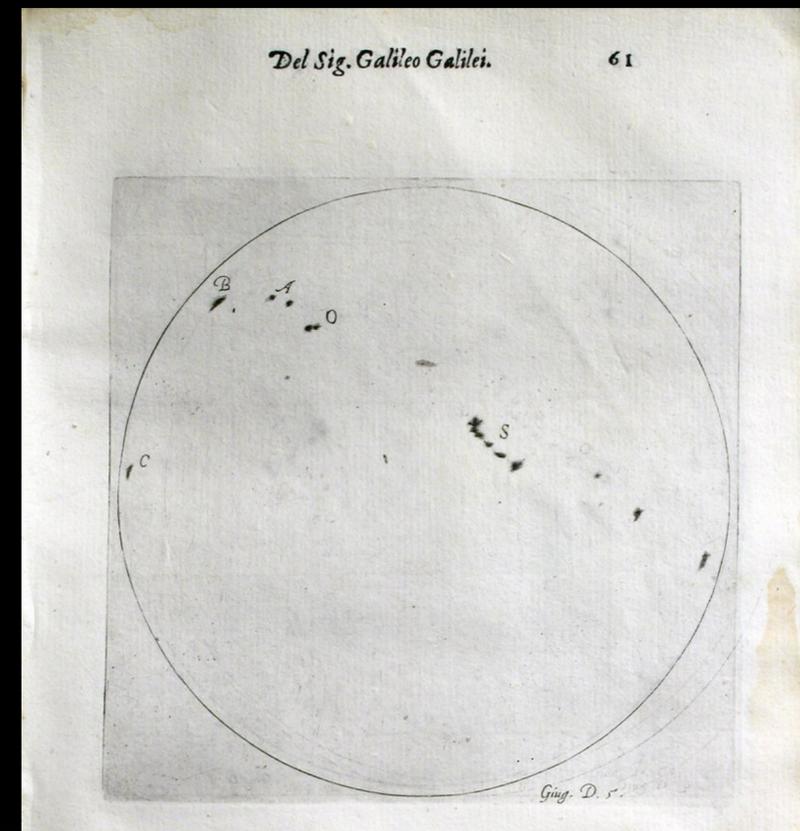


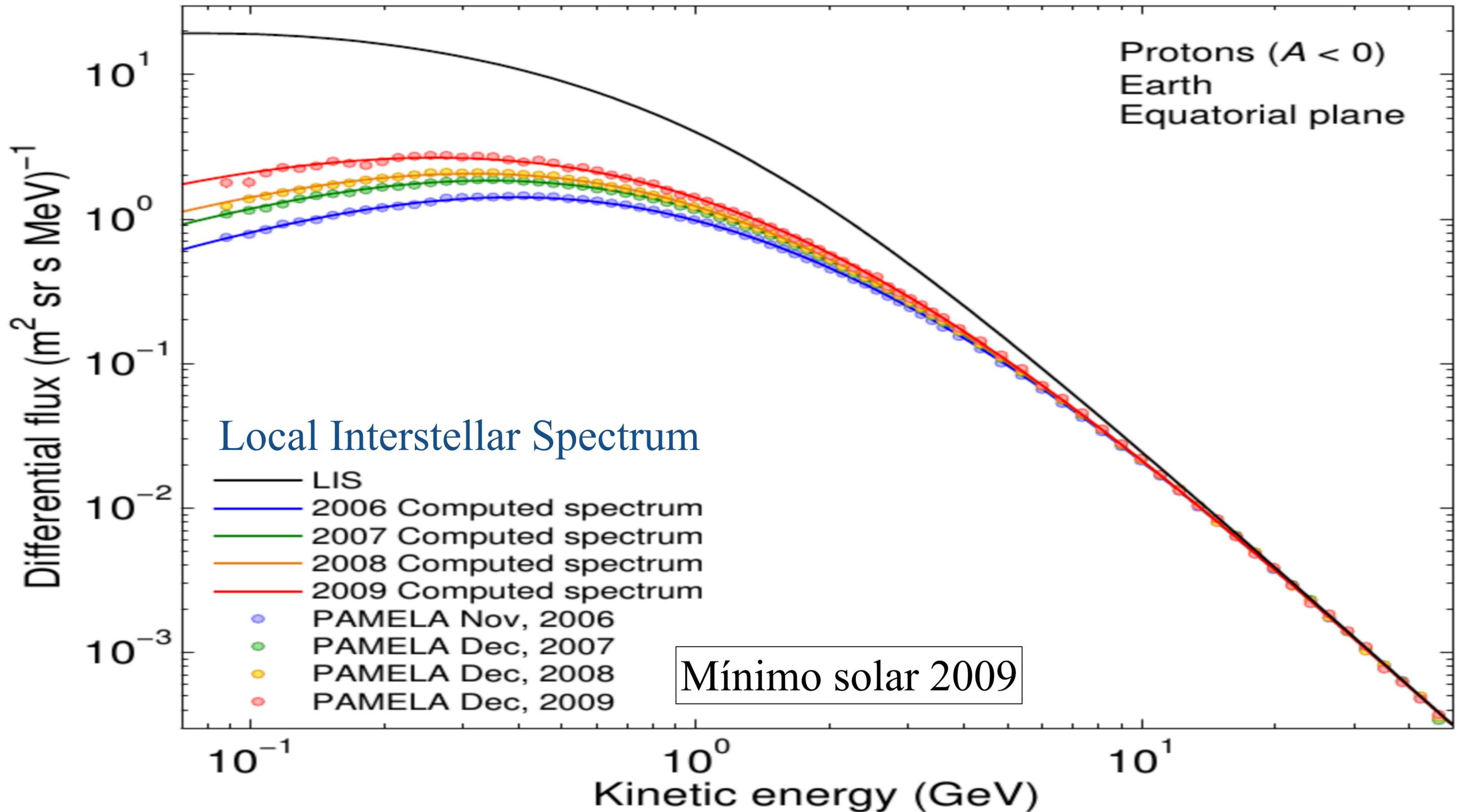
Image: Chinese Academy of Sciences / DAMPE Collaboration Item 1 of 17

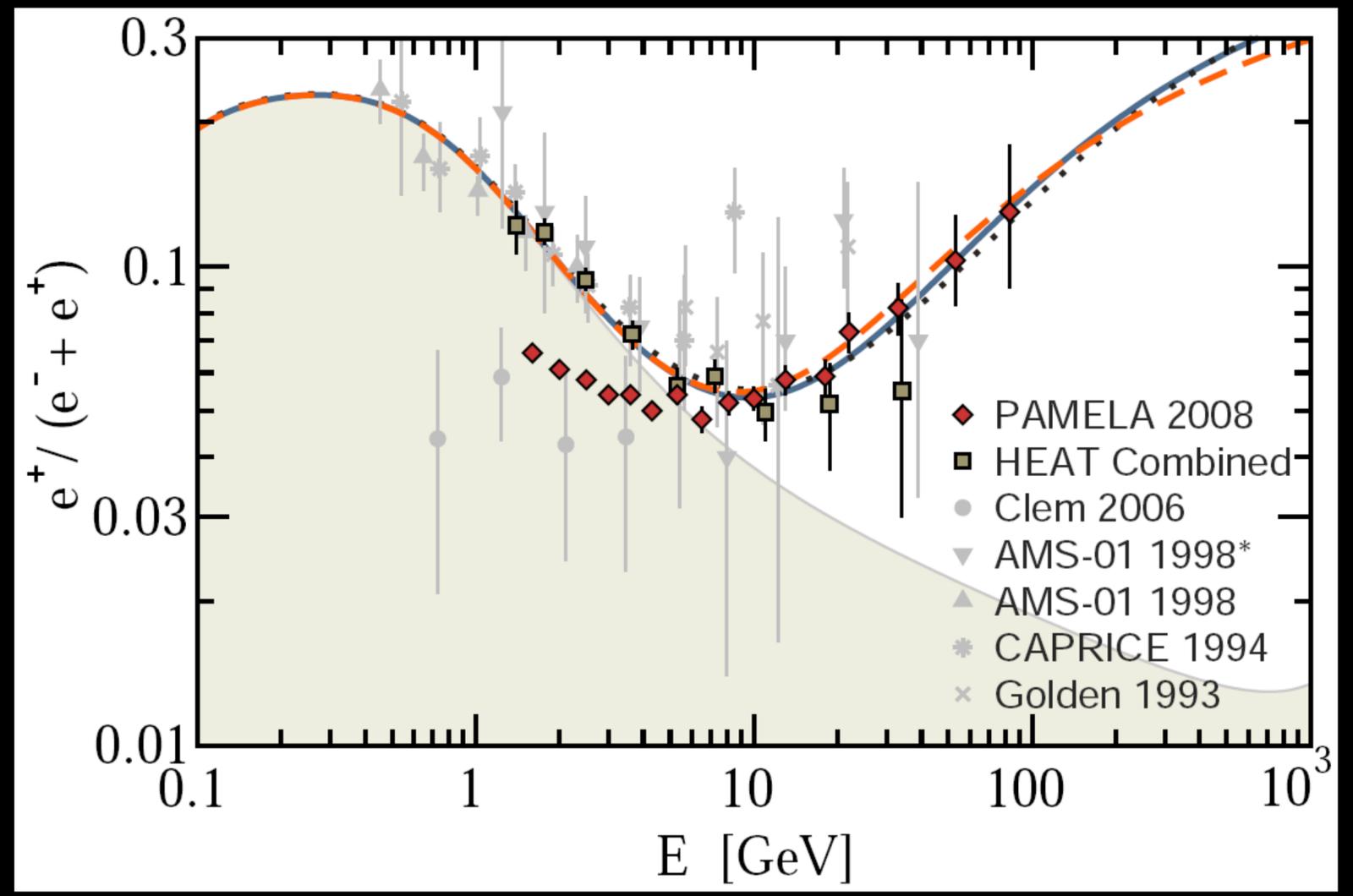
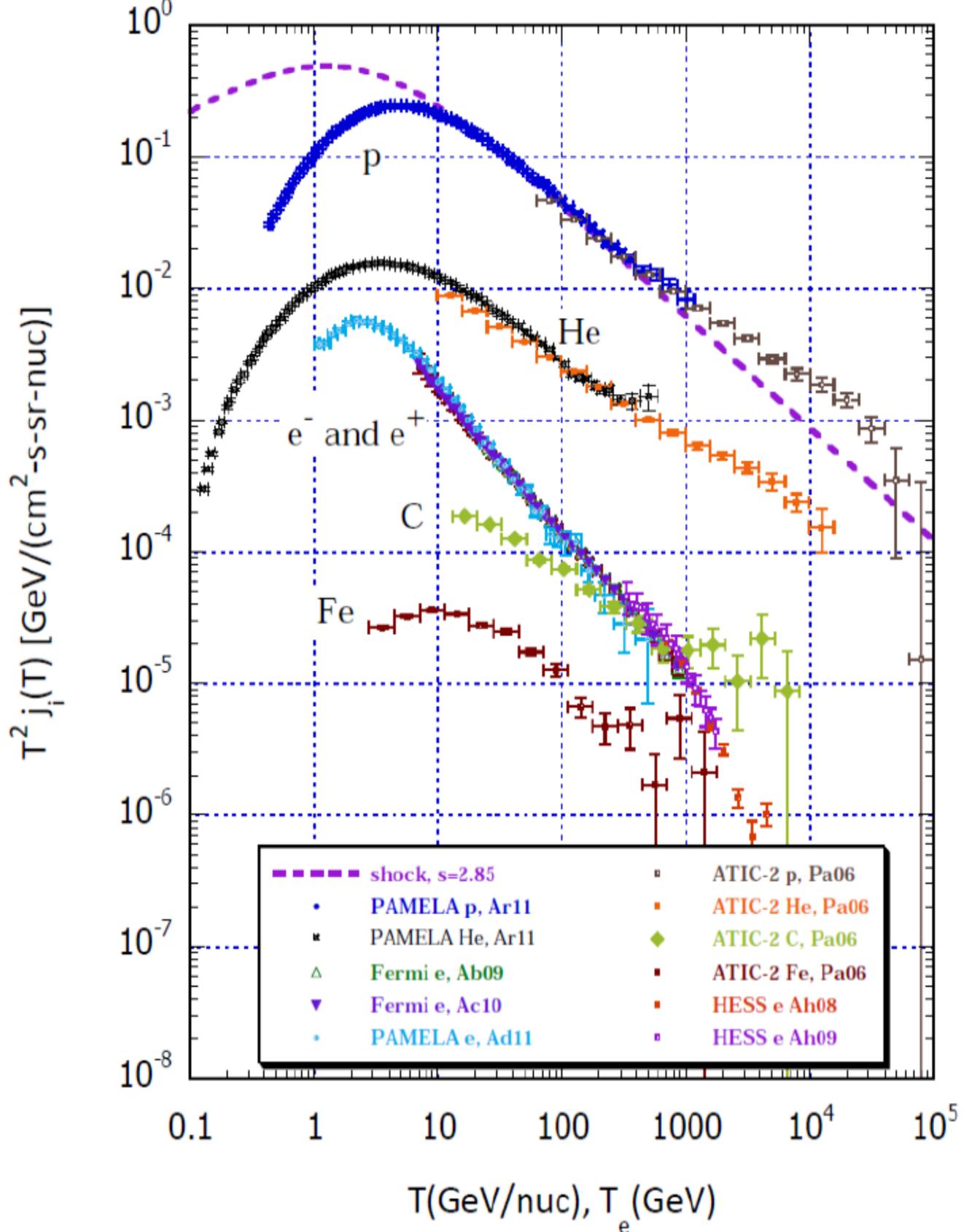


SEP event of December 13, 2006 - Proton spectrum

CLOSE X





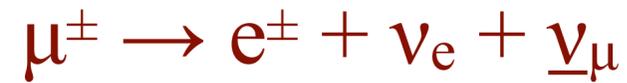


Exceso de positrones:
¿fuente “leptónica” o materia oscura?

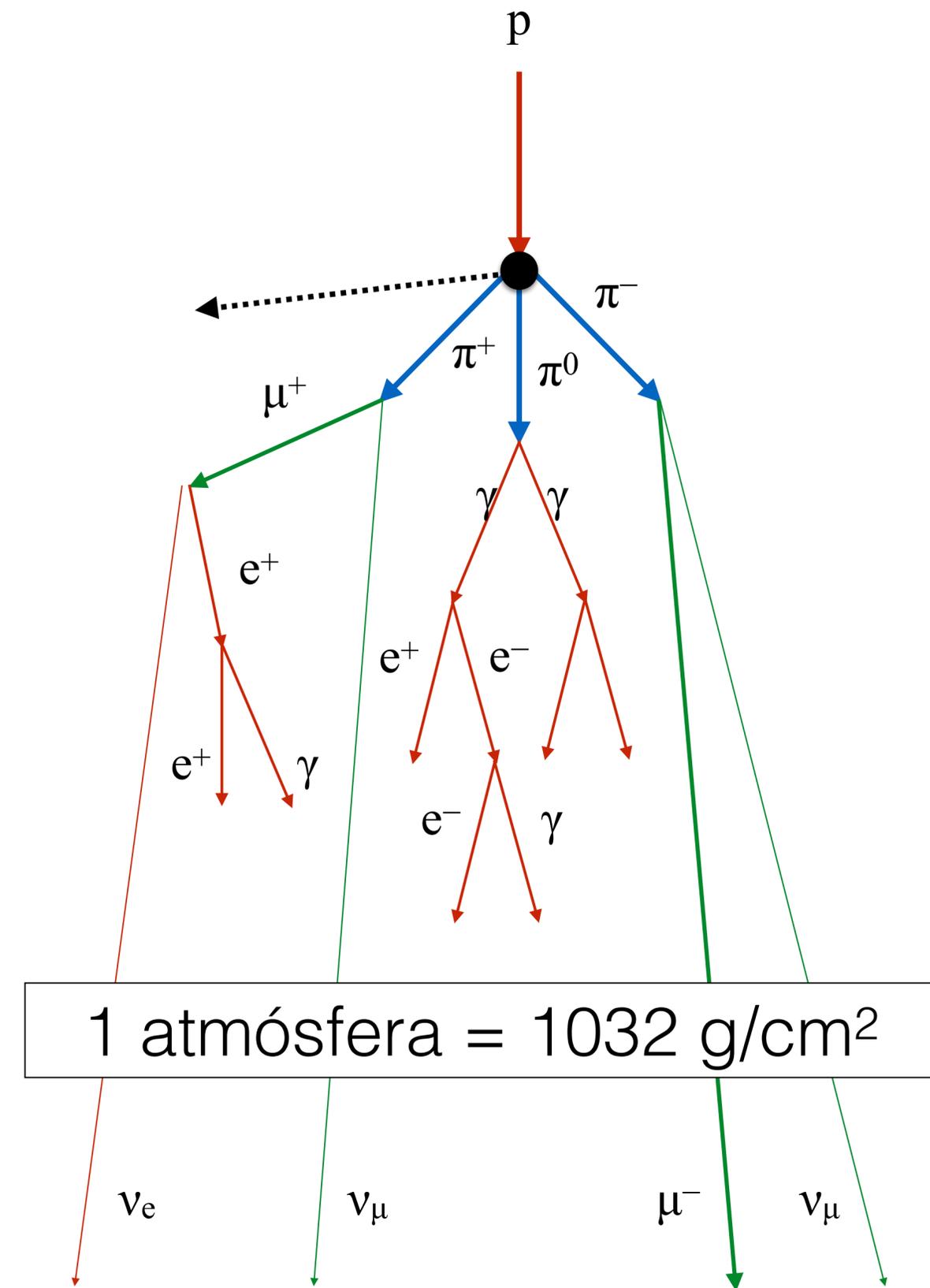
Cascadas atmosféricas

- Los rayos cósmicos provocan cascadas de (miles, millones) de partículas (secundarias) en la atmósfera

- Iniciada en una colisión nuclear

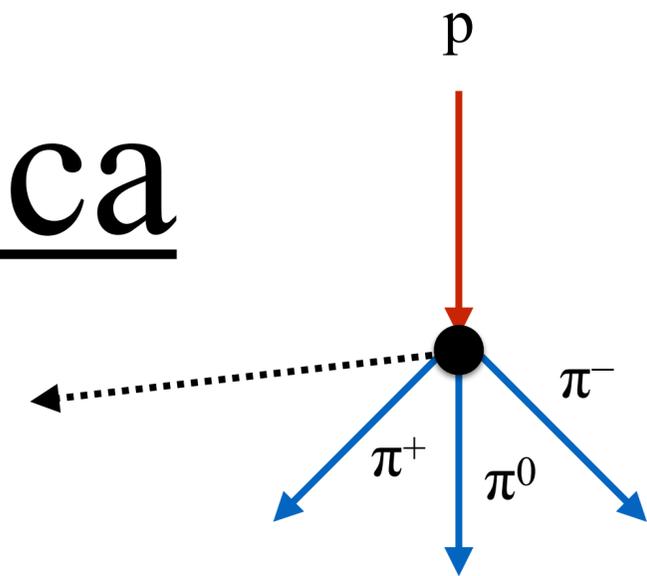


- La cascada tiene componentes nucleares, muónicas y electromagnéticas.
- Neutrinos y muones prosiguen debajo del suelo



Una cascada hadrónica

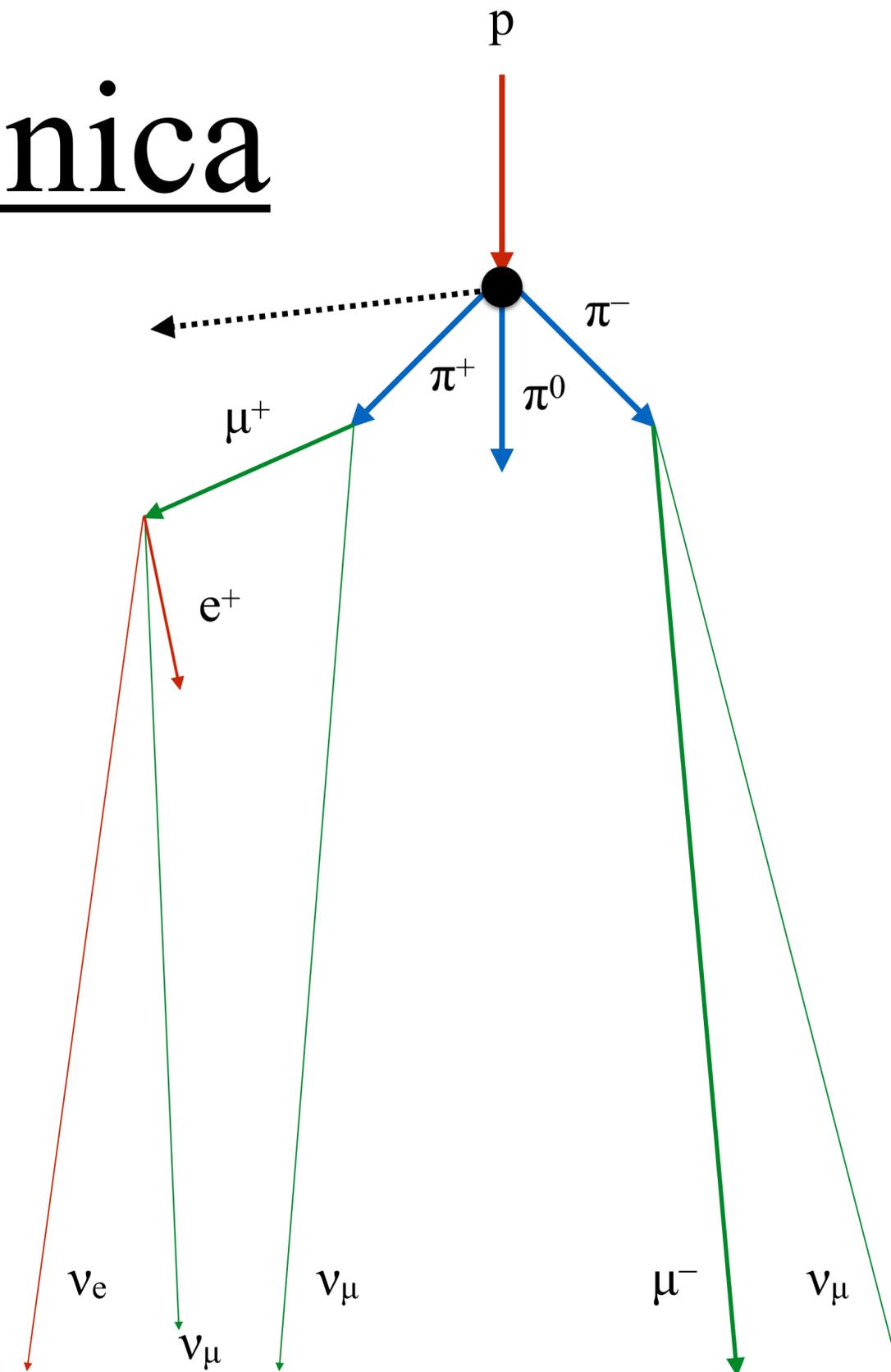
- Un protón de 1 TeV choca con un núcleo produciendo alrededor de 15 piones $\{\pi^\pm, \pi^0\}$
 - escala de interacción p-N: $X_0 \approx 80 \text{ g/cm}^2$
 - se producen fragmentos nucleares de energía intermedia
 - los π^0 decaen “inmediatamente”
 - π^\pm interactúan con núcleos atmosféricos o decaen ($c\tau = 7.8\text{m}$, $\gamma \sim 400$).
 - colisiones π^\pm - aire producen mas piones.



Prob	x / X₀	x (g/cm²)
0.95	0.051	16.6
0.75	0.288	23
0.50	0.693	55.5
0.25	1.386	111
0.05	2.996	240

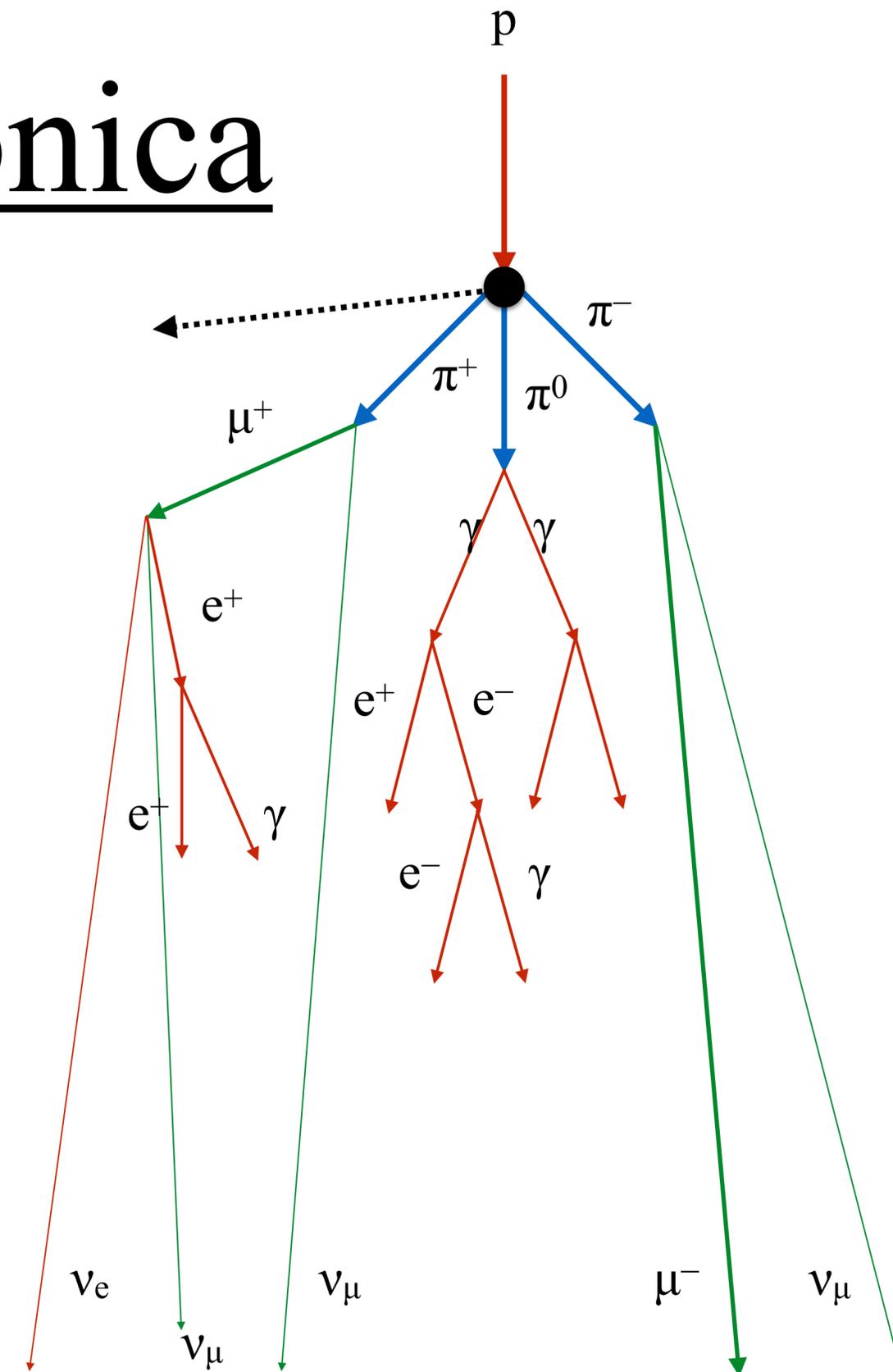
Una cascada hadrónica

- Algunos piones cargados producen más piones.
- Algunos piones cargados decaen en muones:
 - los muones tienen $c\tau = 660\text{m}$, $\gamma \approx 100 \Rightarrow$ pueden alcanzar el suelo
 - algunos muones decaen en un electrón y dos neutrinos
- Prácticamente todos los neutrinos siguen.



Una cascada hadrónica

- Algunos piones cargados producen más piones.
- Algunos piones cargados decaen en muones:
 - los muones tienen $c\tau = 660\text{m}$, $\gamma \approx 100 \Rightarrow$ pueden alcanzar el suelo
 - algunos muones decaen en un electrón y dos neutrinos
- Prácticamente todos los neutrinos siguen.
- Los piones neutros decaen en dos fotones \Rightarrow sub-cascadas electromagnéticas “altas”
- El decaimiento de muones produce electrones \Rightarrow sub-cascadas EM más profundas.



Cascadas electromagnéticas

- Iniciada por un fotón o un electrón

- Producción de pares:

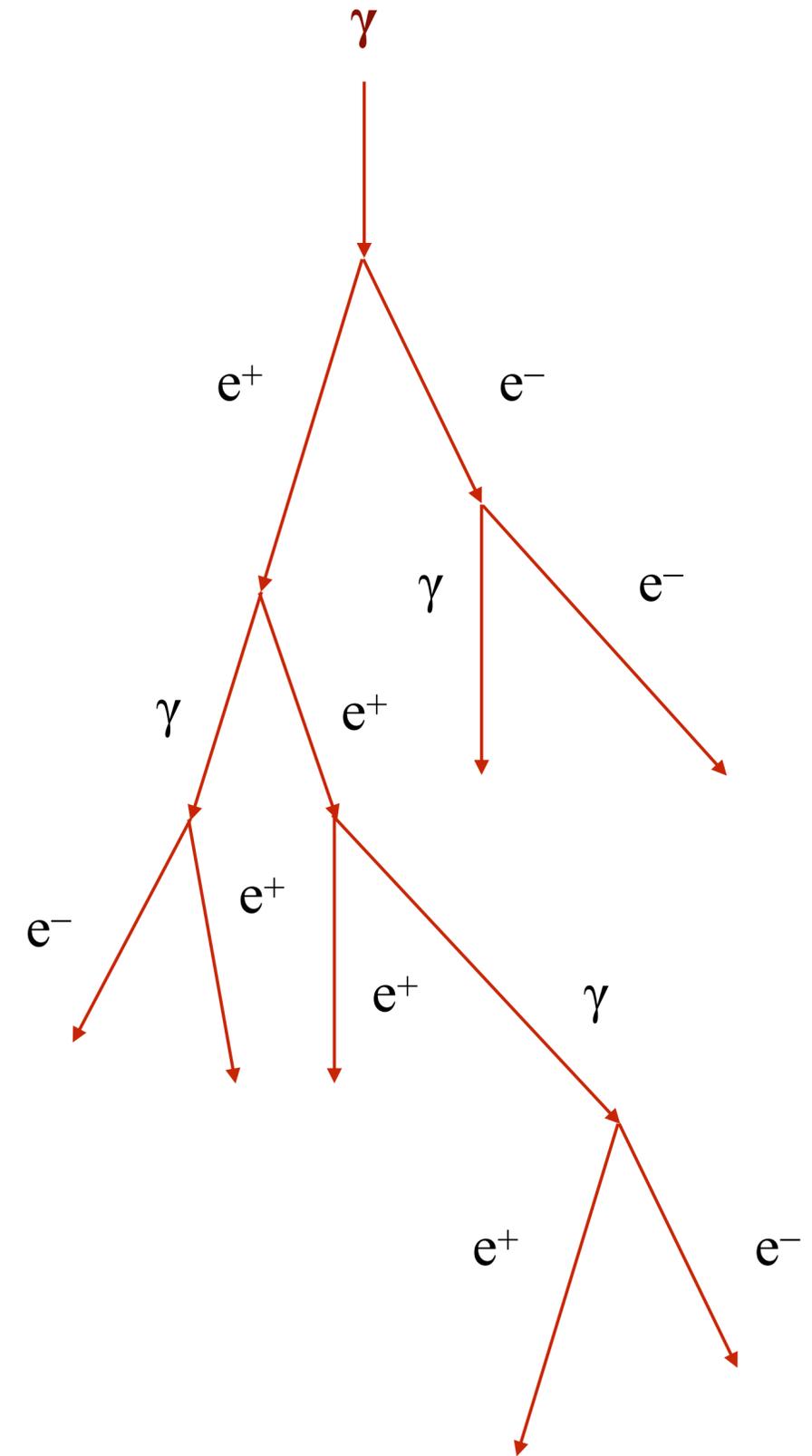


La producción de pares cesa cuando la energía no es suficiente para competir con Compton ($\sim 80 \text{ MeV}$).

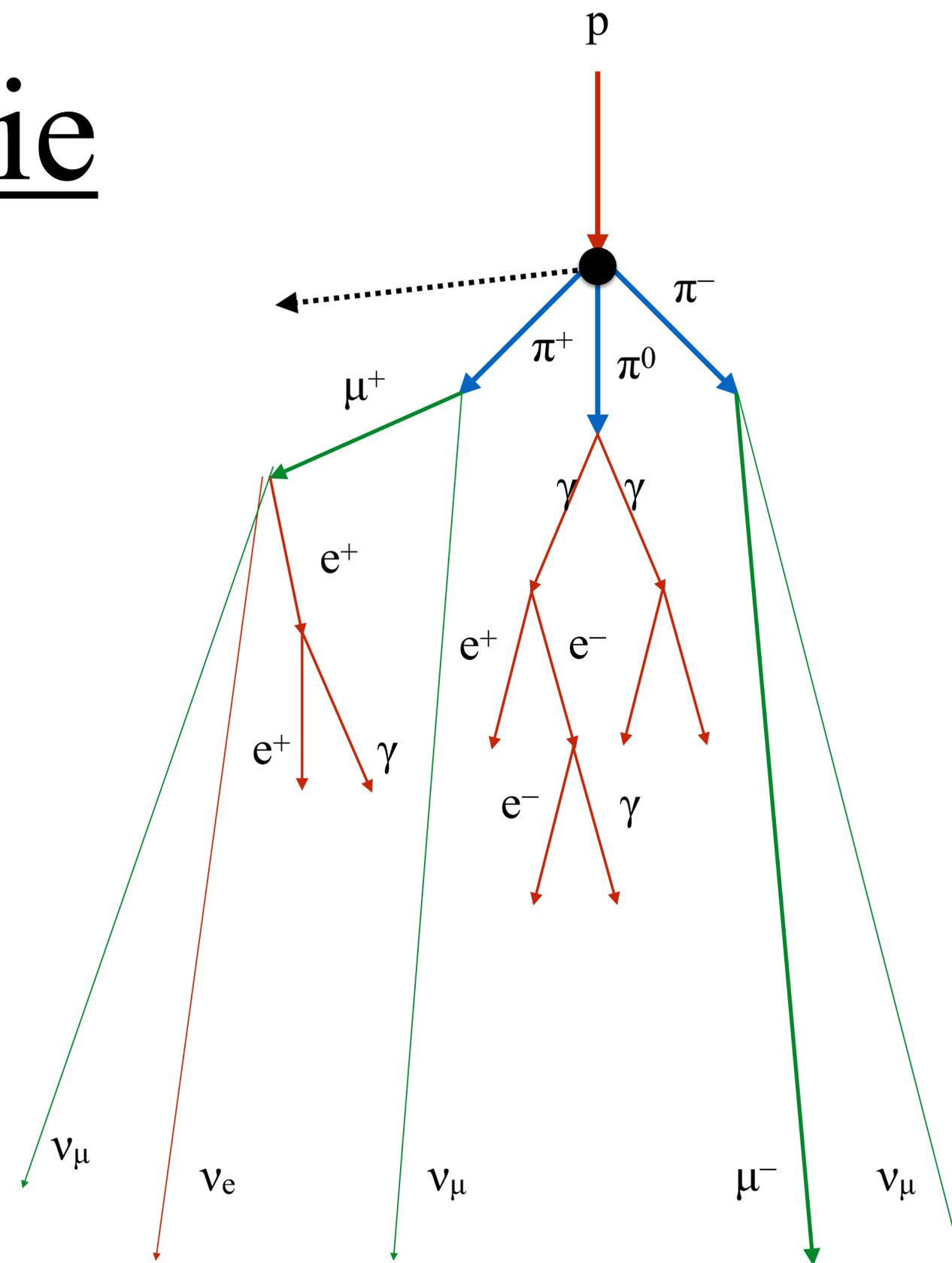
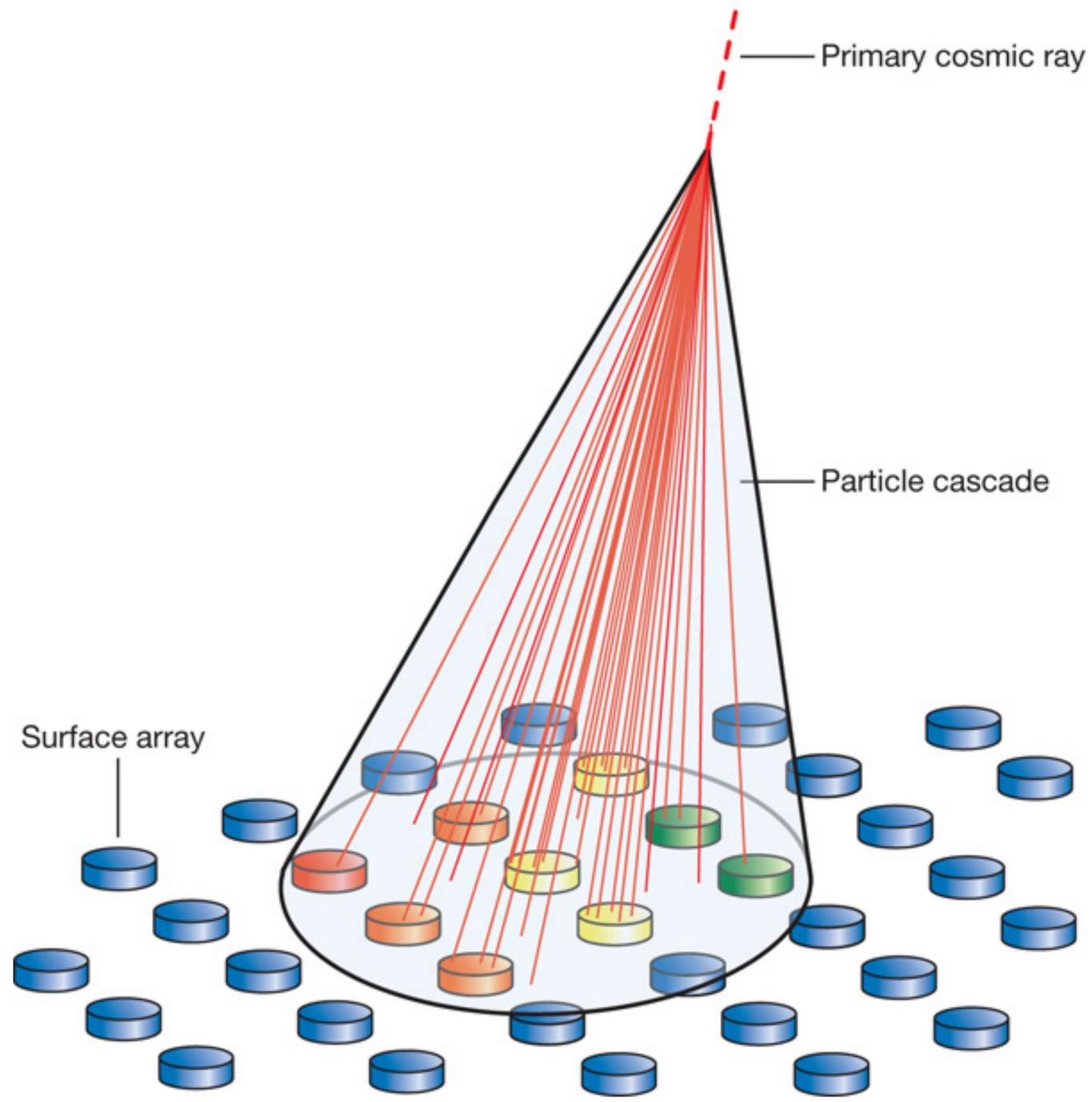
- Bremsstrahlung:

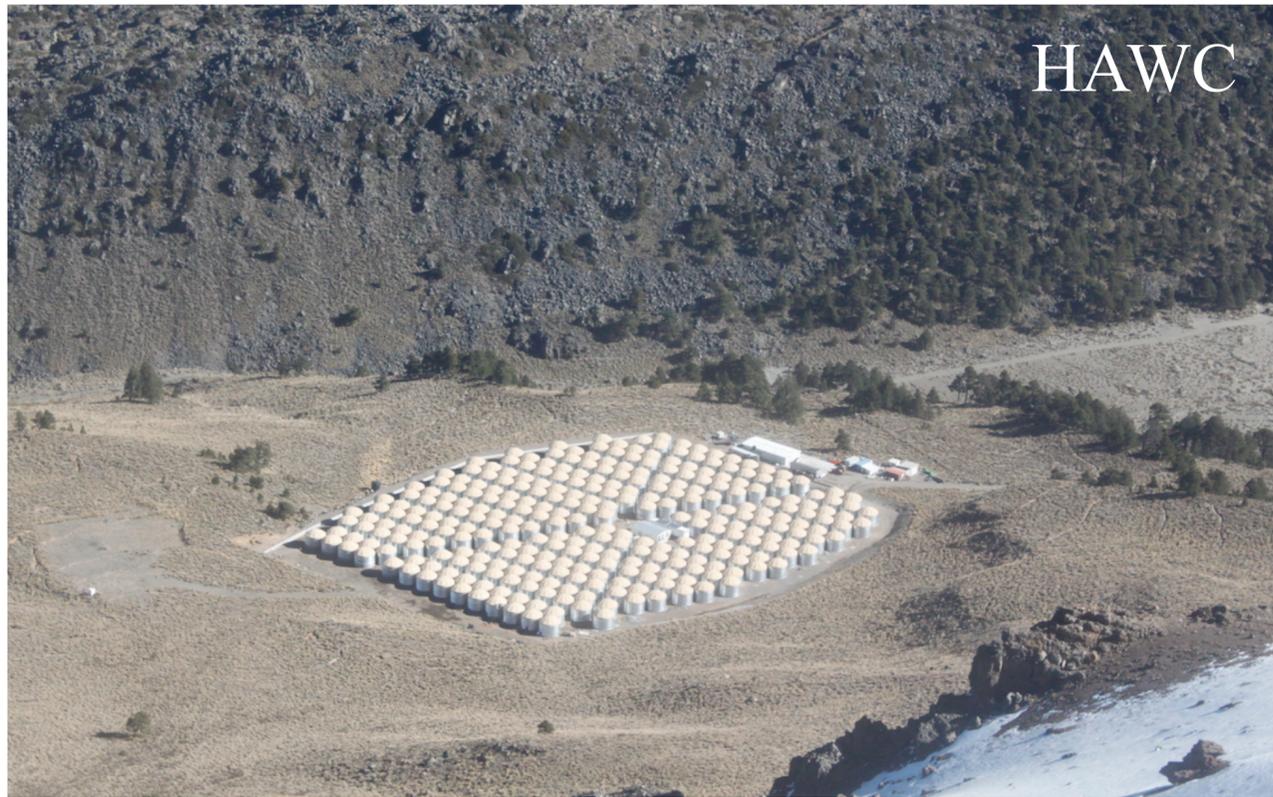


Bremsstrahlung cesa cuando la ionización empieza a competir ($\sim 35 \text{ MeV}$).



Detectores de superficie



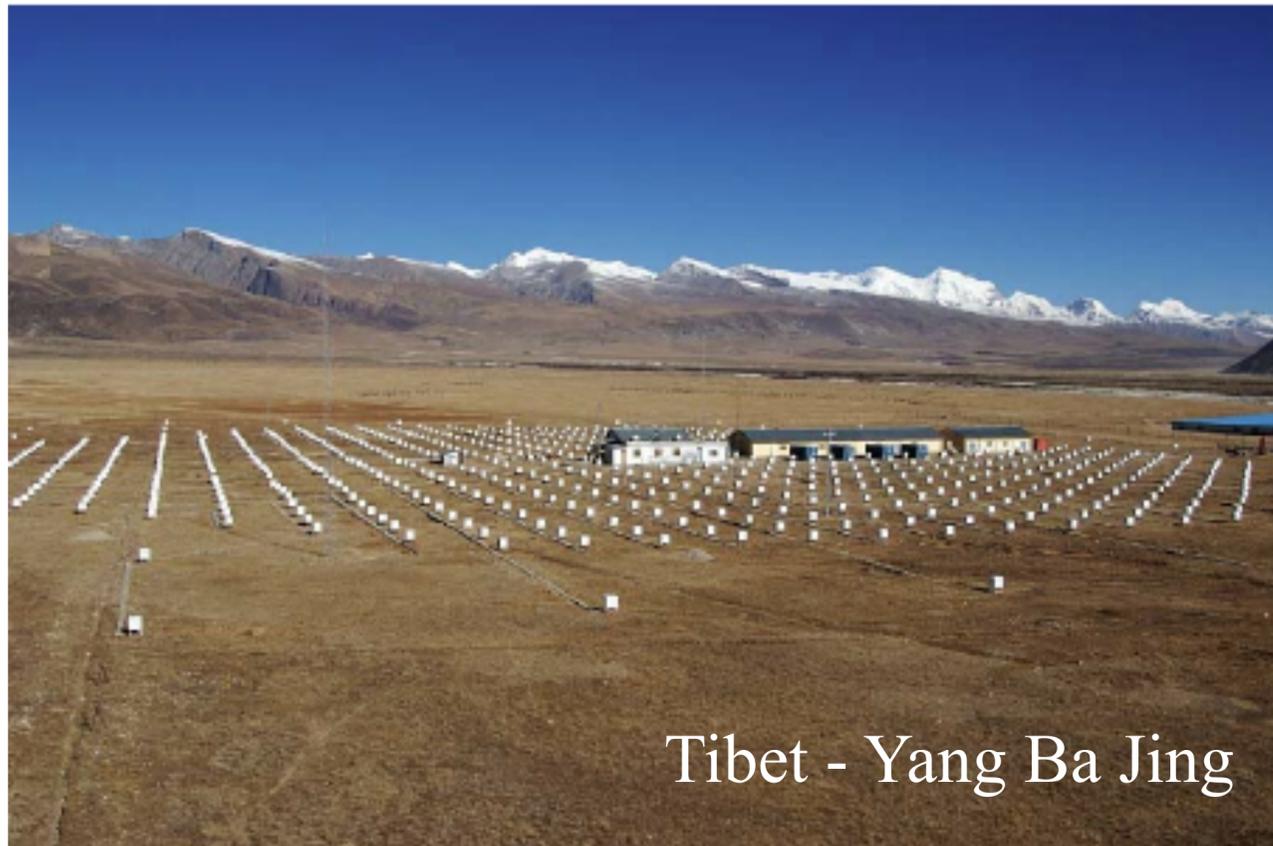


HAWC

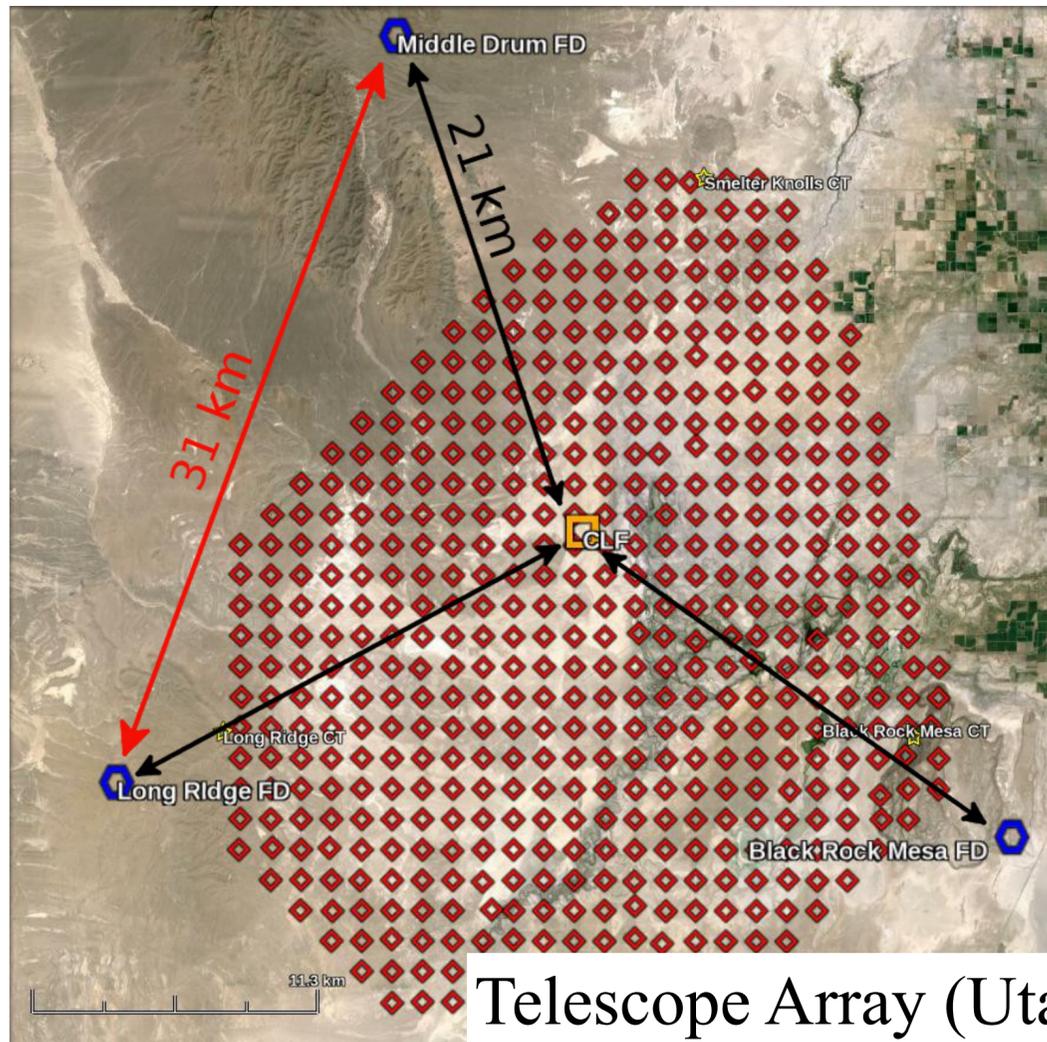


Kascade

Mayor densidad
Menor energía

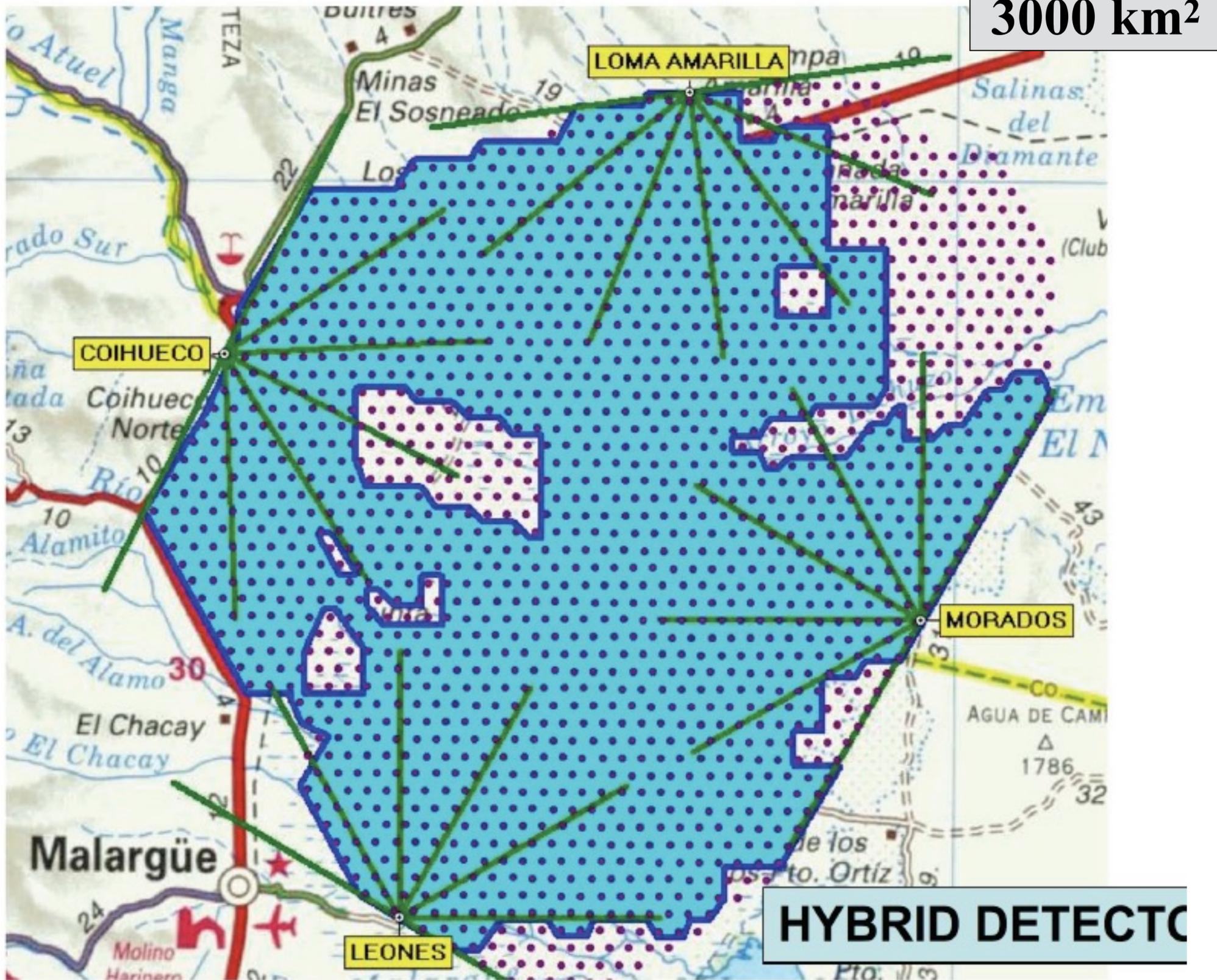


Tibet - Yang Ba Jing



Telescope Array (Utah)

Mayor área
Mayor energía



Carga en campo magnético uniforme

La fuerza de Lorentz,

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

para $\vec{E} = 0$, resulta en γ constante y $d\vec{v} = \omega_B \times \vec{v}$ con la frecuencia de sincrotrón,

$$\vec{\omega}_B = \frac{q\vec{B}}{\gamma mc} = \frac{q\vec{B}c}{E}. \quad (1)$$

La velocidad está dada por, $\vec{v}(t) = v_{\parallel} \hat{z} + a\omega_B (\hat{x} - i\hat{y}) e^{-i\omega_B t}$. El radio de giro está dado por

$$r_{\ell} = v/\omega_B = \frac{Ev}{qBc} = \frac{\gamma\beta mc^2}{qB} = \frac{pc}{qB} = R/B,$$

con $R = pc/q$ la rigidez magnética.



Propagación y campos magnéticos

Campos geomagnético,
heliosférico, Galáctico.

Partículas relativistas:

$$E = L ZeB$$

6. Campos magnéticos y propagación

- La propagación de los rayos cósmicos está gobernada por el campo magnético Galáctico que ocasiona trayectorias localmente helicoidales / caóticas.

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

- Partículas con energías de GeV y TeV tienen radios de curvatura menores que las distancias interestelares \Rightarrow distribución aleatoria (isotrópica) de rayos cósmicos.
- 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

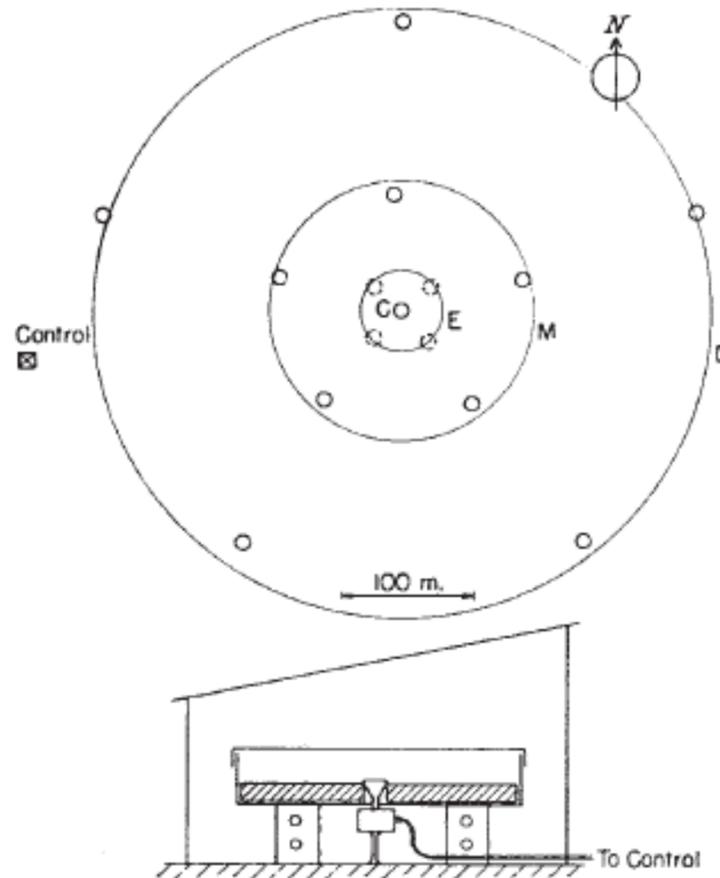


Fig. 1. Detector array and schematic diagram of a scintillation counter

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

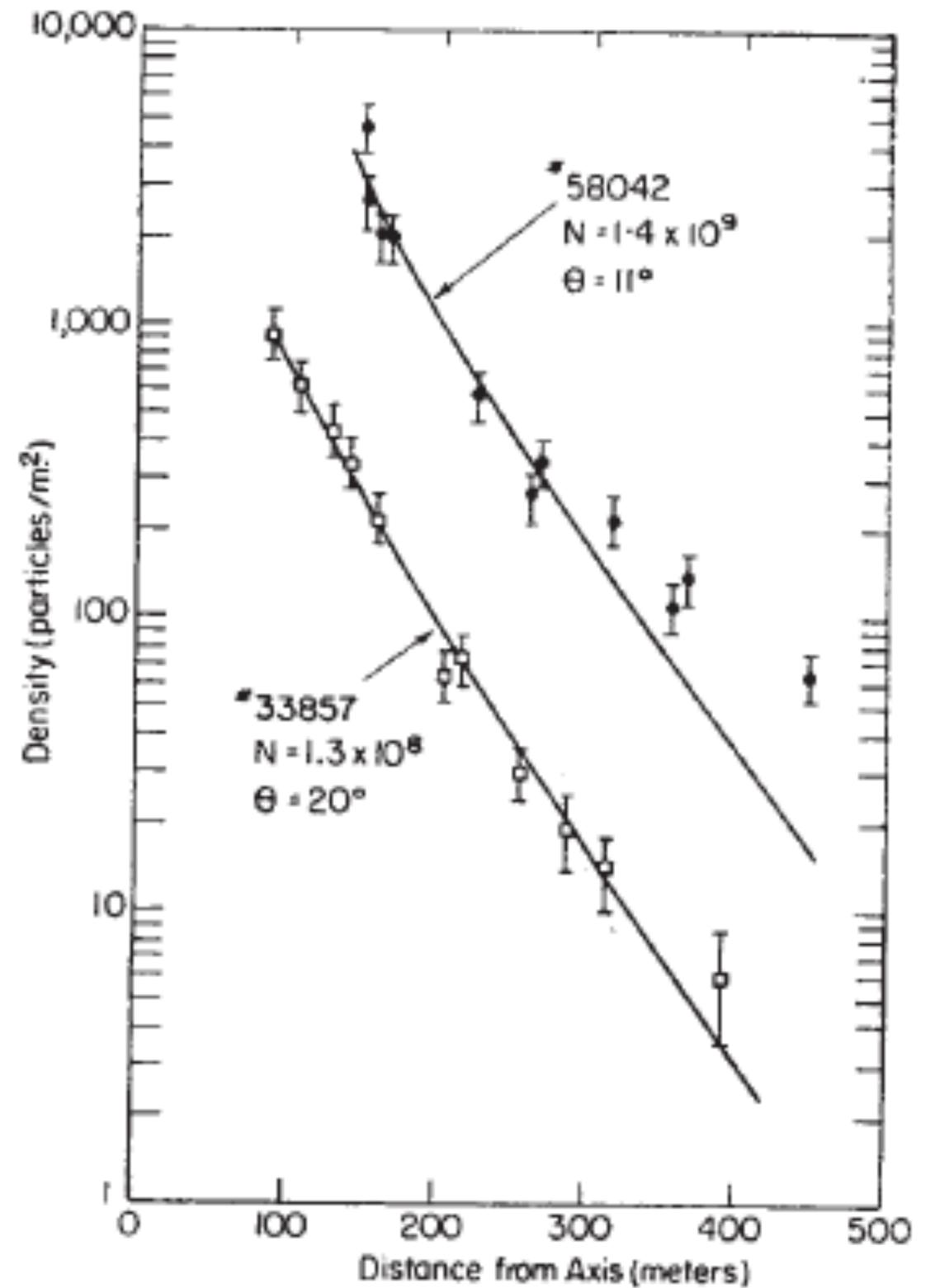
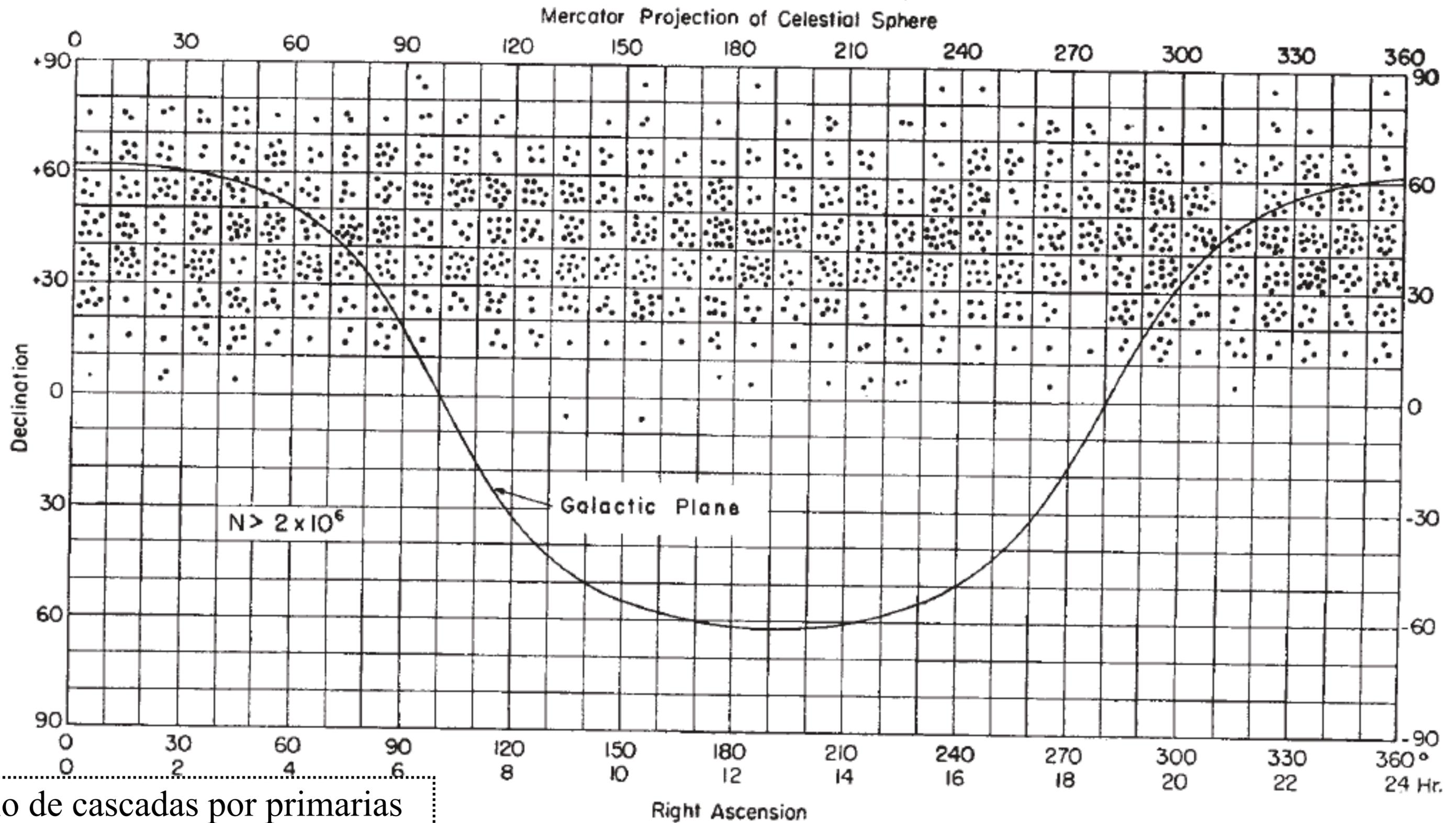


Fig. 3. Lateral density distributions of two large showers

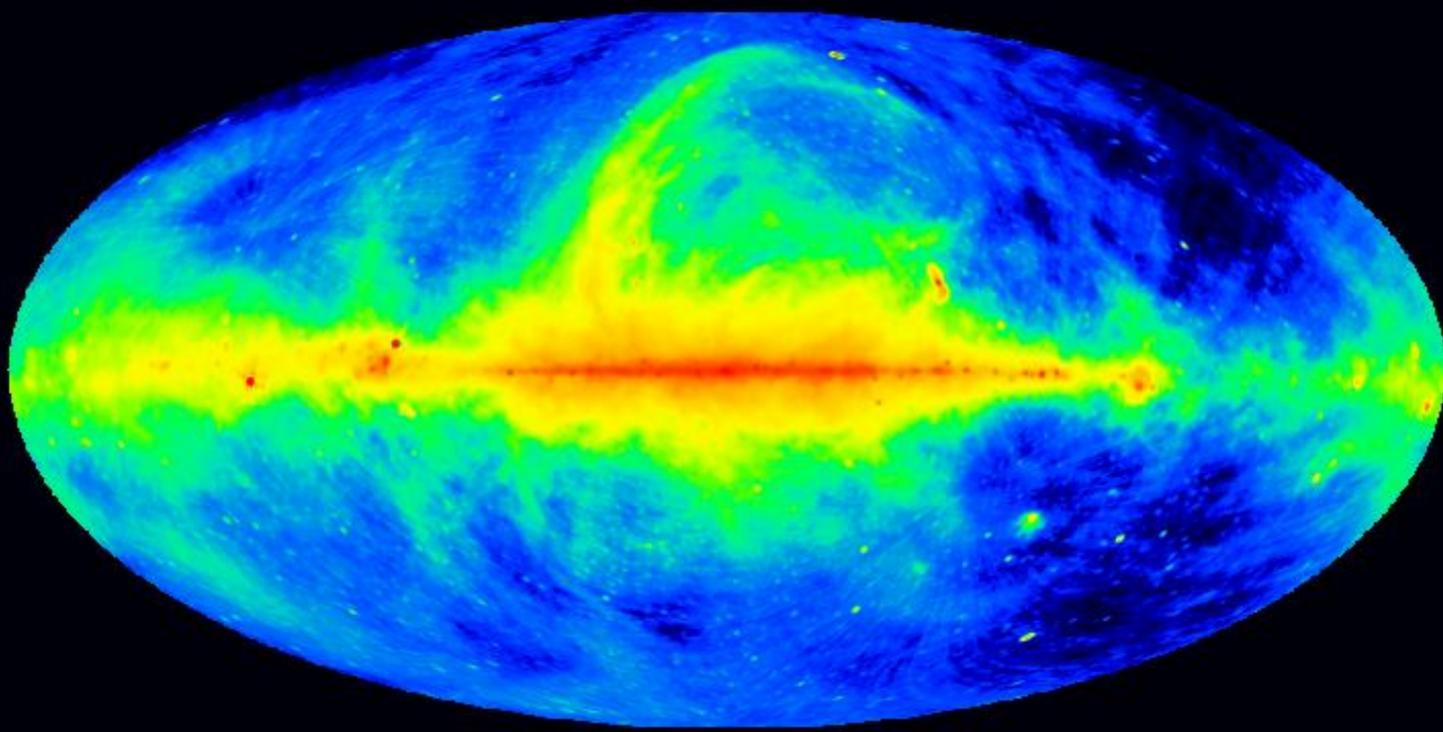
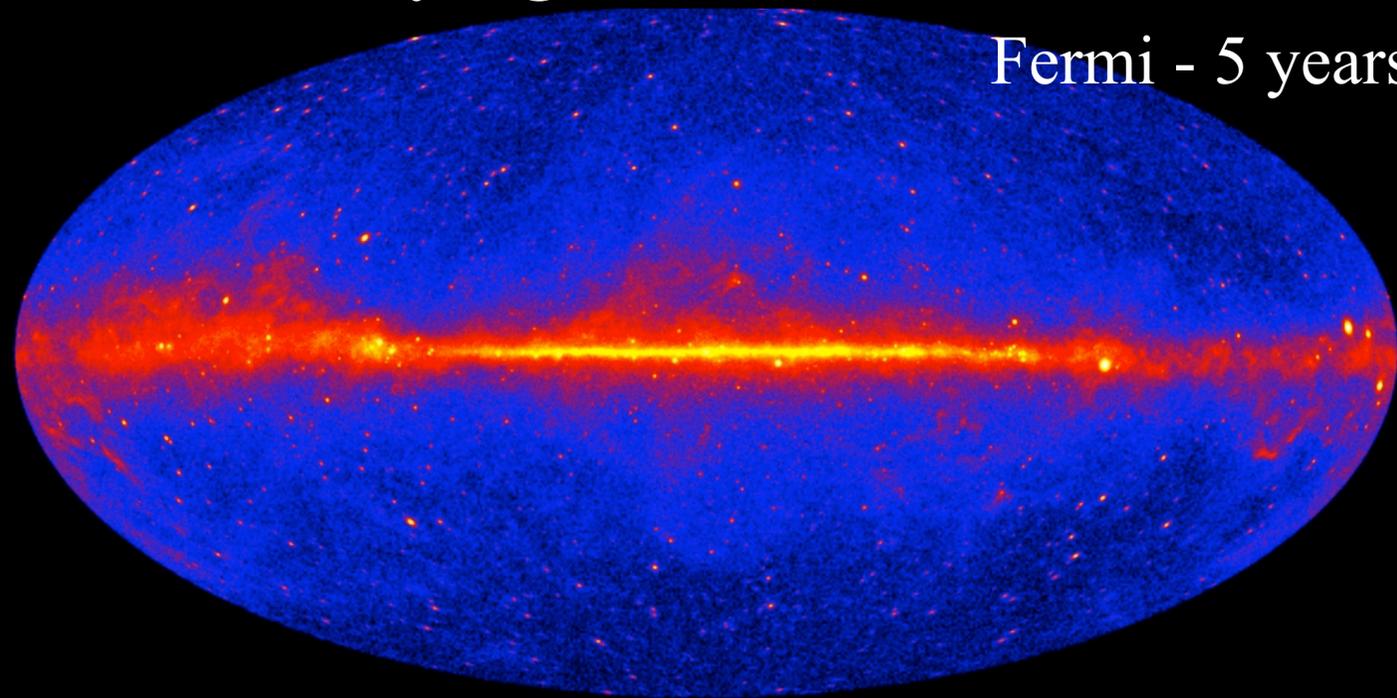


Estudio de cascadas por primarias
con $E \geq 10^{16}$ eV (Clark 1957)

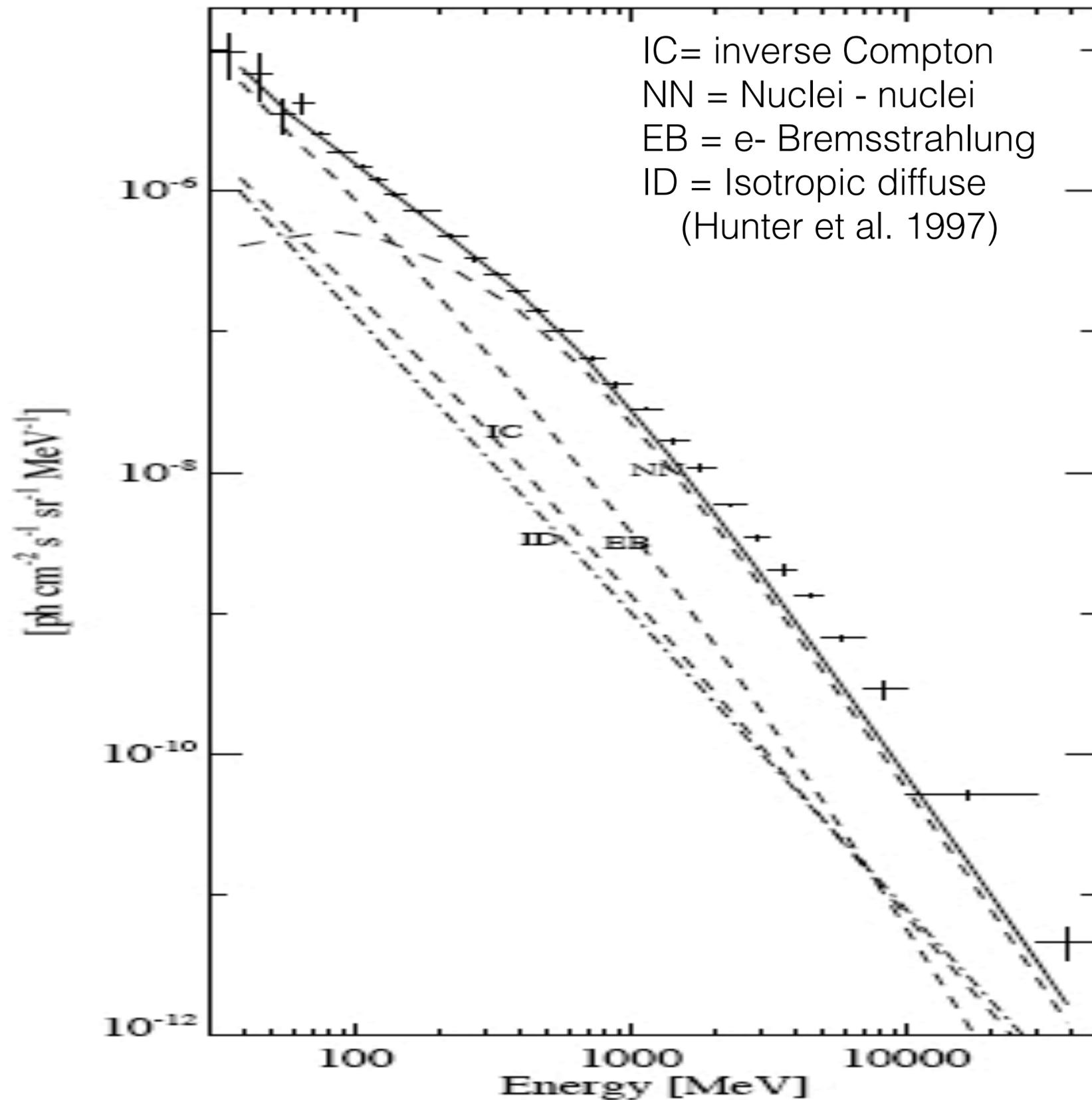
Distributions of arrival of 1,286 showers with more than 2×10^6 particles

Emisión rayos gamma del Plano Galáctico

Fermi - 5 years

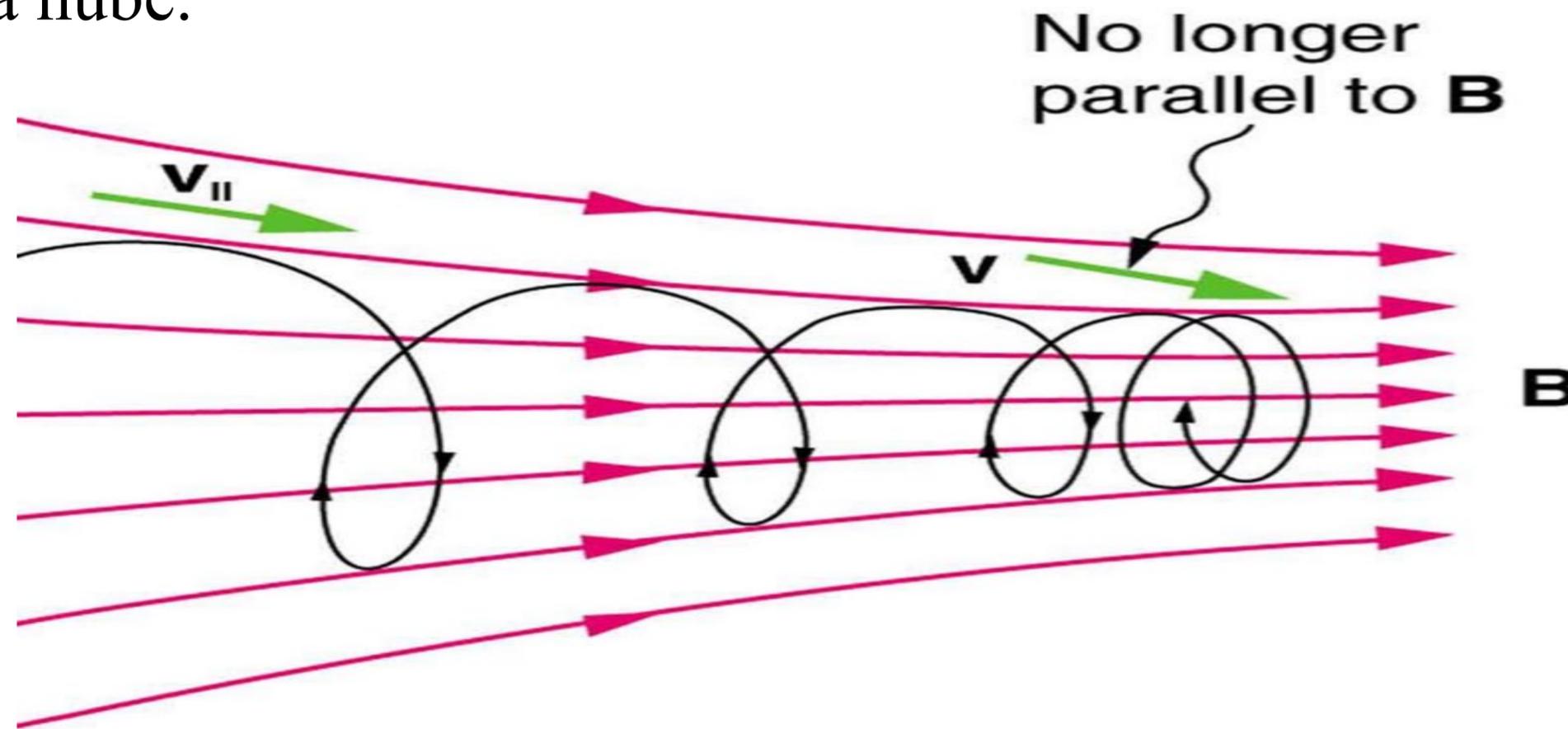


Radio - 408 MHz



Aceleración de rayos cósmicos

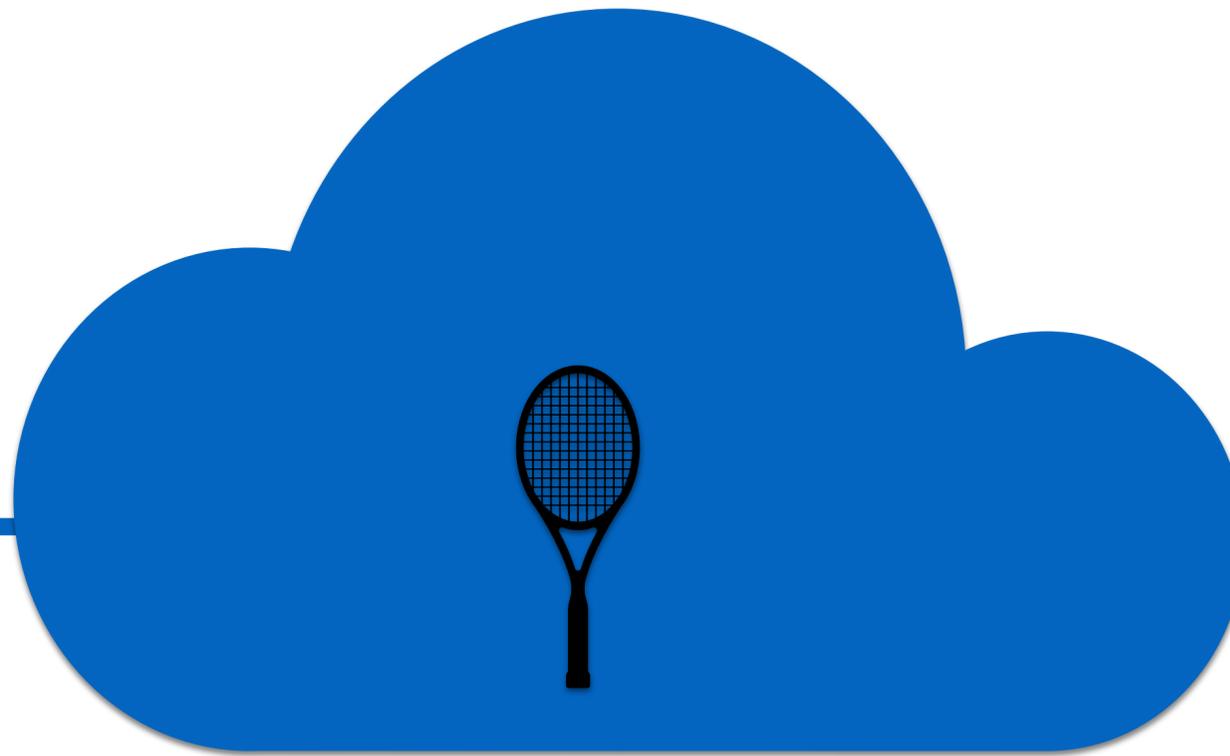
- En 1949 Enrico Fermi estudió la interacción de partículas cargadas con nubes moleculares en el medio interestelar, mostrando que se produce un espectro de partículas en ley de potencias; la interacción se da con espejos *magnéticos* dentro de la nube.



$\beta_0 \approx 1$



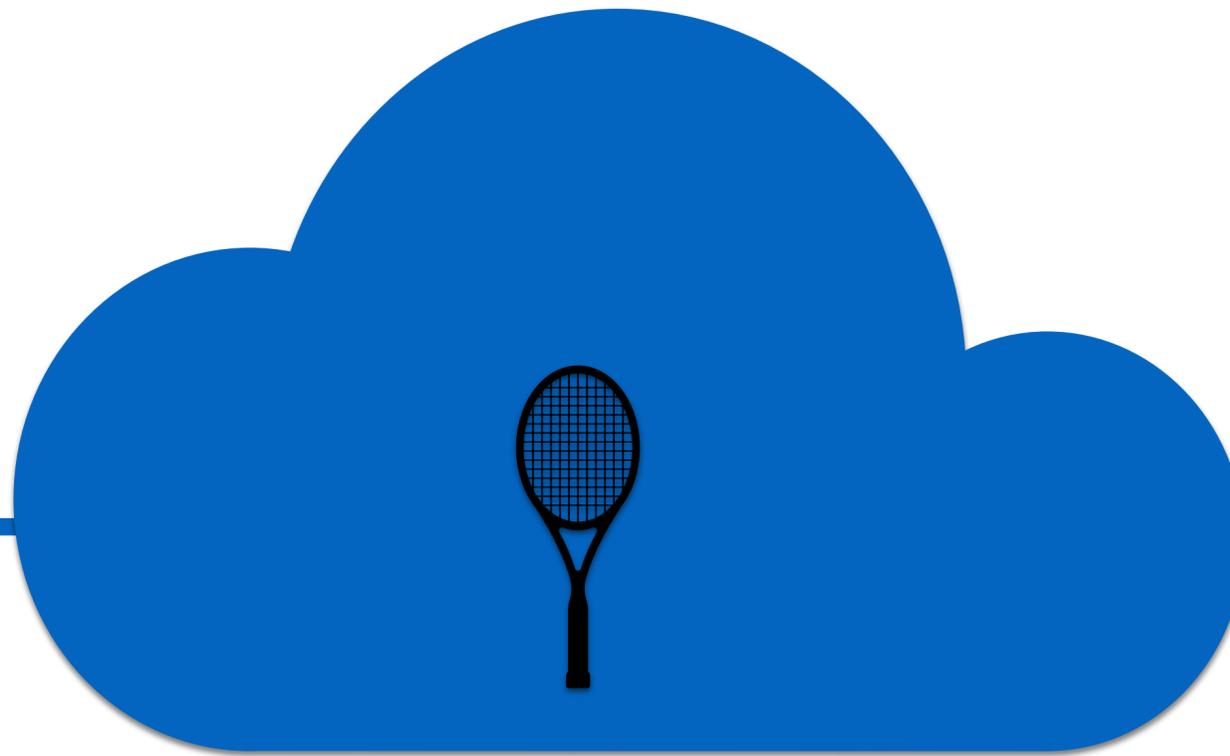
$B_0 \ll 1$



$\beta_1 \approx 1$



$B_1 \approx B_0$



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



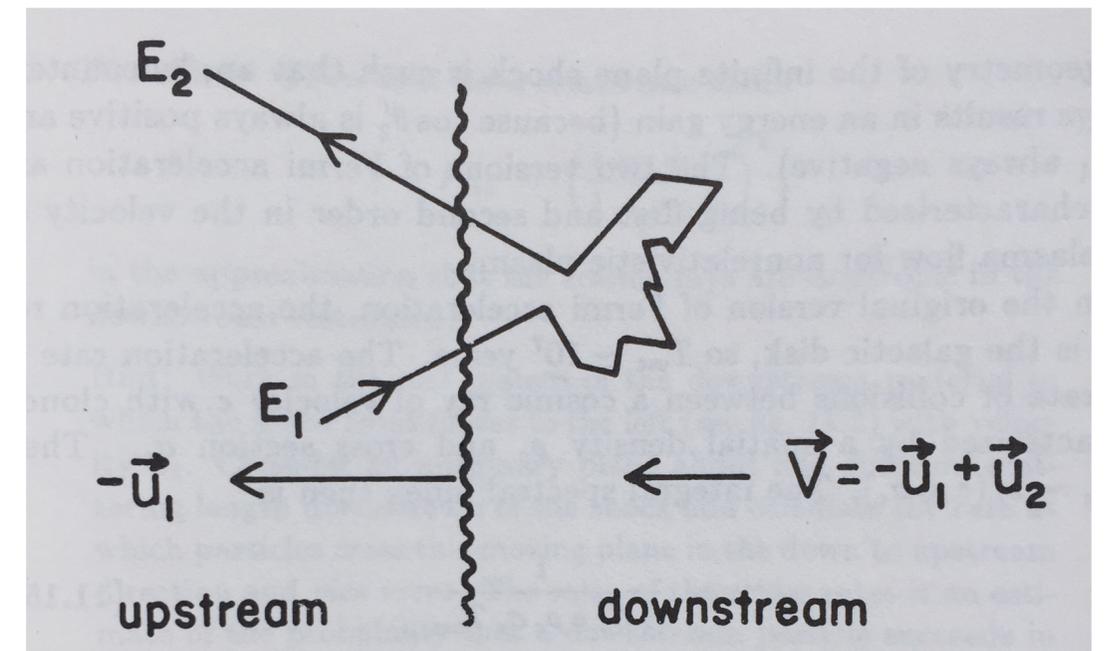
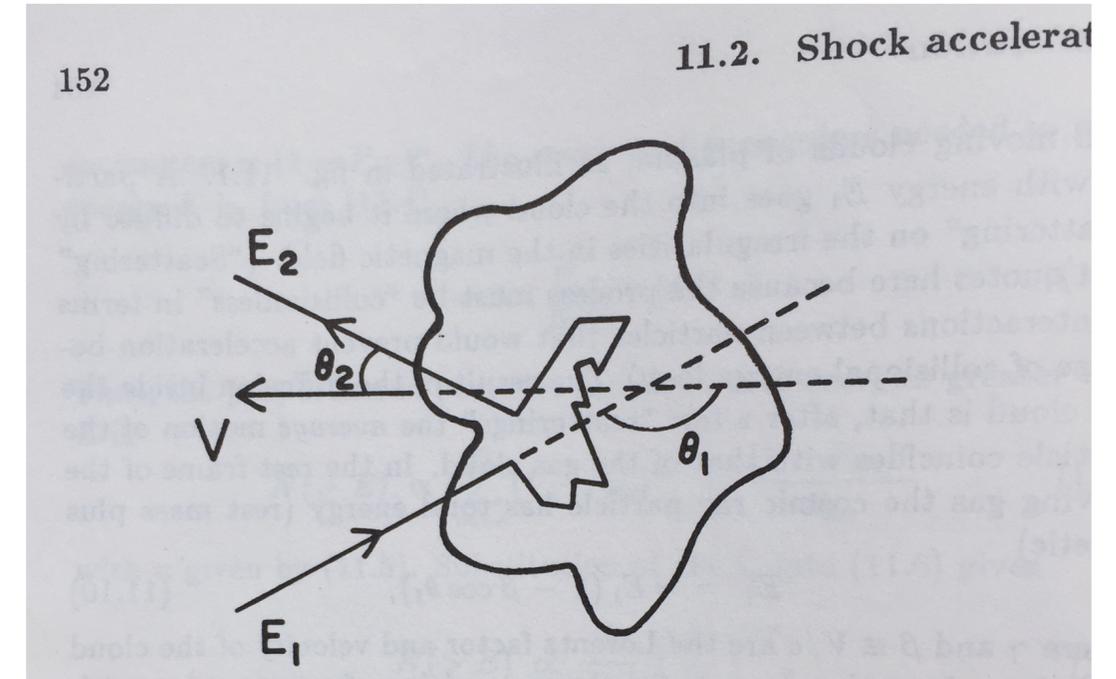
Aceleración de Fermi

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

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

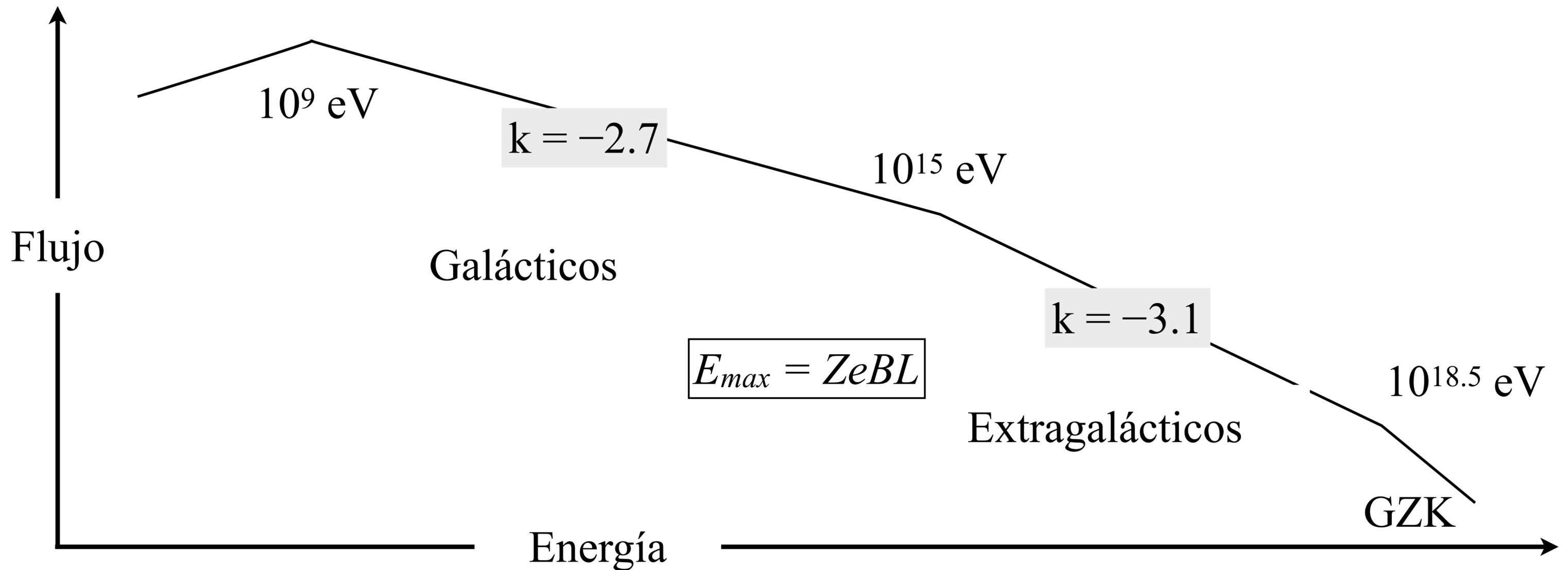


Aceleración de Fermi

- 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



UHECRs: aceleradores

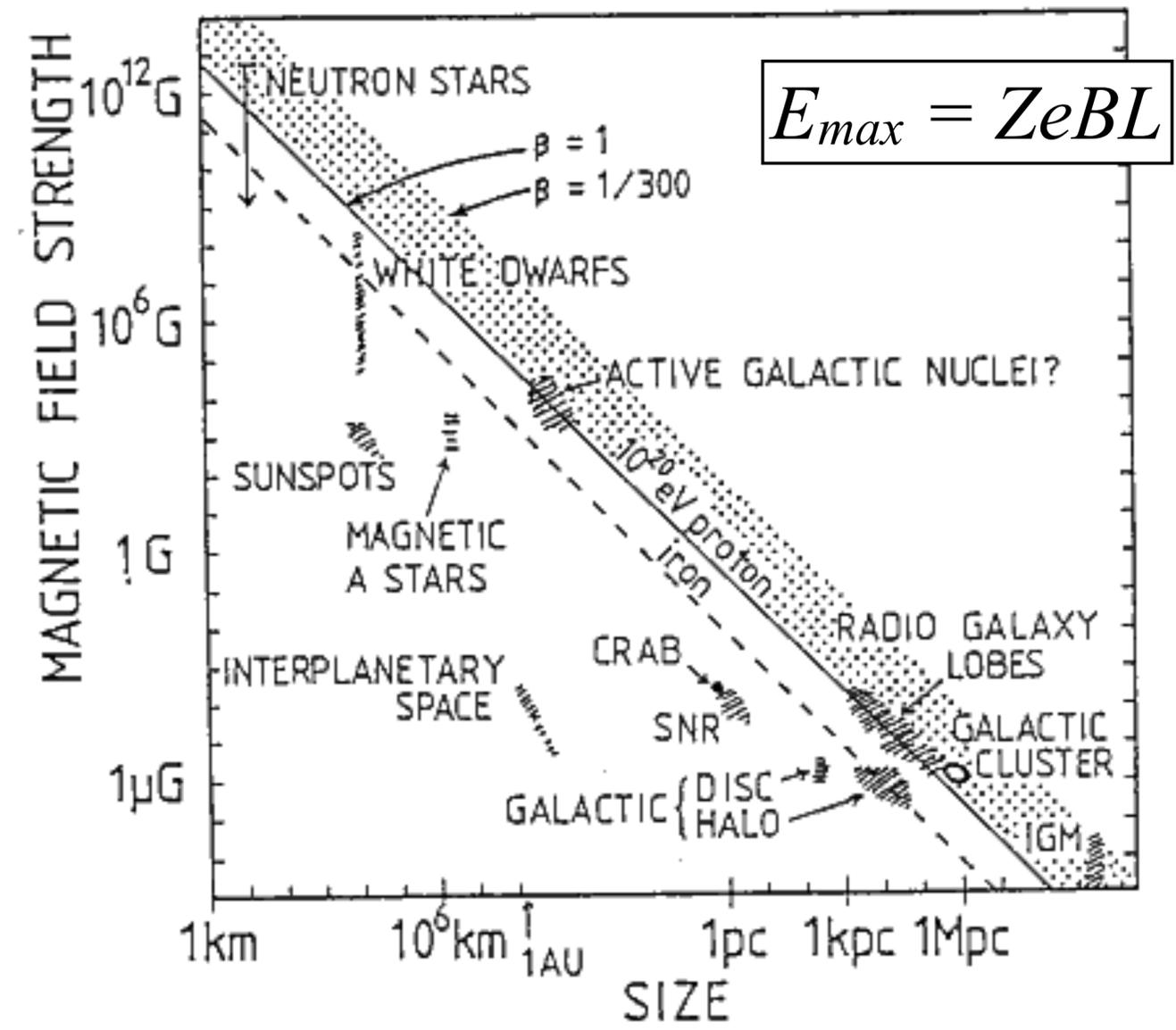
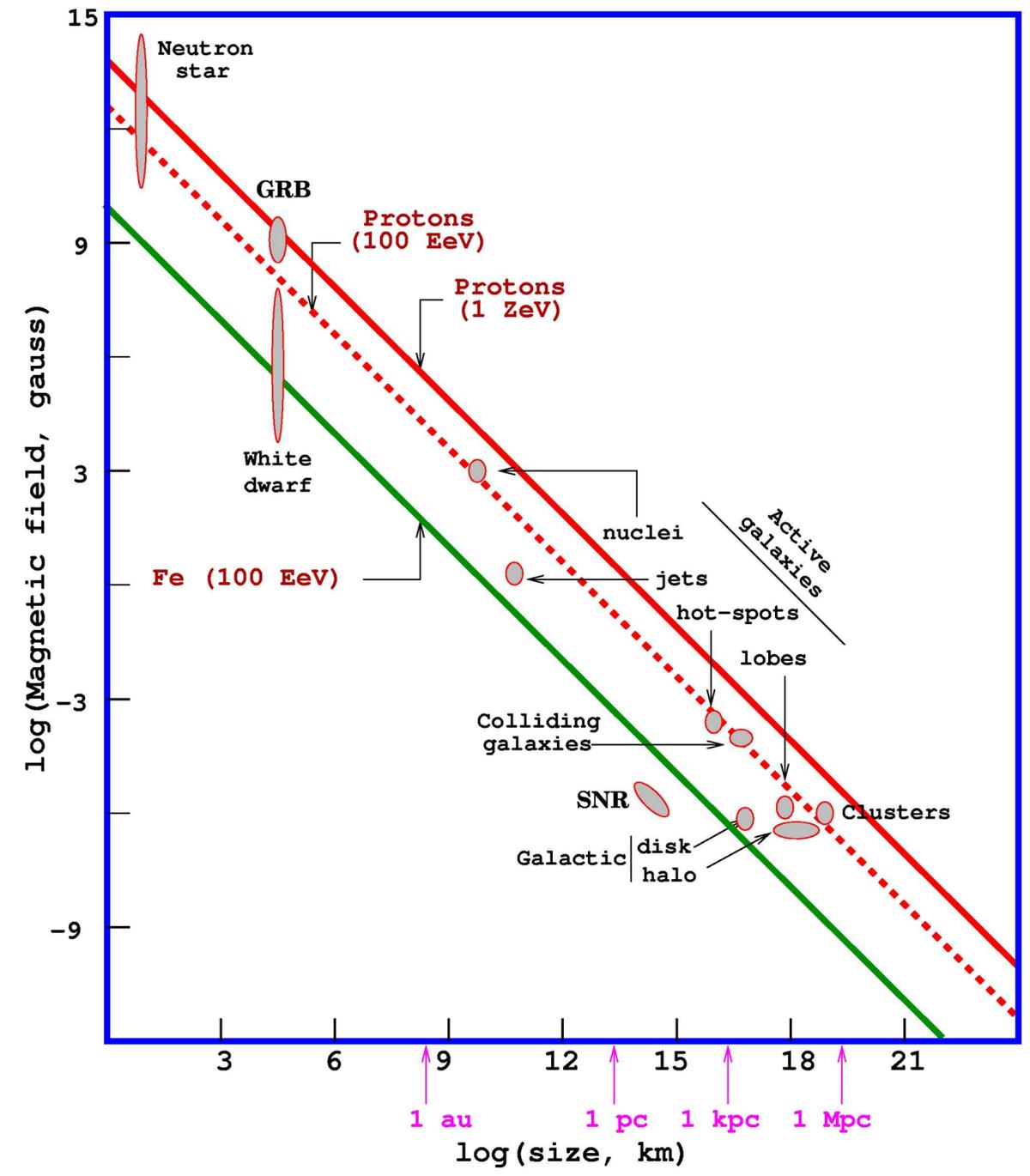


Figure 1. Size and magnetic field strength of possible sites of particle acceleration. Objects below the diagonal line cannot accelerate protons to 10^{20} eV.

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)

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,

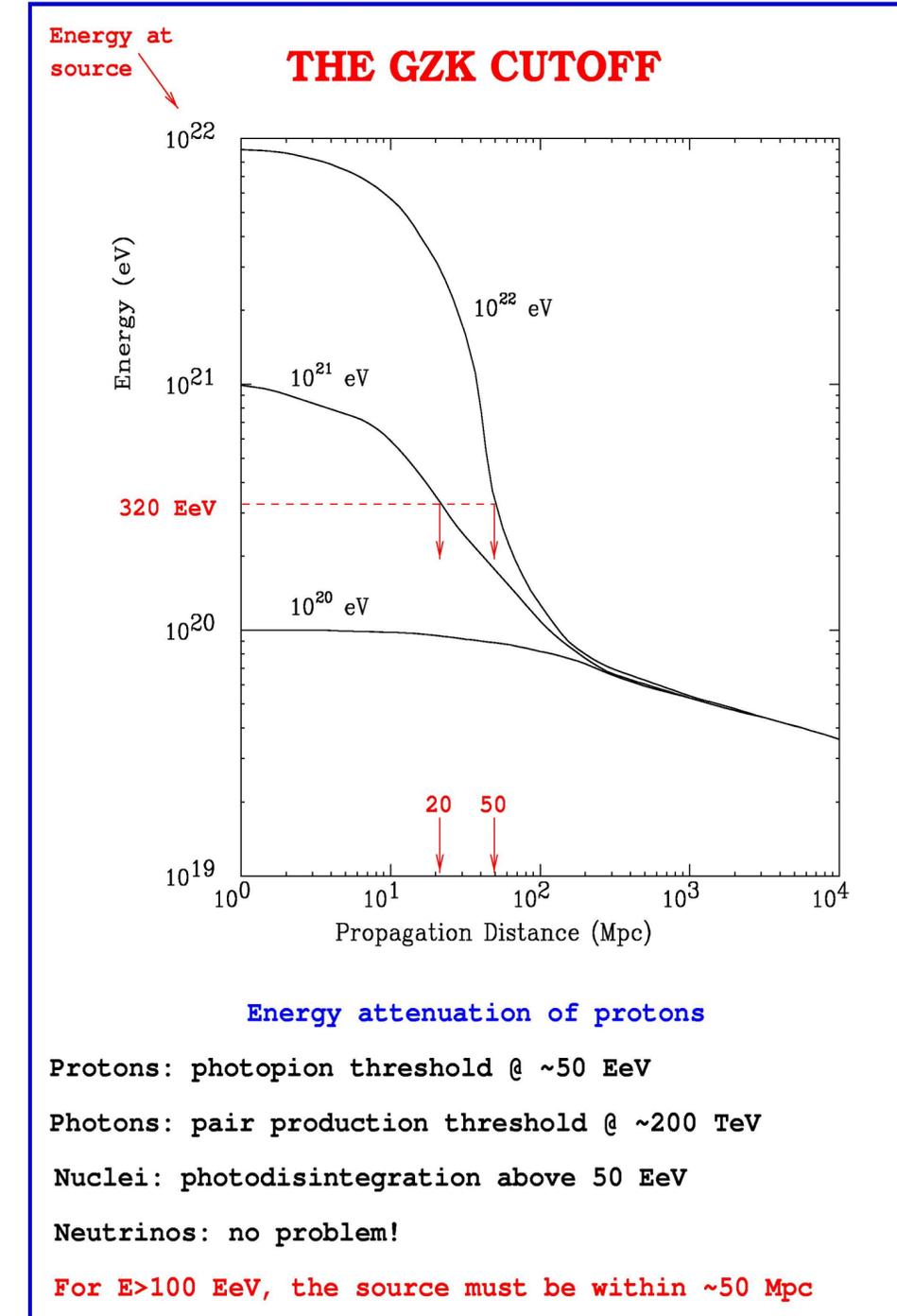
$$\begin{pmatrix} \gamma m_p + \omega \\ \gamma m_p \beta + \omega \hat{k} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} \sqrt{s} \\ 0 \end{pmatrix},$$

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,

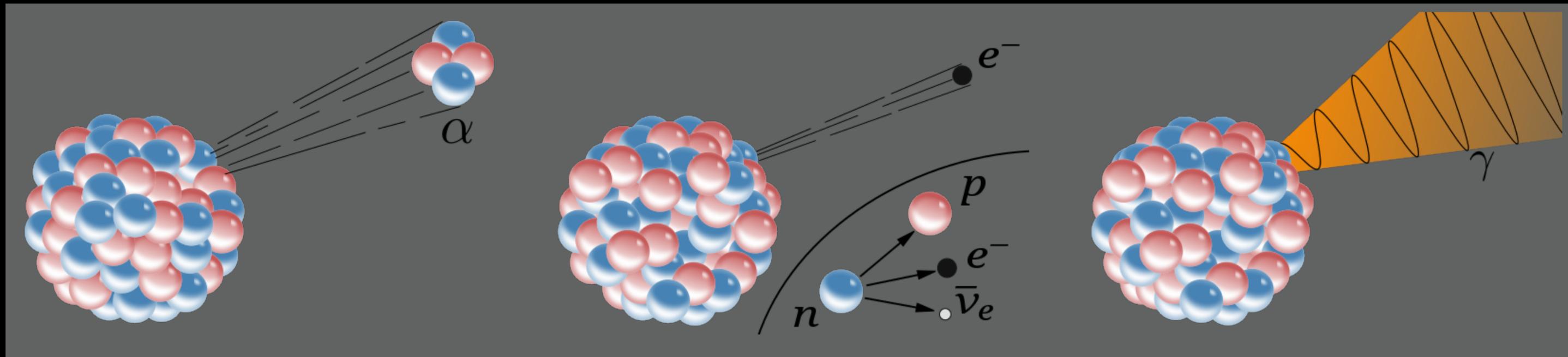
$$\gamma m_p \simeq \frac{m_\pi}{2\omega} (m_p + m_\pi/2) \simeq 5.4 \times 10^{19} \text{ eV}.$$

Auger Project: GZK



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

- Producción, interacciones.
- Bandas astrofísicas, detectores, resultados generales.
- El observatorio de rayos gamma HAWC.



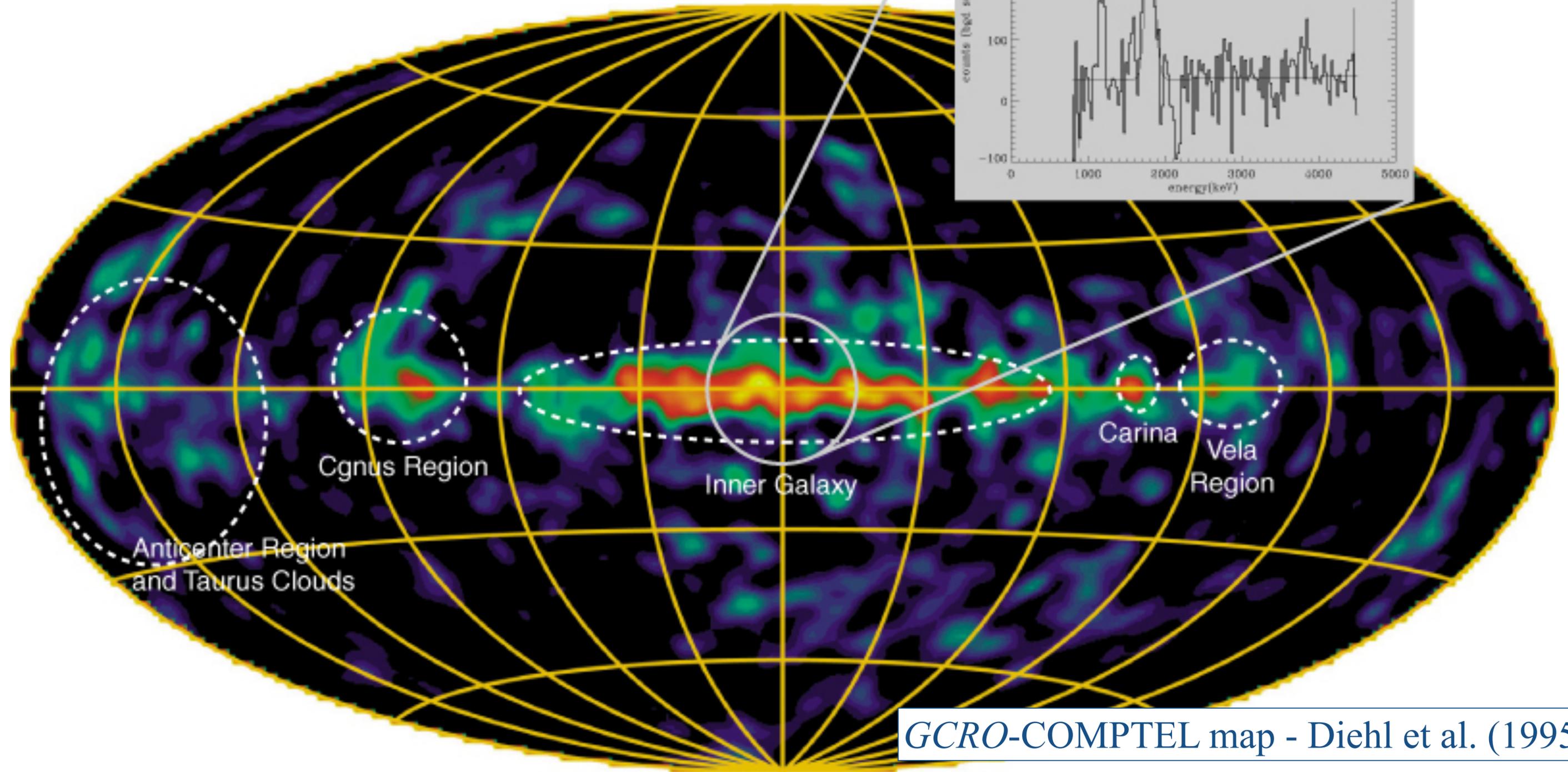
Producción de rayos gamma

- Interacción nuclear fuerte \Rightarrow decaimiento nuclear
 - Primera definición de la radiación gamma.
 - Núcleos atómicos con niveles separados por ~ 1 MeV.
- Interacción electromagnética:
 - procesos fotón - electrón.
 - hadrónica: decaimiento $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
- Interacción débil:
 - producción hadrónica 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

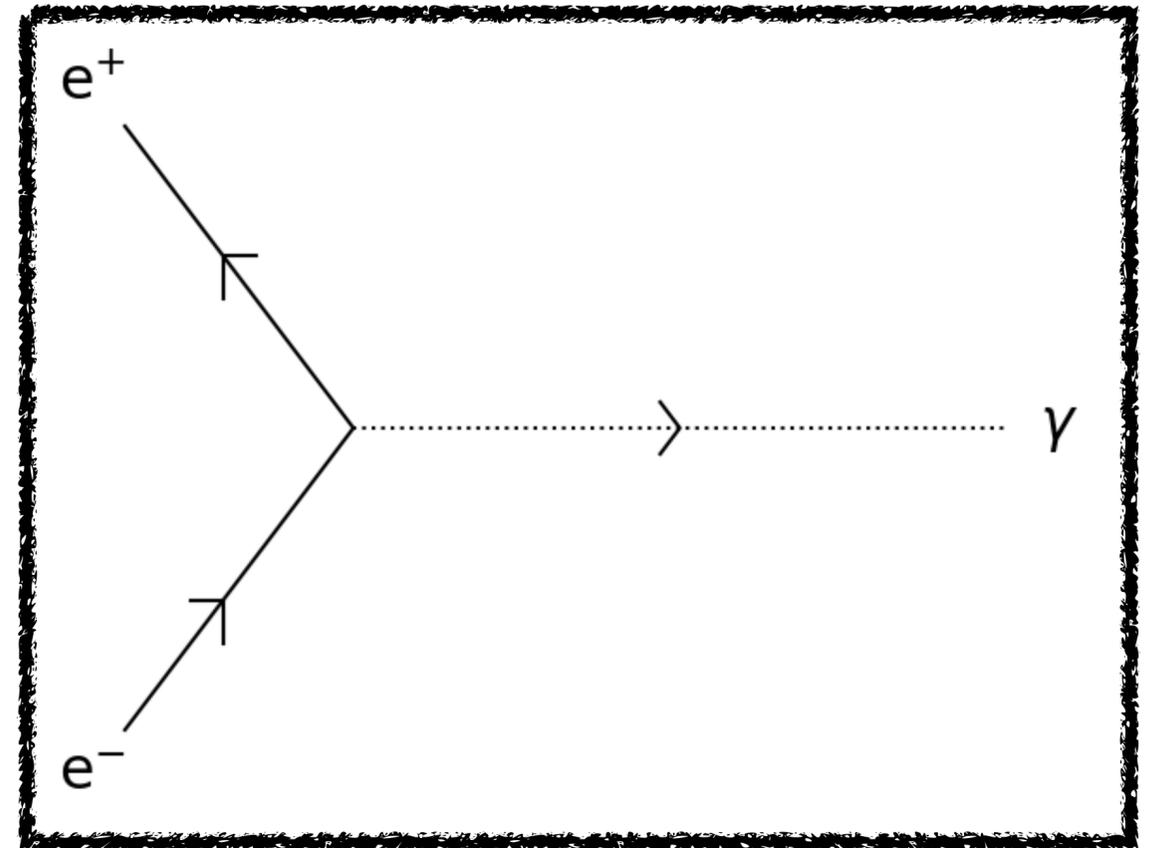


GCRO-COMPTTEL map - Diehl et al. (1995)

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



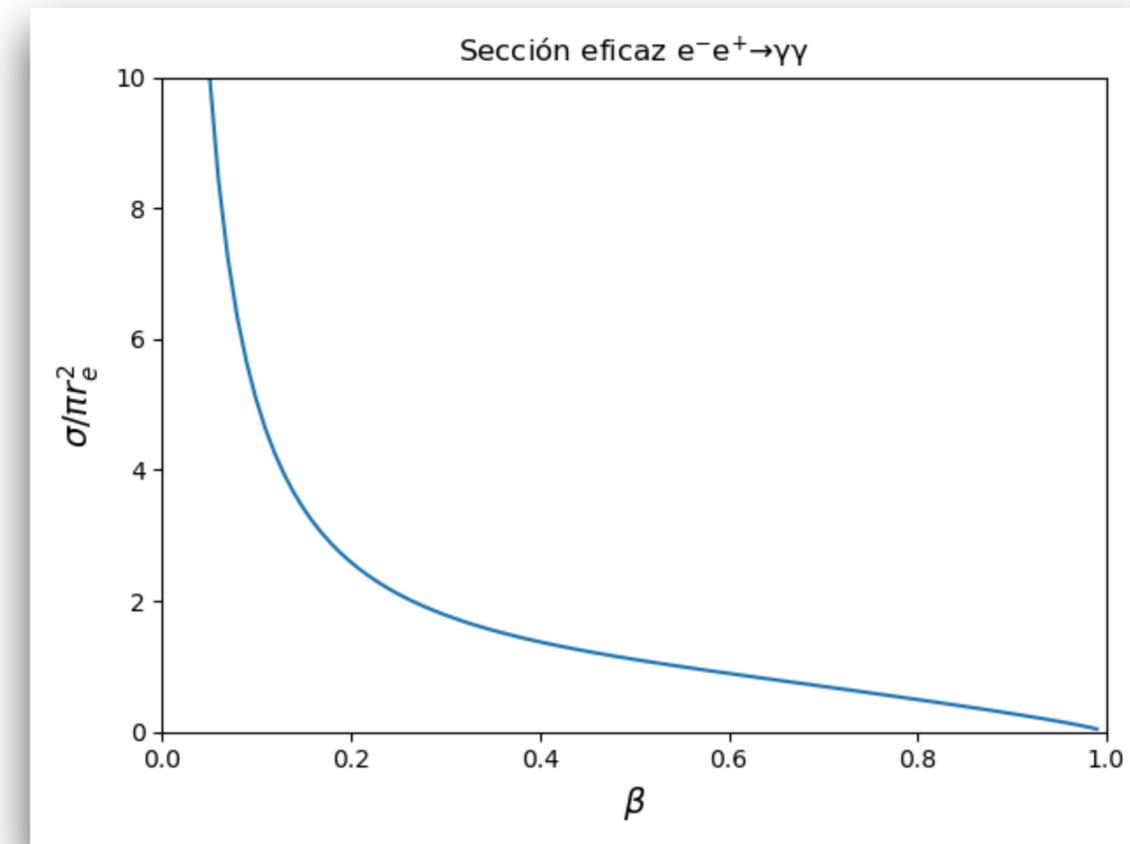
Aniquilación vía positronio

- ▶ 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,

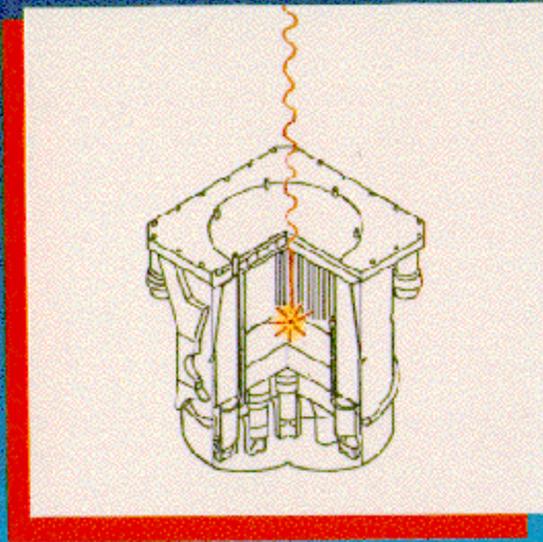
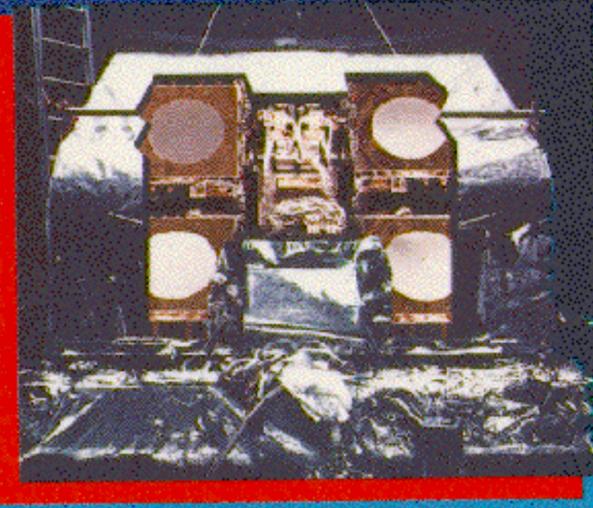
$$e^-e^+ \rightarrow 2\gamma \quad \Rightarrow \quad \tau = \alpha^{-5} \frac{2\hbar}{mc^2} = 1.23 \times 10^{-10} \text{ s}.$$

- ▶ El ortopositronio decae de acuerdo a,

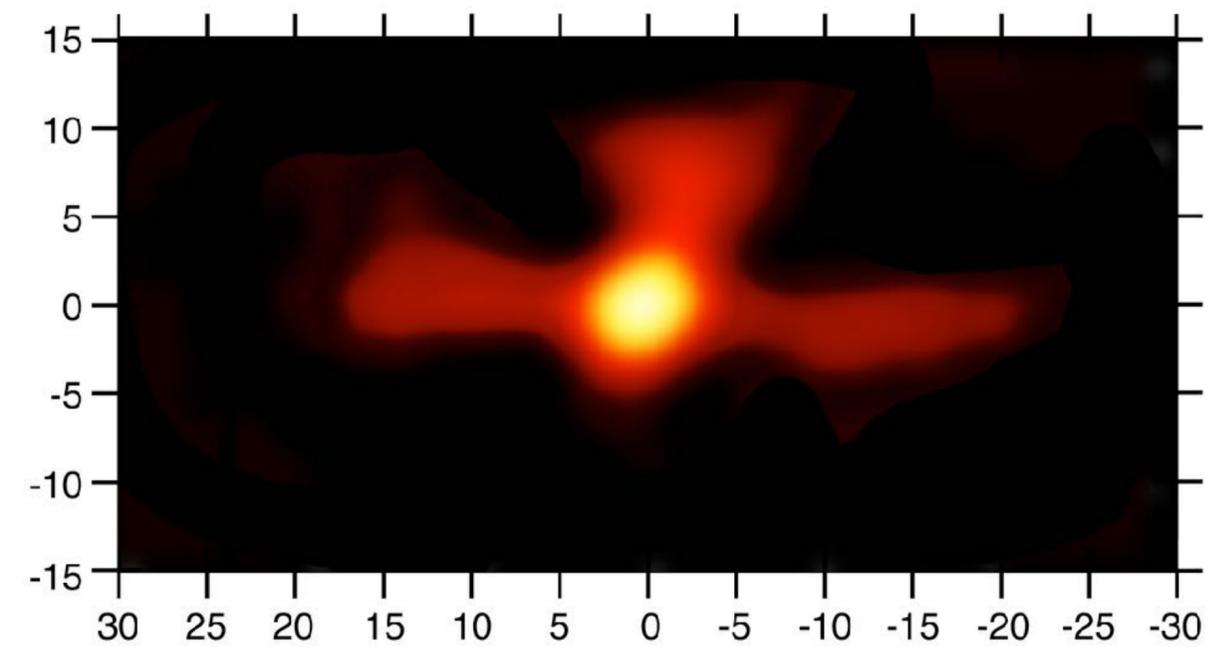
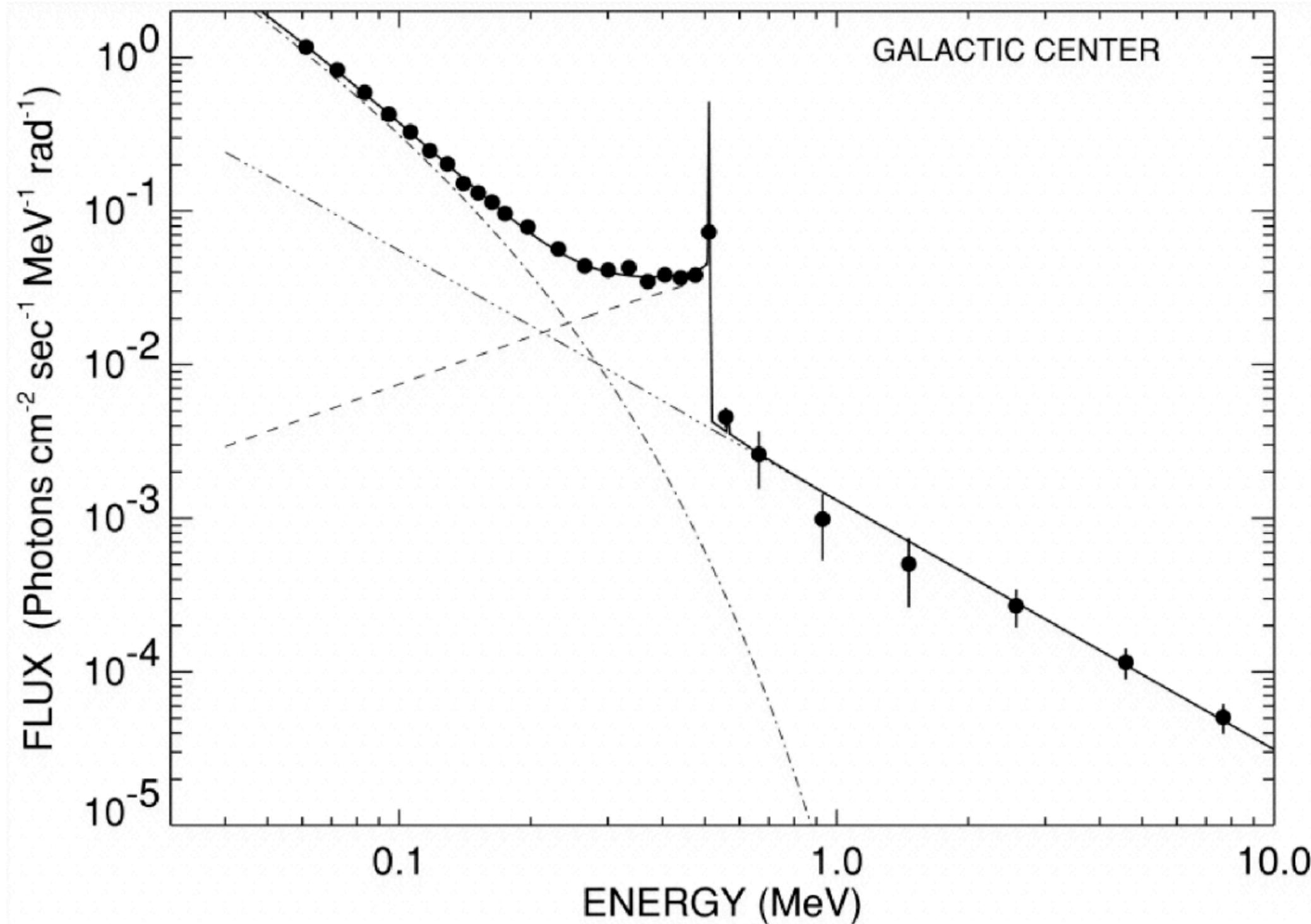
$$e^-e^+ \rightarrow 3\gamma \quad \Rightarrow \quad \tau \sim \alpha^{-6} \frac{\hbar}{mc^2} = 1.4 \times 10^{-7} \text{ s}.$$



Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (OSSE)



The annihilation fountain



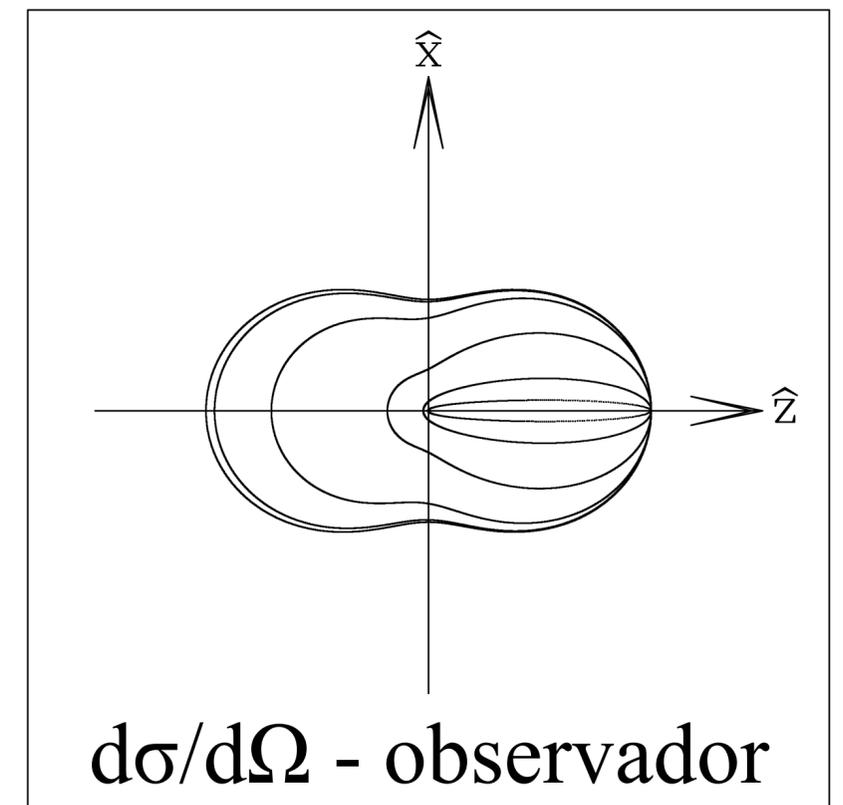
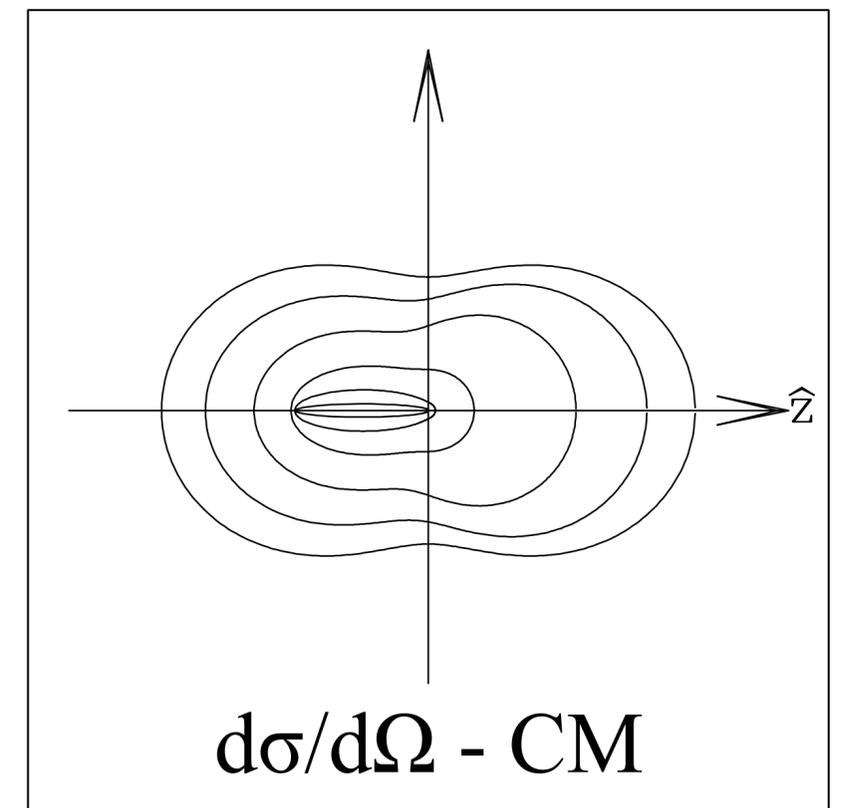
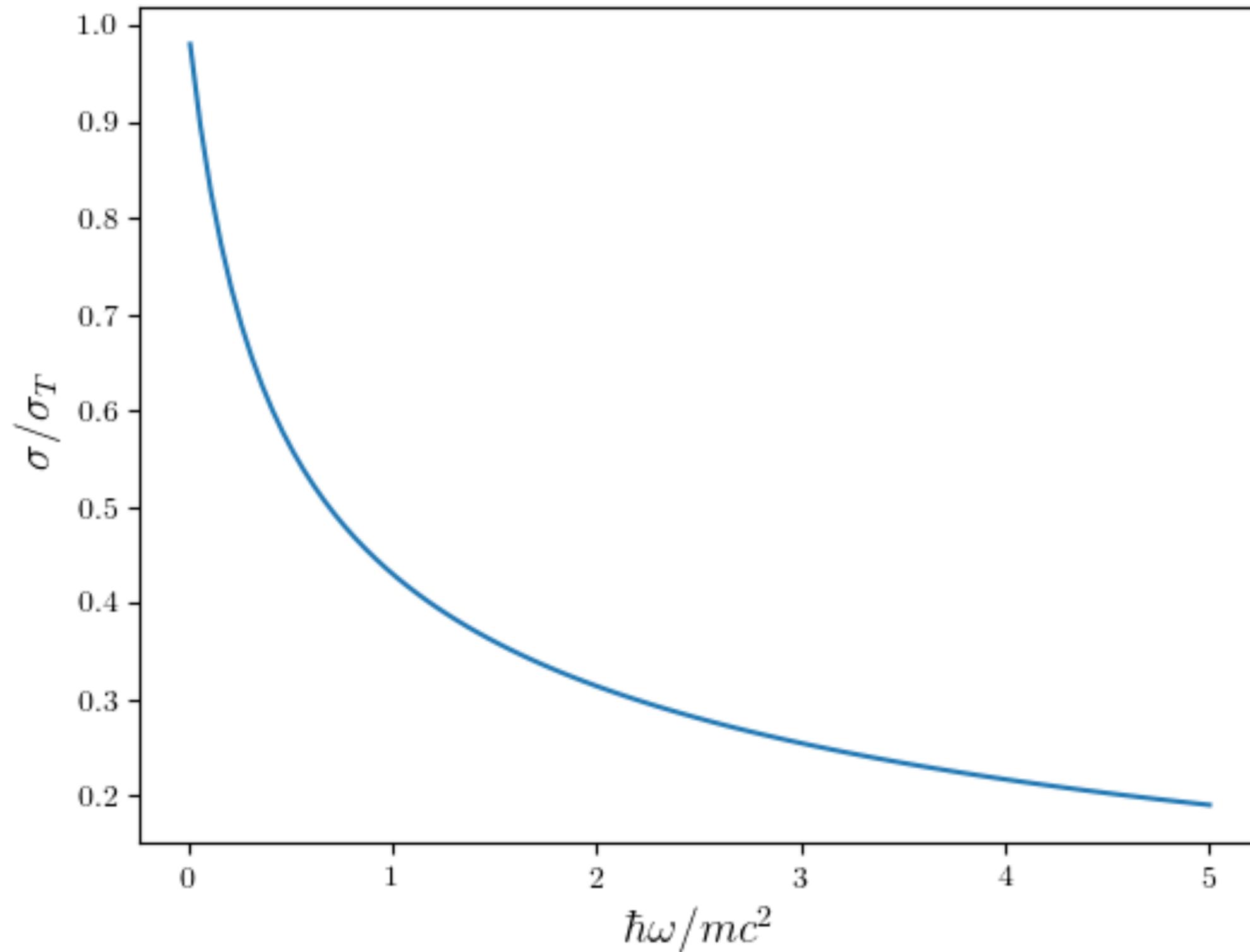
Efecto Compton

- 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 por la interacción de fotones de baja energía con electrones altamente relativistas,

$$\hbar\omega_1 \simeq \max(2\gamma^2 \hbar\omega_0, \gamma mc^2)$$

- un fotón de 1 eV puede alcanzar 800 MeV al interactuar con un electrón de 10 GeV.
- limitado a la energía del fotón y por la sección eficaz.

Sección eficaz Klein - Nishina



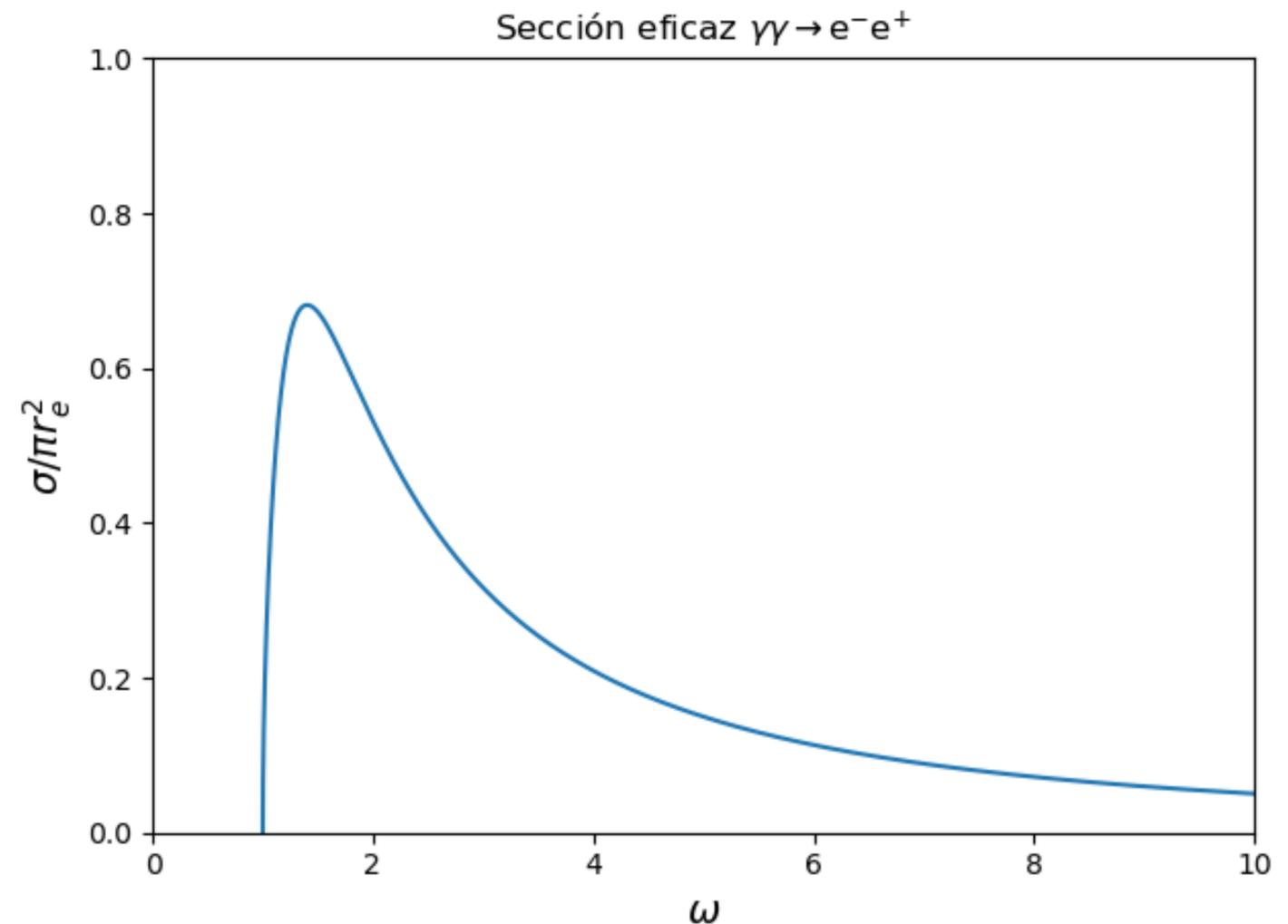
Producción de pares

- $\gamma \gamma \rightarrow e^+ e^-$ es una interacción importante para fotones con energías de TeV.

- La sección eficaz es máxima para

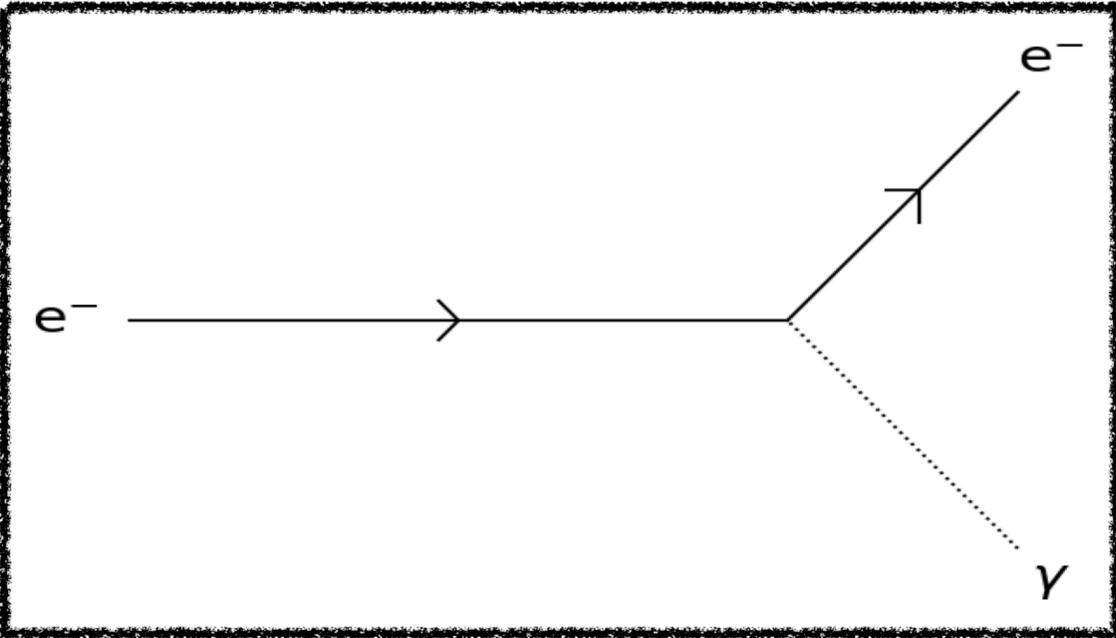
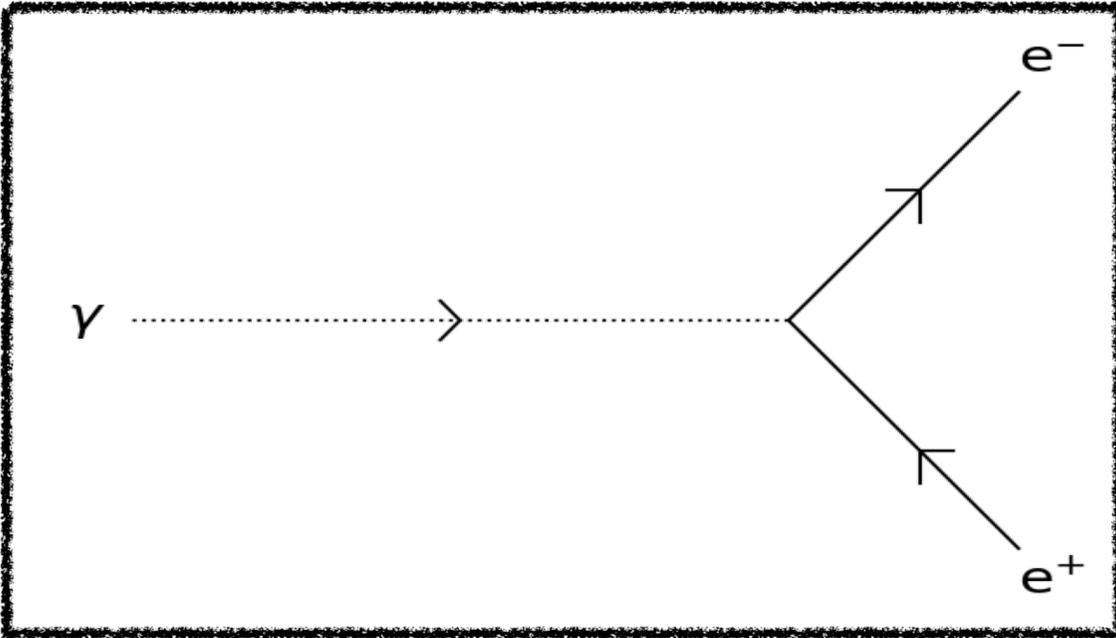
$$E\hbar\omega \simeq 2(mc^2)^2 \Rightarrow 0.5 \text{ eV} \cdot \text{TeV}.$$

- 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 $z \simeq 0.1$.



Interacciones con campos

- 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

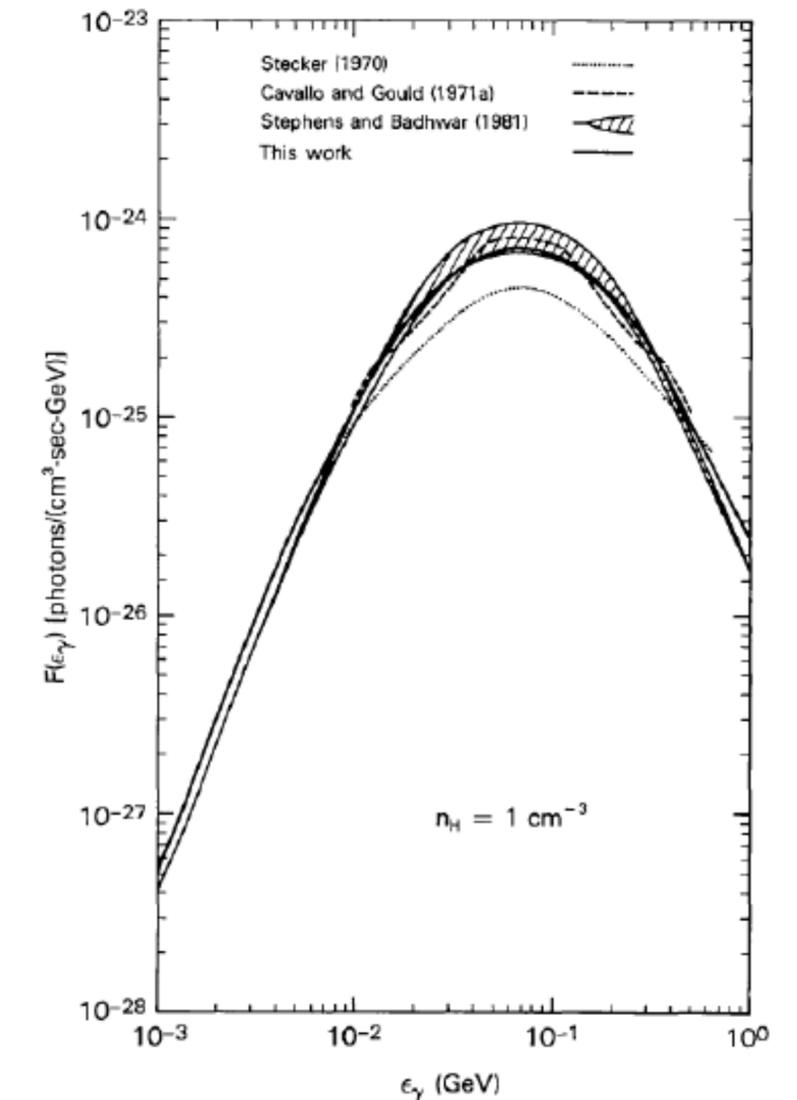
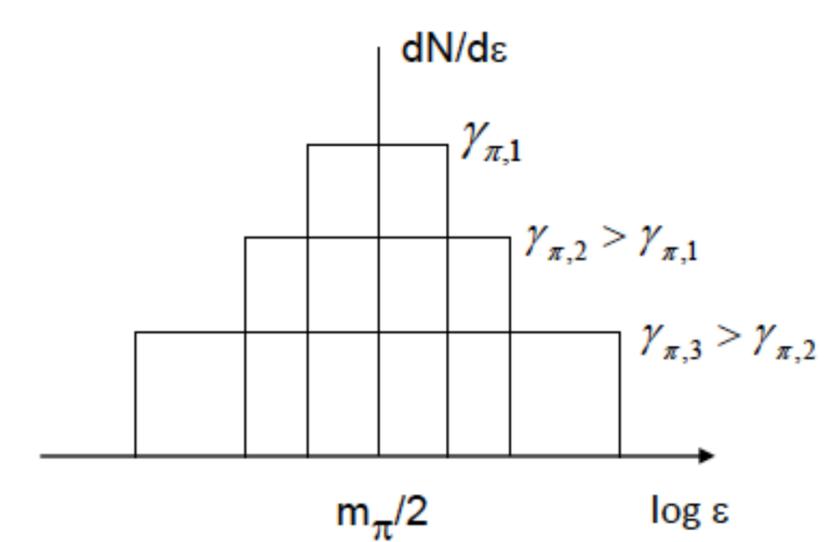
Piones neutros

- ▶ 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,

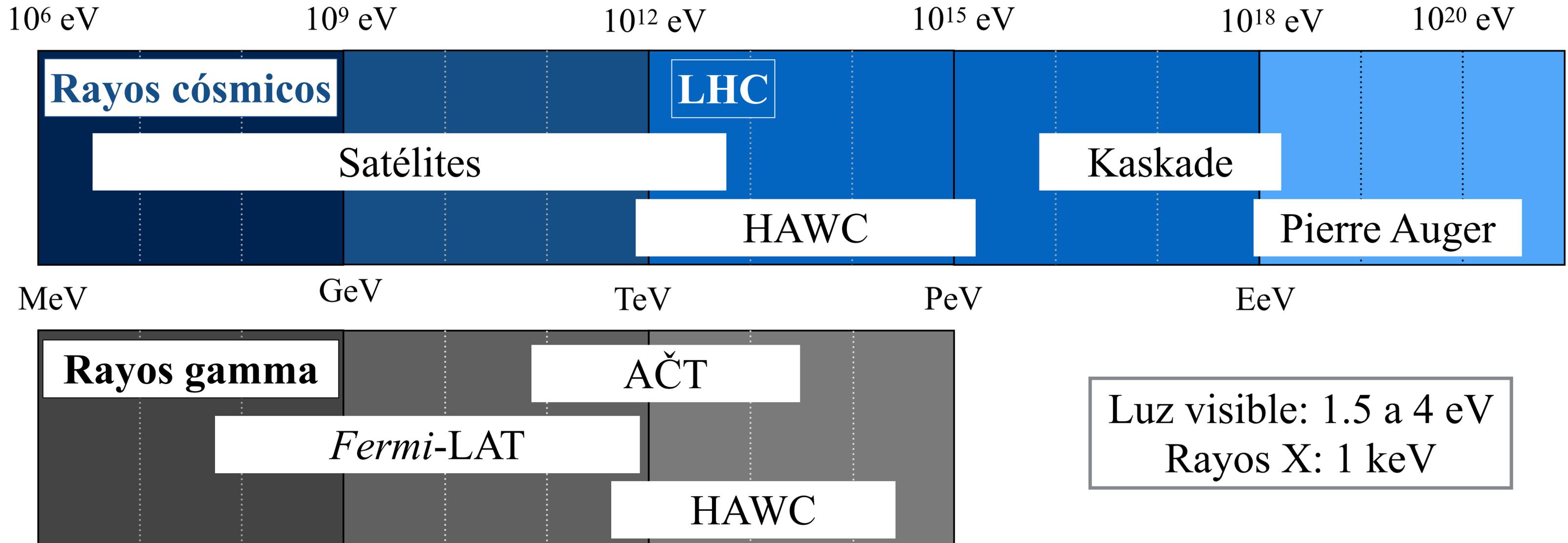
$$\gamma_\pm = \gamma_\pi m_\pi (1 \pm \beta_\pi \cos \theta) / 2,$$

siendo $\cos \theta$ aleatoria.

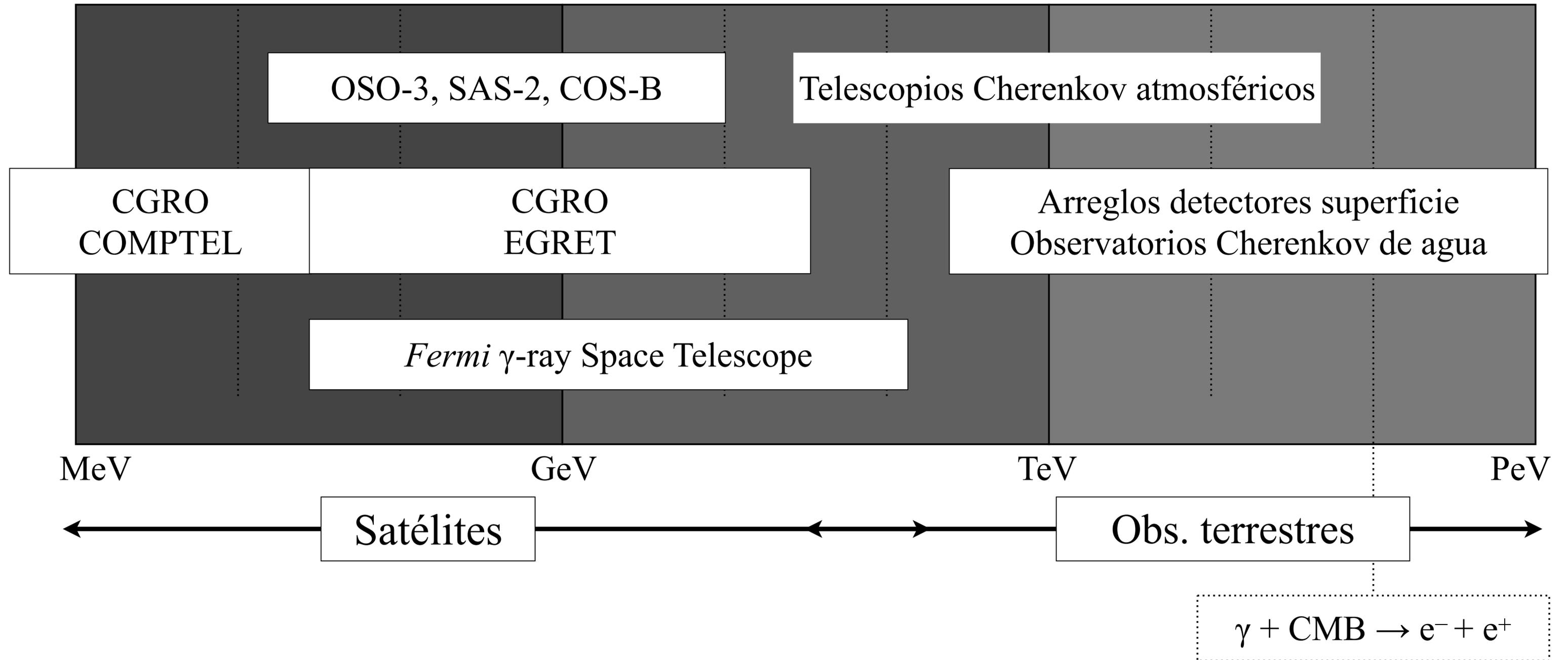
- ▶ La distribución de energía de los fotones es plana en el intervalo $[\gamma_\pi m_\pi (1 - \beta_\pi) / 2, \gamma_\pi m_\pi (1 + \beta_\pi) / 2]$.
- ▶ Para una población de π^0 en ley de potencias, resultante de una ley de potencias de rayos cósmicos, se obtiene una curva simétrica en $\log(E)$,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



Bandas astrofísicas



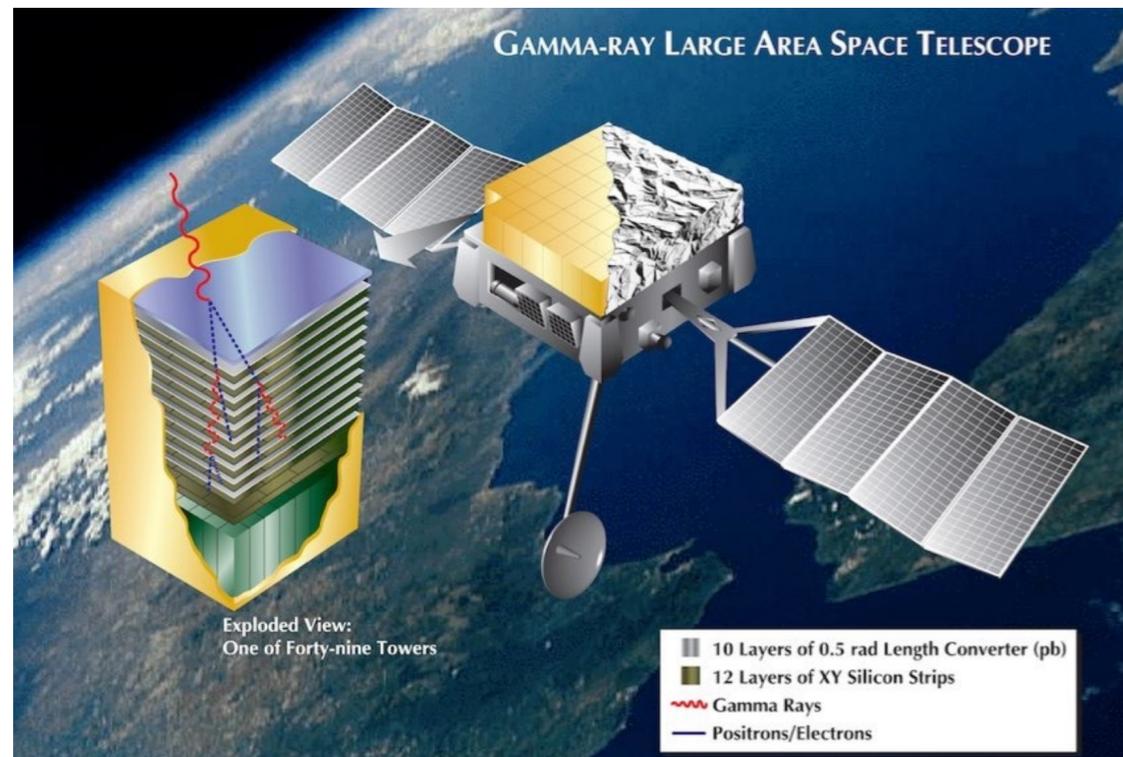
Bandas astrofísicas



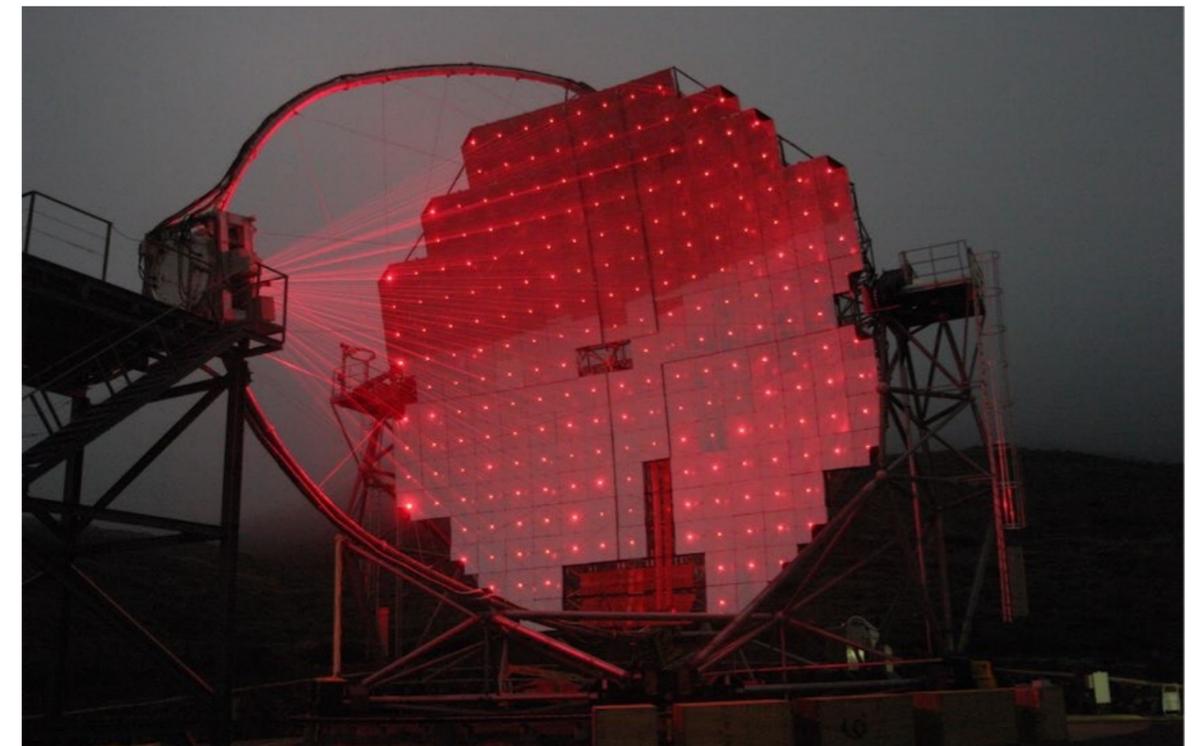
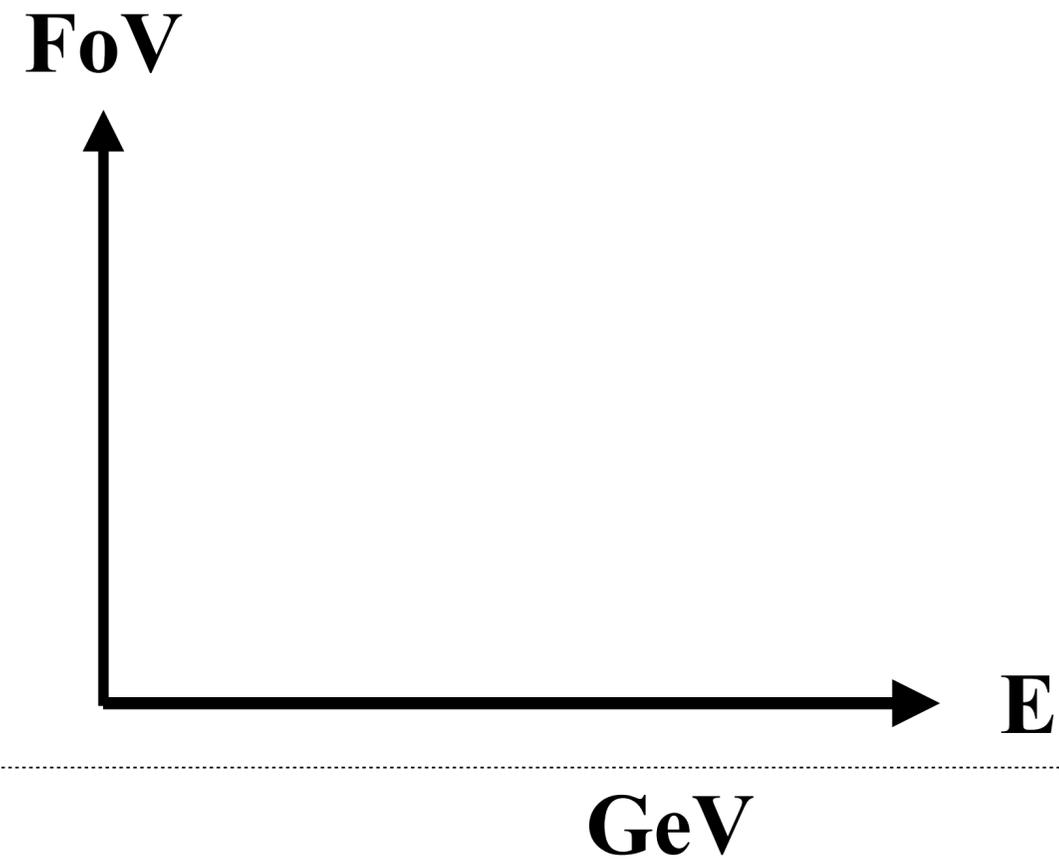
Observatorios de rayos γ

- 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, SWSO.

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

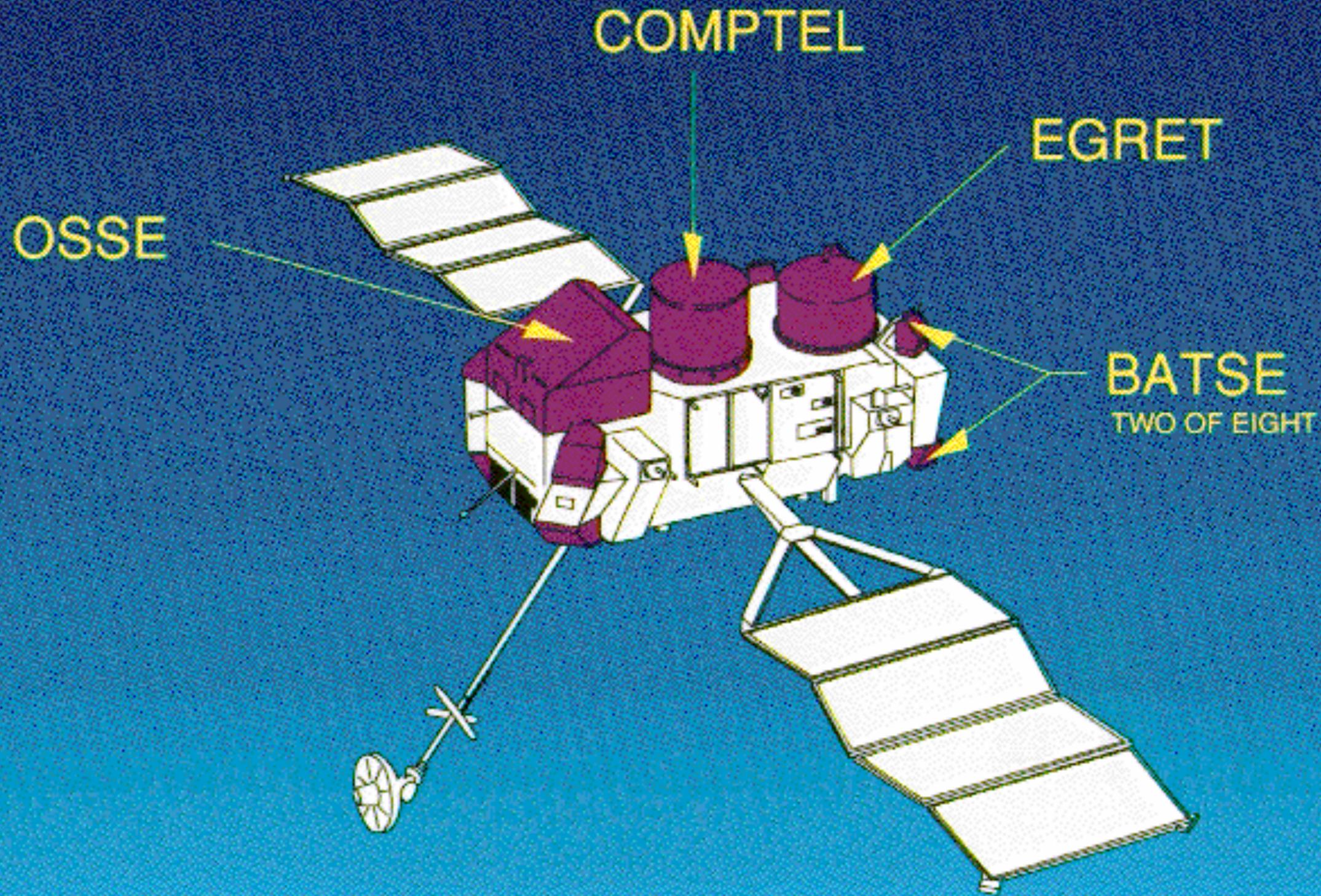
TeV

Telescopios espaciales



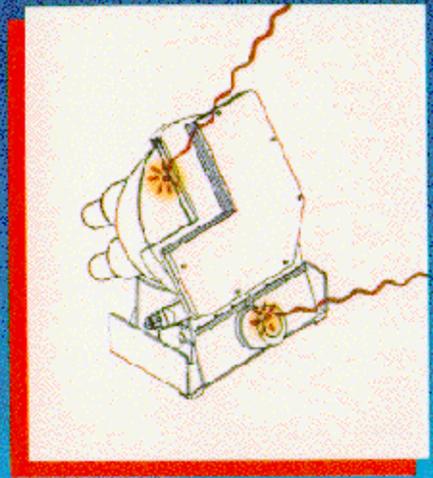
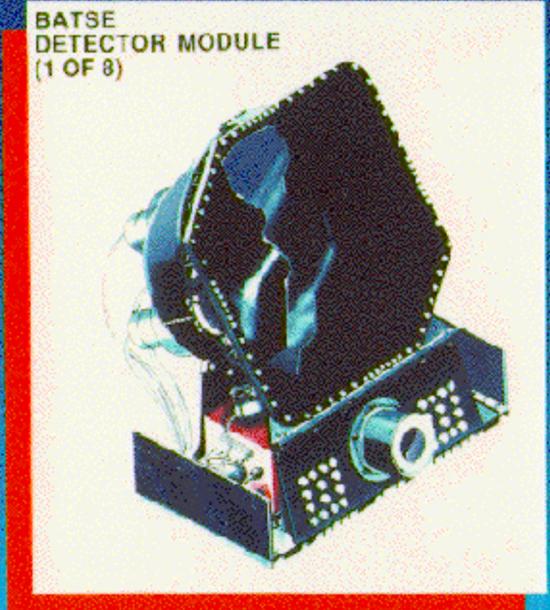
Compton Gamma-Ray Observatory
CGRO (1991-2000)

GRO Instruments



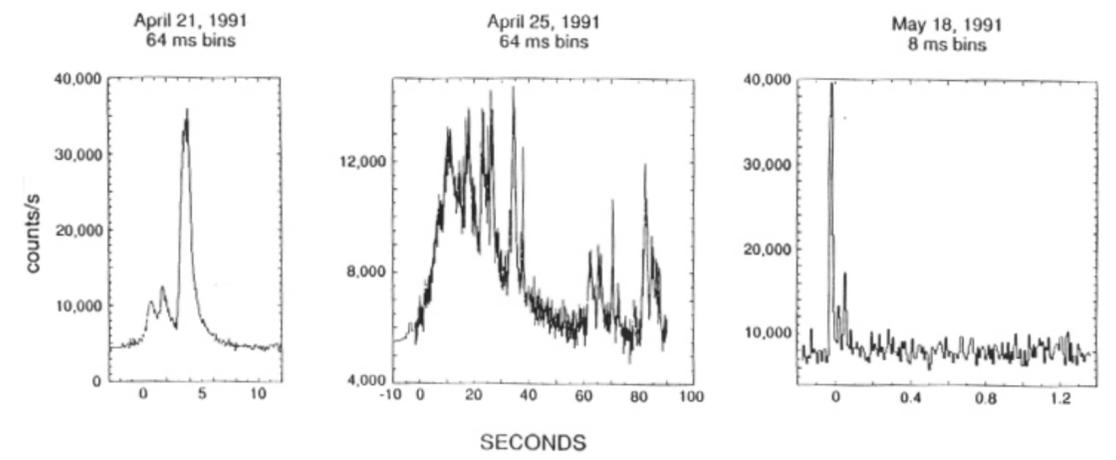
Compton Gamma-Ray Observatory
CGRO (1991-2000)

Burst and Transient Source Experiment (BATSE)

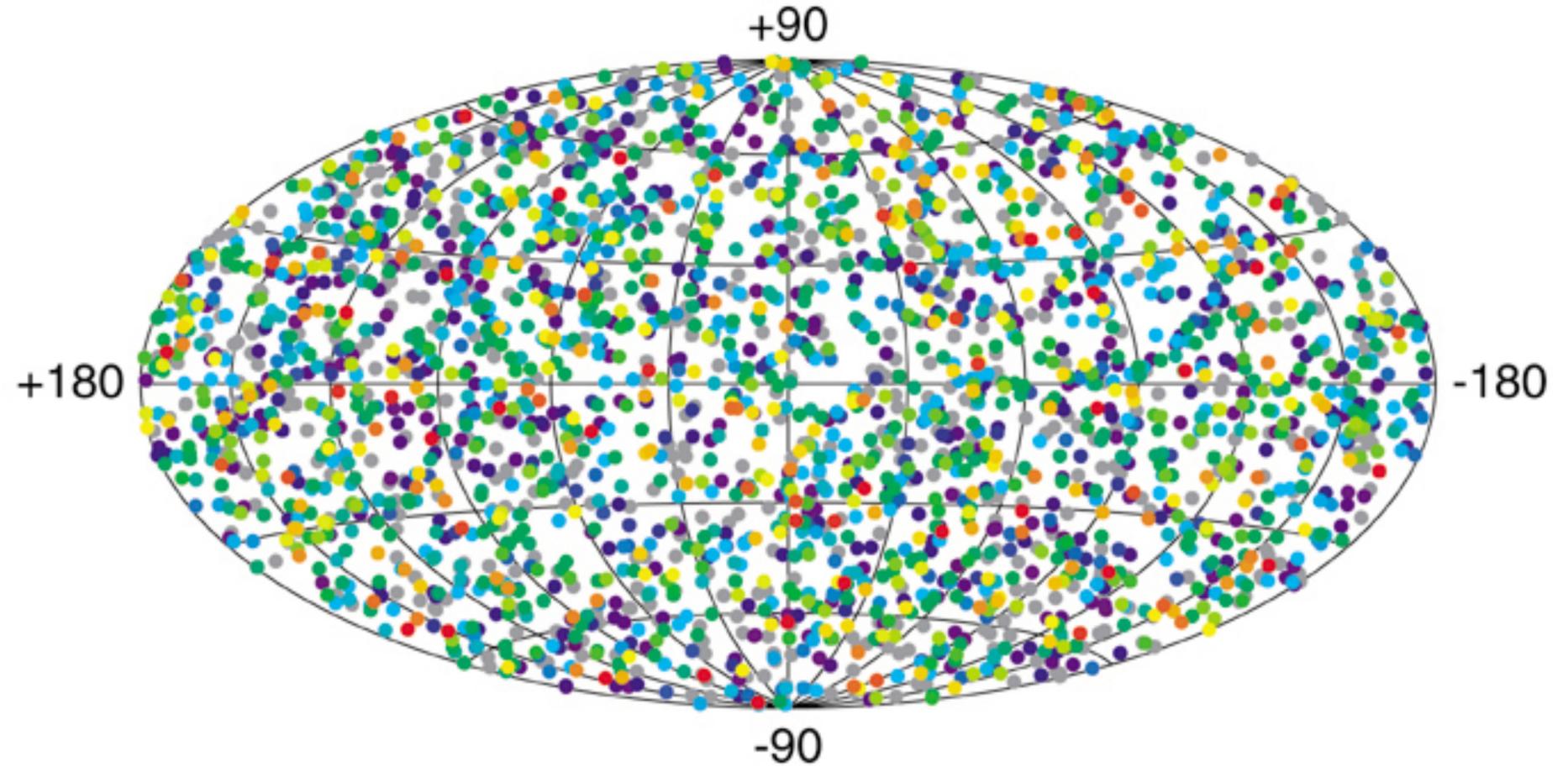
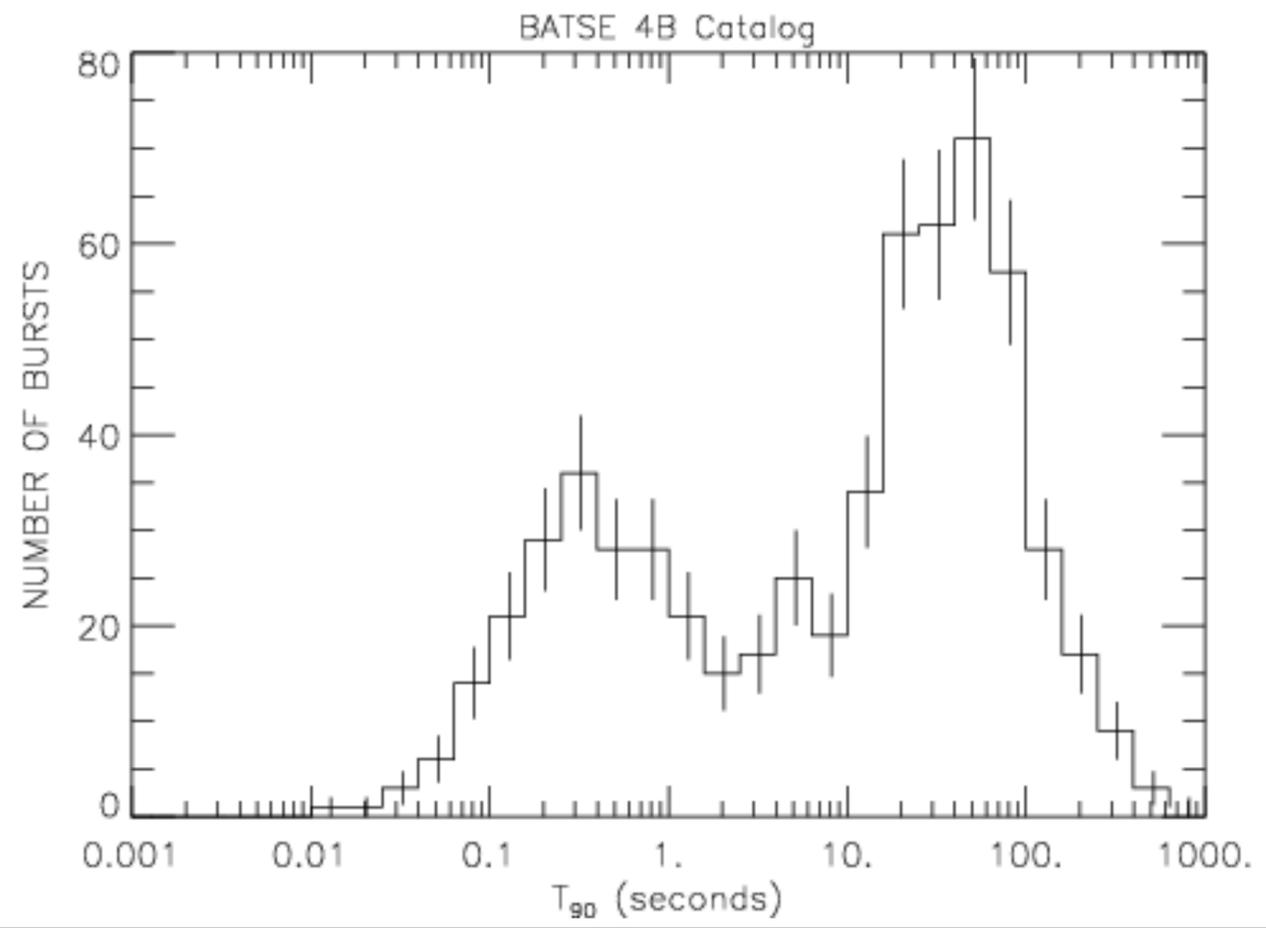


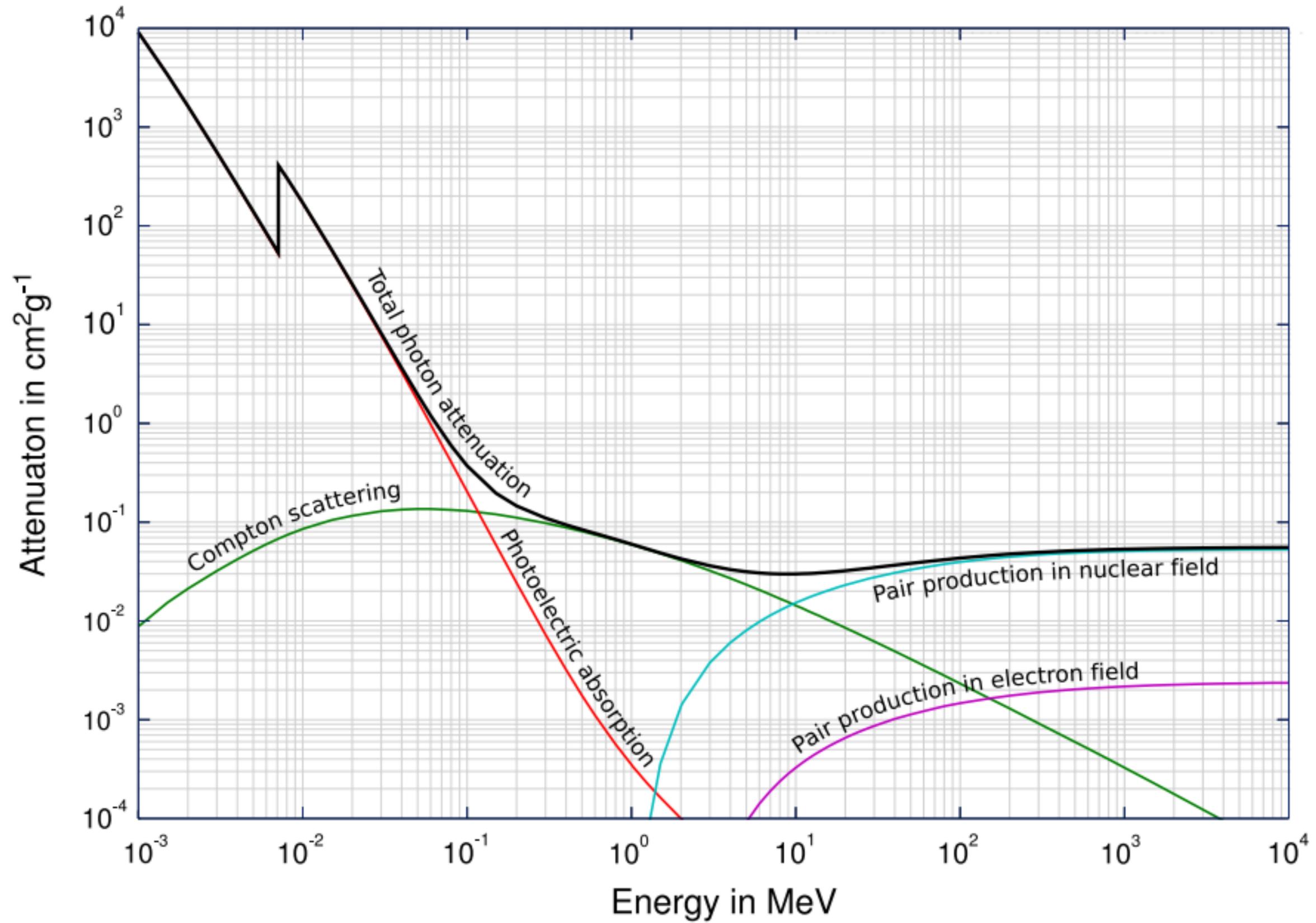
BATSE

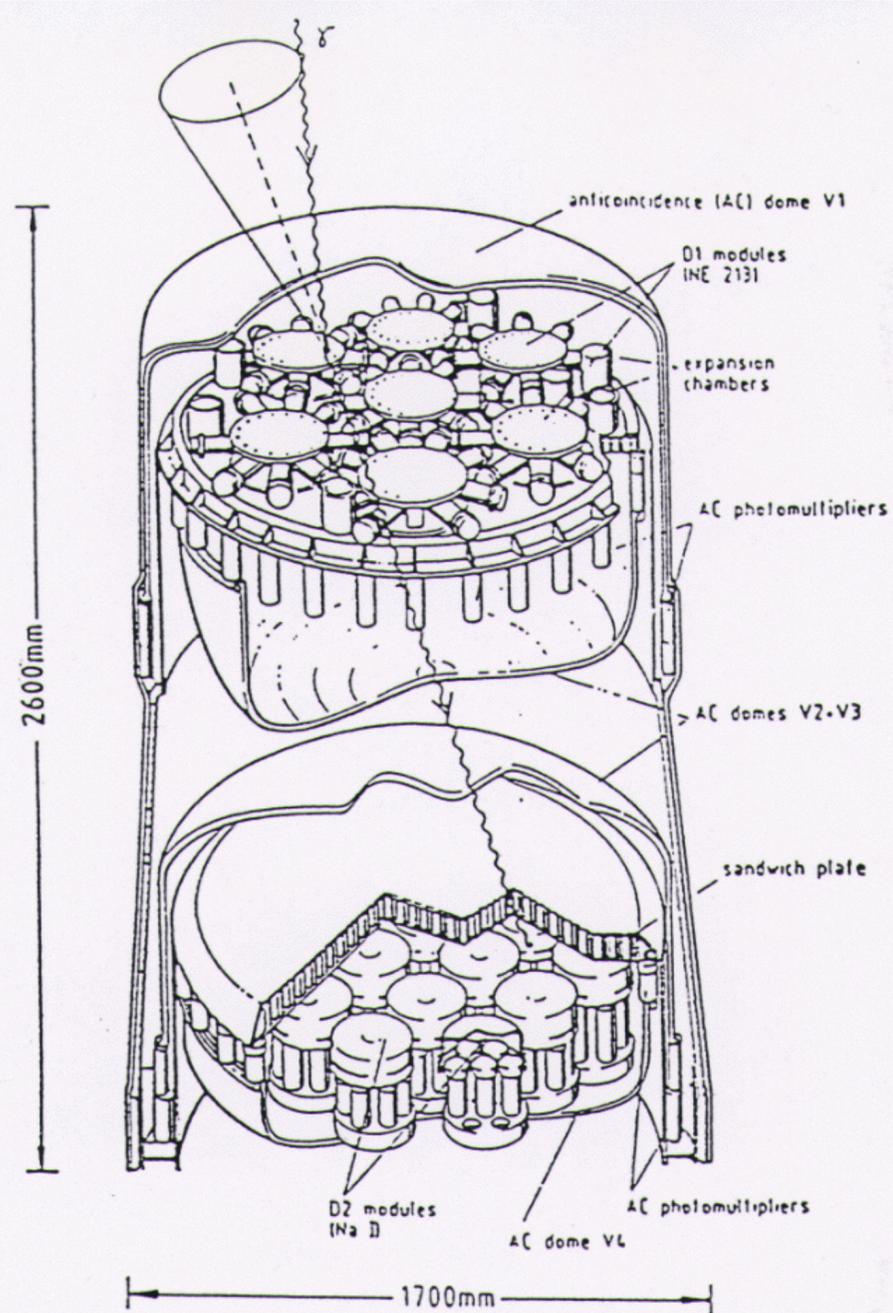
BATSE—GRO 3 Types of Gamma-Ray Bursts 50-300 keV



2704 BATSE Gamma-Ray Bursts





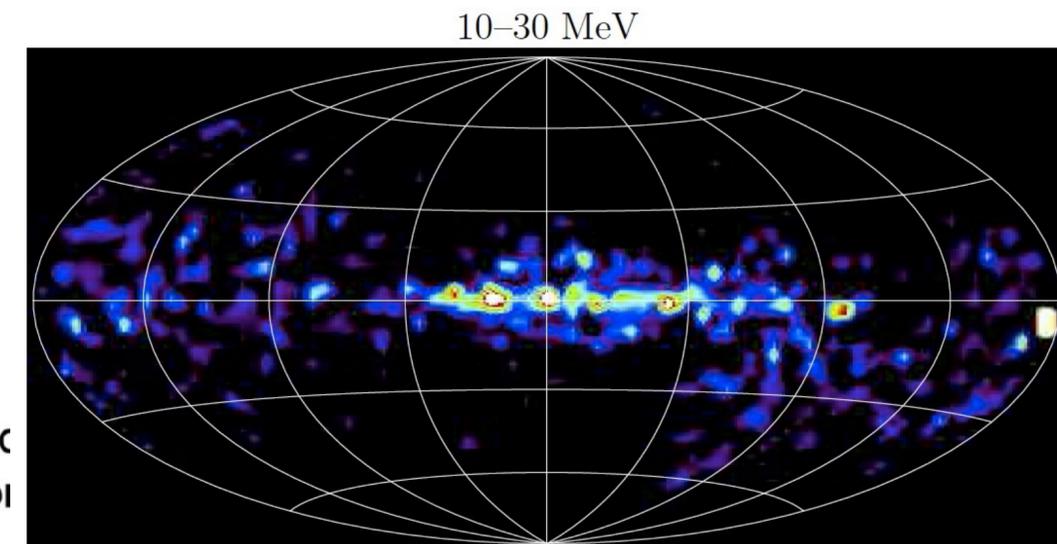
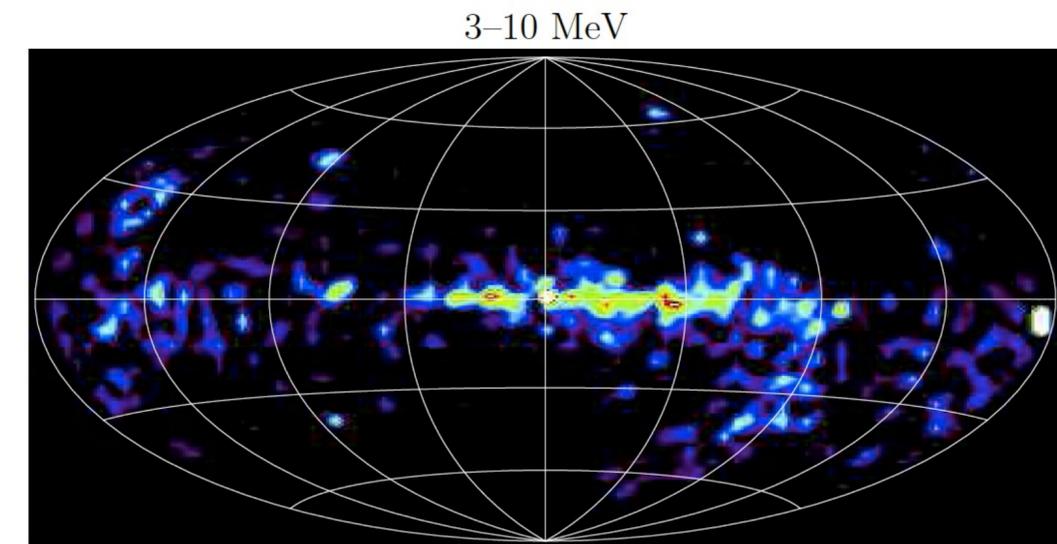
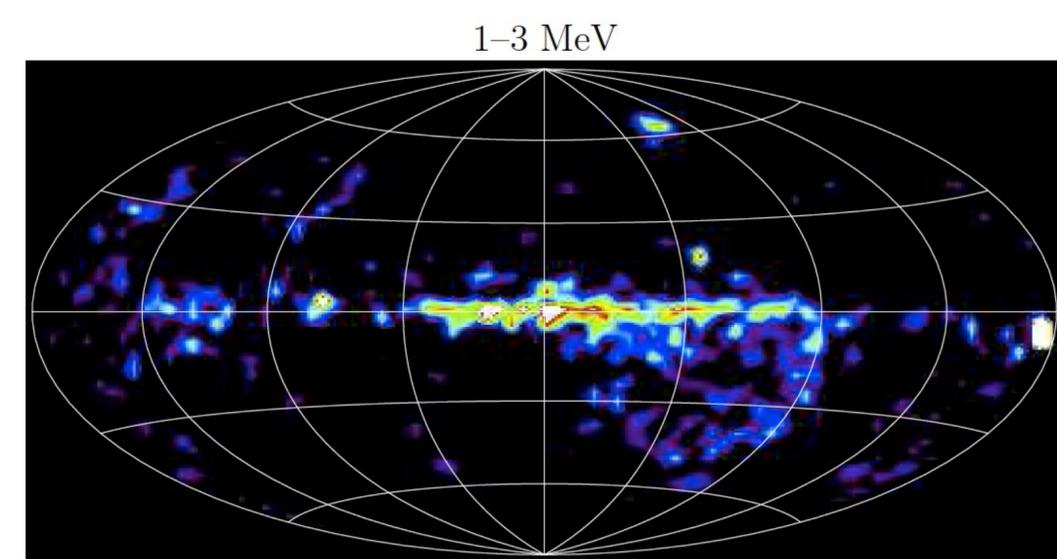
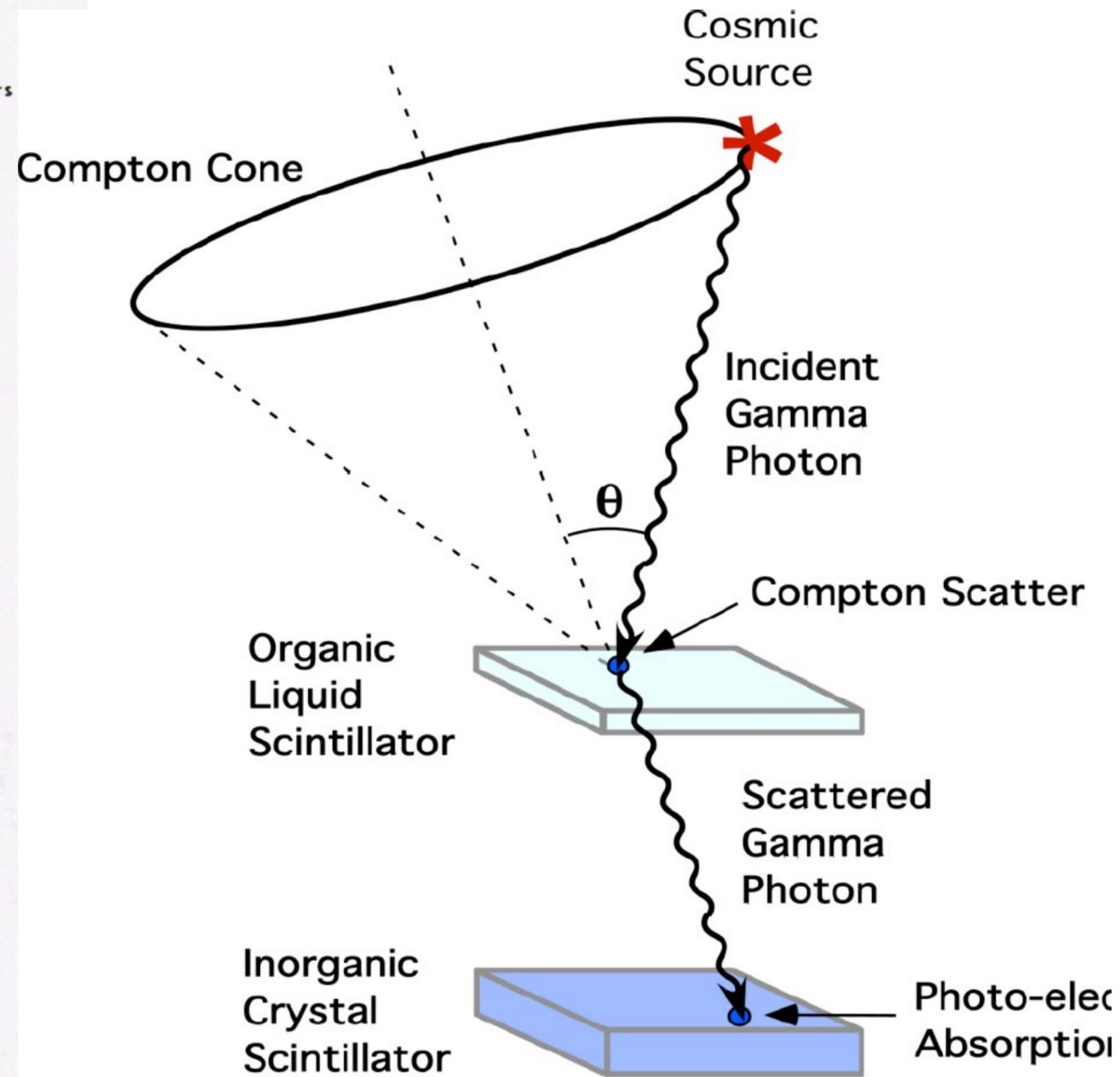


Schematics of COMPTEL

$$E_T = E_1 + E_2$$

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

COMPTEL



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+)

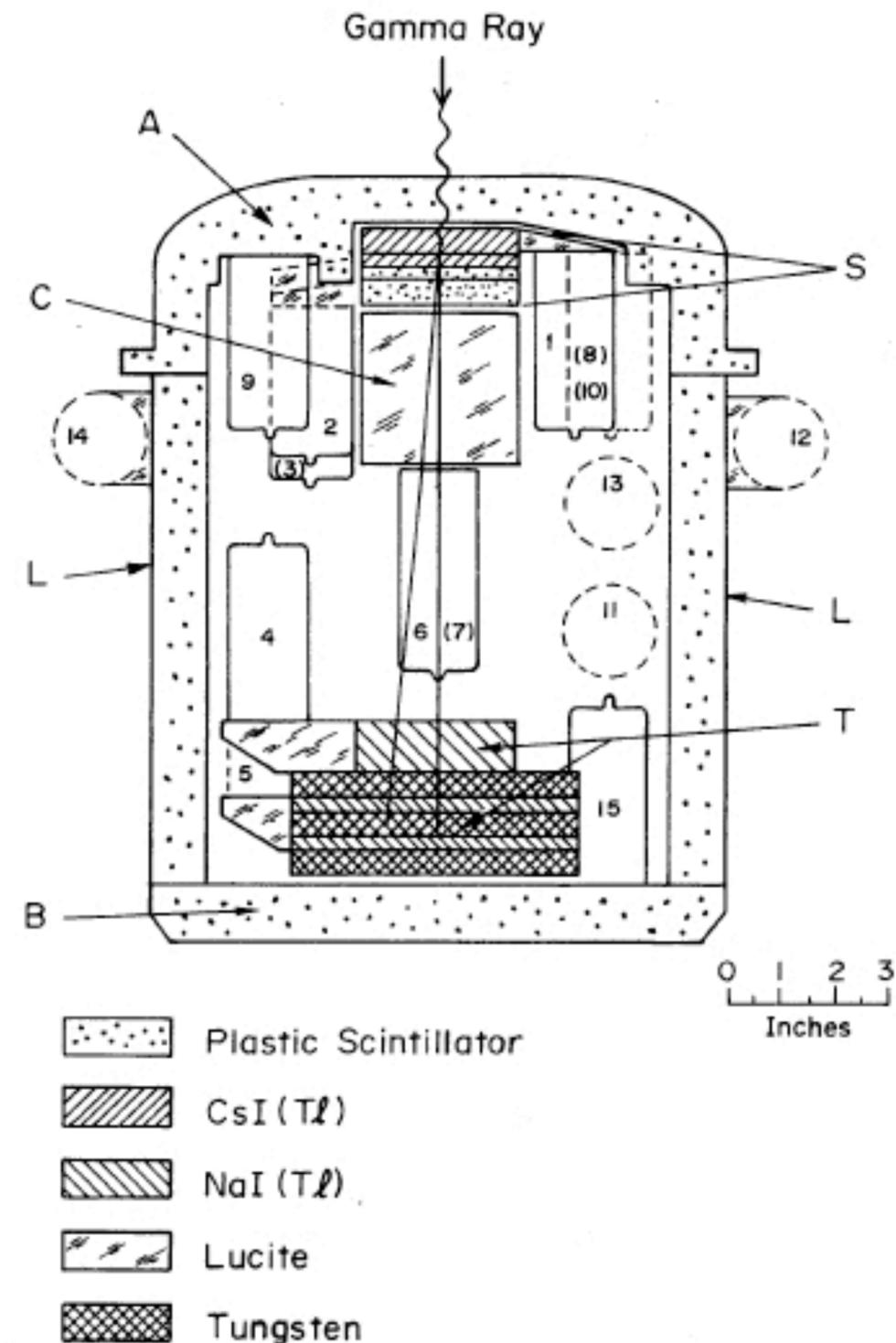
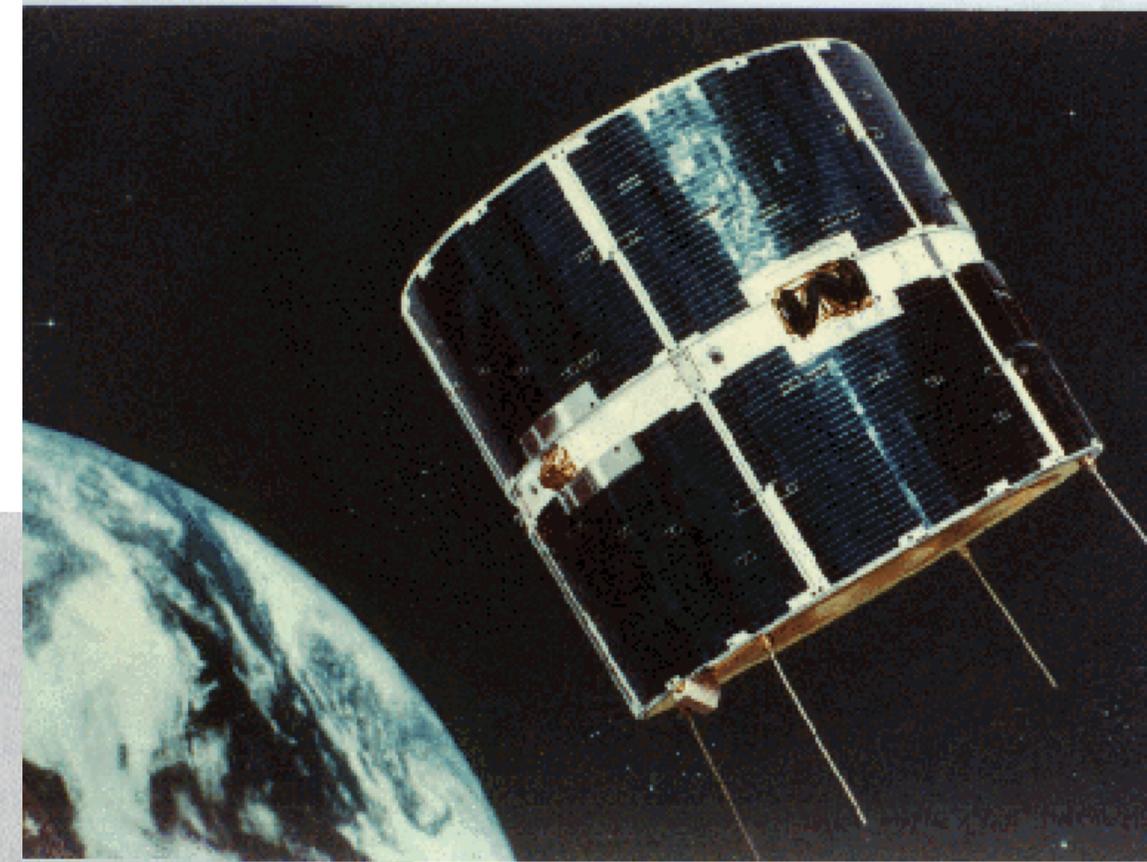
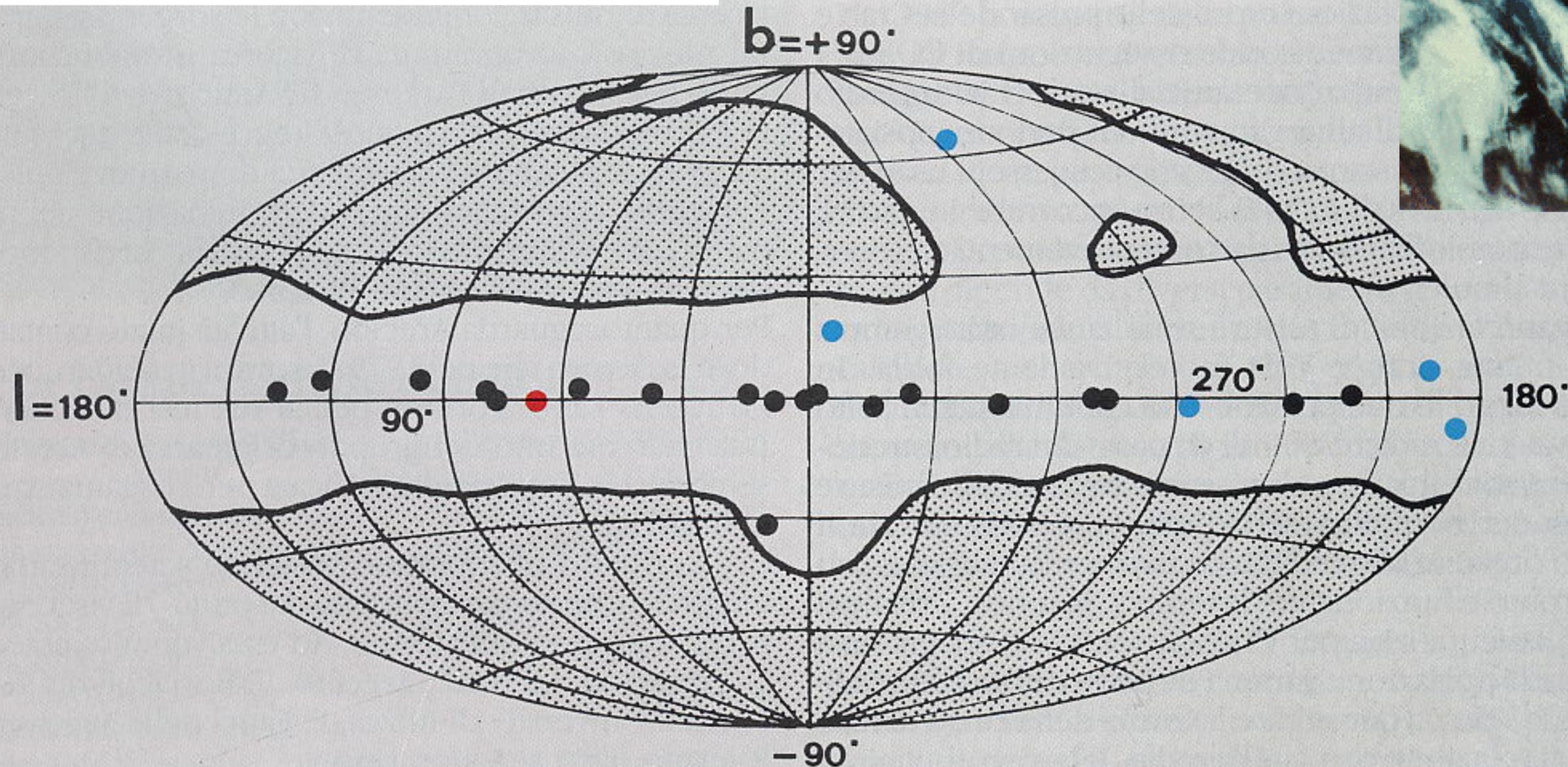


FIG. 1.—Scale drawing of the OSO-3 γ -ray instrument. The photomultipliers are labeled 1 through 15. A typical event in which an incident γ -ray produces a pair of electrons in S is indicated schematically.

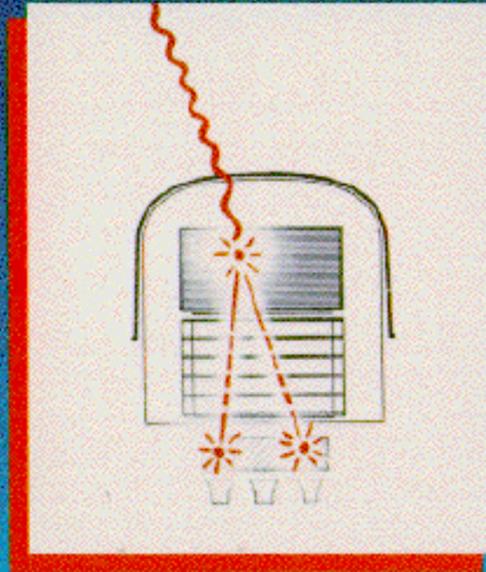
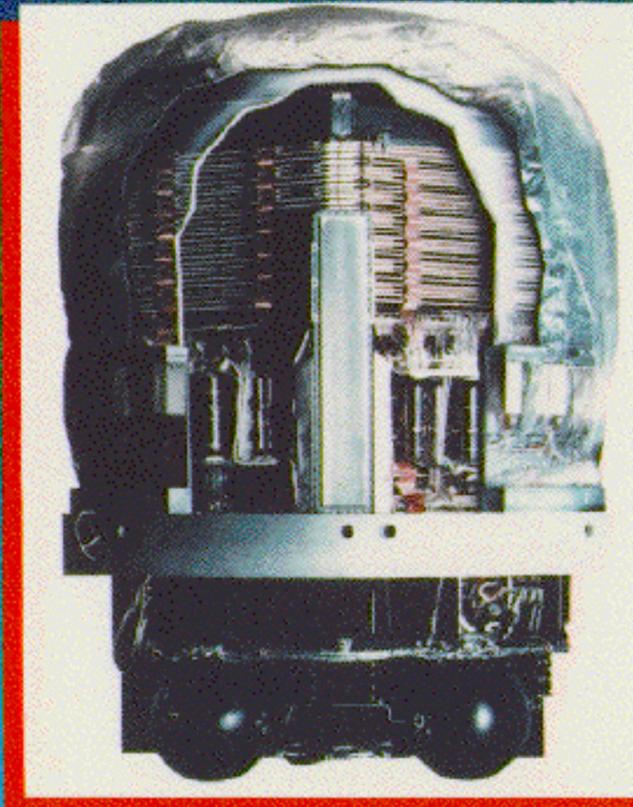
COS-B



2CG - Swanenburg et al. (1981)

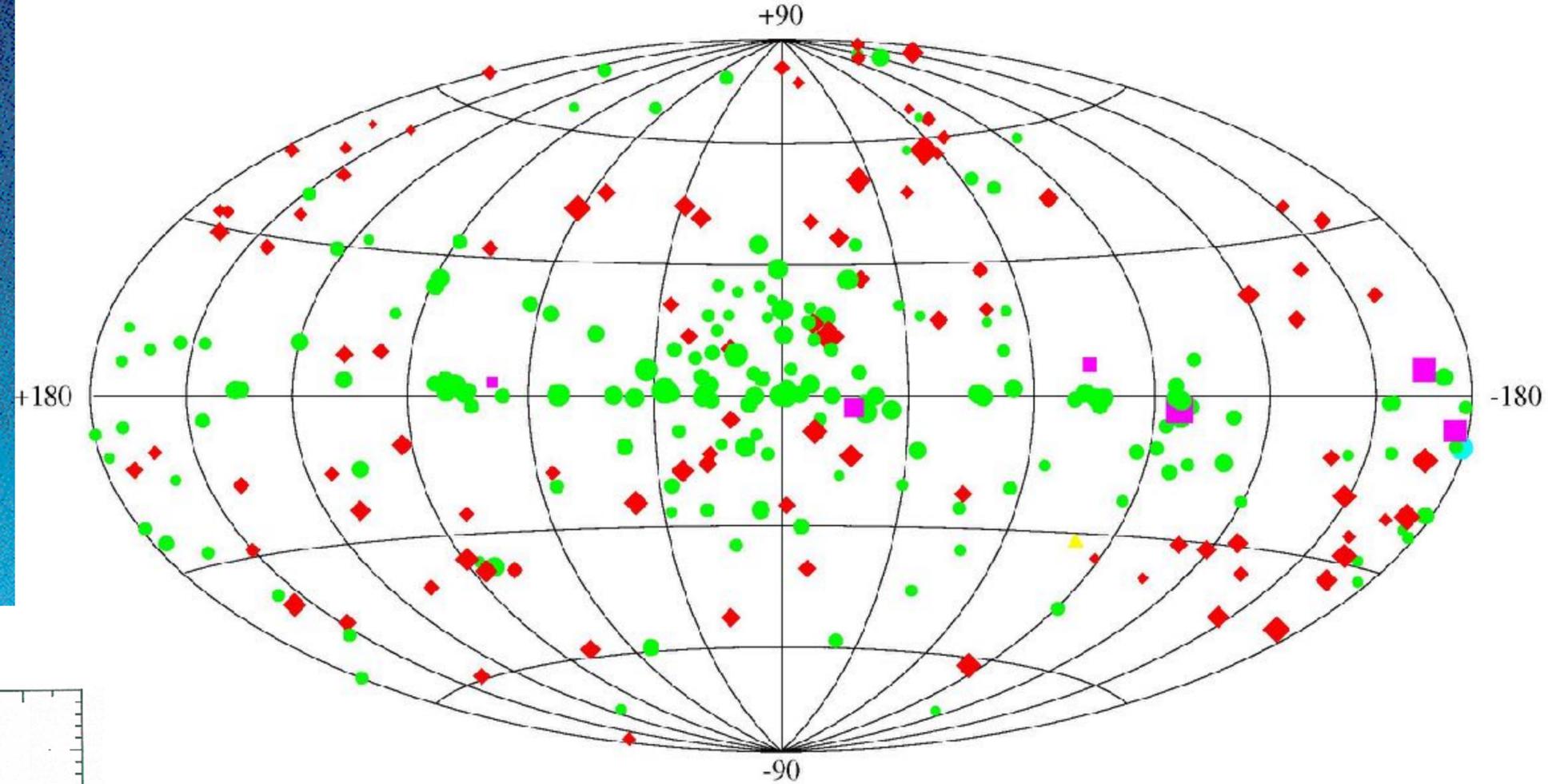


Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)



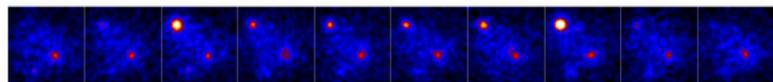
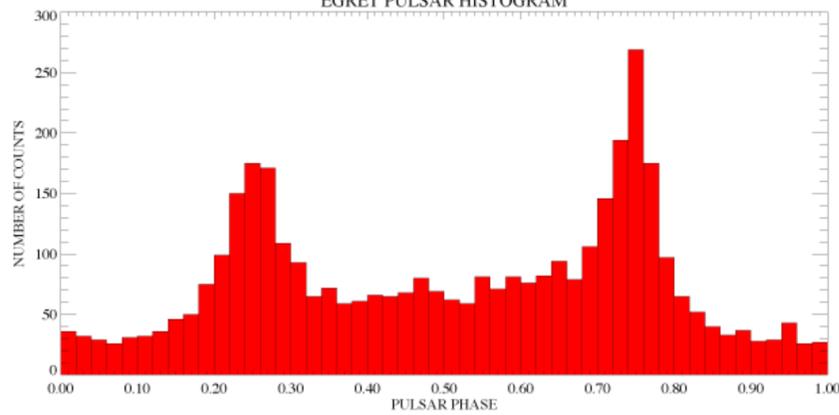
Third EGRET Catalog

$E > 100 \text{ MeV}$

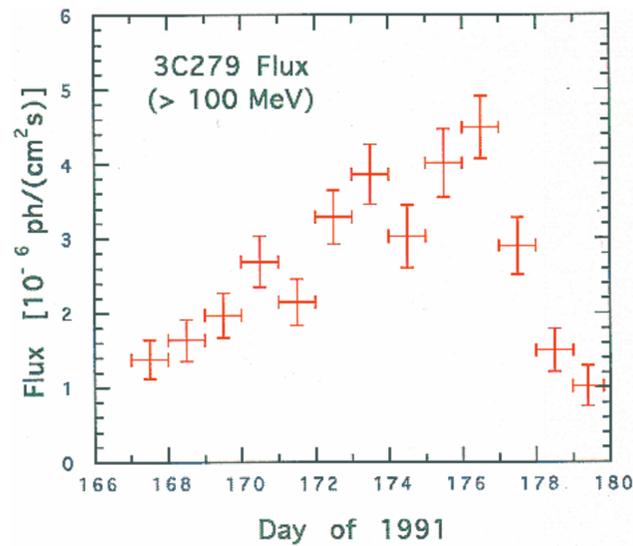


- ◆ Active Galactic Nuclei
- Unidentified EGRET Sources
- Pulsars
- ▲ LMC
- Solar FLare

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 GST
(11 junio 2008)



Fermi Gamma-ray Space Telescope (2008–)

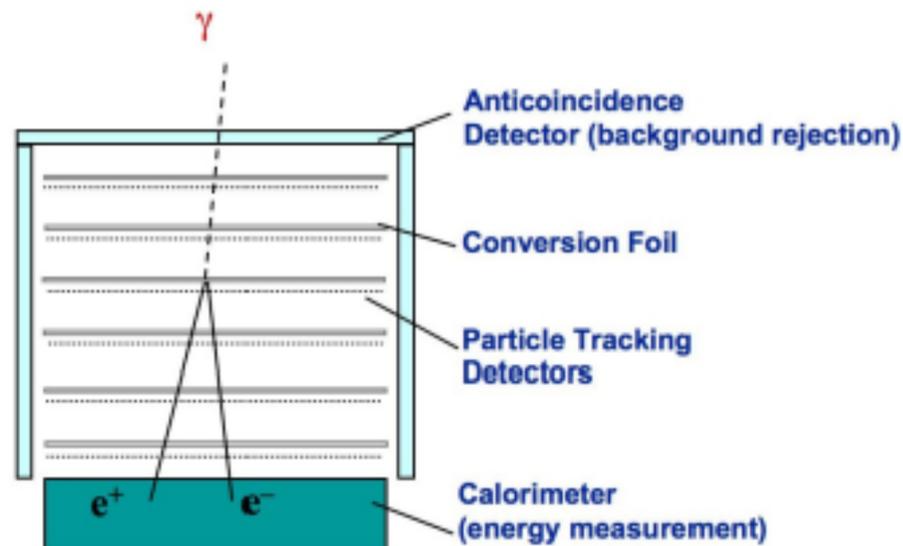
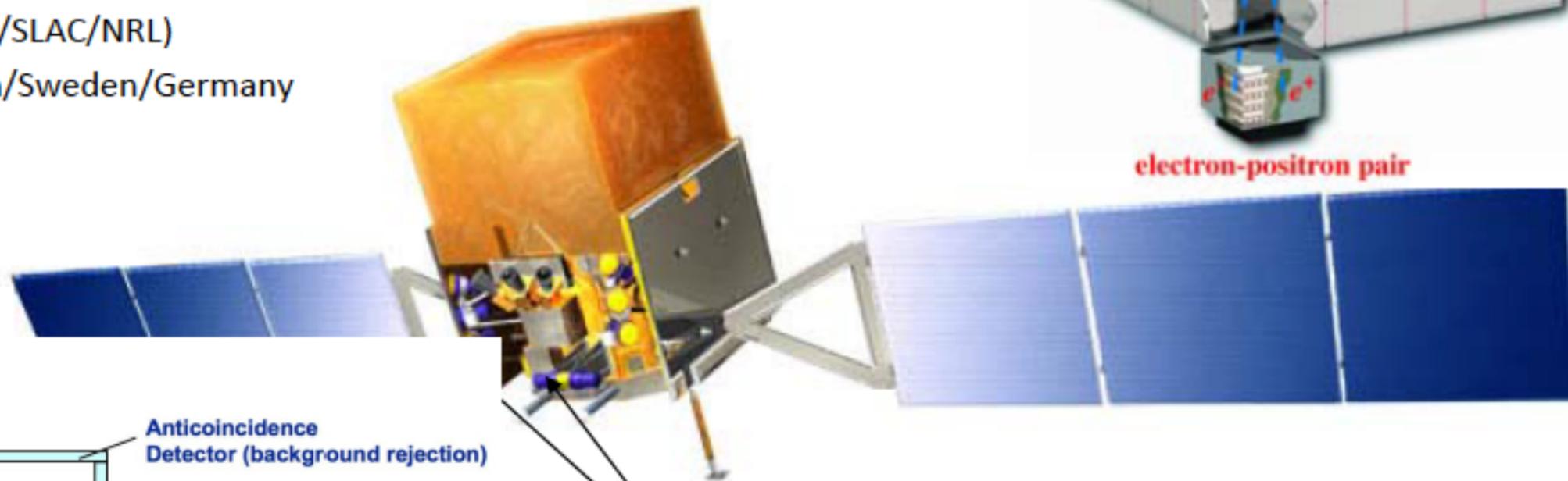
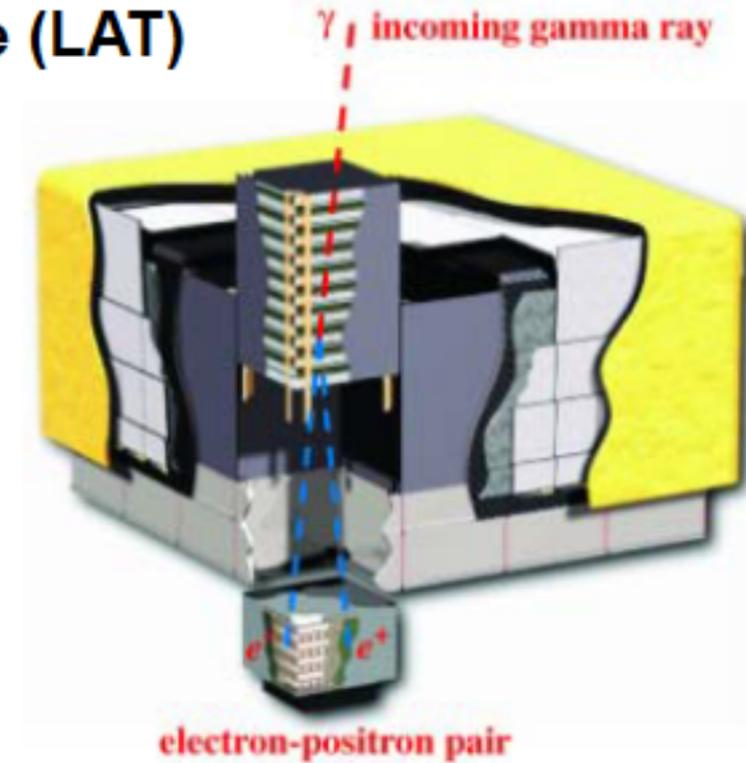
- ❑ NASA/DoE Project
- ❑ Launched June 11, 2008
- ❑ NRL Fermi Involvement
 - Calorimeter
 - Environmental testing
 - Interdisciplinary scientist

USA (GSFC/SLAC/NRL)

Italy/Japan/Sweden/Germany

Large Area Telescope (LAT)

20 MeV → 300 GeV
2.4 sr Field of View

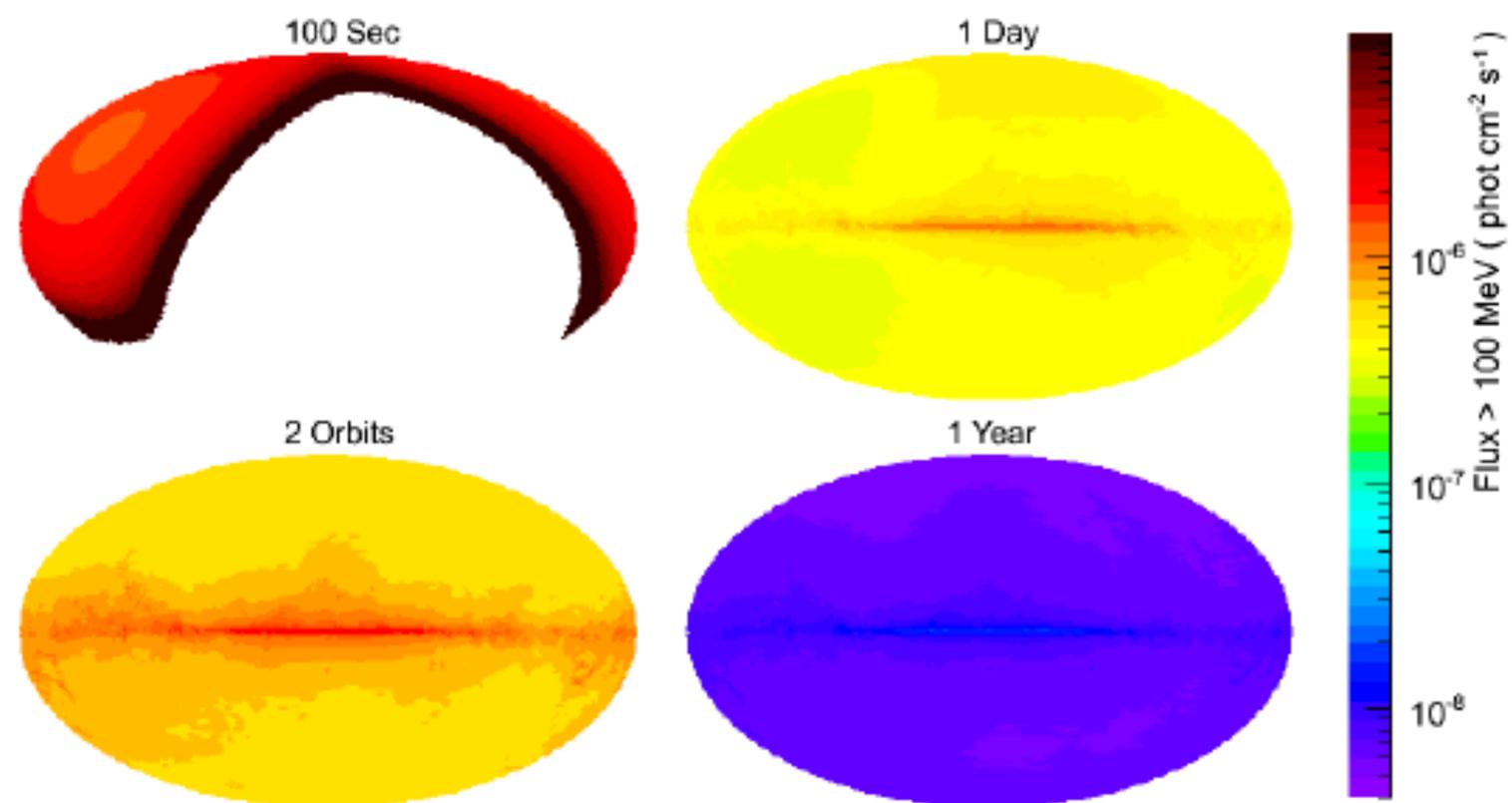


Gamma-ray Burst Monitor (GBM)

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

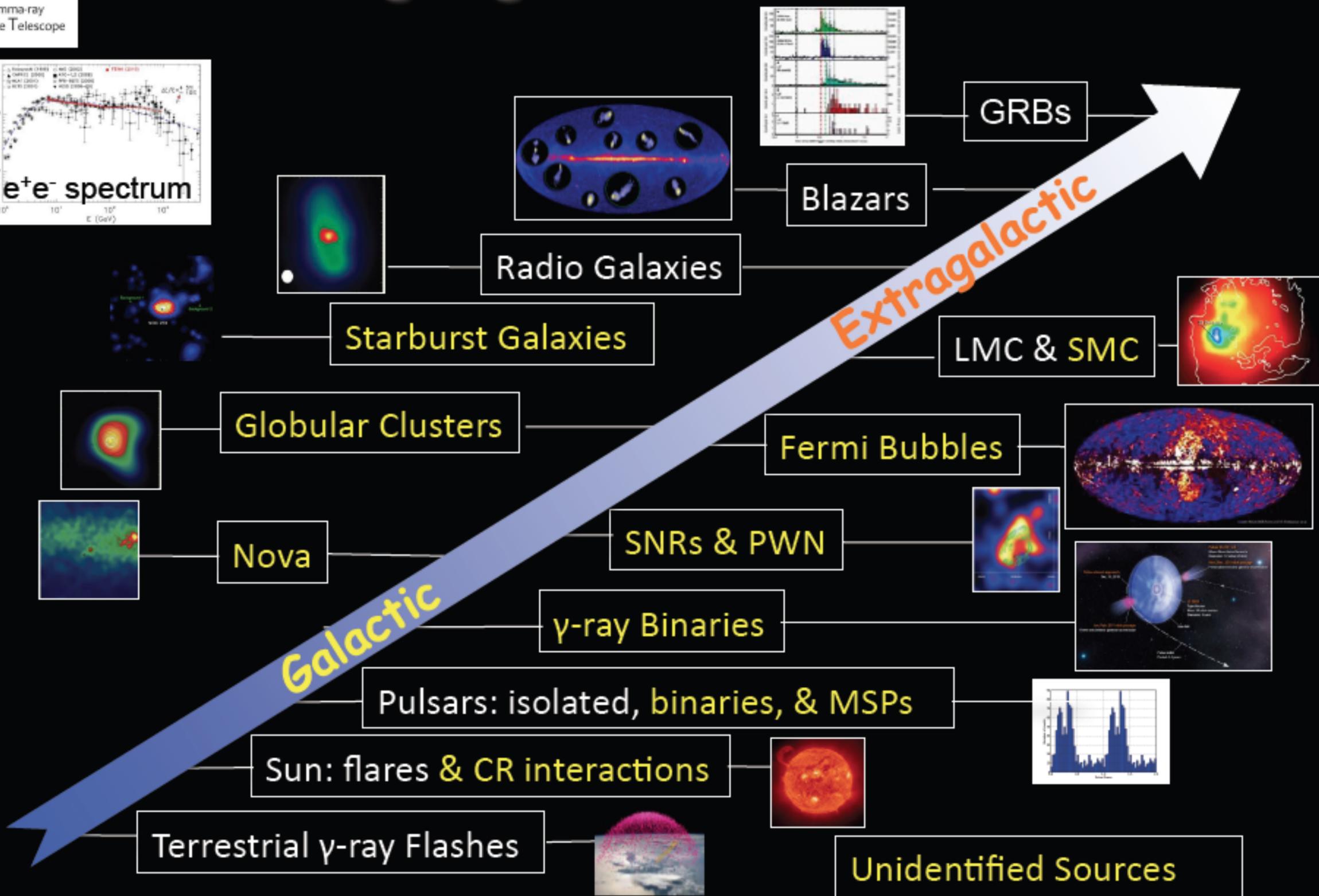
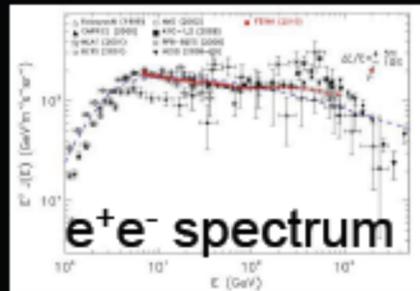


Table 7. LAT 4FGL Source Classes

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.



Radiación Cherenkov

- ▶ La radiación Cherenkov (Čerenkov) se da cuando una partícula cargada viaja más rápido que la luz en un medio, $v > c/n$.
- ▶ Está restringida a un cono de apertura $\cos \theta = 1/\beta n$.
- ▶ La emisión por unidad de longitud es,

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



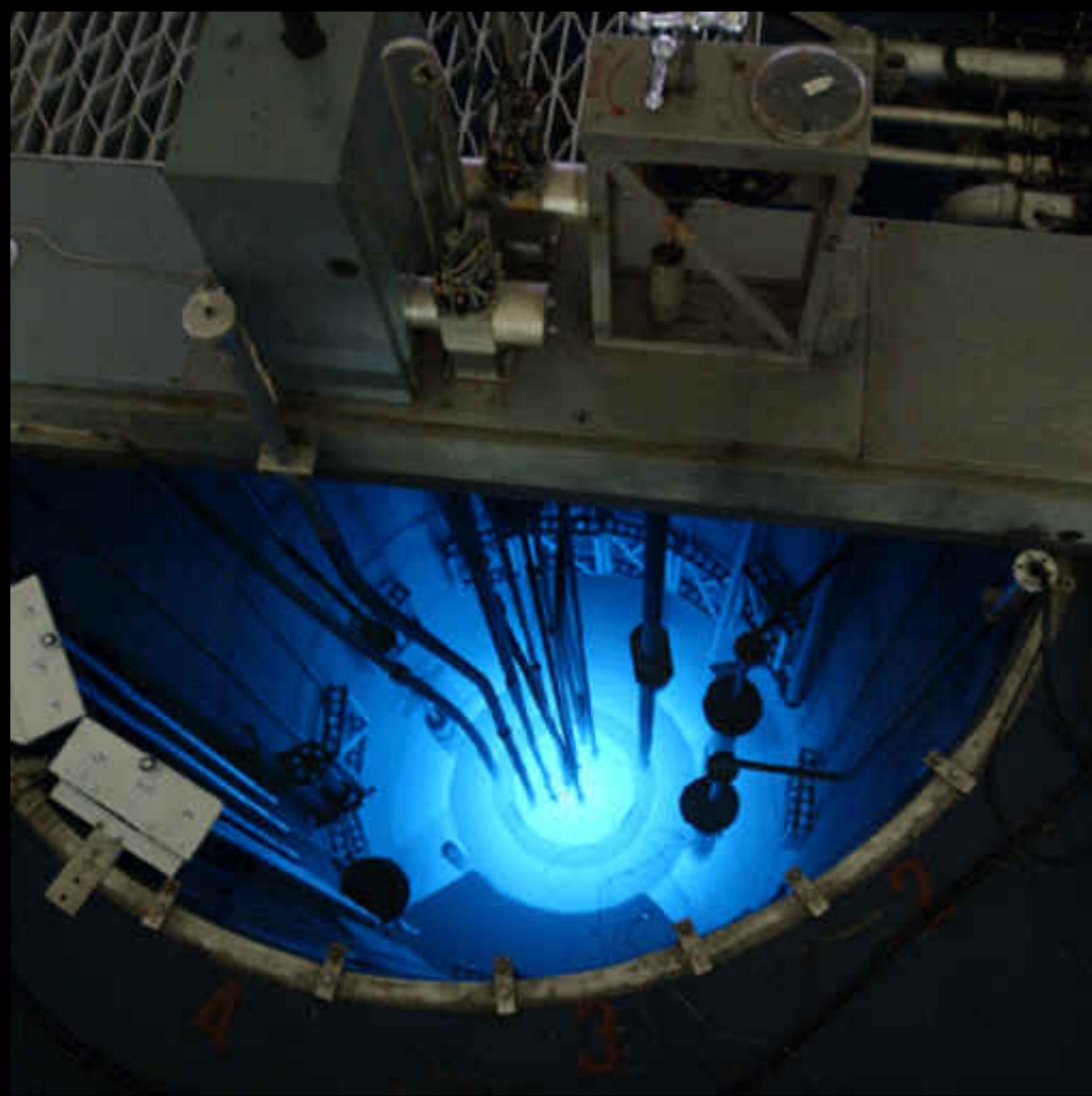
	n	Umbral (γ)	$\theta(^{\circ})$	$dE/d\ell$ (eV/cm)
aire	1.00029	40.8	1.4	0.34
agua	1.335	1.5	41.2	327

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



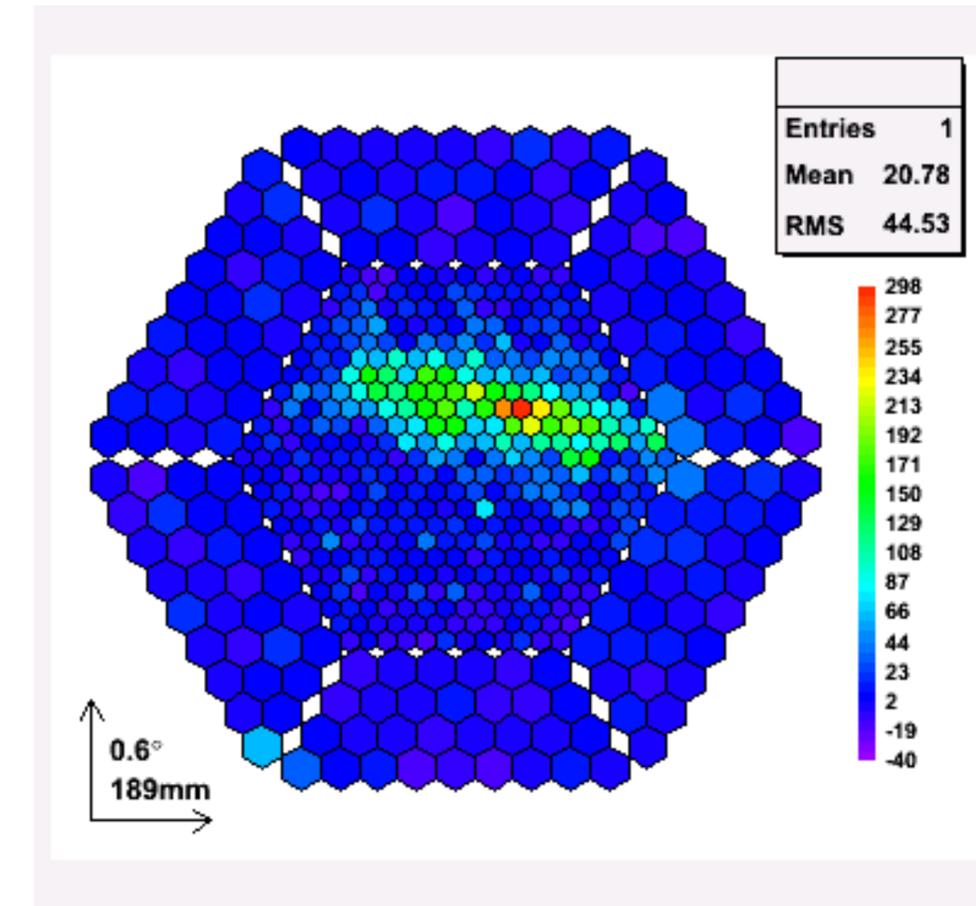
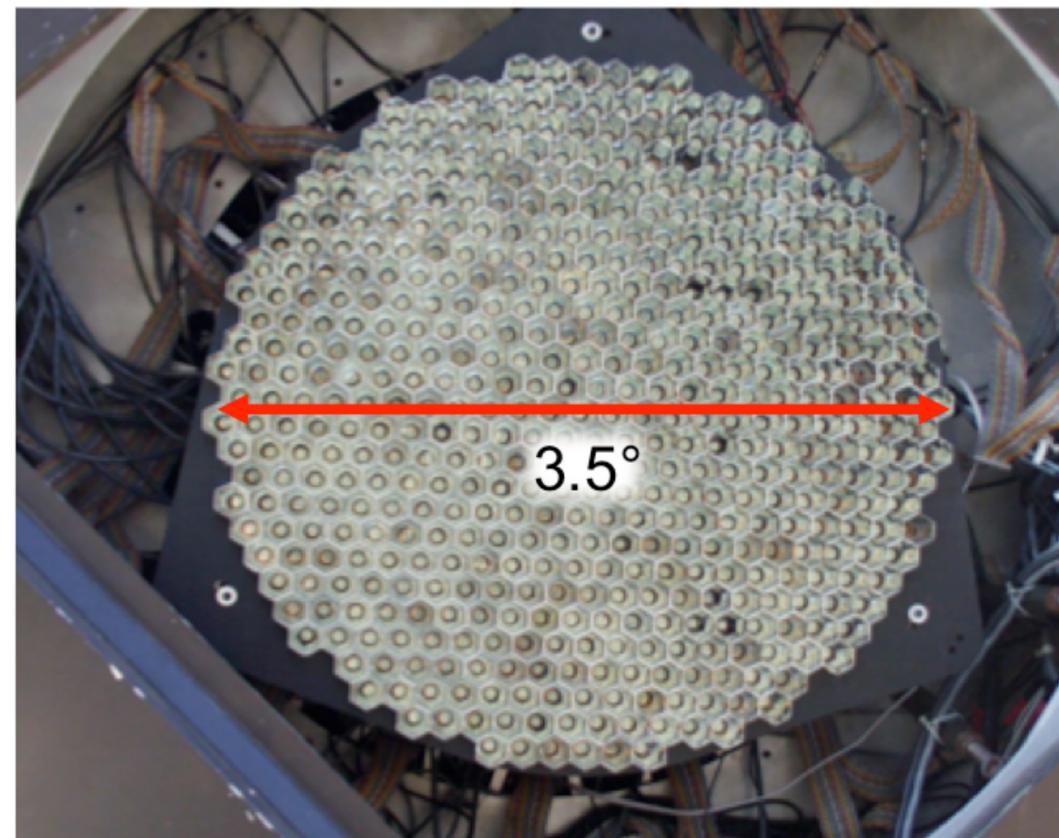
Rayos gamma @ LA-CoNGA Physics - julio 2021





Telescopios Cherenkov atmosféricos

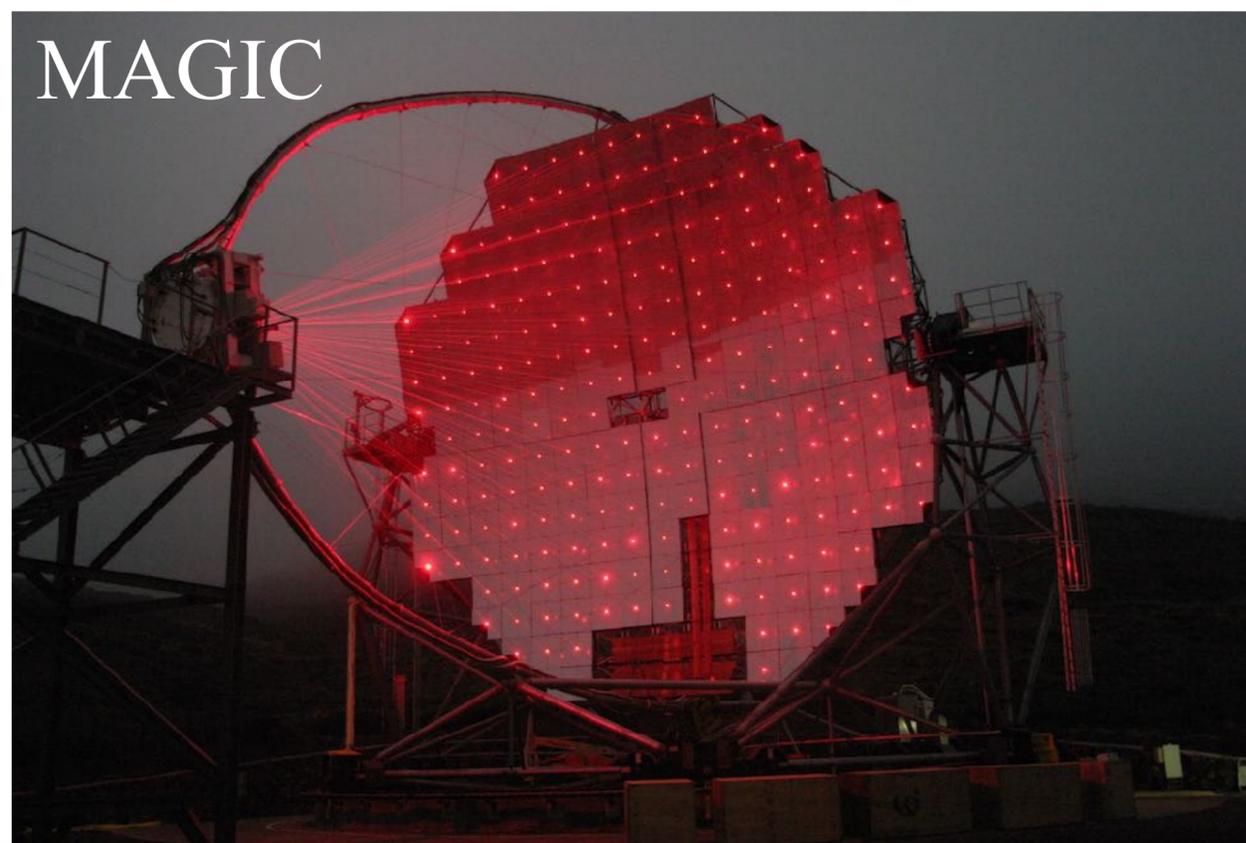
- Operan detectando la luz Cherenkov producida por cascadas de partículas secundarias en la atmósfera.
- Se estudia la imagen de la cascada ($\Delta t \sim \text{ns}$) para rechazar hadrones.



HESS



MAGIC

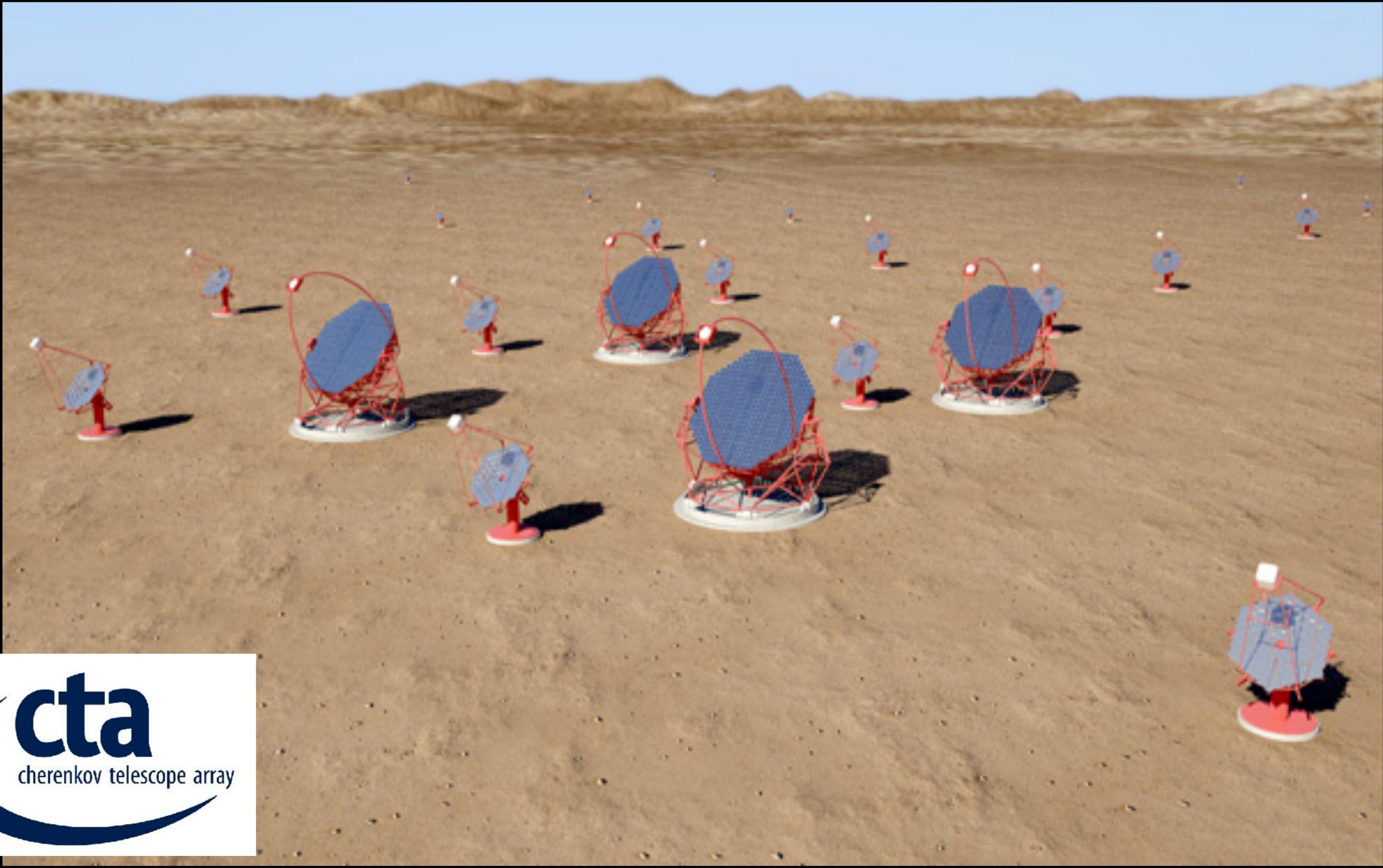


VERITAS

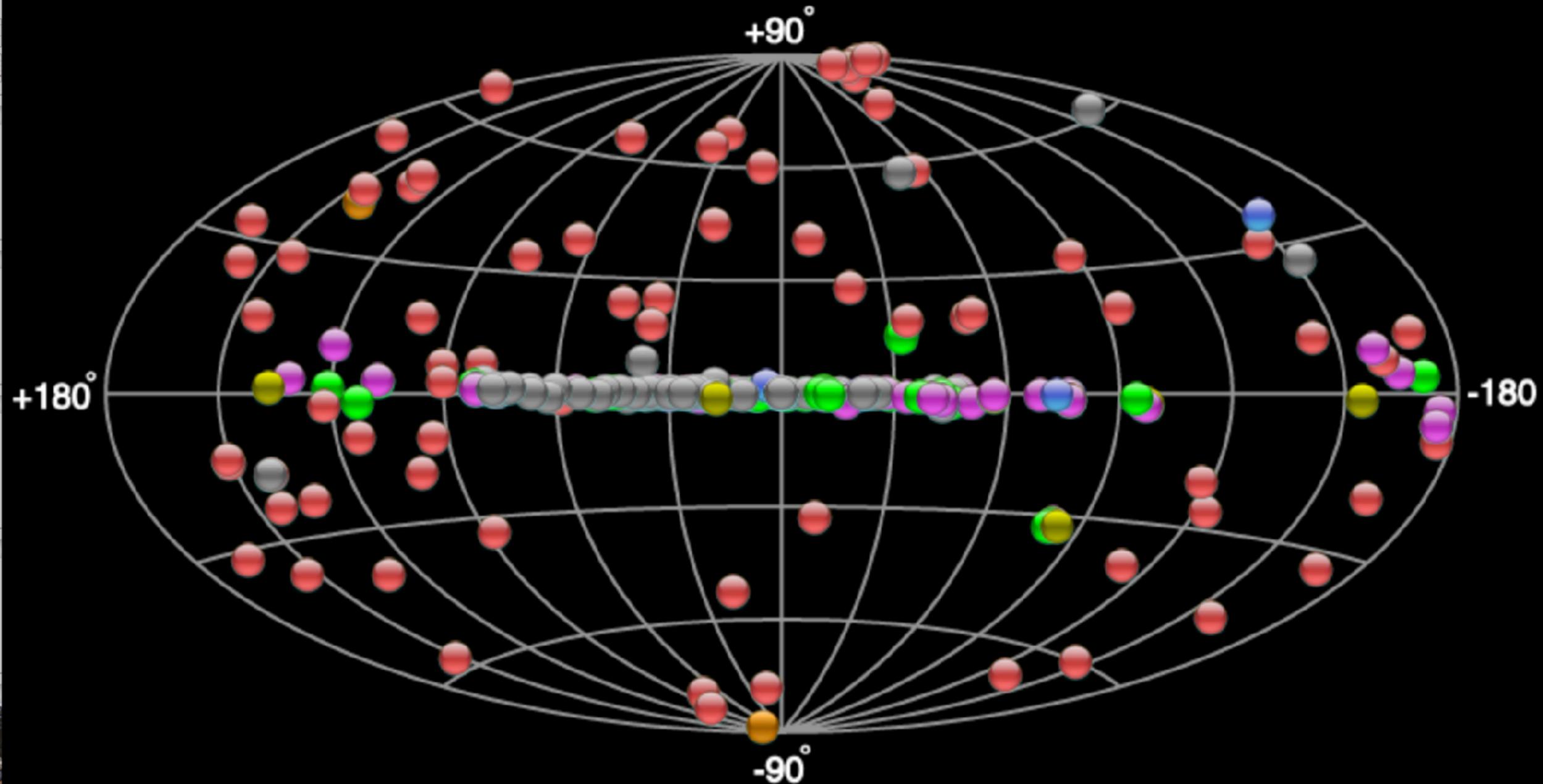


FACT





Welcome to TeVCat!



Try TevCat 2.0 Beta!

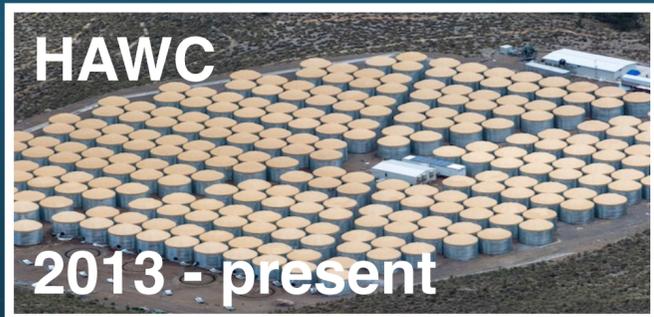
Table Control Map Control Tools Lege..

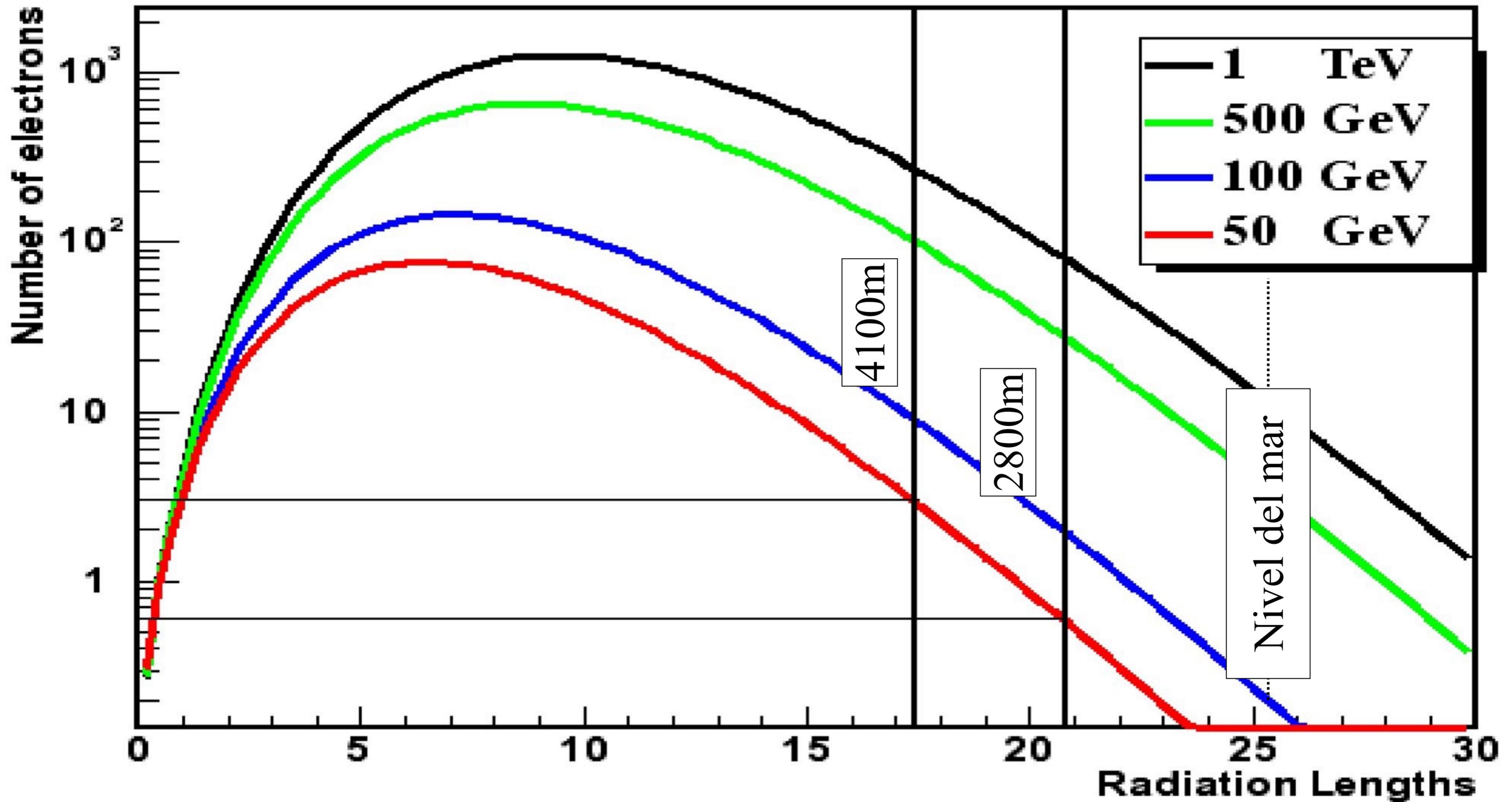
- Extended TeV Halo, PWN
- Starburst
- HBL, IBL, FRI, Blazar, FSRQ, LBL, AGN (unknown type)
- Globular Cluster, Star Forming Region, uQuasar, Cat. Var., Massive Star Cluster, BIN, BL Lac (class unclear), WR
- Shell, SNR/Molec. Cloud, Composite SNR, Superbubble
- DARK, UNID, Other
- Binary, XRB, PSR,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

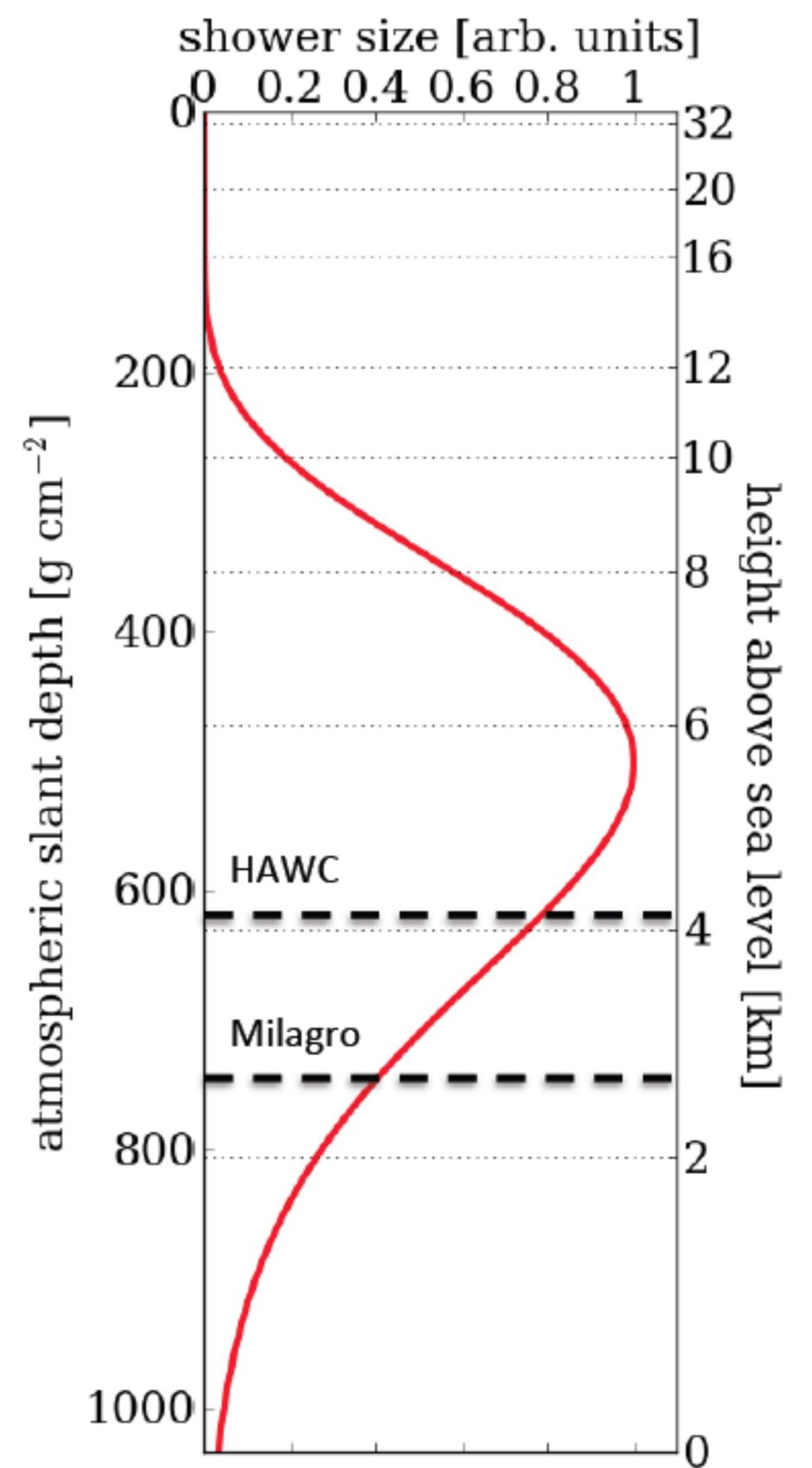
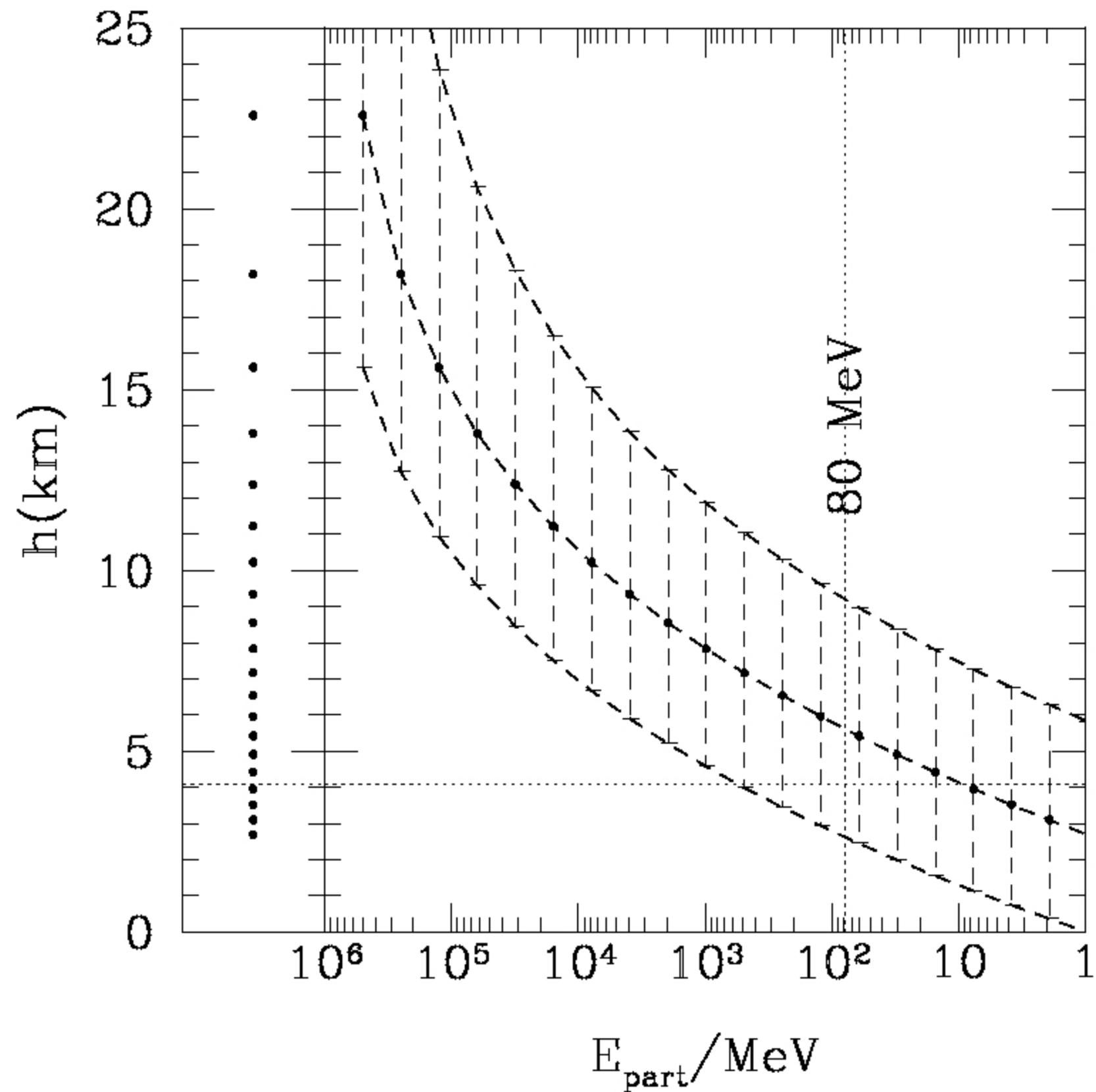
Export Black Export White



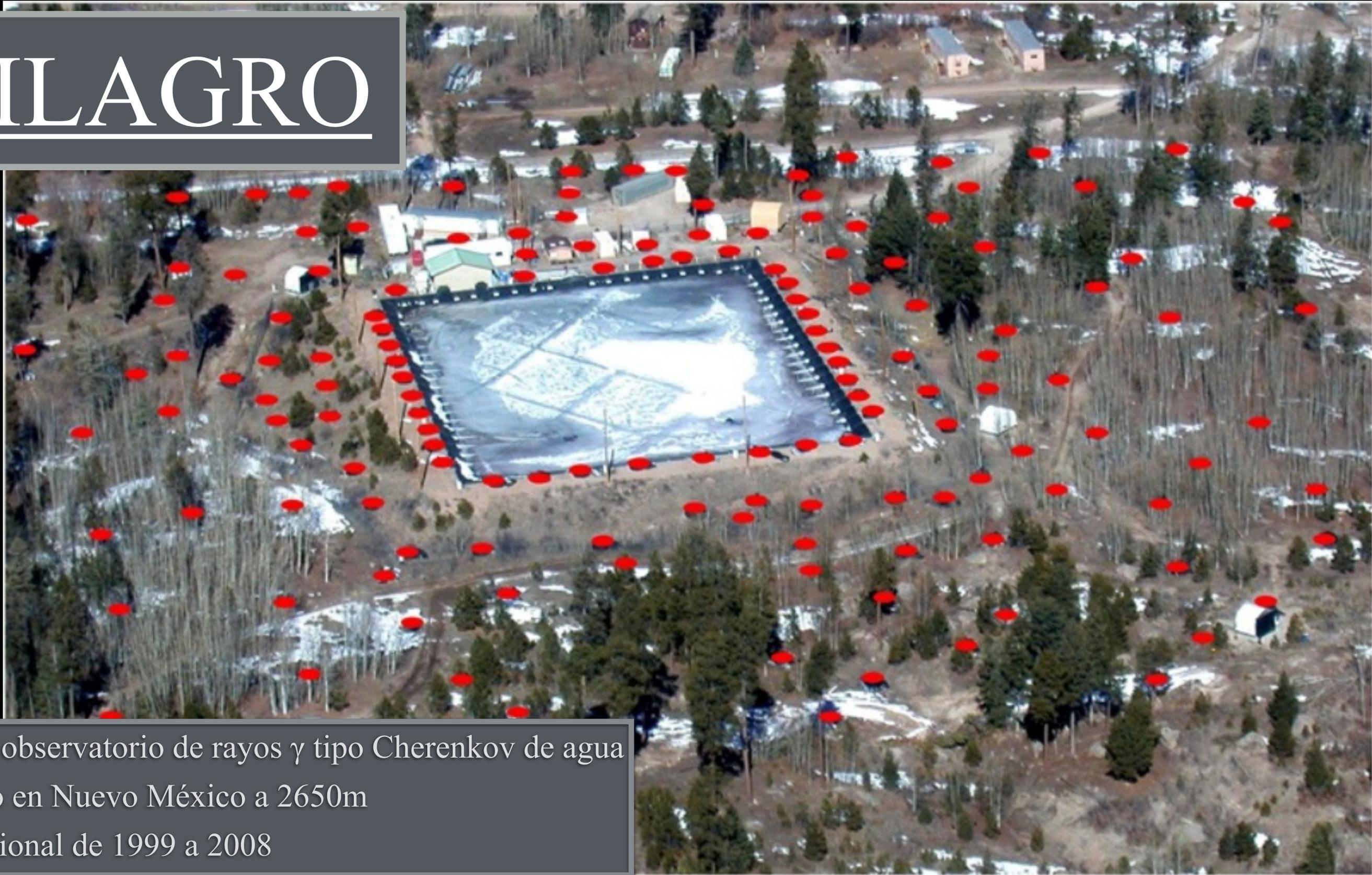
Observatorios de rayos γ a gran altura



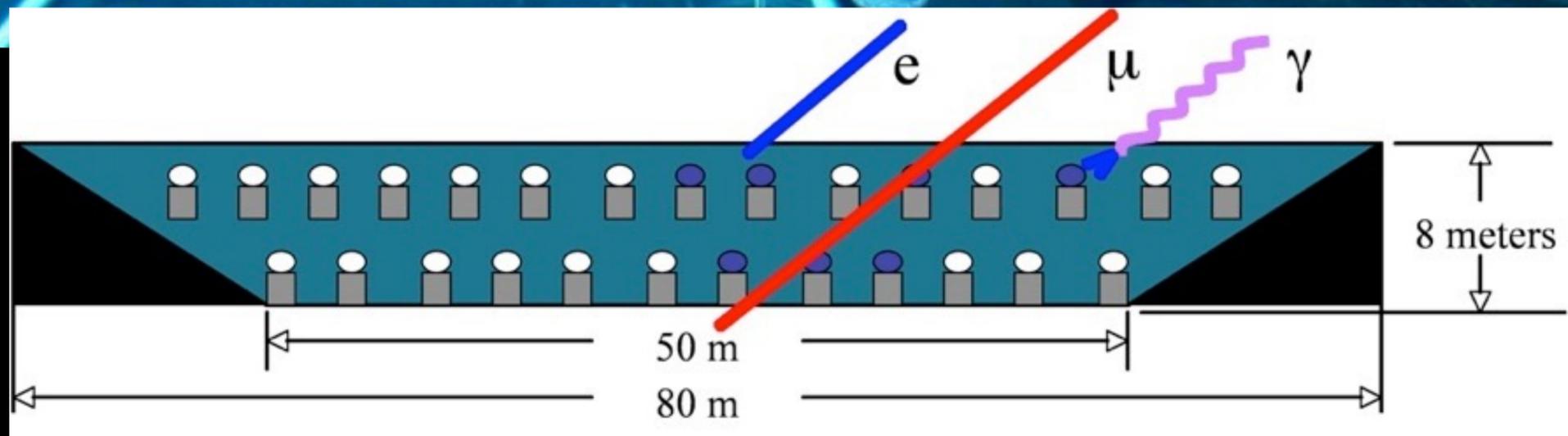
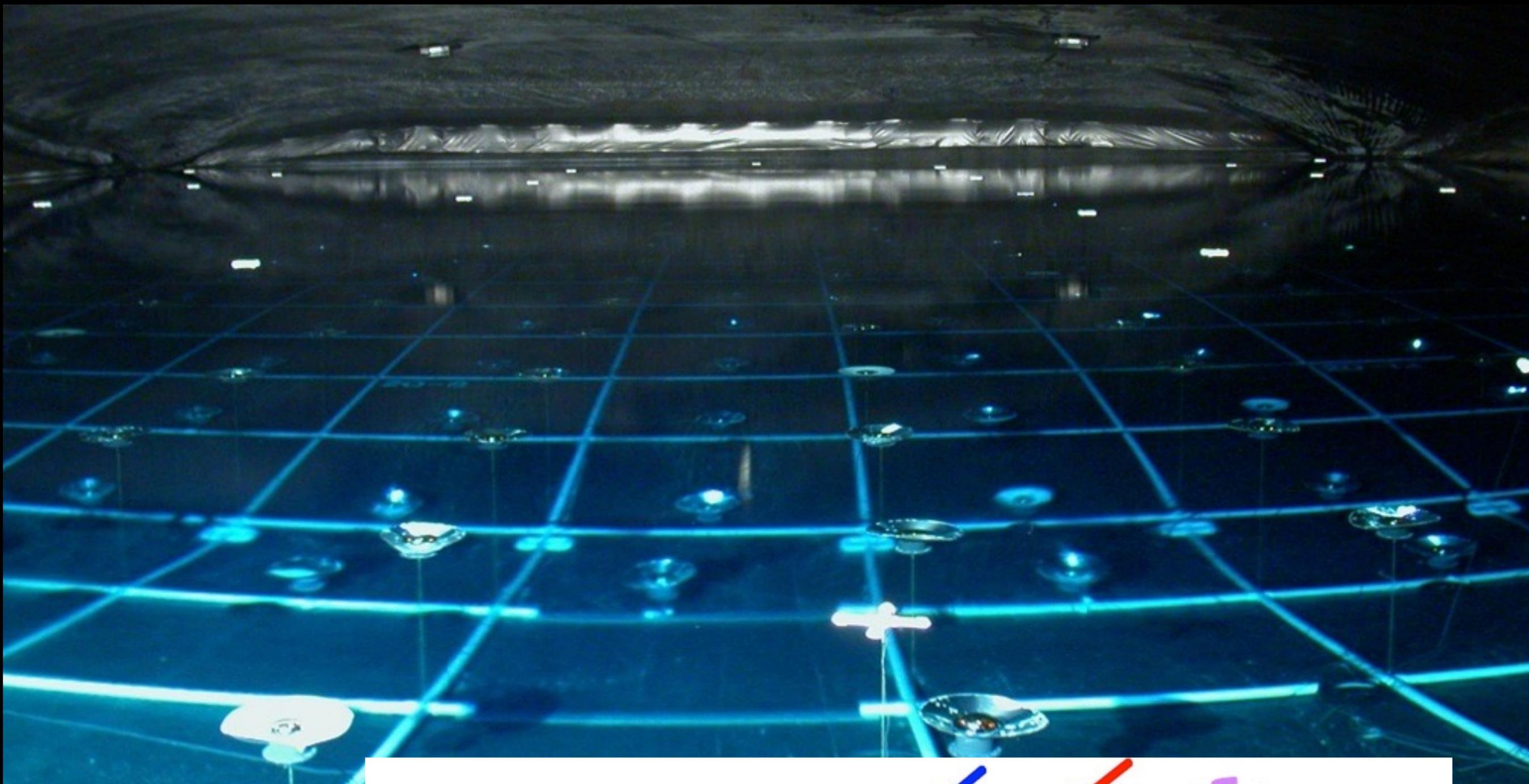




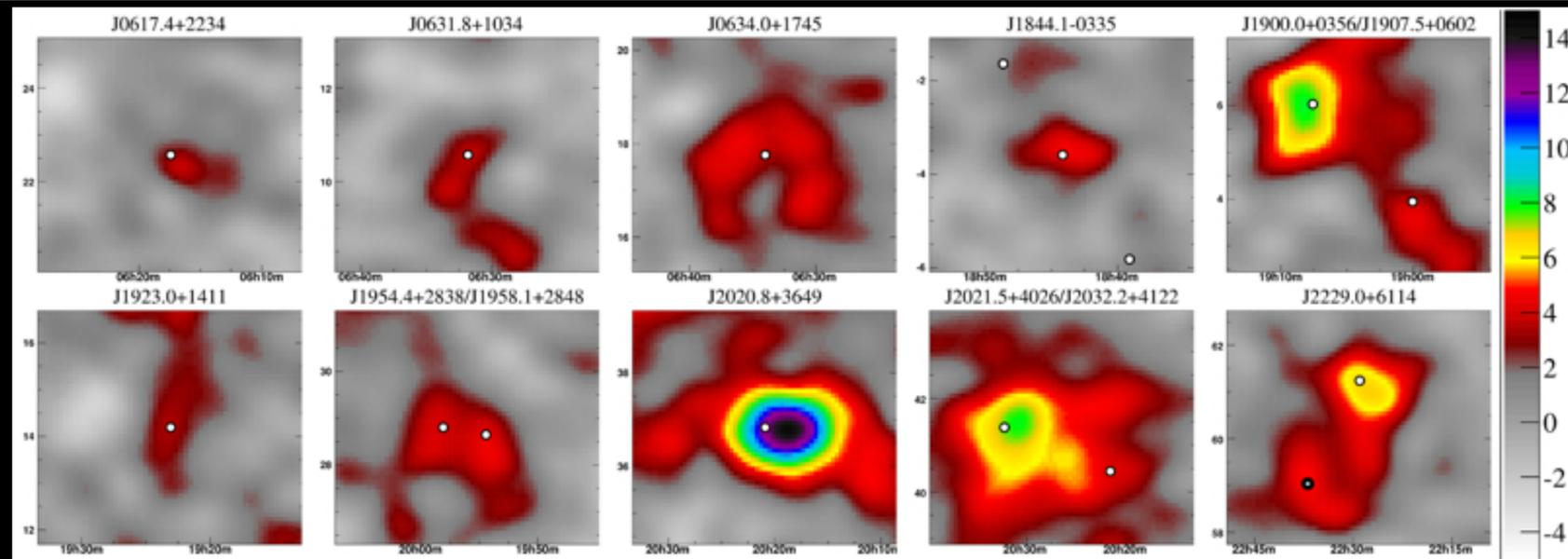
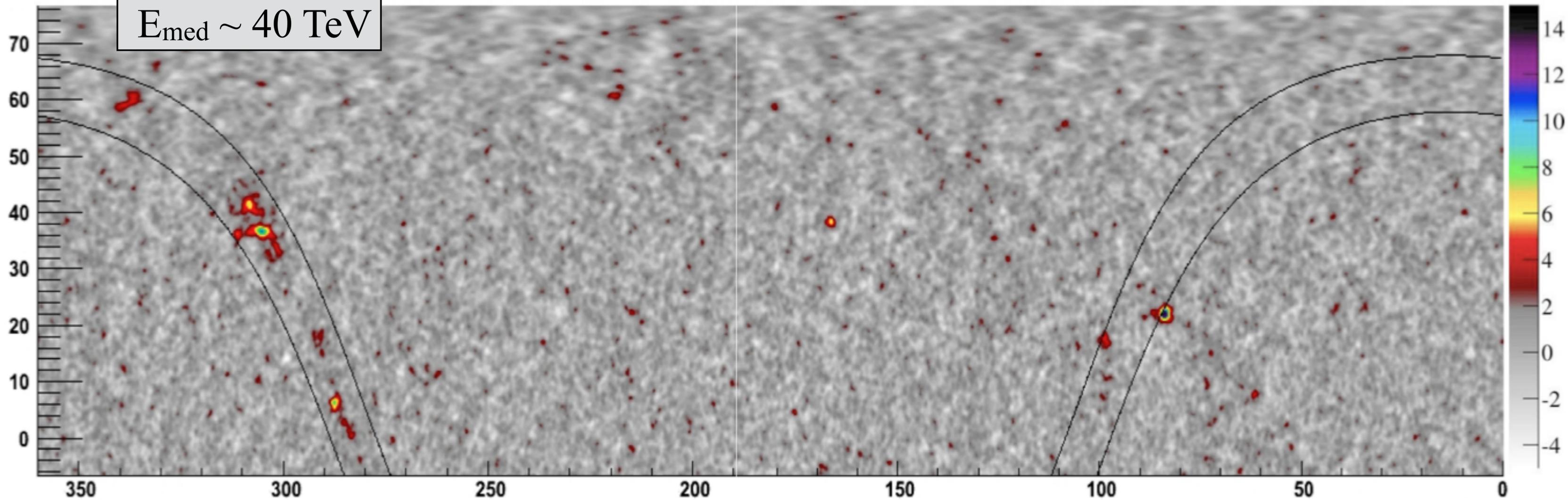
MILAGRO



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



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

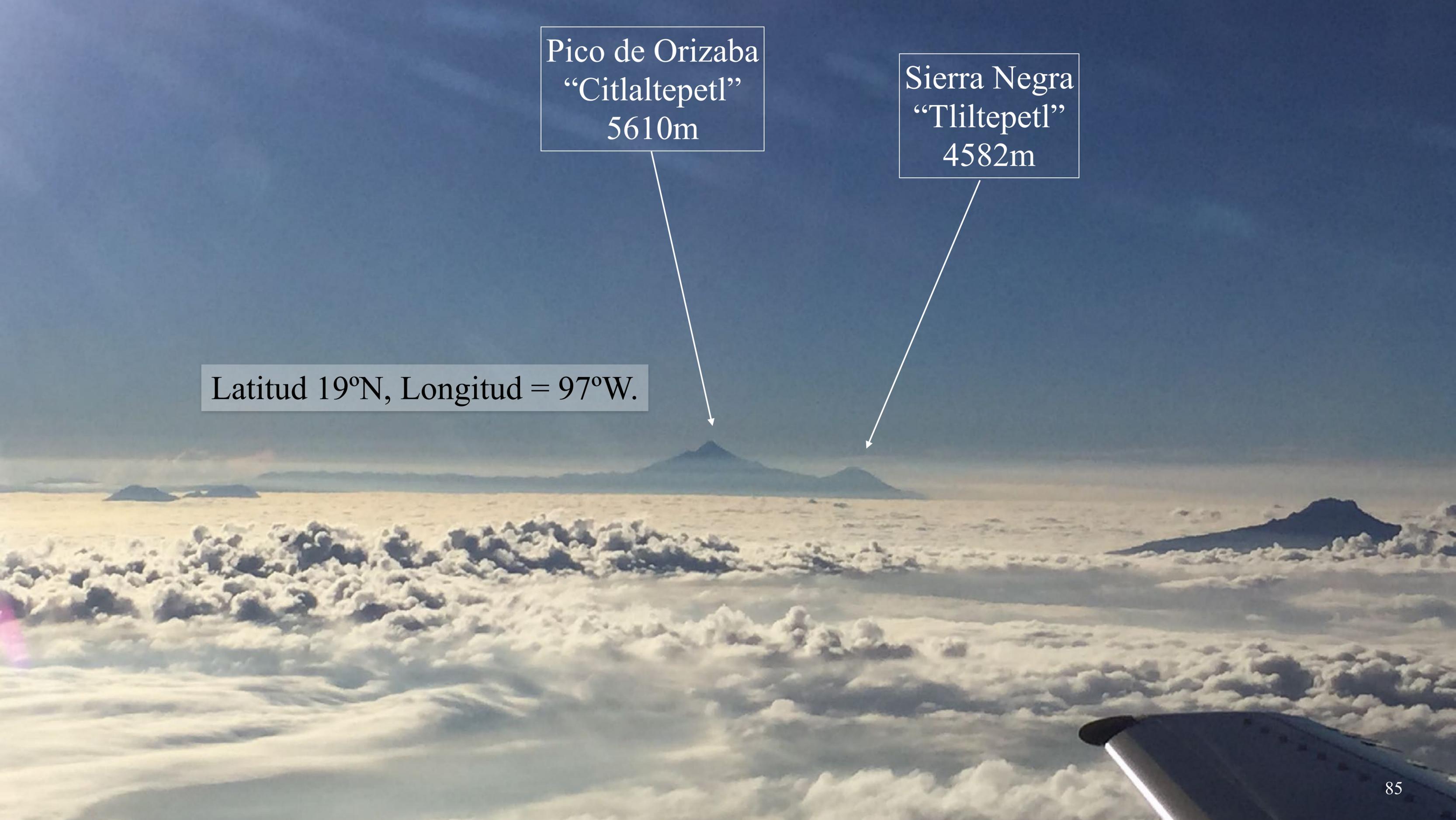




Pico de Orizaba
"Citlaltepetl"
5610m

Sierra Negra
"Tliltepetl"
4582m

Latitud 19°N, Longitud = 97°W.

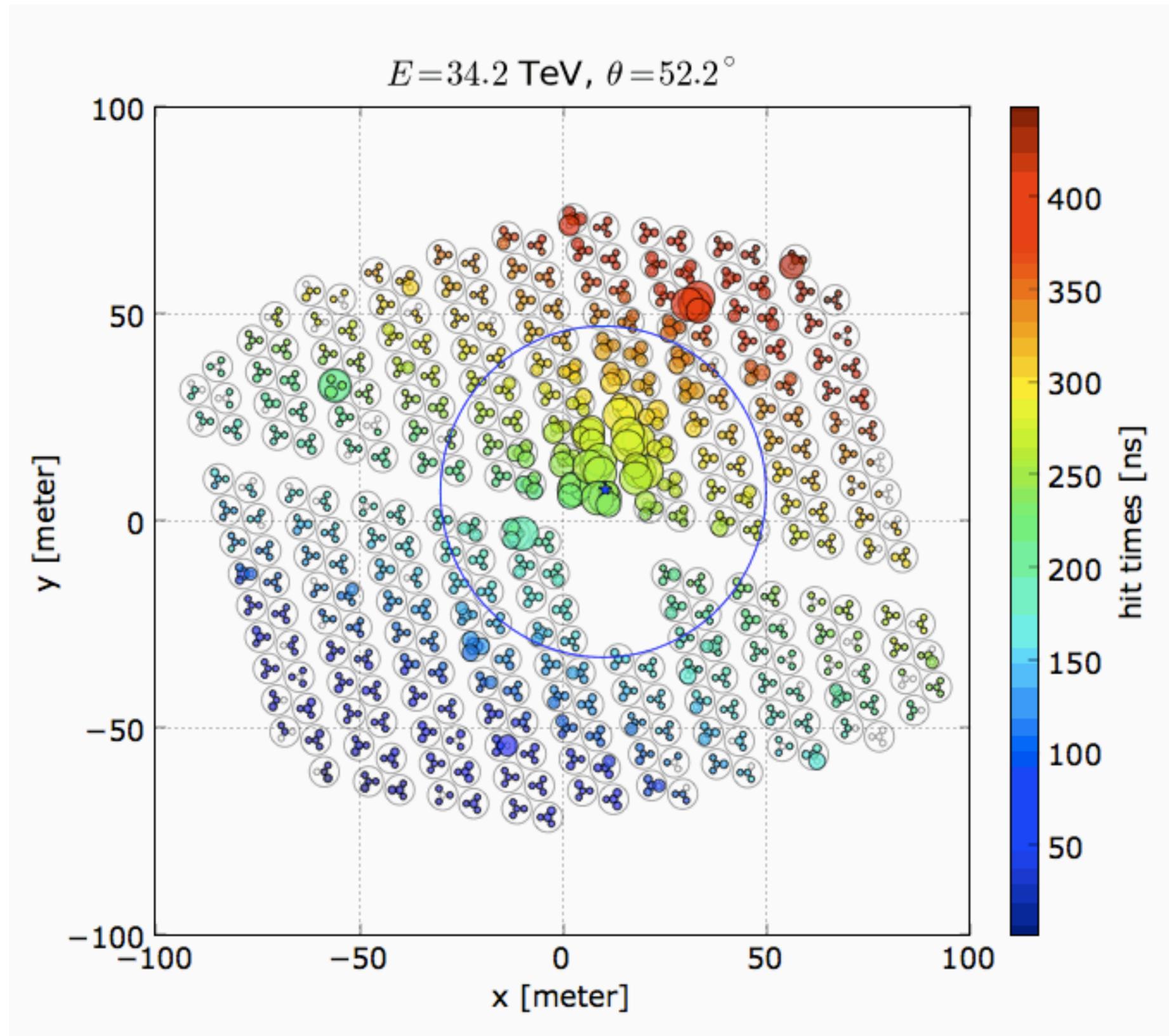
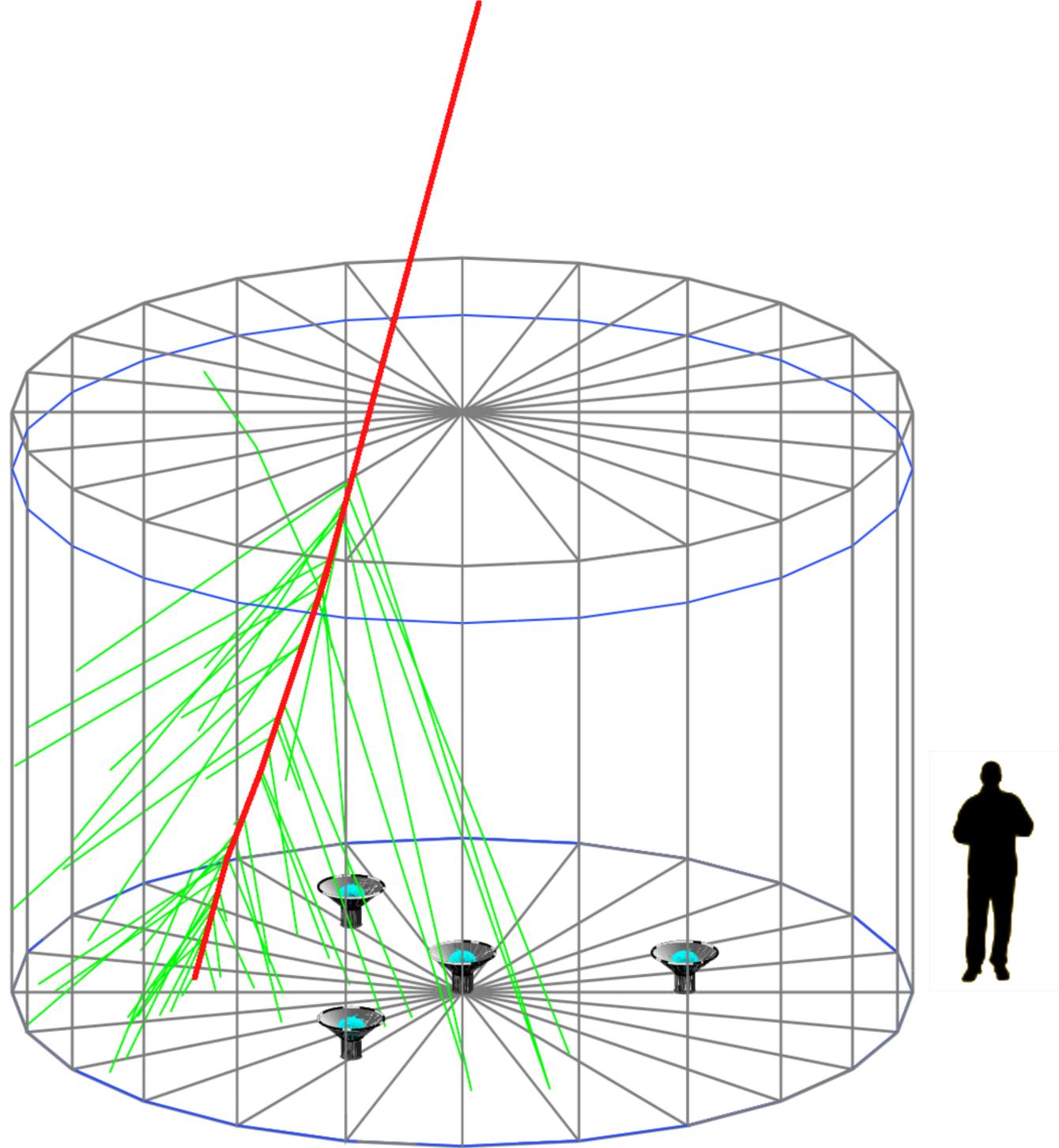


4600m

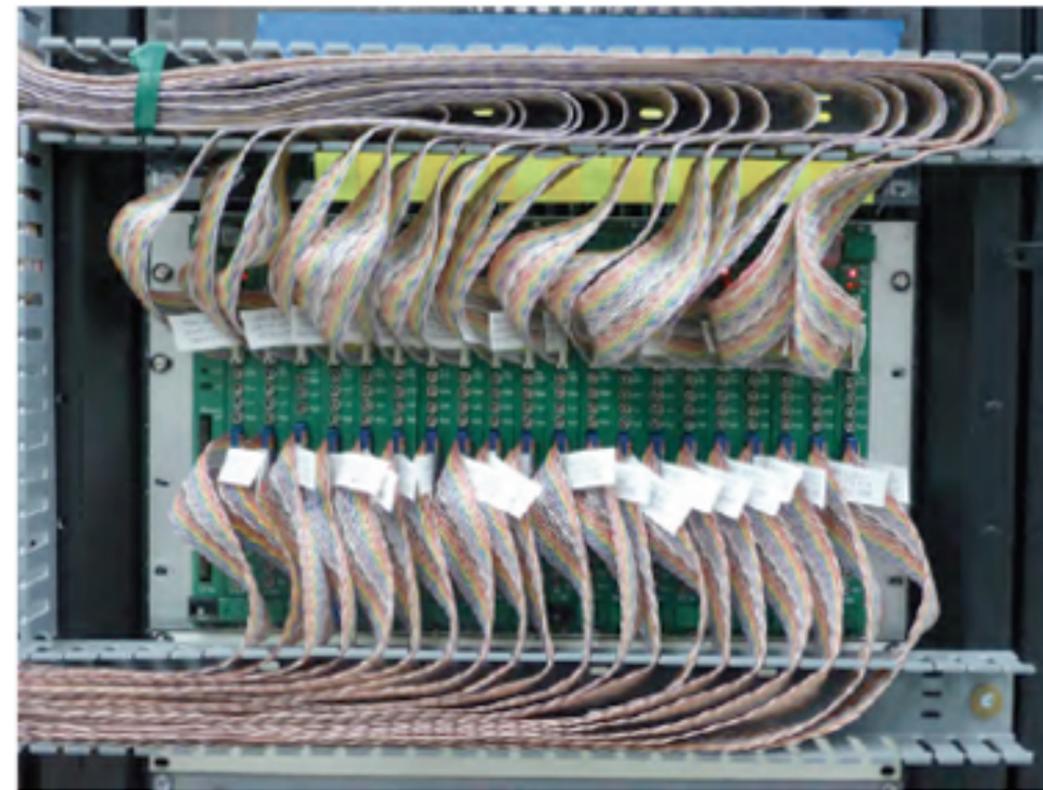
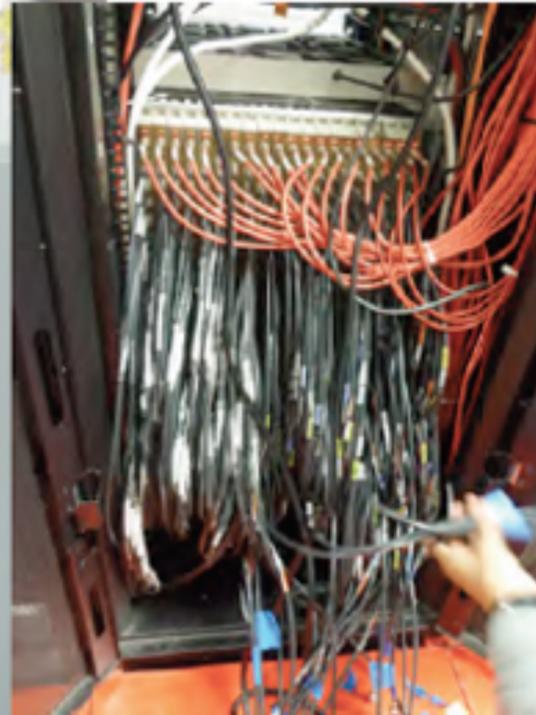
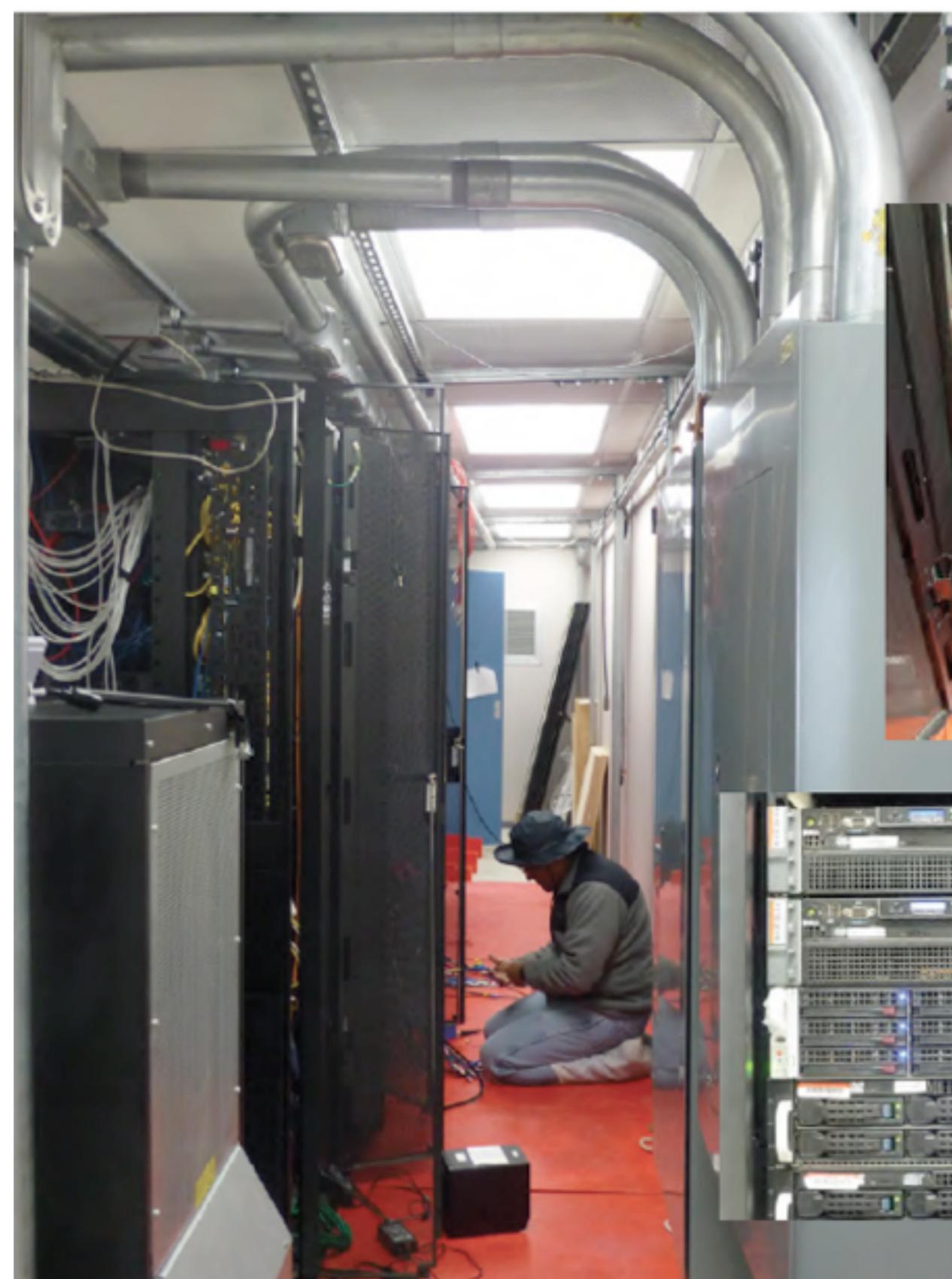


4100m

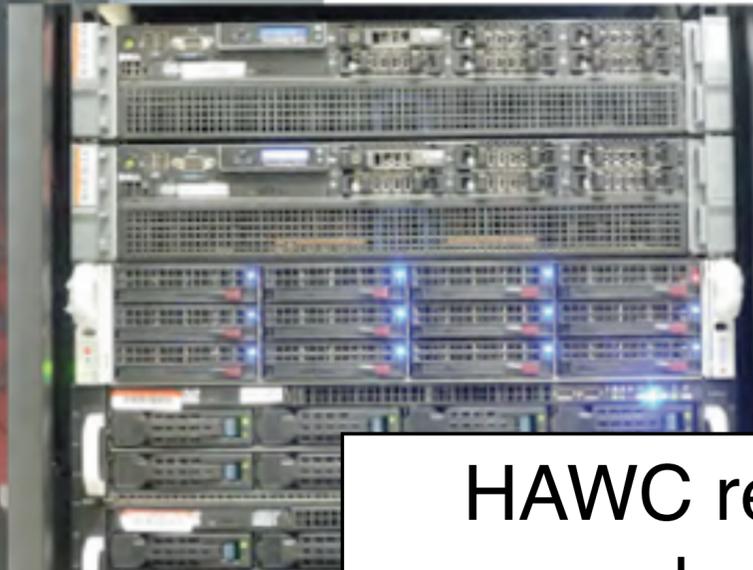






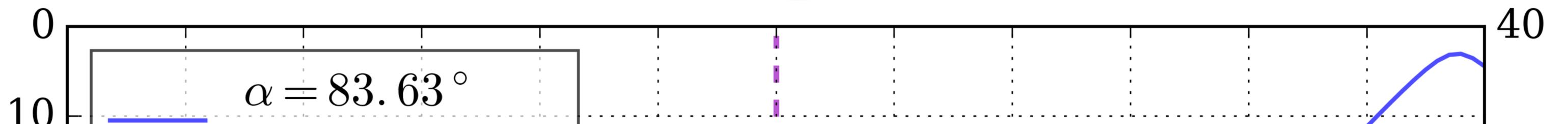
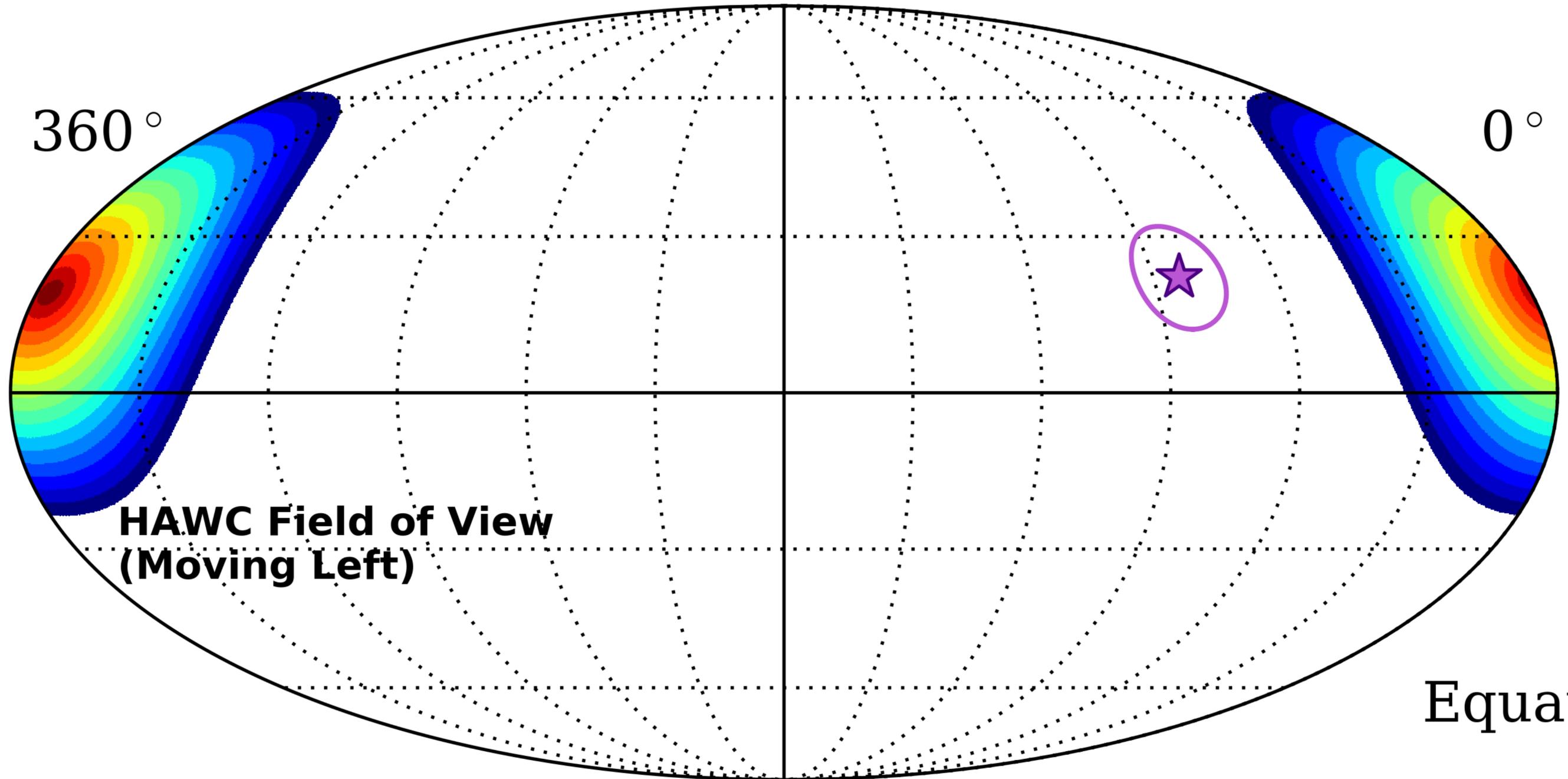


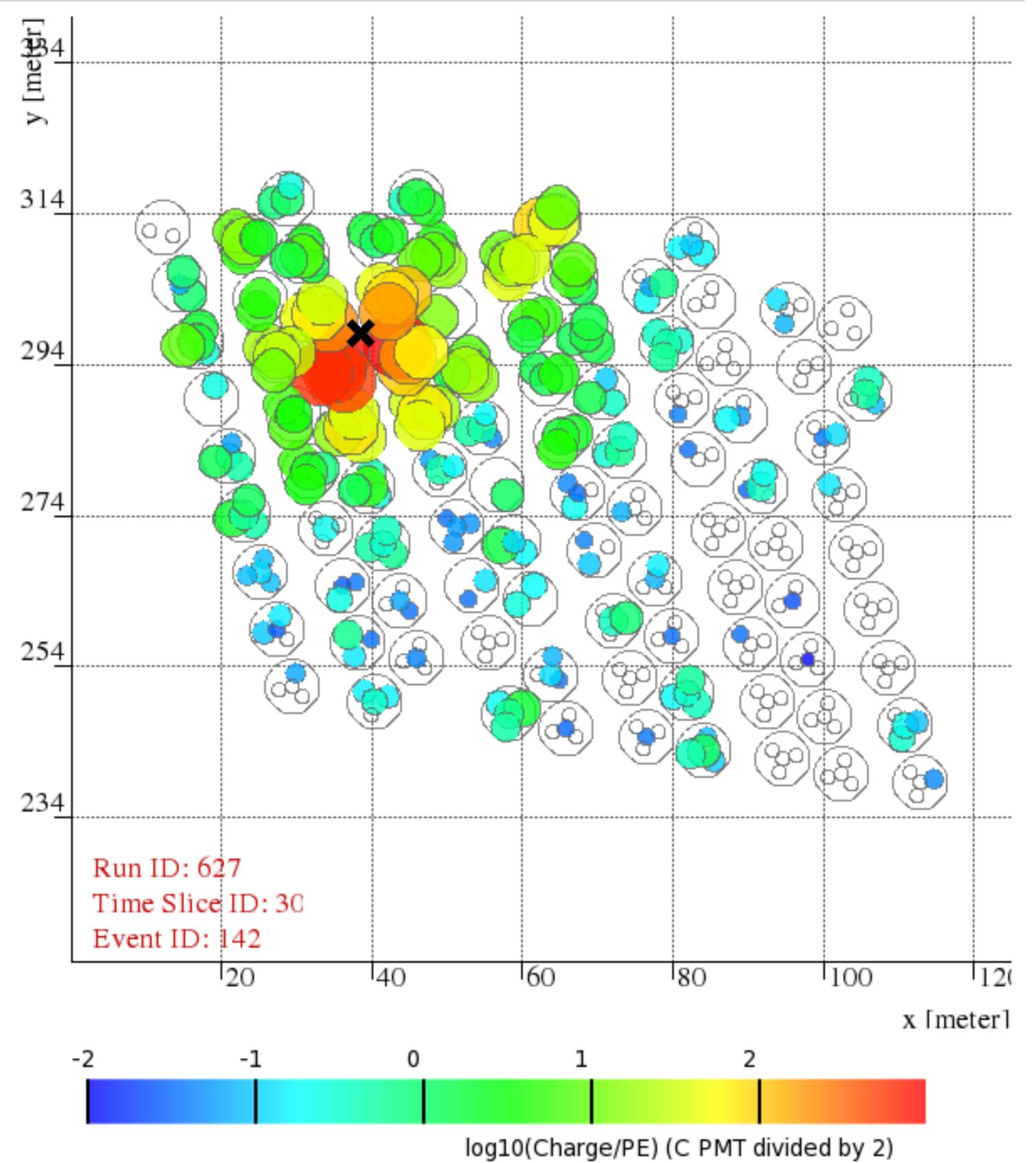
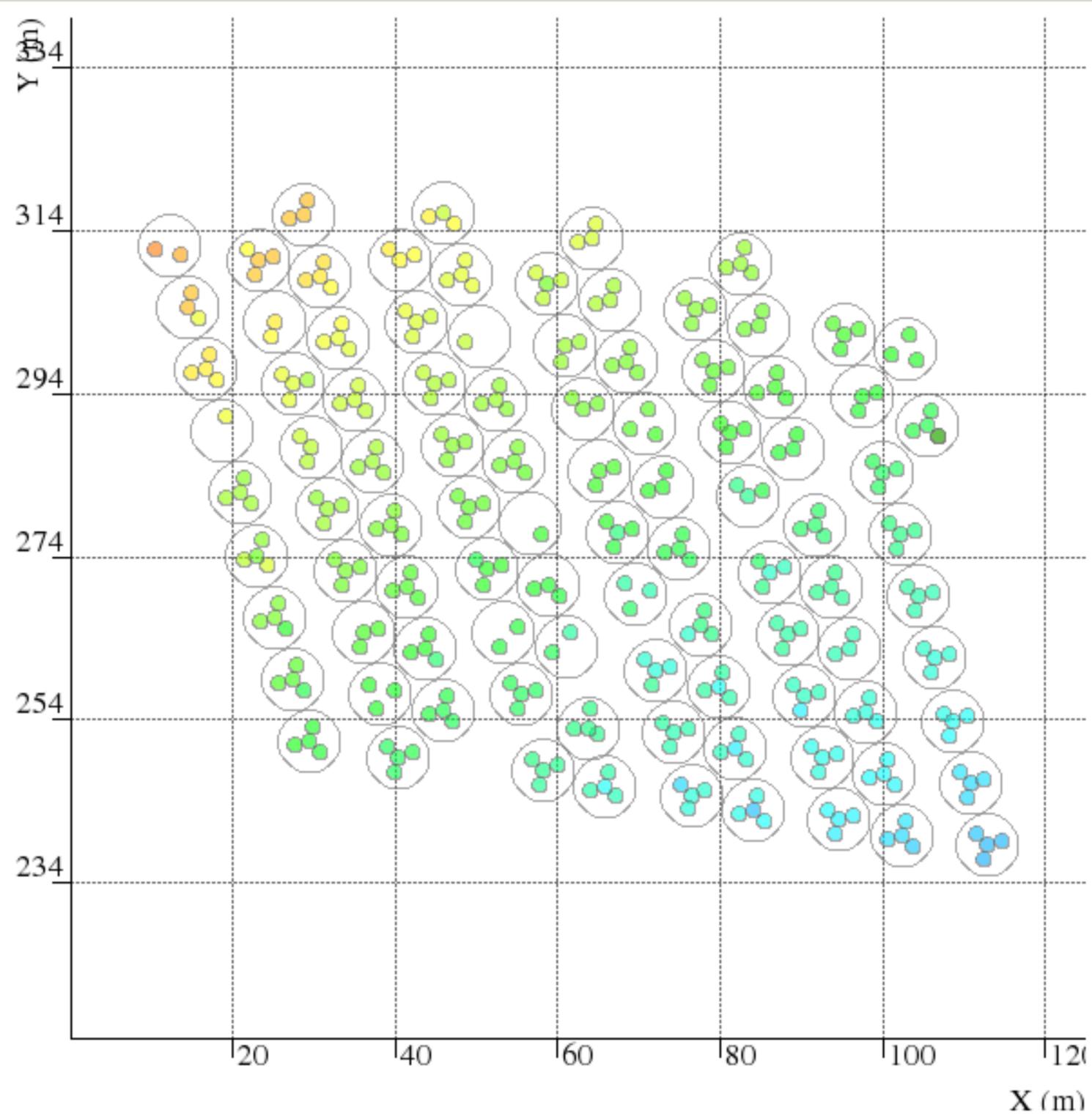
HAWC Experiment Monitoring



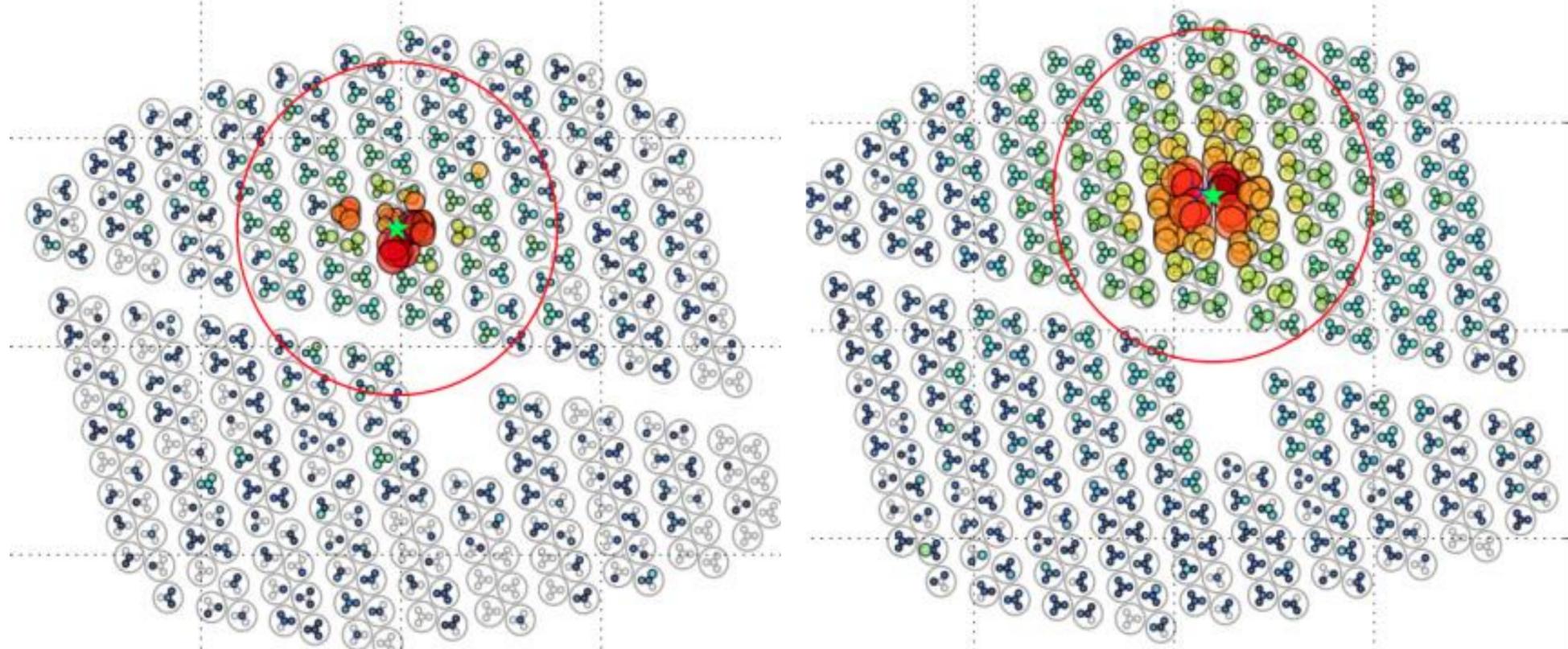
HAWC registra 20,000 rayos cósmicos por segundo, generando 2 Terabytes de datos cada día - todos los días.

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

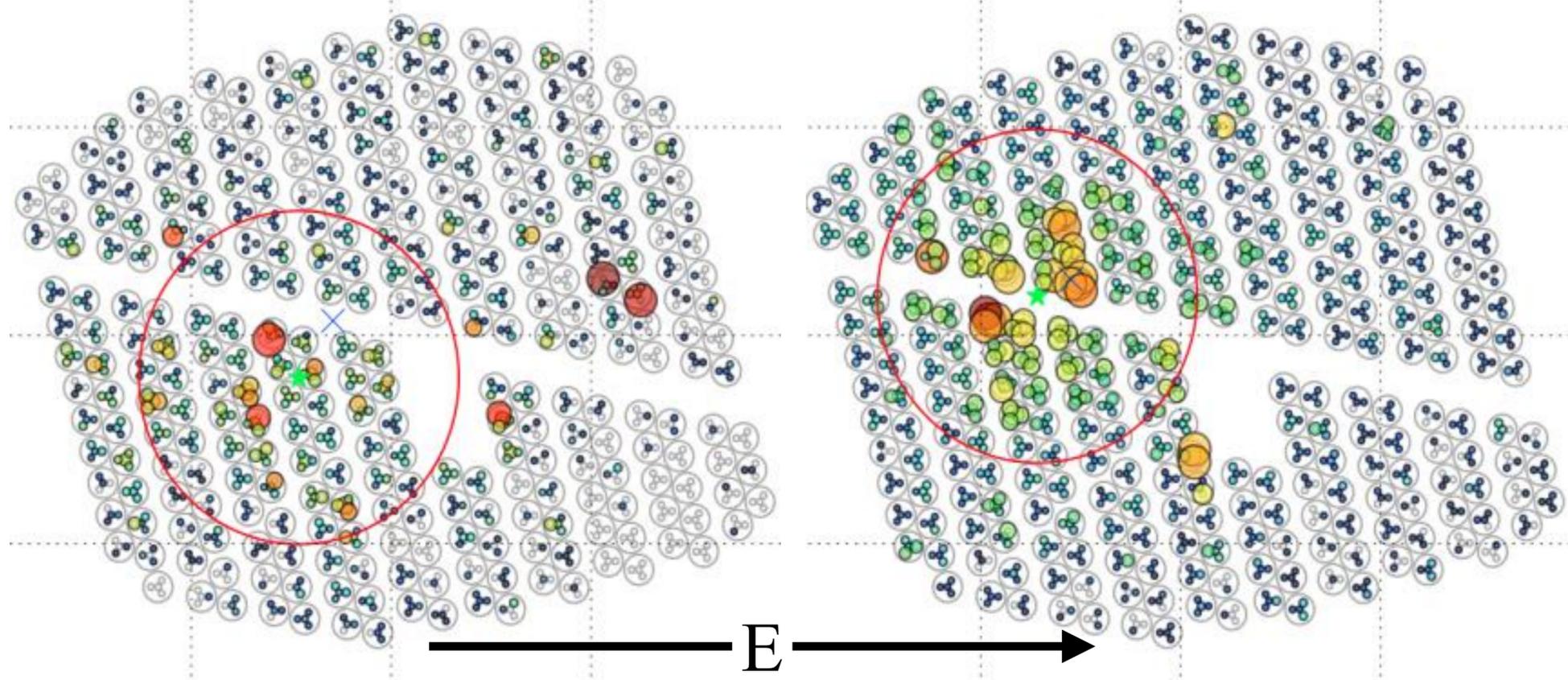




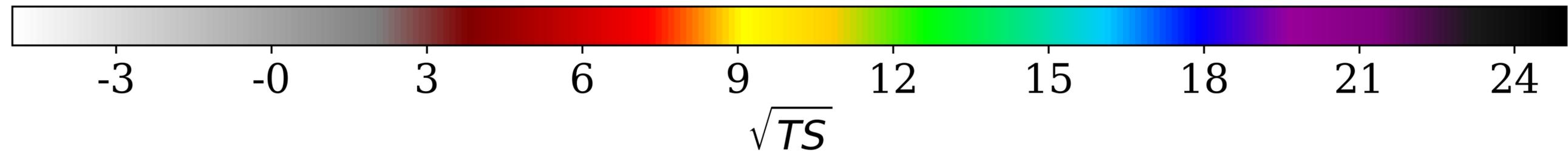
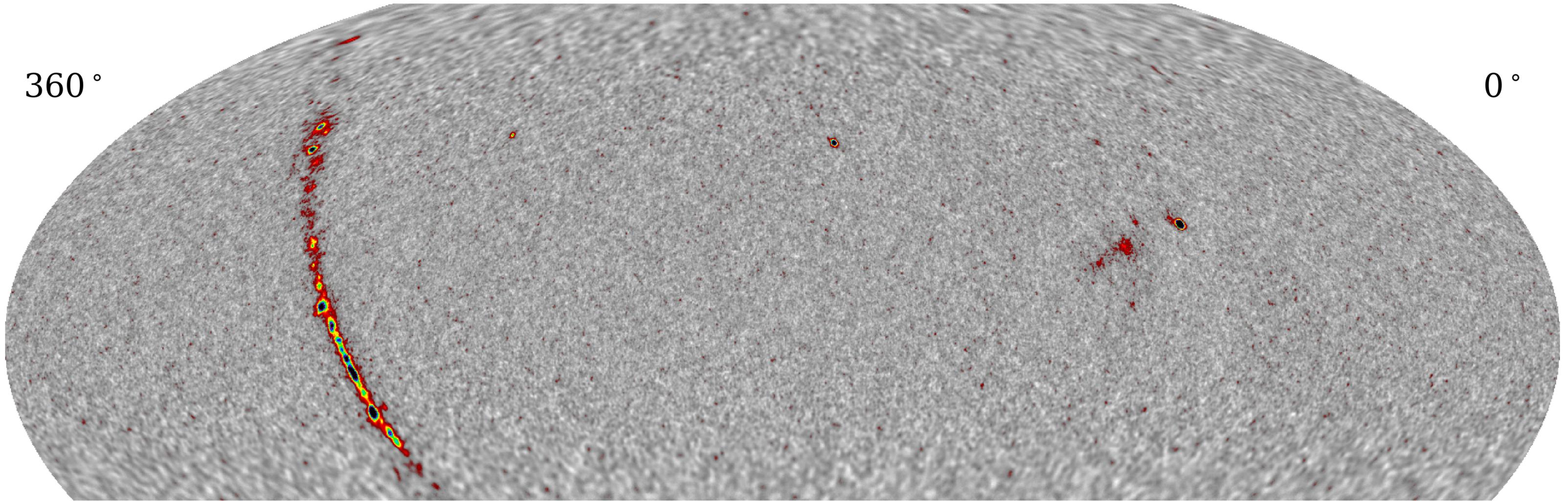
Fotón



Hadrón



All-sky view; 0.0 °; 1523 days

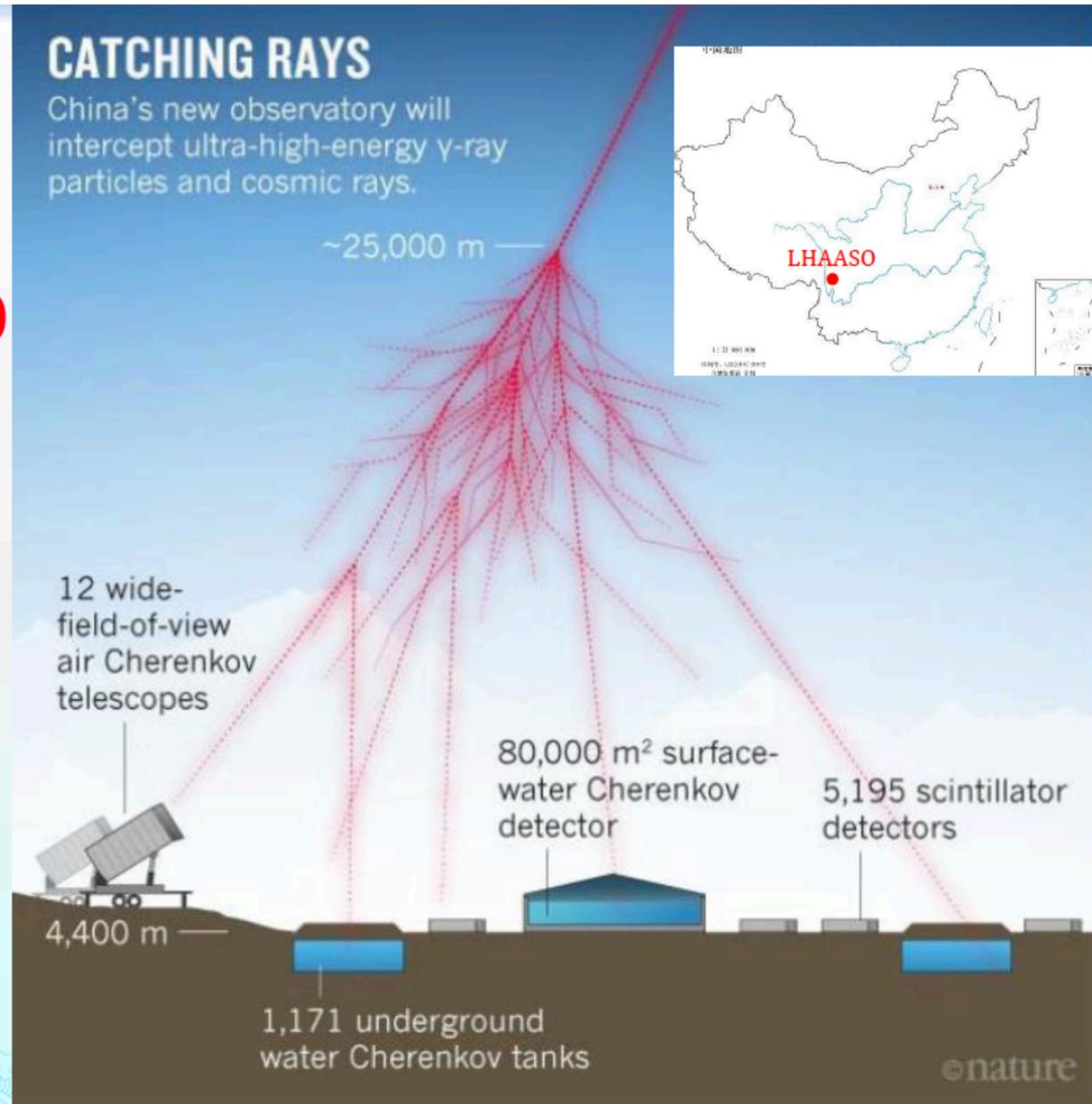




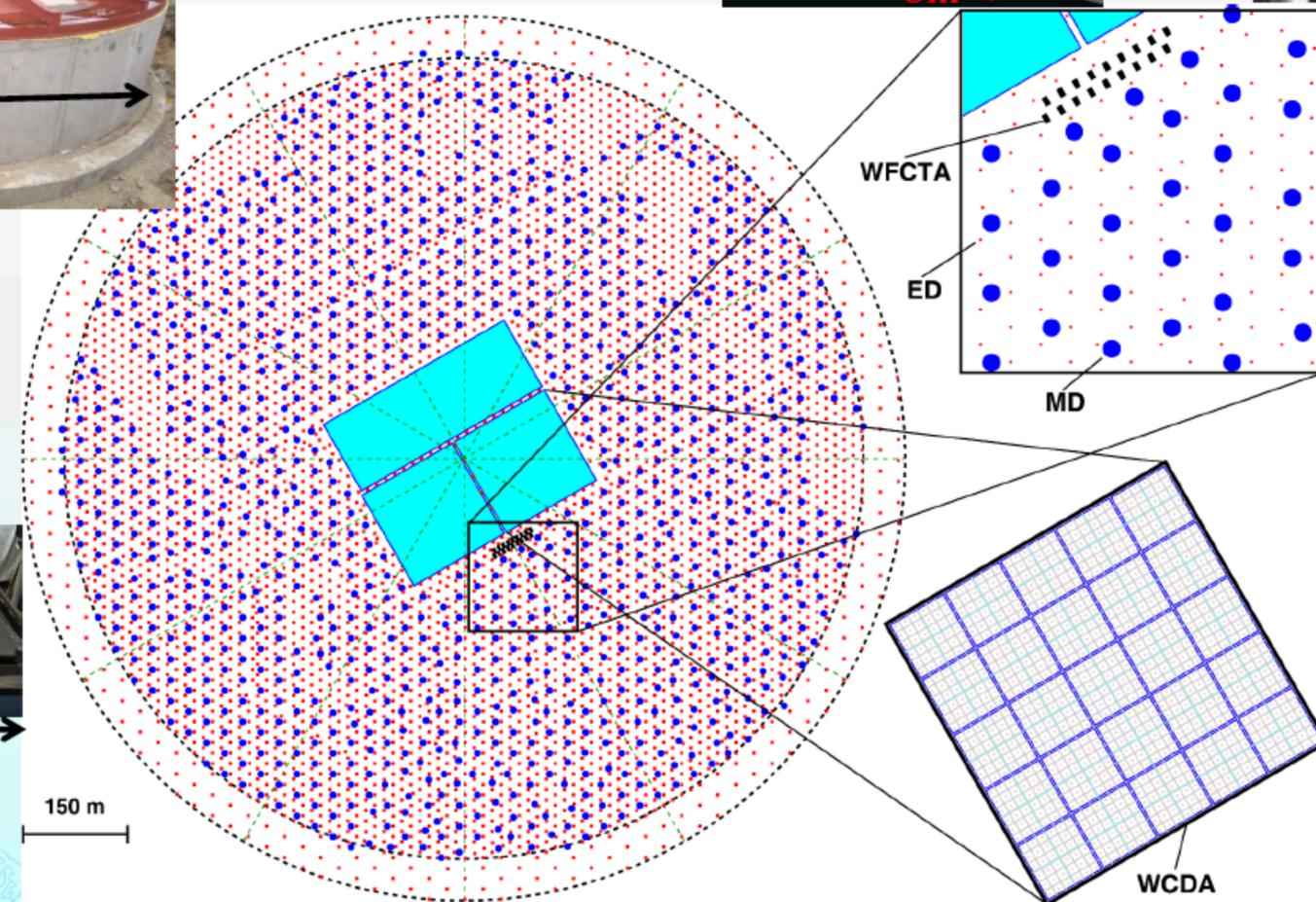
LHAASO

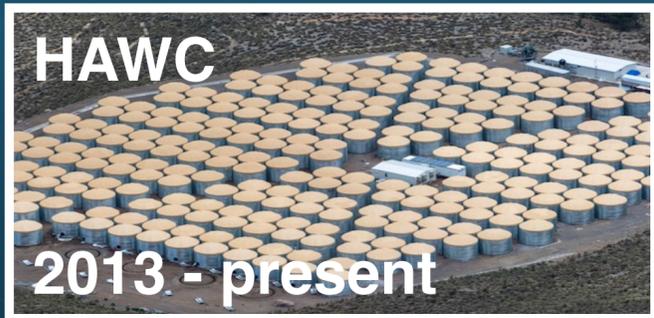


LHAASO
in the eyes of
reporters from
Nature



Detector Layout in LHAASO





LHAASO
desde 2019

SWGGO
2024?



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.

