

Astrofísica de partículas: Rayos cósmicos, neutrinos y rayos gamma,



Dr. J.C. Arteaga Velázquez

IFM, Universidad Michoacana
Morelia, Michoacan, Mexico



Contenido

Introducción

Astrofísica de partículas a muy altas energías.

¿Por qué interés en este campo?

4) Rayos cósmicos

5) Rayos gamma

6) Neutrinos

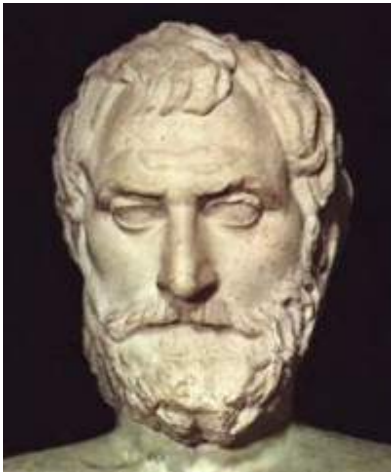
7) Resumen



1) Introducción: Astrofísica de partículas

Antigua Grecia

- **Tales de Mileto (624 - 546 A.C.)**
Leyes de la naturaleza gobiernan el universo.
- **Los cielos y la Tierra se rigen por leyes diferentes.**



1) Introducción: Astrofísica de partículas

1687. Isaac Newton

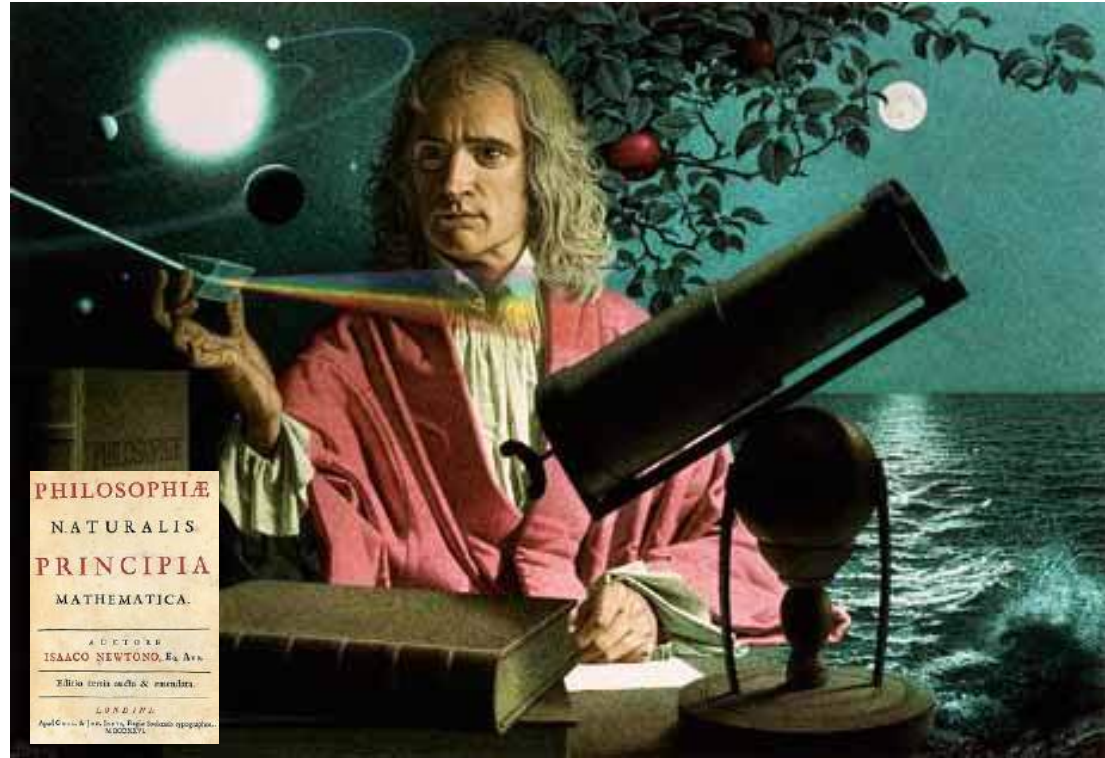
- **Principia:**

- Leyes del movimiento
- Ley de gravitación universal

- **Leyes de la física:**

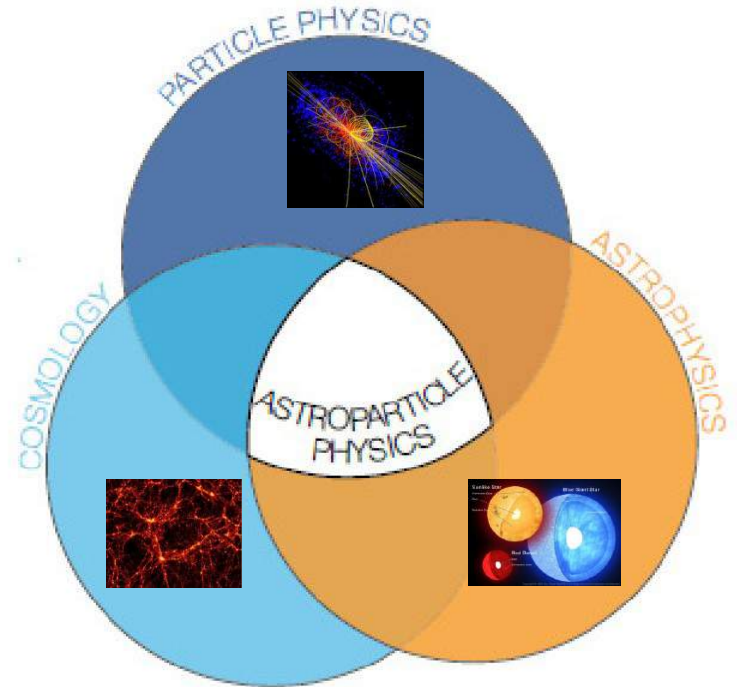
- Aplicables al mundo terrenal y al celeste.

- **Primera unificación de la física.**



1) Introducción: Astrofísica de partículas

- **Emplea** el universo como laboratorio para la física de partículas.
- **Involucra** la frontera de investigación entre la física de partículas, astrofísica y cosmología .
- **Investiga** el micro y macrocosmos, y la relación entre el mundo subatómico y el universo a gran escala.
- **Explora** nuevas ventanas astronómicas a muy altas energías.



1) Introducción: Astrofísica de partículas

Evolución y contenido del universo

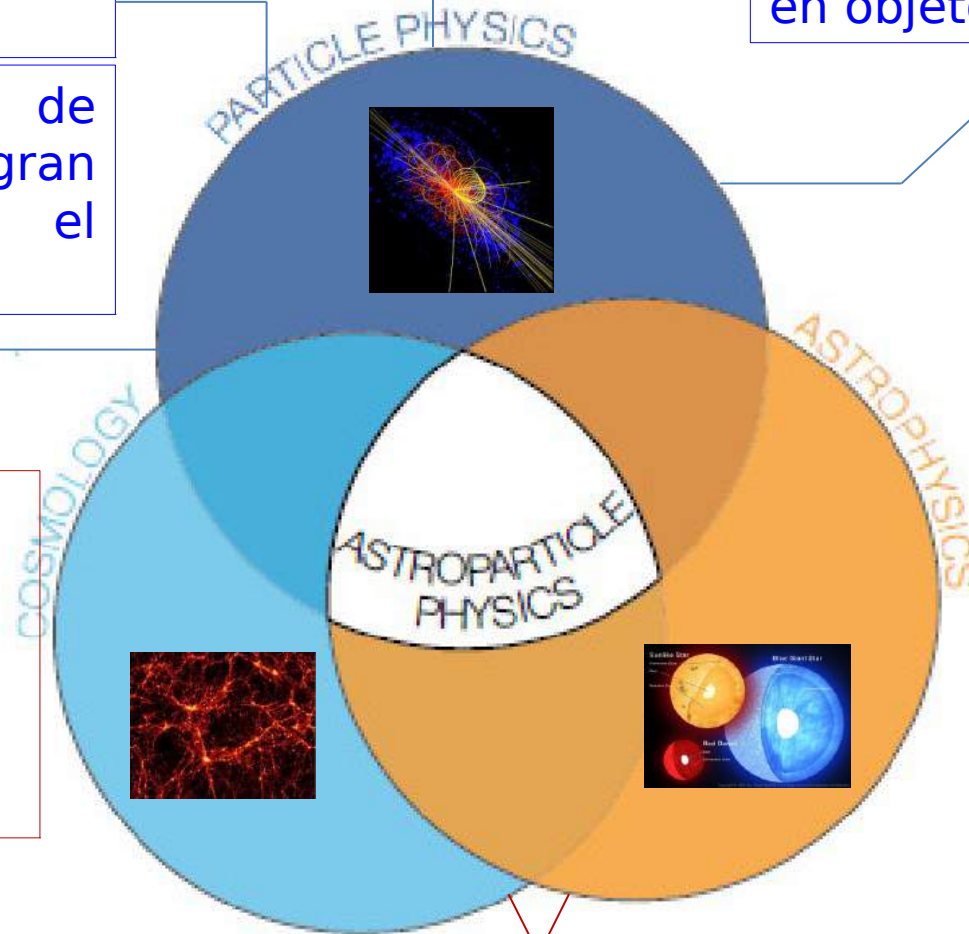
Evolución de las estrellas

Mecanismos de generación de energía en objetos astrofísicos

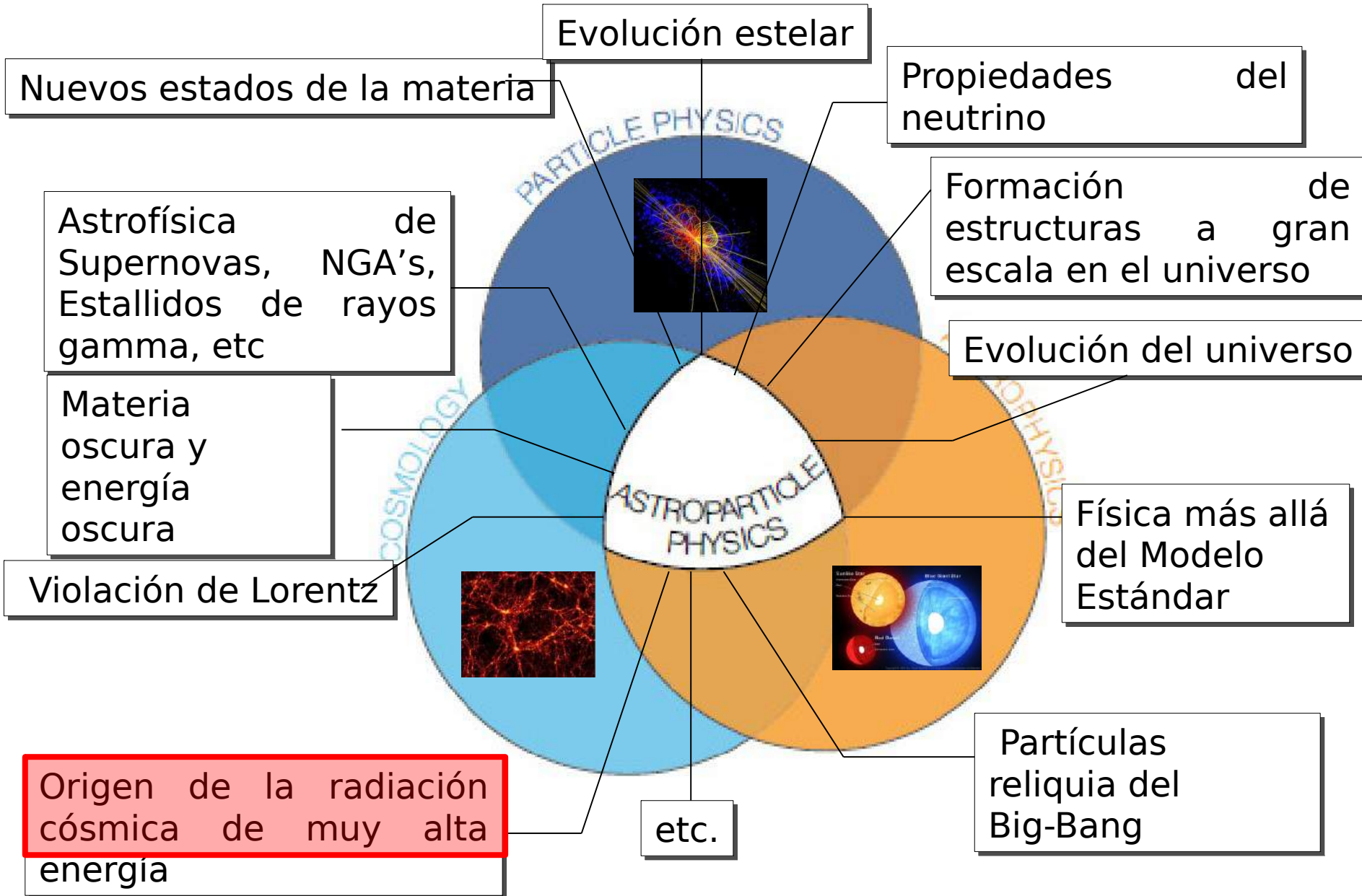
Formación de estructuras a gran escala en el universo.

Propiedades de partículas y sus interacciones:
Neutrinos, interacciones débiles, etc.

Restricciones al Modelo Estándar de las partículas elementales:
Nuevas partículas e interacciones, violación de Lorentz, etc.

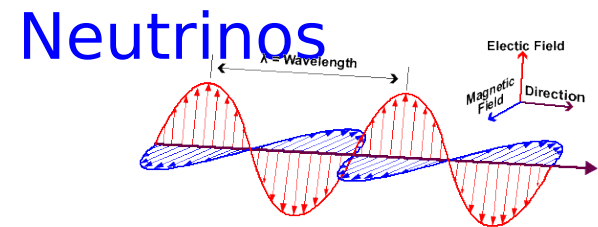
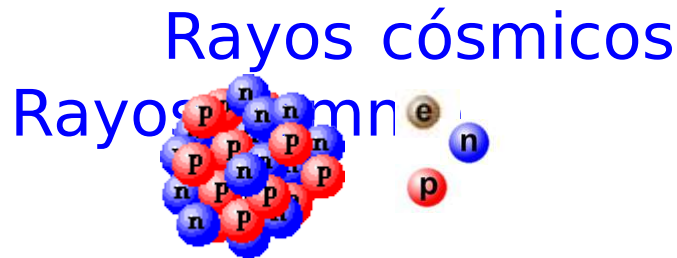


1) Introducción: Astrofísica de partículas



2) Astrofísica de partículas a muy altas energías

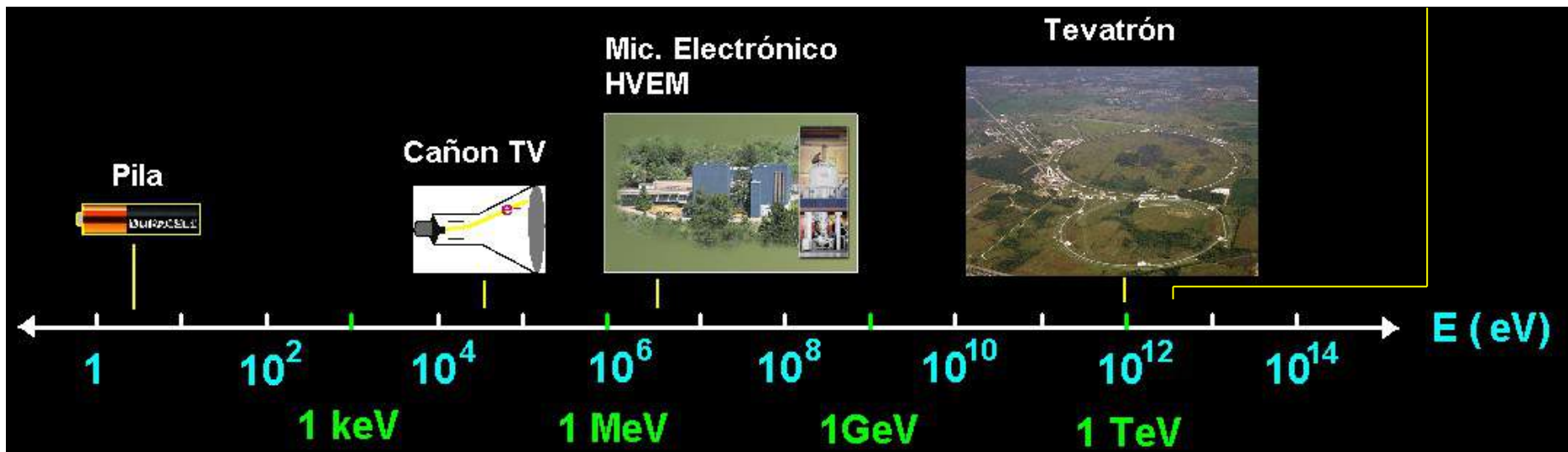
- Su campo de estudio es la radiación cósmica de altas energías:



- Descubrir y estudiar las fuentes, naturaleza, mecanismos de aceleración y propagación de la radiación más energética del universo.
- Energías $> \text{GeV}$.

2) Astrofísica de partículas a muy altas energías

LHC



$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ erg} \sim 1 \text{ TeV}$$

$$E_{\text{tot}} = \gamma mc^2 = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} (m^2 c^4 + p^2 c^2)$$

$$E_{\text{kin}} = E_{\text{tot}} - mc^2$$

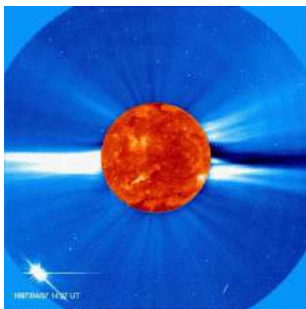
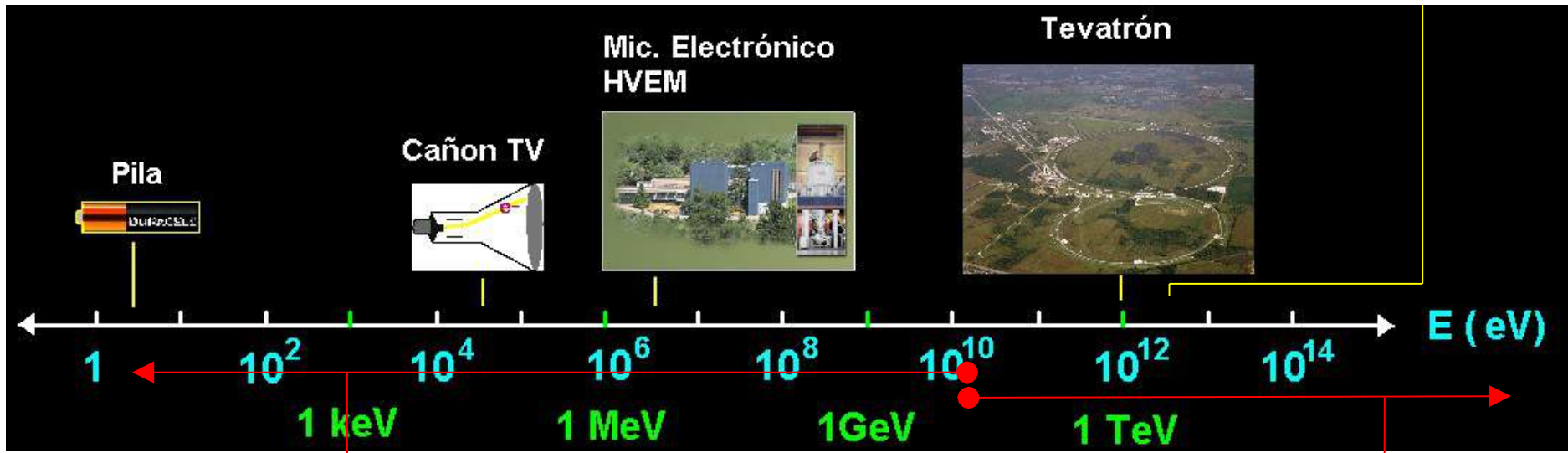
$$p = E_{\text{tot}} v/c^2$$

$$(\text{masa reposo protón})c^2 = 1 \text{ GeV}$$

$$(\text{masa reposo electrón})c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

2) Astrofísica de partículas a muy altas energías

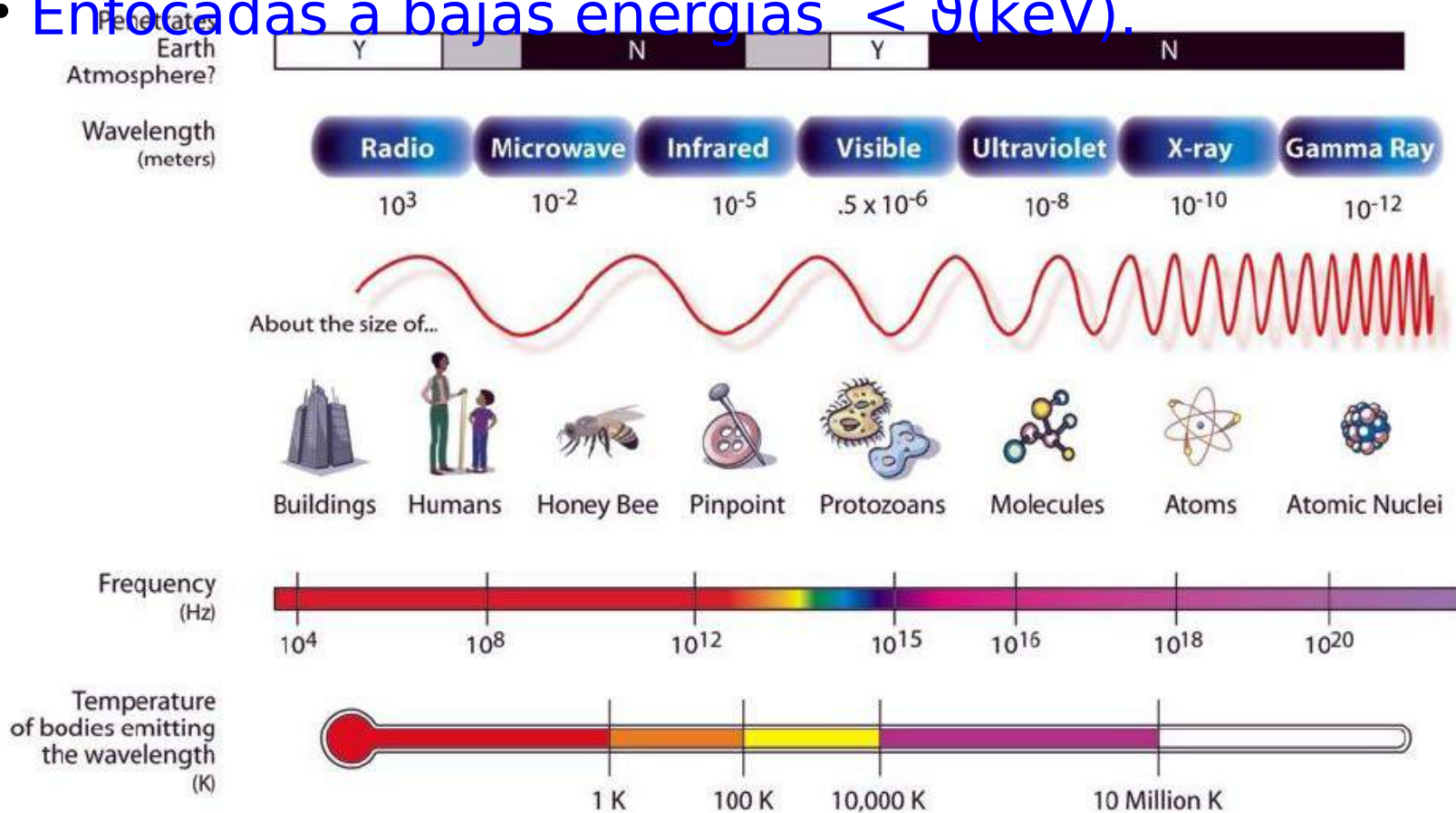
LHC



2) Astrofísica de partículas a muy altas energías

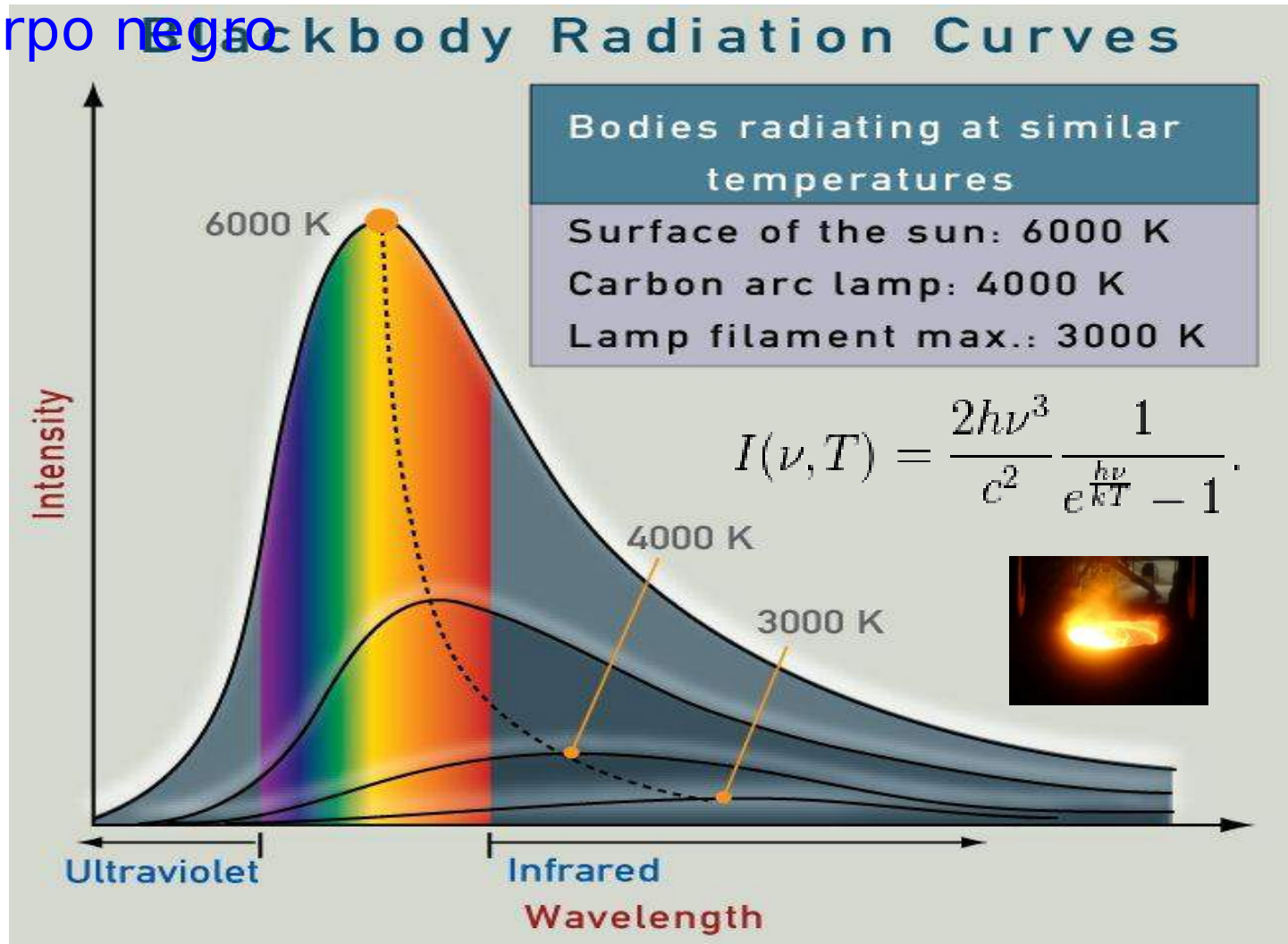
Espectro electromagnético:

- Observaciones concentradas en región emisión térmica y
- Enfocadas a bajas energías $< \theta(\text{keV})$.



2) Astrofísica de partículas a muy altas energías

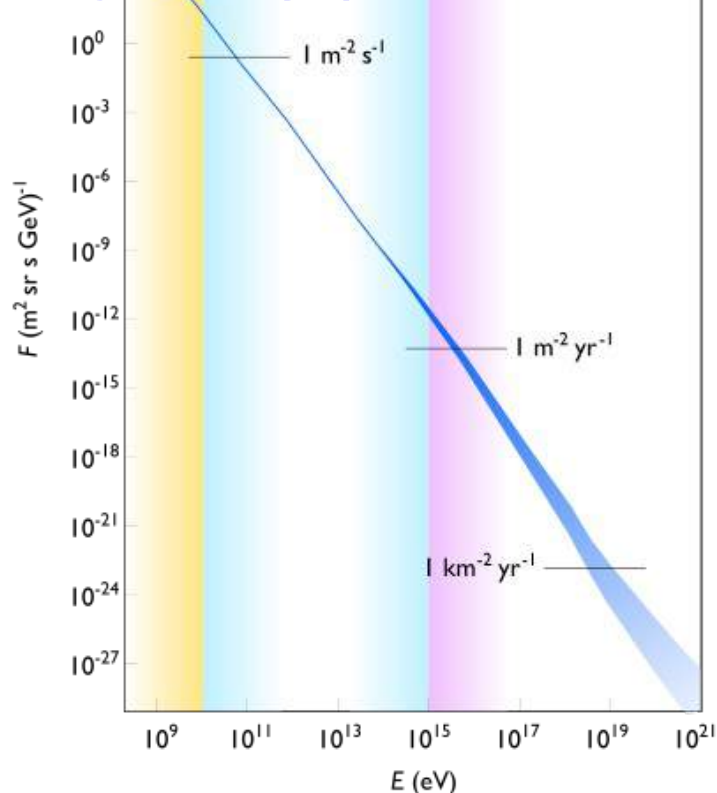
Espectro térmico gobernado por ley de radiación del cuerpo negro



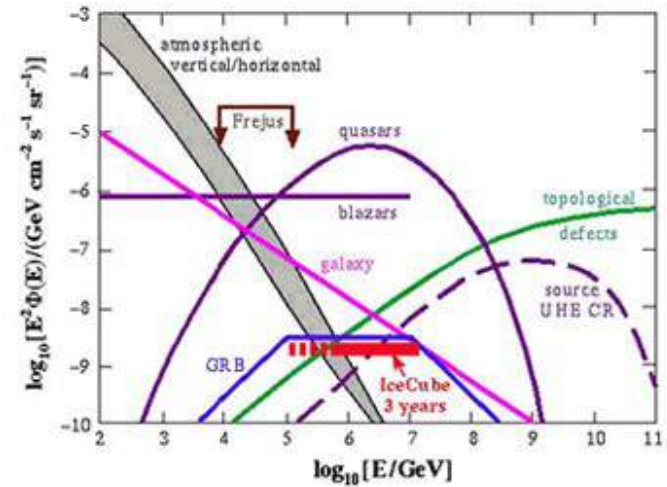
2) Astrofísica de partículas a muy altas energías

Radiación cósmica de altas energías

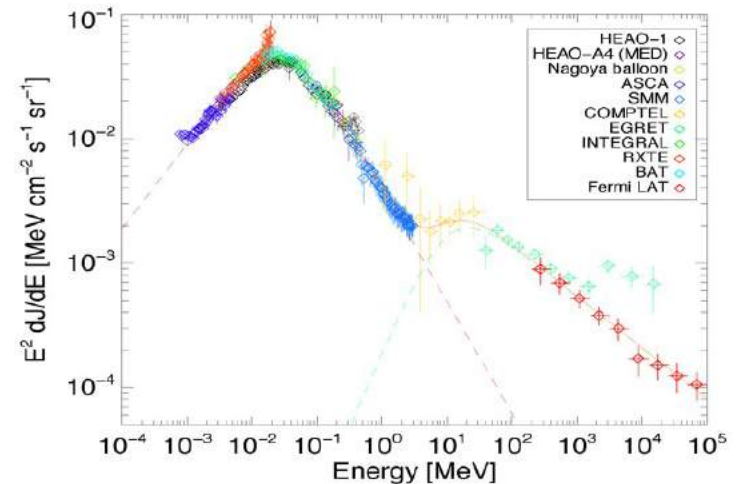
- No térmica
- Sigue ley potencias: E_γ .



Espectro de rayos cósmicos



Espectro de neutrinos



Espectro de γ 's extragaláctico (Ajello et al)

3) ¿Por qué el interés en este campo?

Objetivos:

Abrir nuevas ventanas astronómicas.

Conocer origen y mecanismos aceleración partículas más energéticas del universo.

Estudiar interior de objetos astrofísicos que emiten radiación de alta energía.

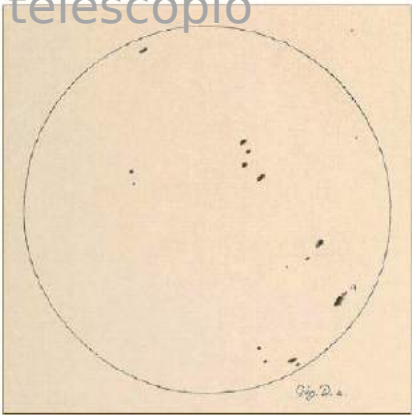
4) Física de partículas



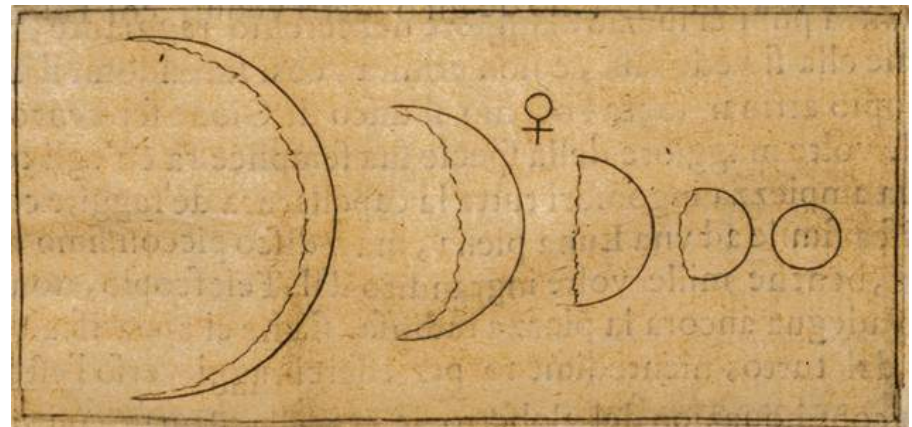




Galileo Galilei y el telescopio



Manchas solares (2 Junio 1613)



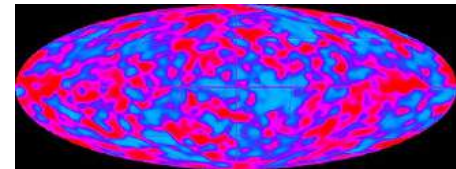
Fases de Venus

3) ¿Por qué el interés en este campo?

1) Abrir nuevas ventanas astronómicas.

Ventana	Fecha	Objetivo	Descubrimiento
---------	-------	----------	----------------

Microondas	1965	Ruido	 Radiación de fondo 3K
------------	------	-------	--



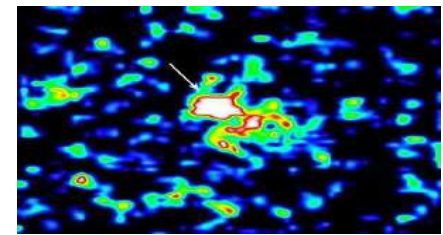
Radiación de fondo 3K

Radio	1932	Ruido	 Radio Galaxias
-------	------	-------	---



Radio Galaxias

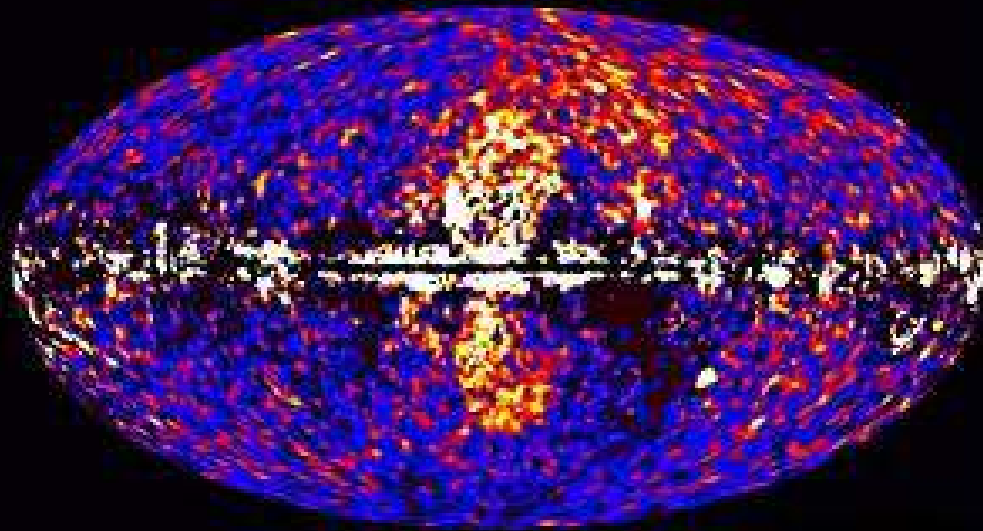
Rayos γ	60's	Pruebas nucleares	 Estallidos de rayos gamma
----------------	------	-------------------	---



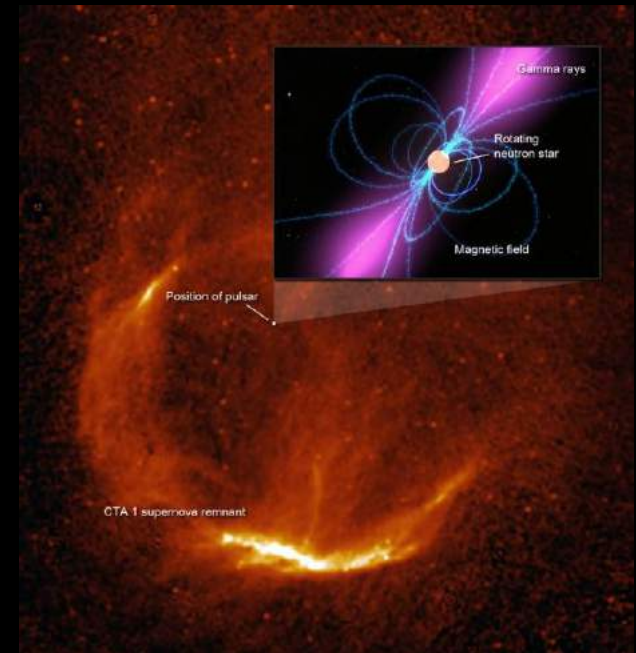
Estallidos de rayos gamma

3) ¿Por qué el interés en este campo?

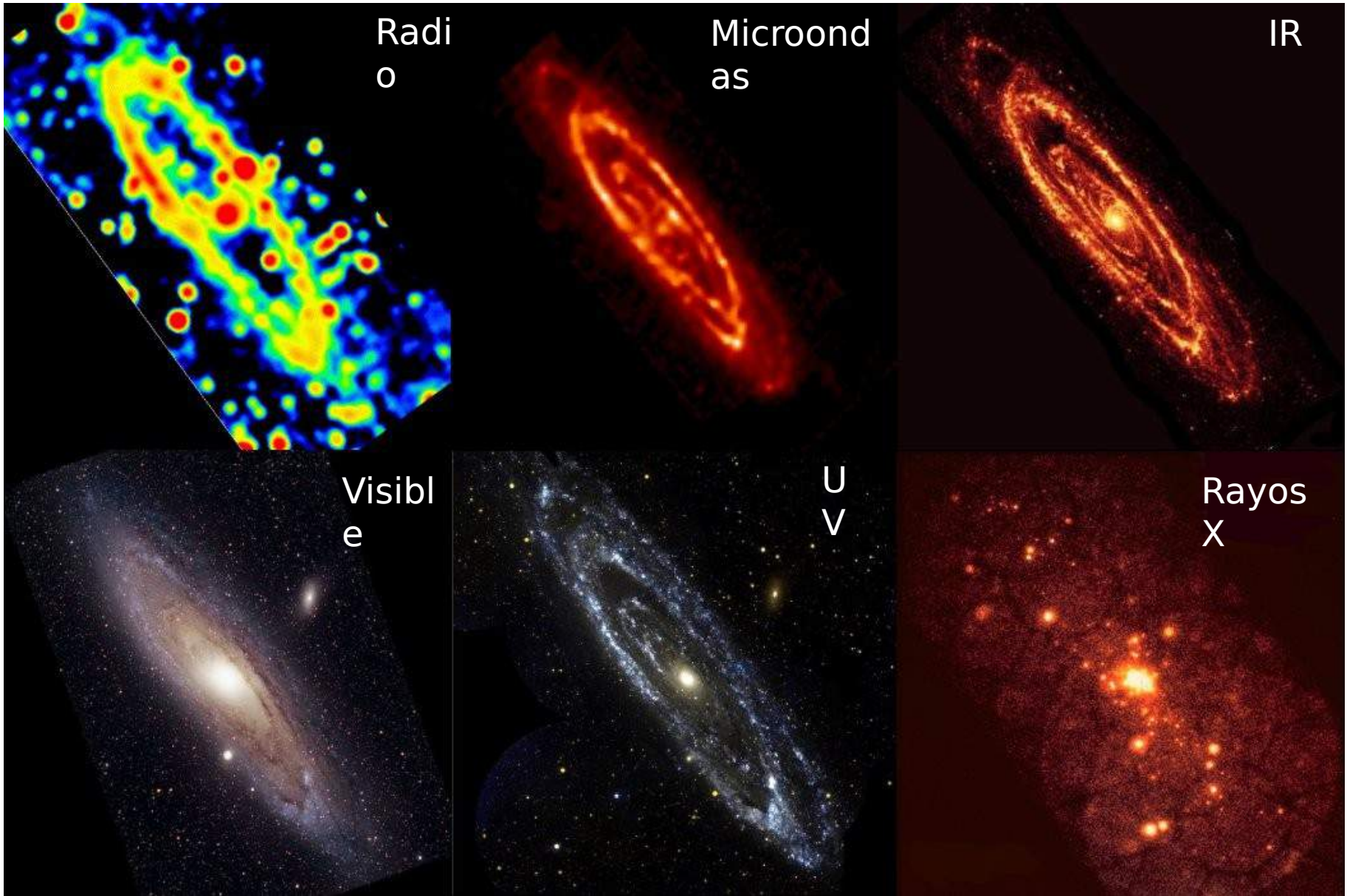
Nuevos objetos



Burbujas de Fermi
gamma radio-quietos



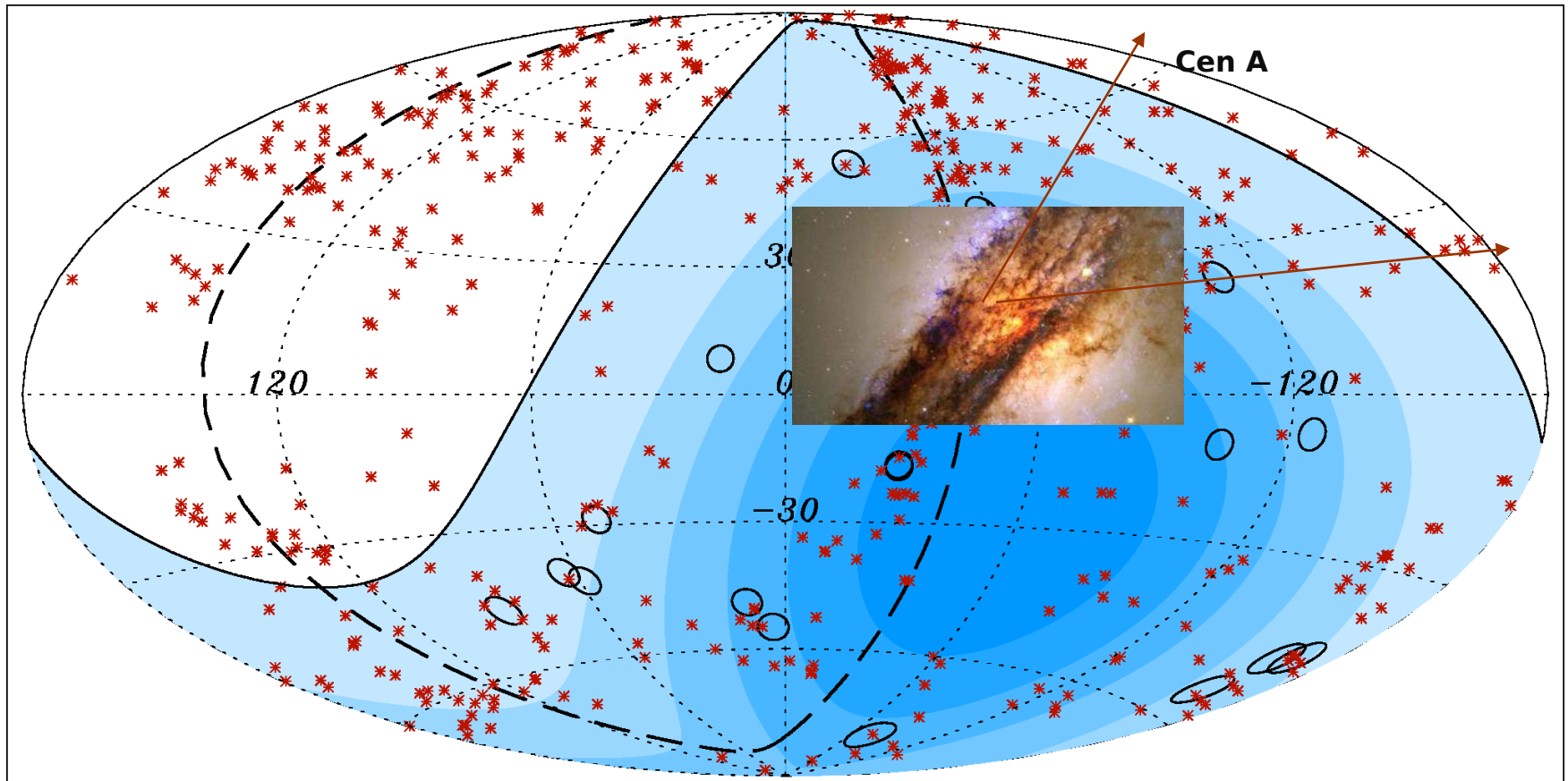
FERMI
Pulsares



Galaxia de Andr3meda (M31)

3) ¿Por qué el interés en este campo?

1) Abrir nuevas ventanas astronómicas.



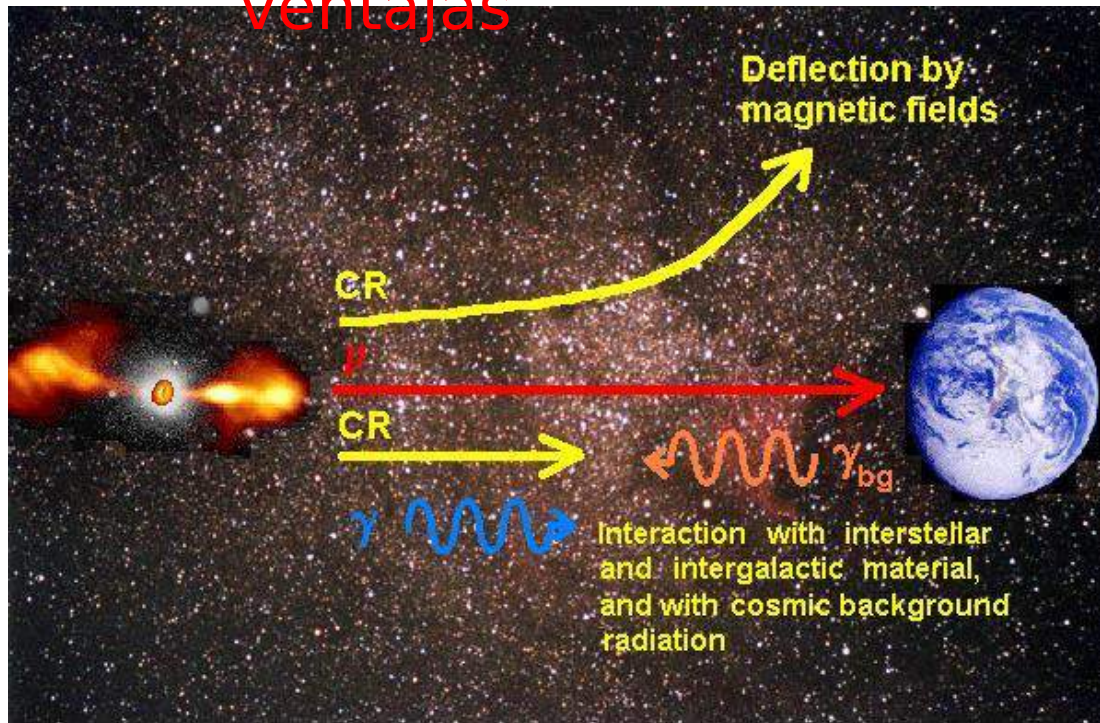
Dirección de arribo de 27 rayos cósmicos con $E > 57 \times 10^{18}$ eV detectados por el Observatorio Pierre Auger (círculos) en coordenadas galácticas. (P. Auger Coll., Science 318, 2007)

Núcleos de Galaxia Activa ¿fuentes de rayos cósmicos

Ultraenergéticos?

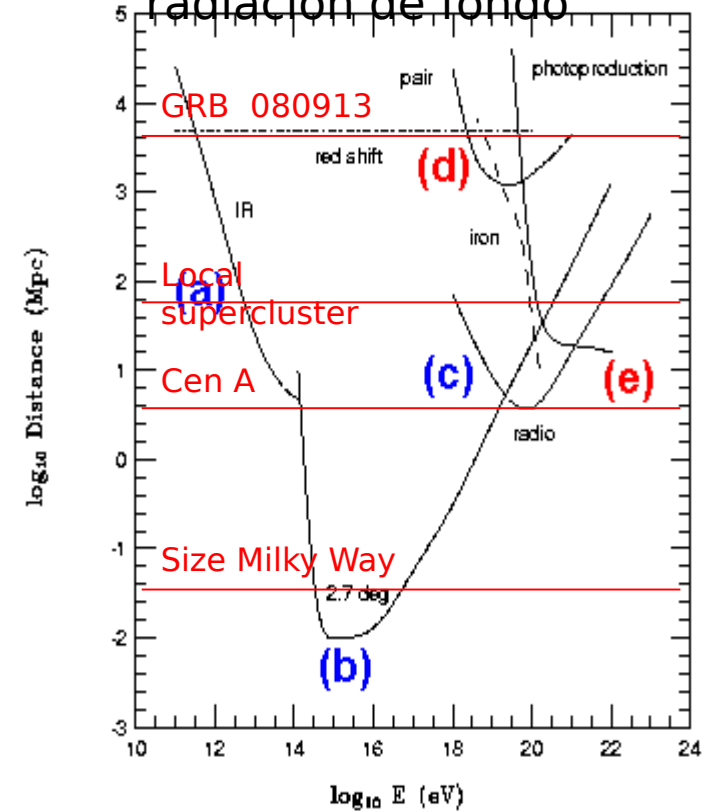
3) ¿Por qué el interés en este campo?

Desventajas y ventajas



Implicaciones:
Rayos cósmicos y gammas
proviene de nuestro vecindario
galáctico

Longitud de atenuación en radiación de fondo



- (a) $\gamma + \gamma_{IR}$
- (b) $\gamma + \gamma_{CMB}$
- (c) $\gamma + \gamma_{radio}$
- (d) $P + \gamma_{CMB} \rightarrow e+e-$
- (e) $P + \gamma_{CMB} \rightarrow \pi$

(c) $\gamma + \gamma_{radio}$
Escuela de Física Fundamental
2013

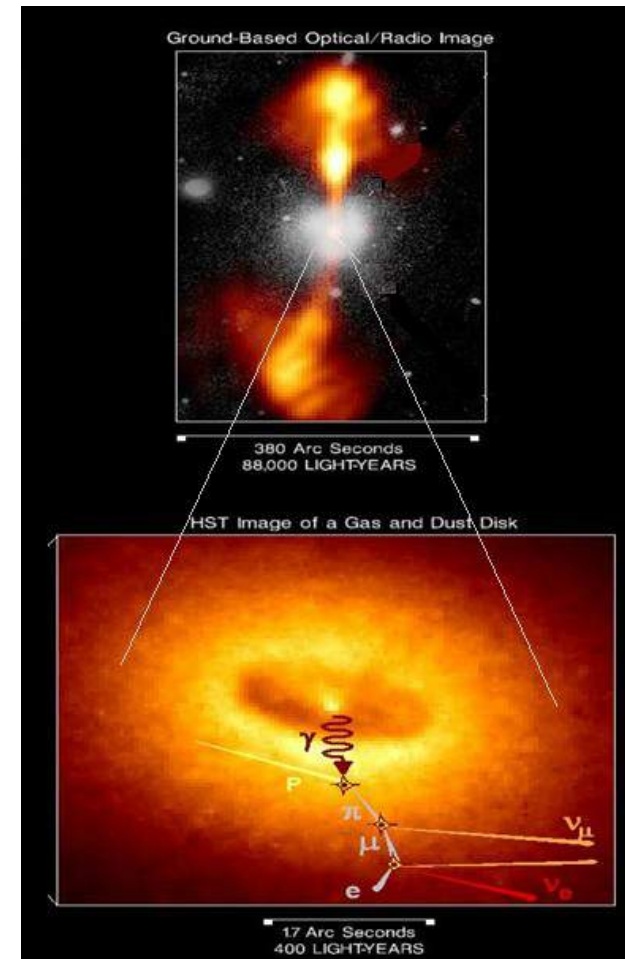
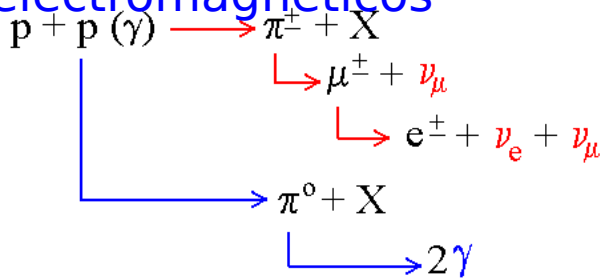
3) ¿Por qué el interés en este campo?

2) Conocer origen y mecanismos aceleración partículas más energéticas del universo.

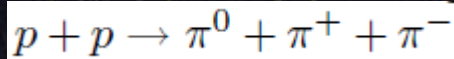
¿Dónde?

Regiones caracterizadas por:

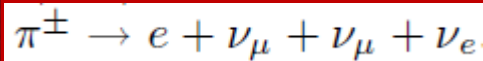
- 1) Aceleración de plasmas
- 2) Partículas cargadas
- 3) Campos electromagnéticos



Producción de neutrinos y gammas: Modelo hadrónico



Prob. Producción π^\pm



$$x_\nu = E_\nu / E_p$$

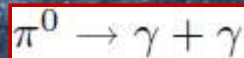
$$x_\nu \simeq 0.25 x_\pi \simeq 0.05$$

$$\frac{dN_\nu}{dE}(E) = 3 \times \frac{2}{3} \times \frac{1}{x_\nu} \times R_p \frac{dN_p}{dE} \left(\frac{E}{x_\nu} \right)$$

Prob. Interac. protón

Flujo inicial de protones

$$\frac{dN_\gamma}{dE}(E) = 2 \times \frac{1}{3} \times \frac{1}{x_\gamma} \times R_p \frac{dN_p}{dE} \left(\frac{E}{x_\gamma} \right)$$



$$x_\gamma = E_\gamma$$

$$x_\gamma \simeq 0.5 x_\pi \simeq 0.1$$

Prob. Producción π^0

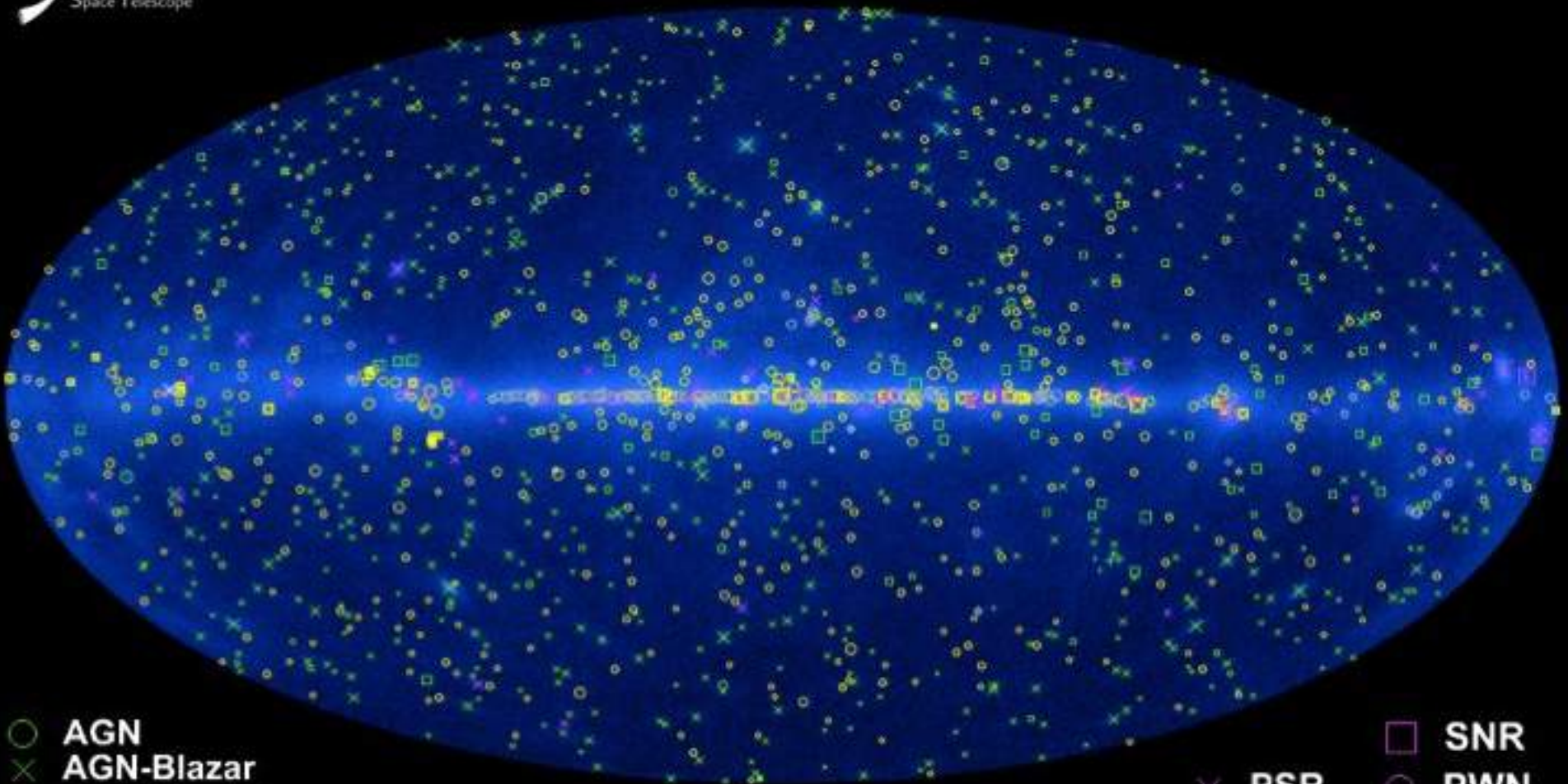


Gammas : Detectados

**Neutrinos:
Detectados pero
no se sabe de
dónde
proviene**



The Fermi LAT 1FGL Source Catalog



- AGN
- × AGN-Blazar
- AGN-Non Blazar
- No Association
- Possible Association with SNR and PWN
- Possible confusion with Galactic diffuse emission
- Starburst Galaxy
- + Galaxy
- SNR
- PWN
- × PSR
- ⊗ PSR w/PWN
- ◇ Globular Cluster
- × HXB or MQO



The Fermi LAT 1FGL Source Catalog



GRB

Cúmulos globulares

AGN

Pulsares



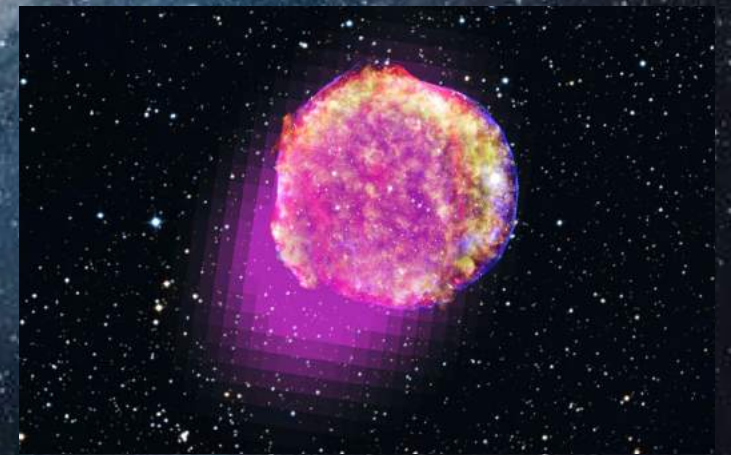
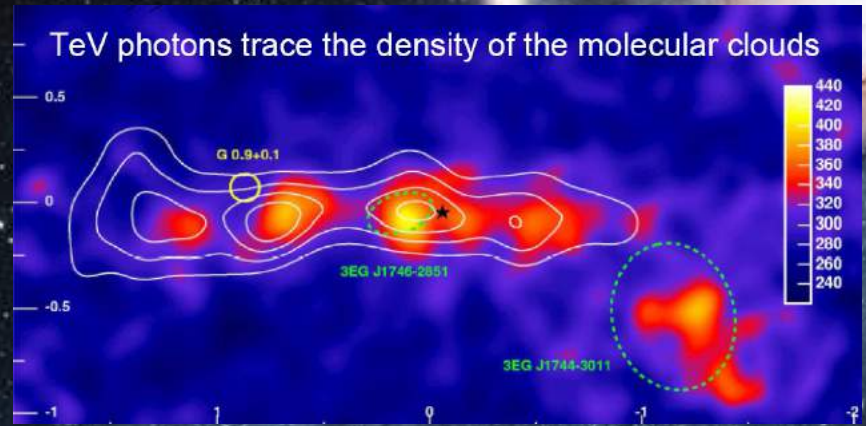
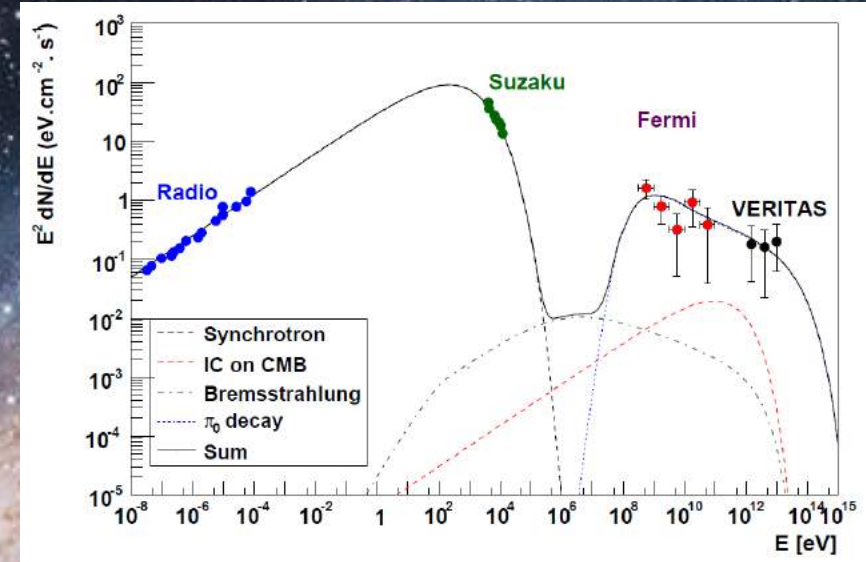
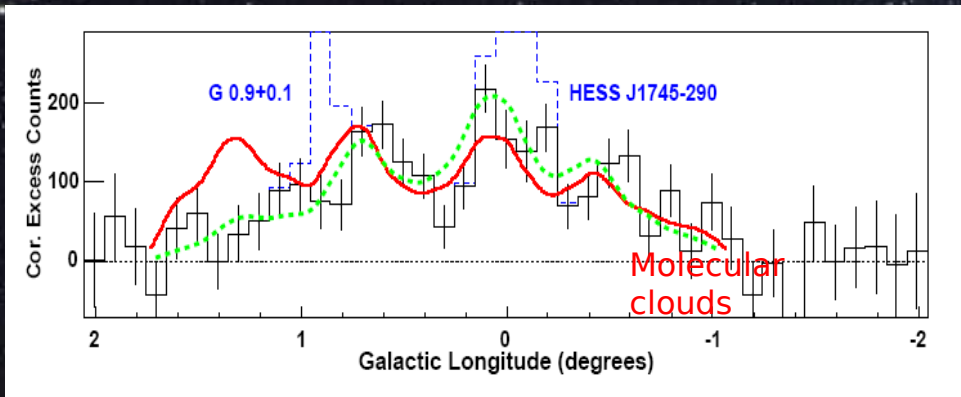
Vía láctea

Remanentes de SN



- AGN
- × AGN-Blazar
- AGN-Non Blazar
- No Association
- ◻ Possible Association with SNR and PWN
- Possible confusion with Galactic diffuse emission
- Starburst Galaxy
- + Galaxy
- SNR
- PWN
- × PSR
- ⊗ PSR w/PWN
- ◇ Globular Cluster
- × HXB or MQO

¿Evidencia conexión γ - rayos cósmicos?



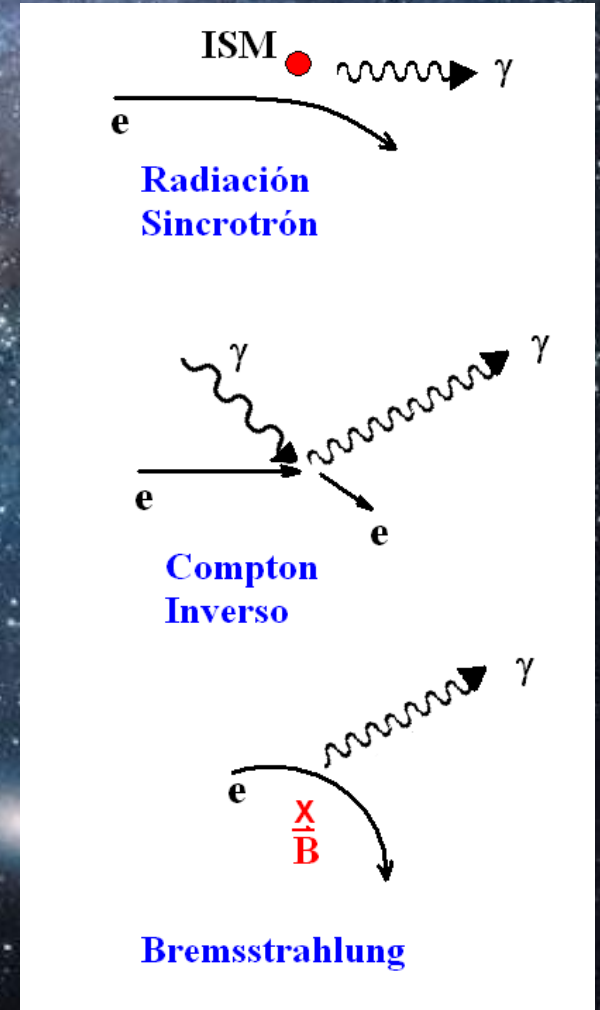
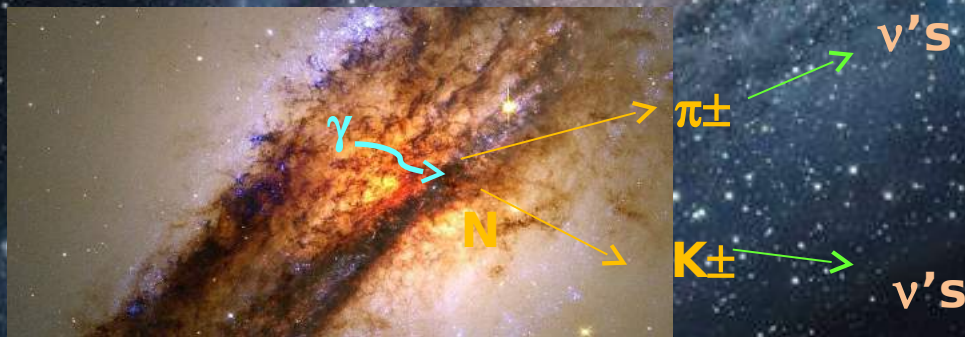
Intensidad de flujo de γ 's de centro galáctico correlacionado con densidad de nubes moleculares
 HESS experiment (Aharonian, Nature 439, 2006)

Espectro de γ 's de SNR Tycho consistente con aceleración de RC.

Fermi-LAT experiment (Giordano, et al, 2011)

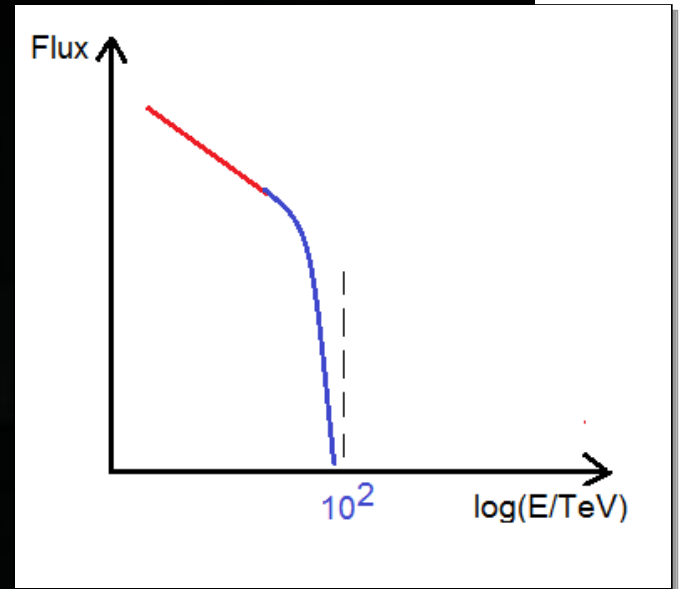
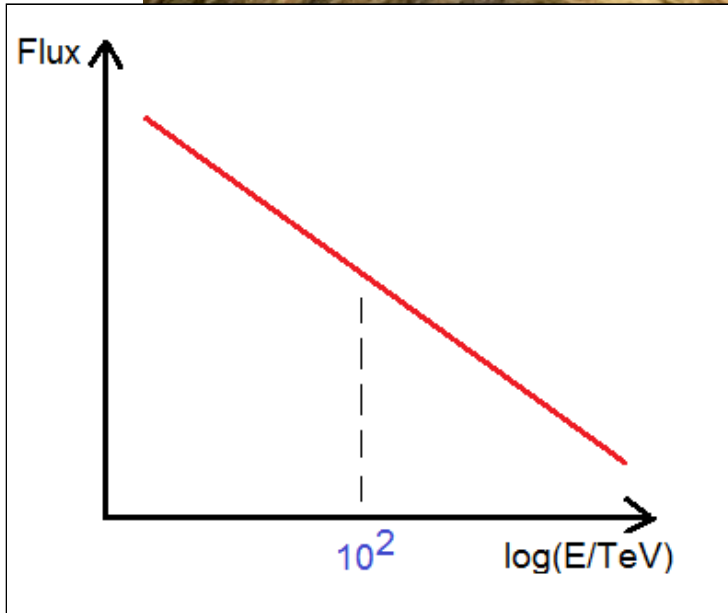
Modelo alternativo de producción de gammas: Modelo leptónico

- Aceleración de electrones
- Emisión de gammas por mecanismo sincrotrón, Bremsstrahlung, Compton Inverso.
- No aceleración de núcleos atómicos
- Emisión despreciable de neutrinos de alta energía



3) ¿Por qué el interés en este campo?

Modelo Hadrónico vs Modelo Leptónico



Claves:

- Neutrinos
- Rayos gamma de energías superiores a 100 TeV

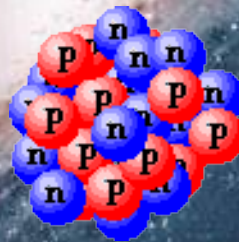
3) ¿Por qué el interés en este campo?

¿Cómo? Mecanismo de aceleración

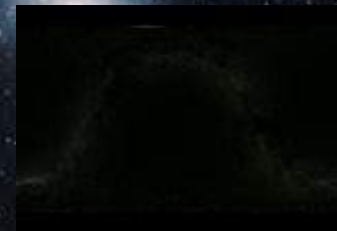
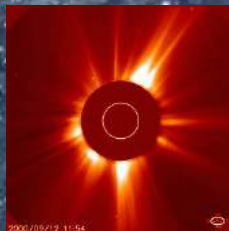
- Campos electromagnéticos

$$d(\gamma m \vec{v})/dt = \vec{q} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

- Partículas cargadas



- Aceleración de plasmas



3) ¿Por qué el interés en este campo?

Paradigma: Mecanismo de Fermi de primer orden

- Aceleración en ondas de choque

- $\Phi(E) \propto E^\gamma$

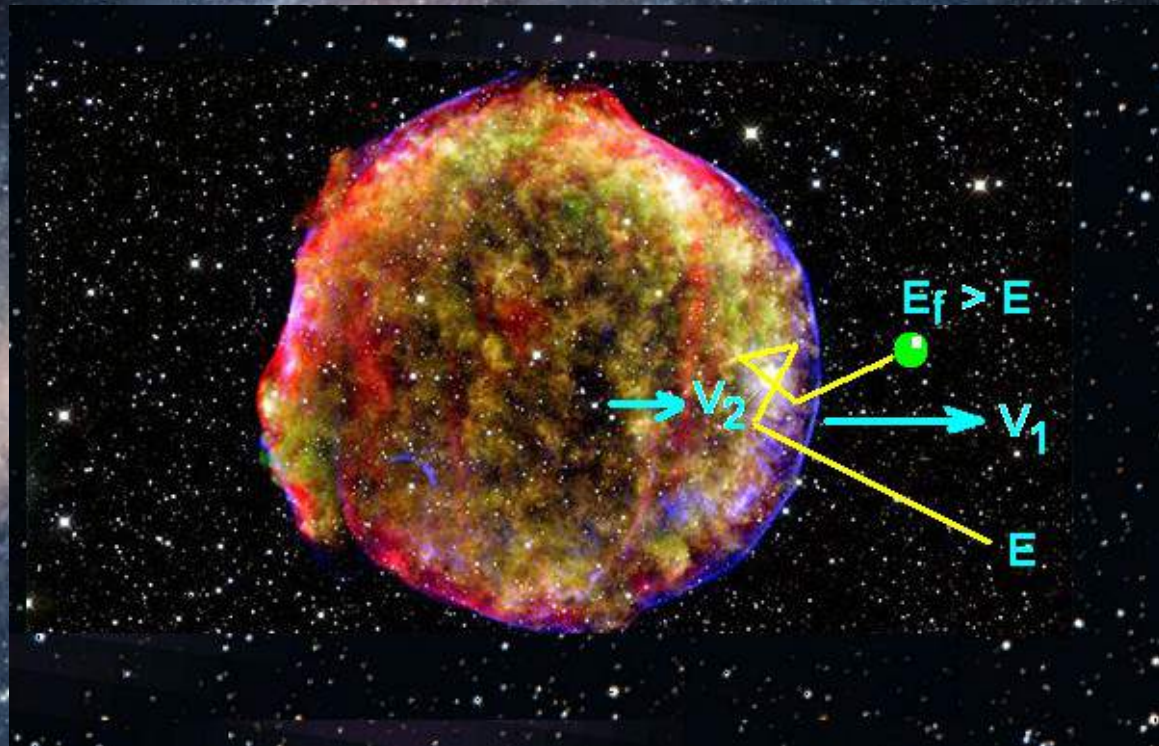
$$\Delta E/E \sim (v_2/c) = \beta$$

- Ejemplo:

$L_{cr} \sim 10^{40} \text{ erg/s} =$

- $10\% L_{SNR}$ Remanentes de SNI

- $\beta < 10^{-1}$



3) ¿Por qué el interés en este campo?

Paradigma: Mecanismo de Fermi de primer orden

- Aceleración en ondas de choque

- $\Phi(E) \propto E^\gamma$

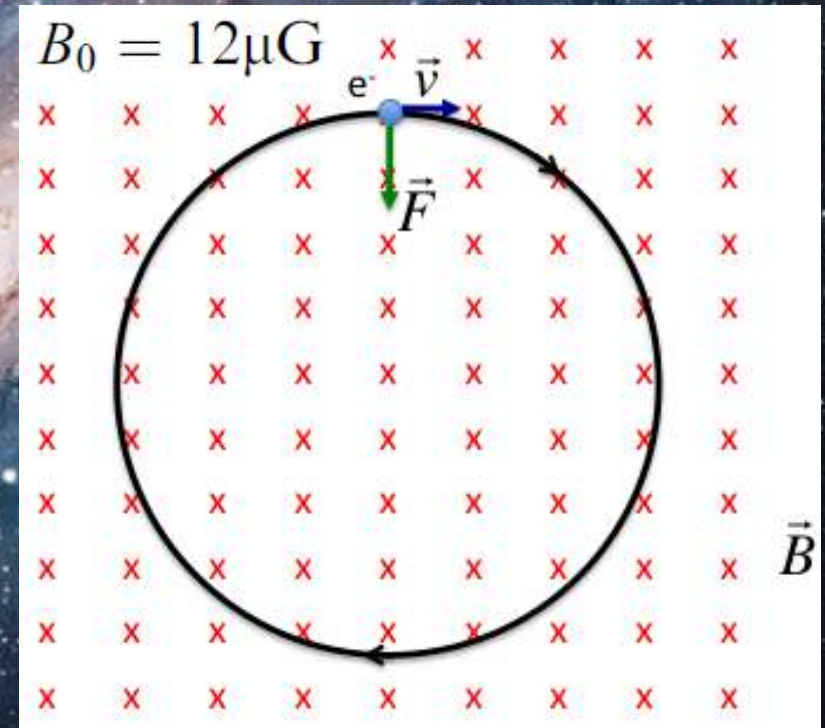
$$\Delta E/E \sim (v/c)^2 = \beta^2$$

- Ejemplo:

$$L_{cr} \sim 1040 \text{ erg/s} =$$

- Remanentes de SNII

$$E_{max} \sim Ze \cdot c \cdot B \cdot TV_s$$



$$d(\gamma m \vec{v})/dt = \vec{q} (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

3) ¿Por qué el interés en este campo?

Paradigma: Mecanismo de Fermi de primer orden

- Aceleración en ondas de choque

- $\Phi(E) \propto E^{-\gamma}$

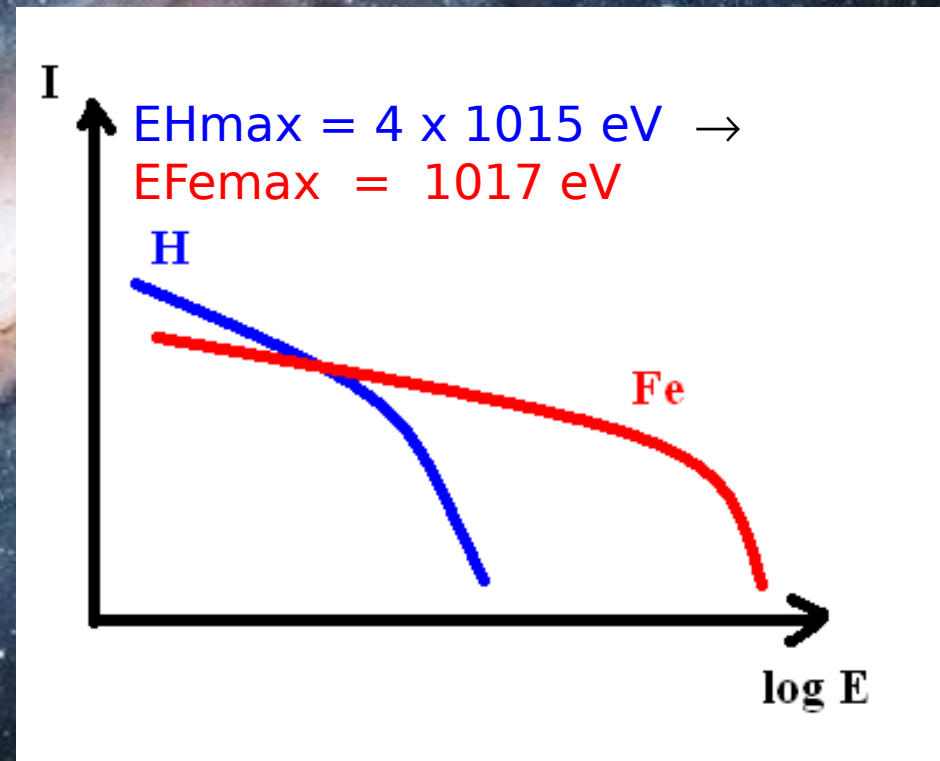
$$\Delta E/E \sim (v/c)$$
$$= \beta$$

- Ejemplo:

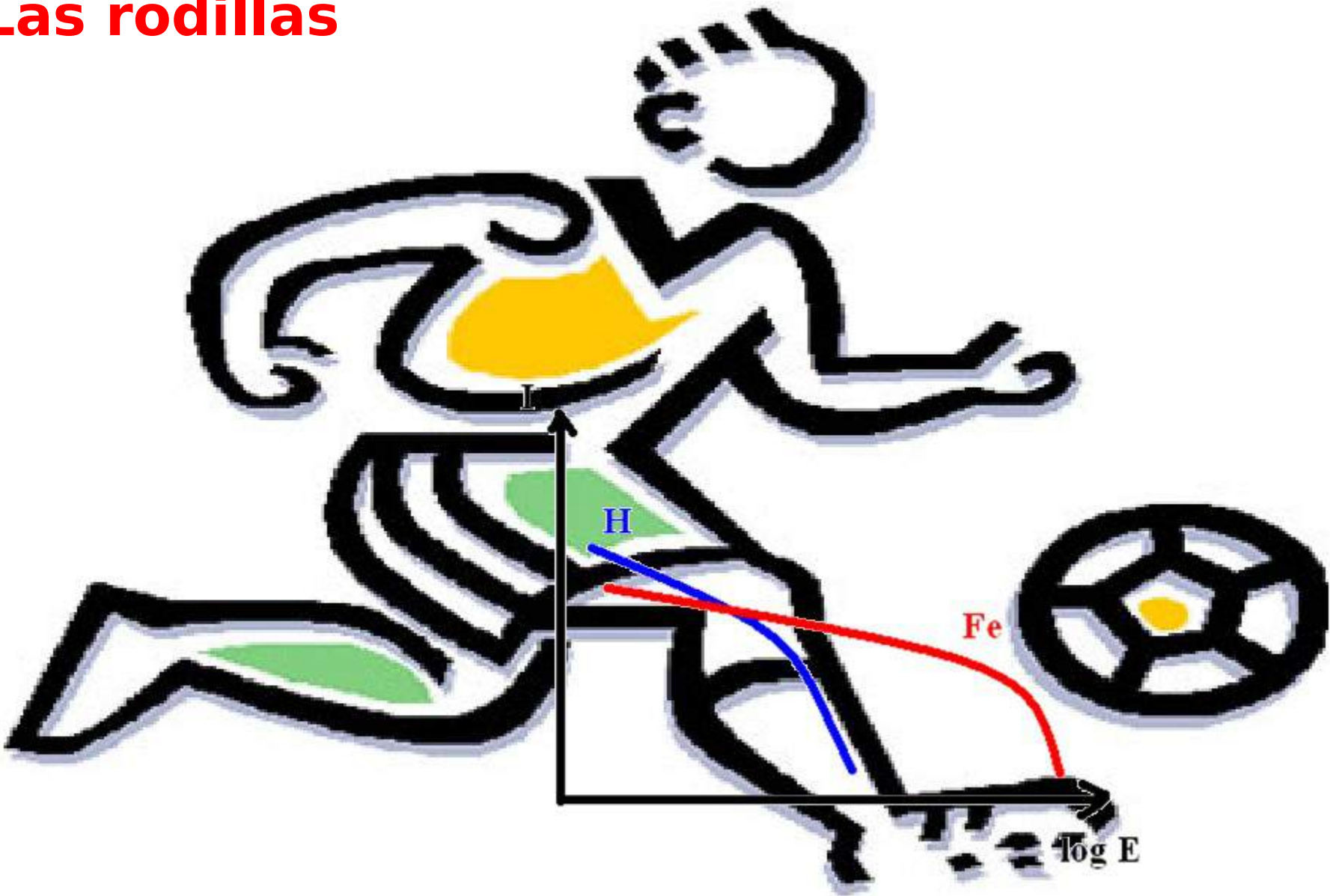
$$L_{cr} \sim 10^{40} \text{ erg/s} =$$

- $10\% L_{SNB}$
- Remanentes de SNI

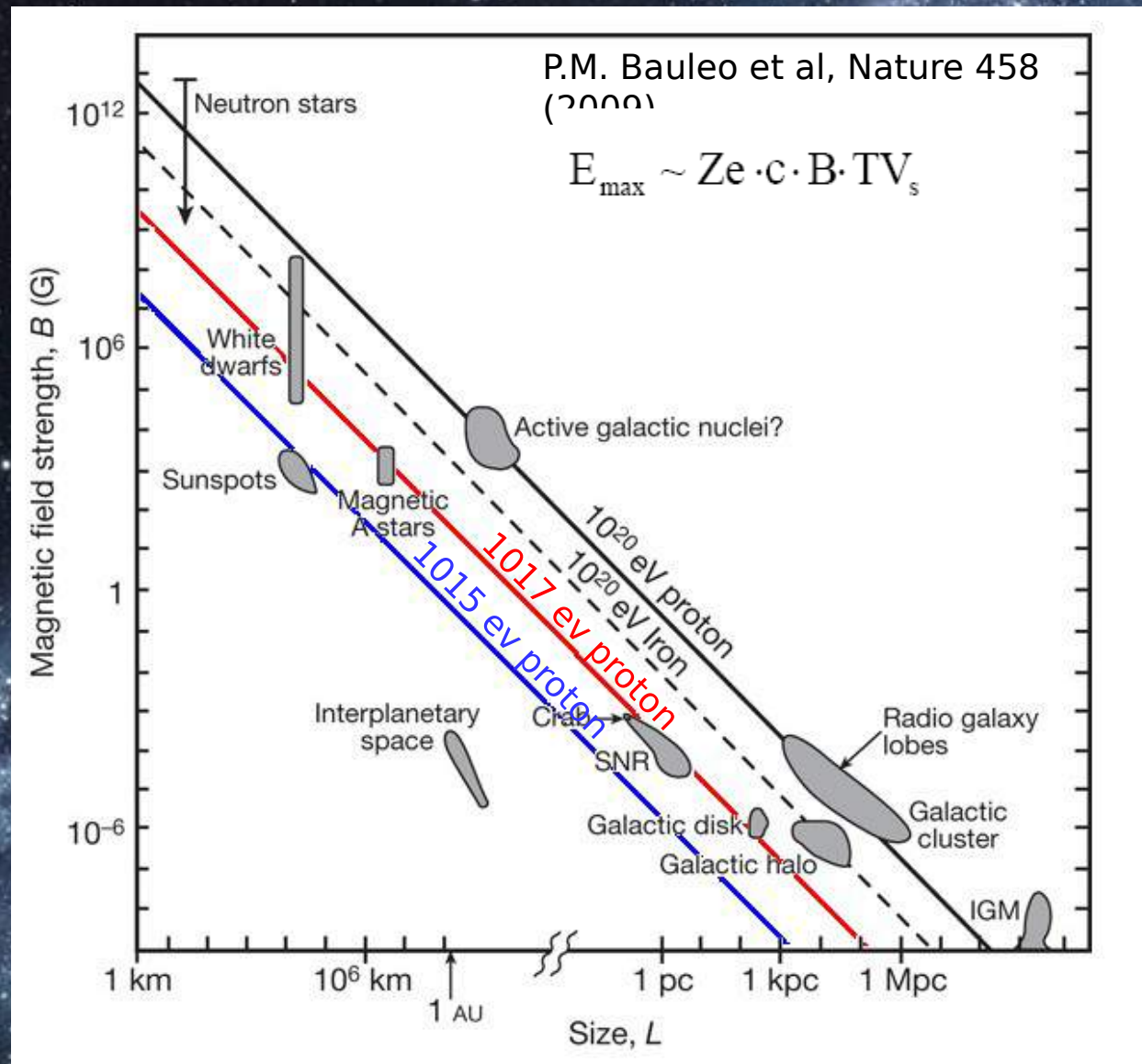
$$E_{max} \sim Ze \cdot c \cdot B \cdot TV_s$$



Las rodillas



Paradigma: Mecanismo de Fermi de primer orden



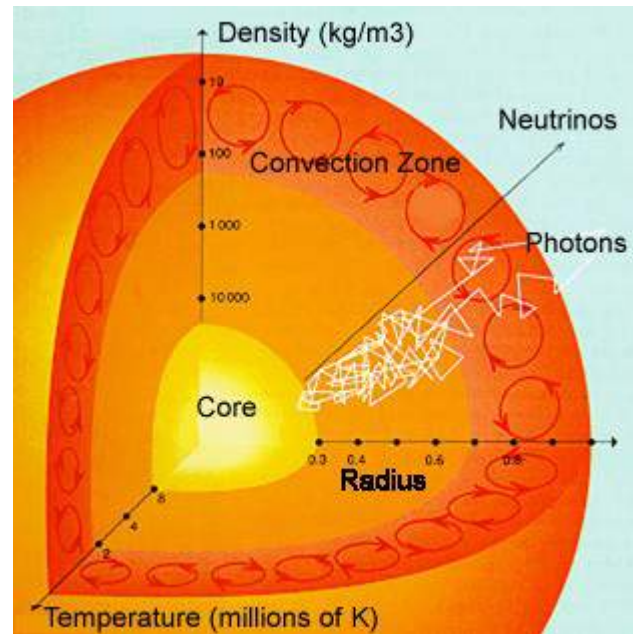
3) ¿Por qué el interés en este campo?

3) Estudiar interior de objetos astrofísicos que emiten radiación de alta energía.



3) ¿Por qué el interés en este campo?

3) Estudiar interior de objetos astrofísicos que emiten radiación de alta energía.



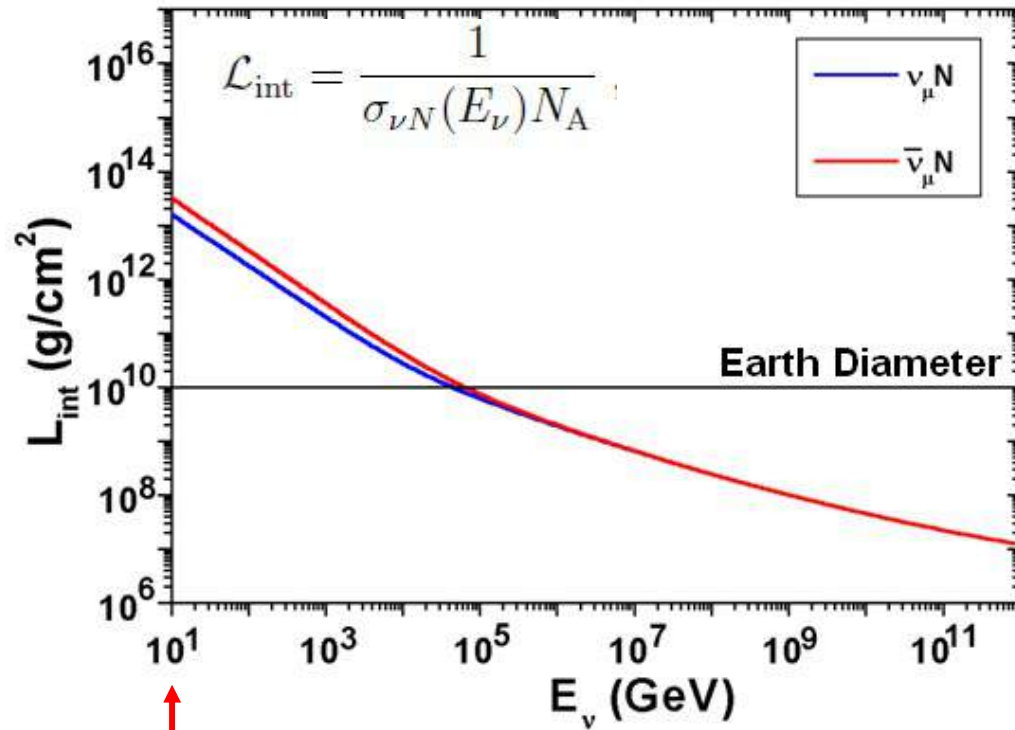
Tiempo escape

2 segundos

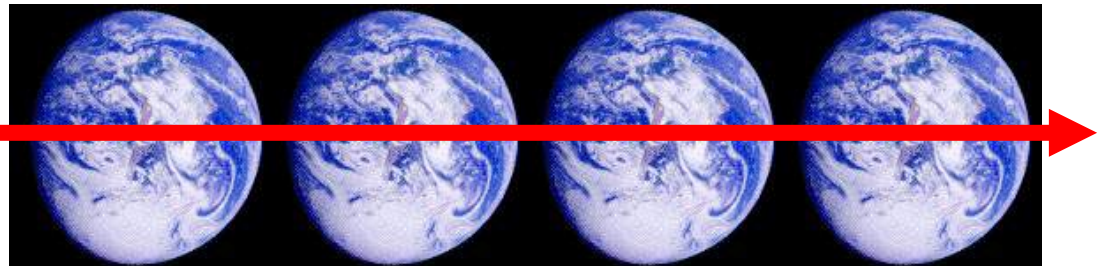
1 millón de años

3) ¿Por qué el interés en este campo?

Longitud de interacción del neutrino



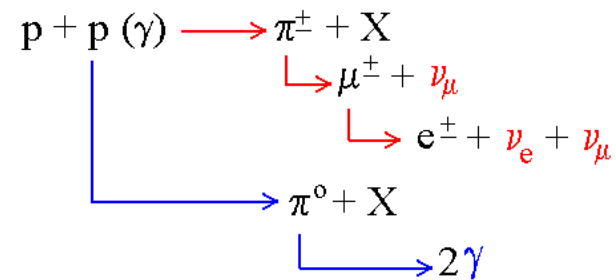
A 10 GeV, un ν podría atravesar la Tierra mil veces



3) ¿Por qué el interés en este campo?

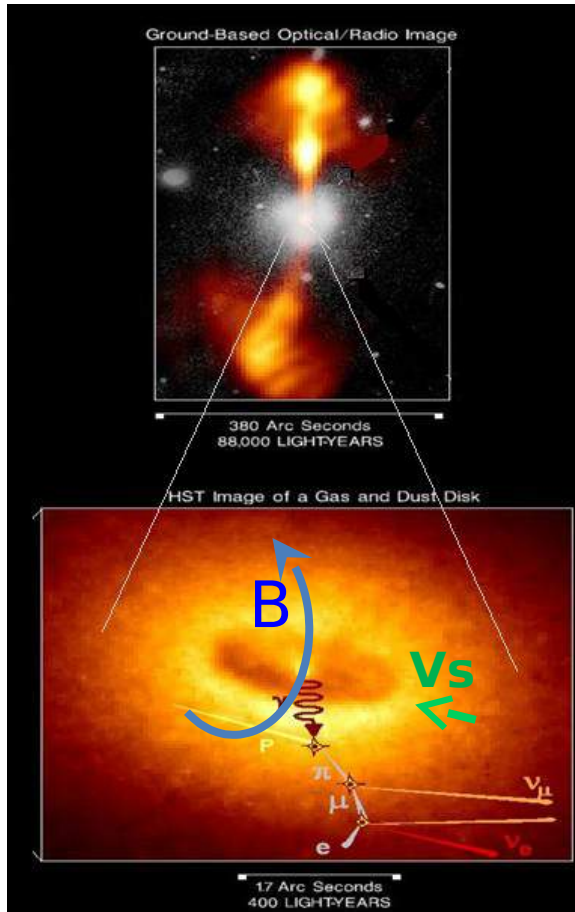
importante conocer información en otras ventanas para comprender mejor el objeto: **Campo magnético, densidad, tamaño, etc.**

Modelo Hadrónico



B: Campo magnético

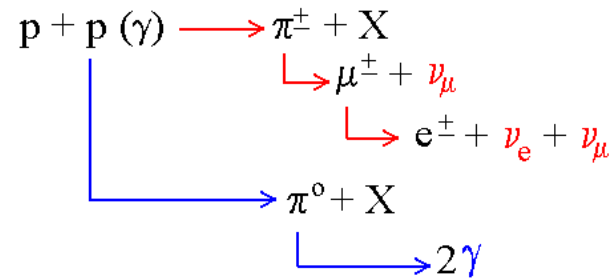
Vs: Velocidad onda choque



3) ¿Por qué el interés en este campo?

importante conocer información en otras ventanas para comprender mejor el objeto: Campo magnético, densidad, tamaño, etc.

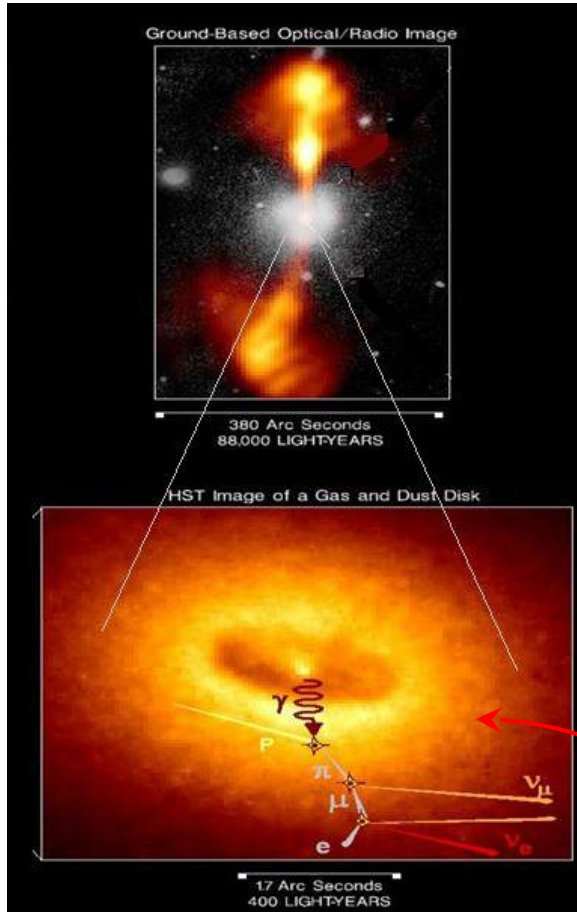
Modelo Hadrónico



$$d\Phi_\nu(x)/dx \approx \rho N(x) \sigma_{pN \rightarrow \nu} \Phi_p(x)$$

$$d\Phi_\gamma(x)/dx \approx \rho N(x) \sigma_{pN \rightarrow \gamma} \Phi_p(x)$$

$\rho N(x)$: Densidad del medio



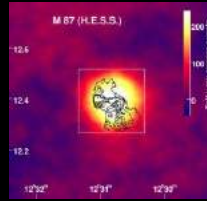
$$= c \Delta t = \text{Vel. luz} \times \text{Time variation signal}$$

Localizando el lugar de producción de las fuentes de rayos gamma en M87

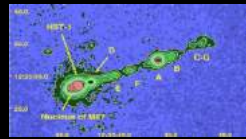


M87

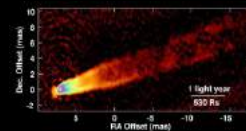
Observaciones simultáneas a diferentes λ durante un evento con fuerte emisión de γ 's



Gamma

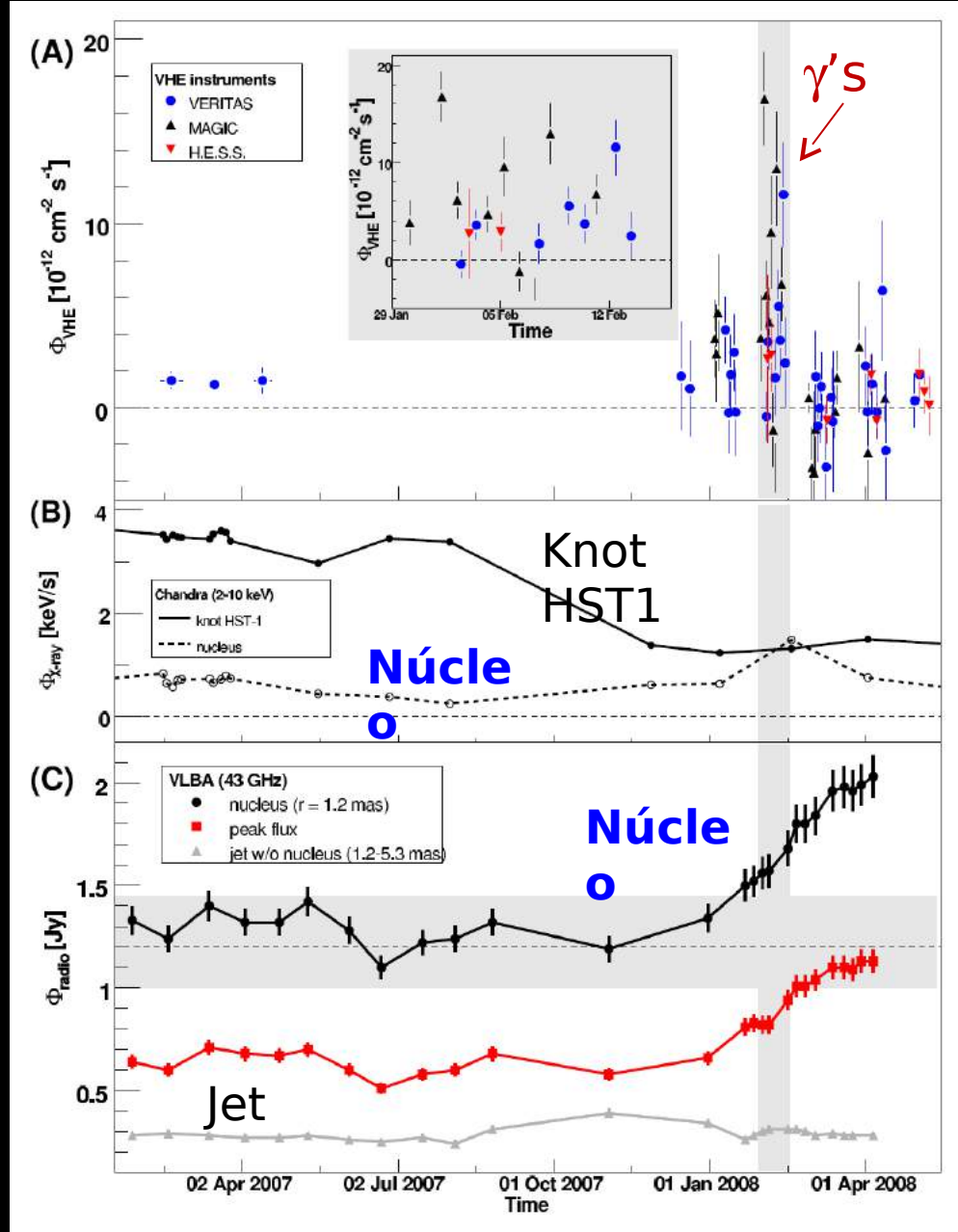


X-ray



Radio

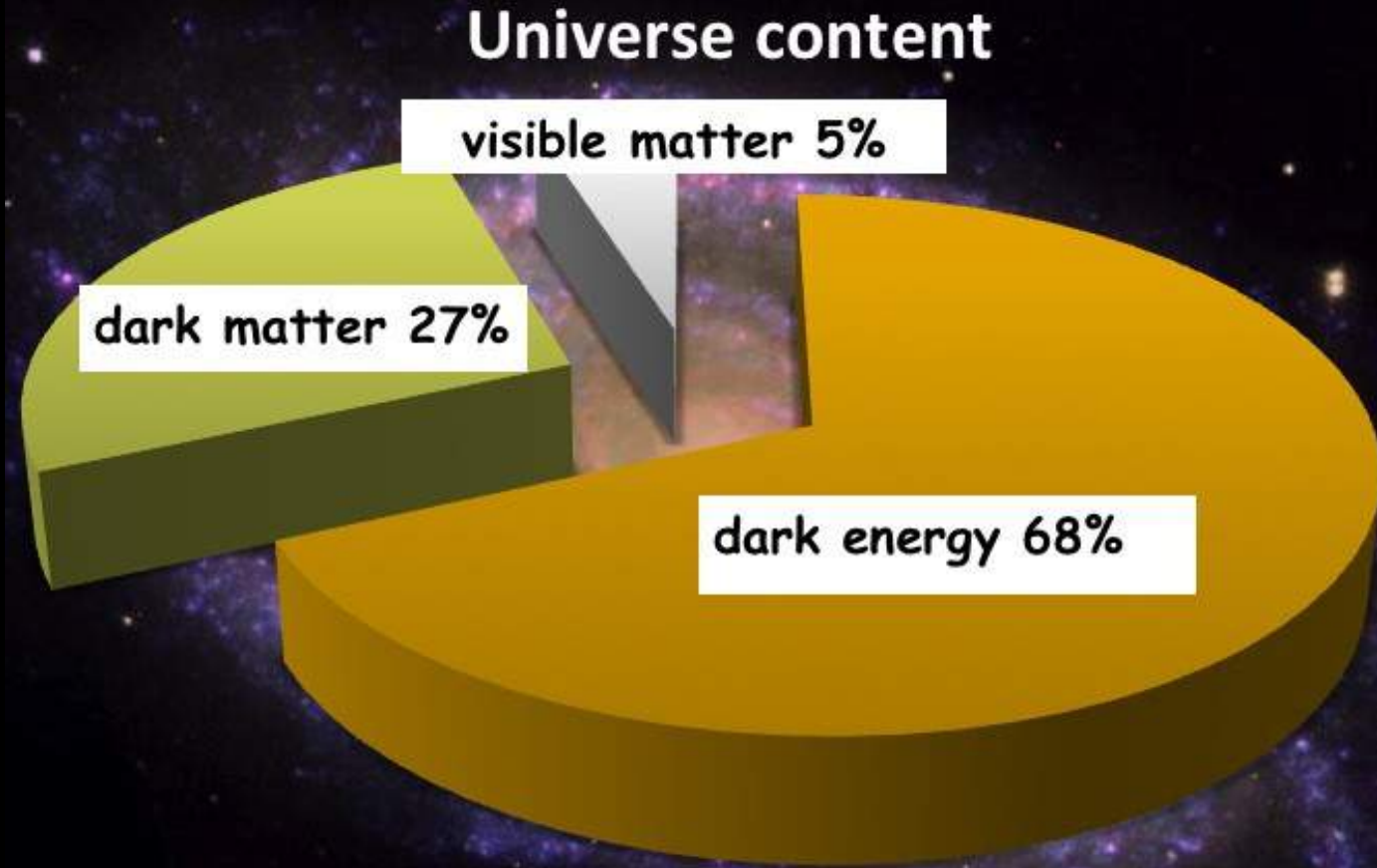
Evento relacionado con actividad del núcleo



3) ¿Por qué el interés en este campo

4) Física de partículas

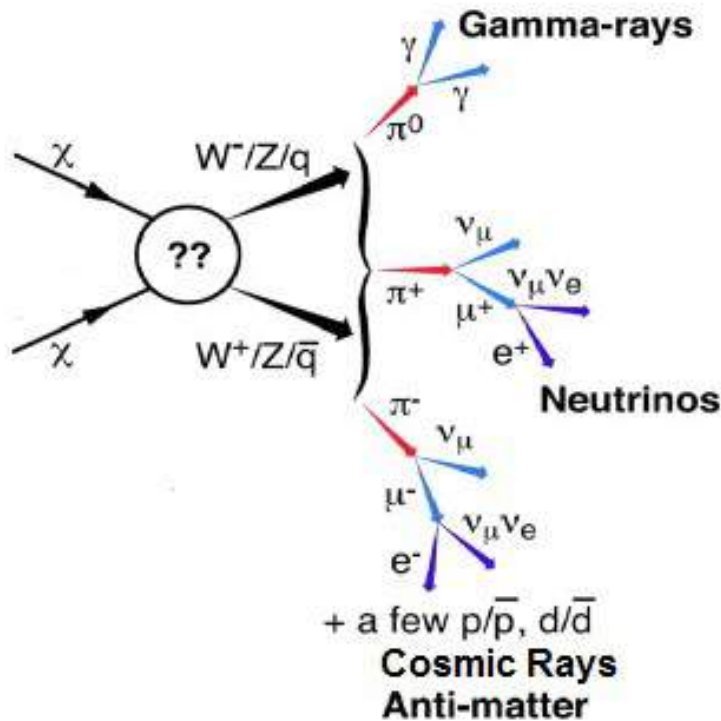
• Límites a reliquias del Big Bang: Materia oscura, defectos topológicos, etc.



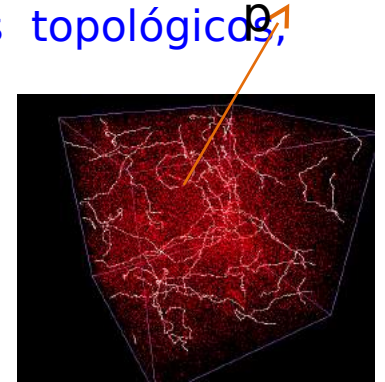
3) ¿Por qué el interés en este campo?

4) Física de partículas

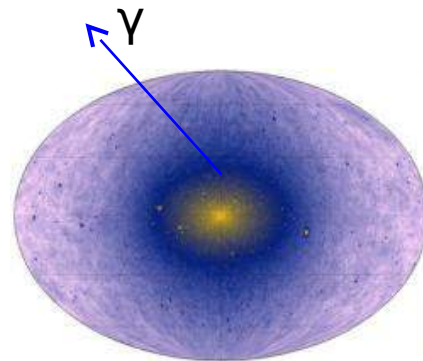
● Límites a reliquias del Big Bang: **Materia oscura, defectos topológicos, monopolos, etc.**



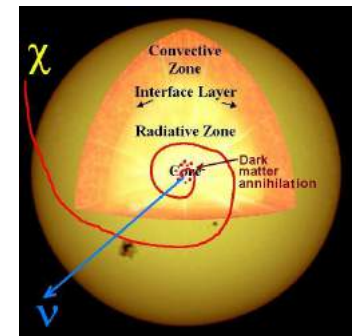
- Límites:**
- Masa
 - Distribución
 - Sección eficaz
 - Velocidad



Defectos Topológicos en universo



Materia oscura en Vía Láctea (M. Kuhlen et al)

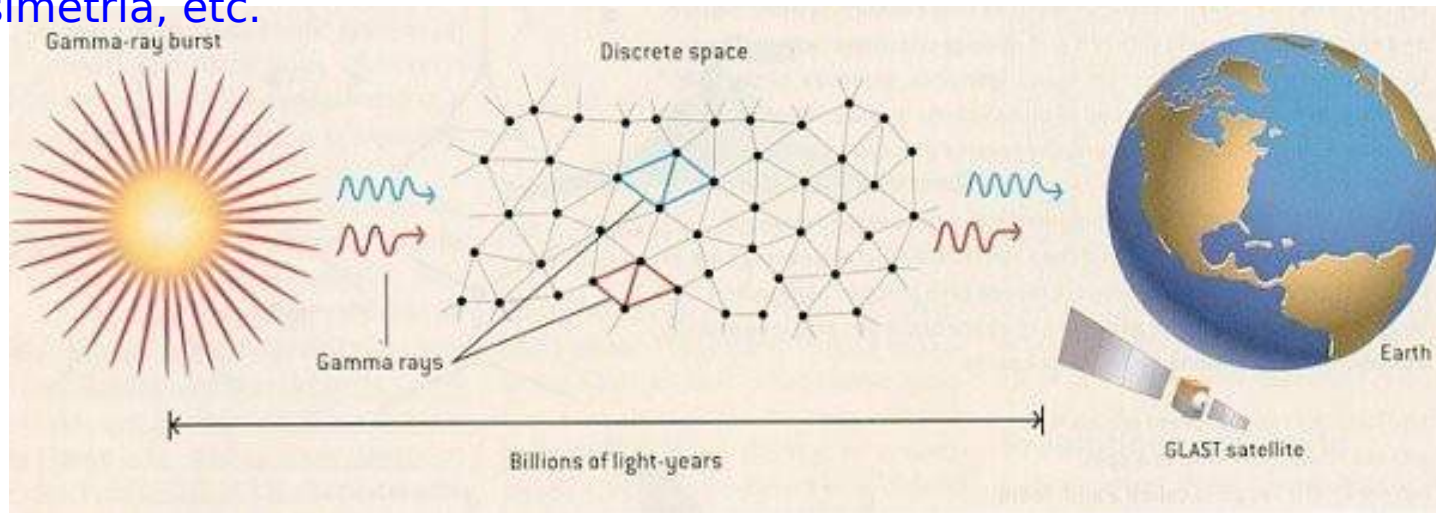


Materia oscura en el Sol

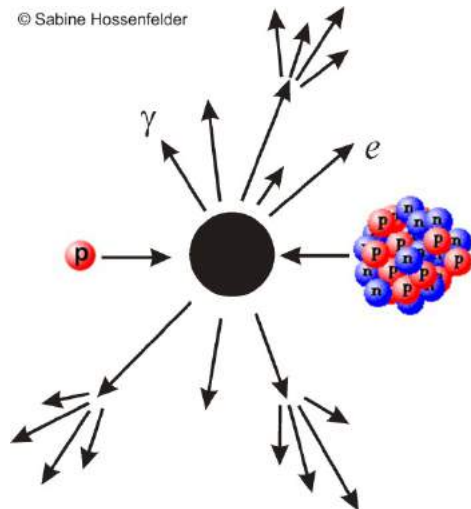
3) ¿Por qué el interés en este campo?

● Límites a escenarios Nueva física:

Gravedad cuántica, violación de Lorentz, dimensiones extras, supersimetría, etc.



© Sabine Hossenfelder



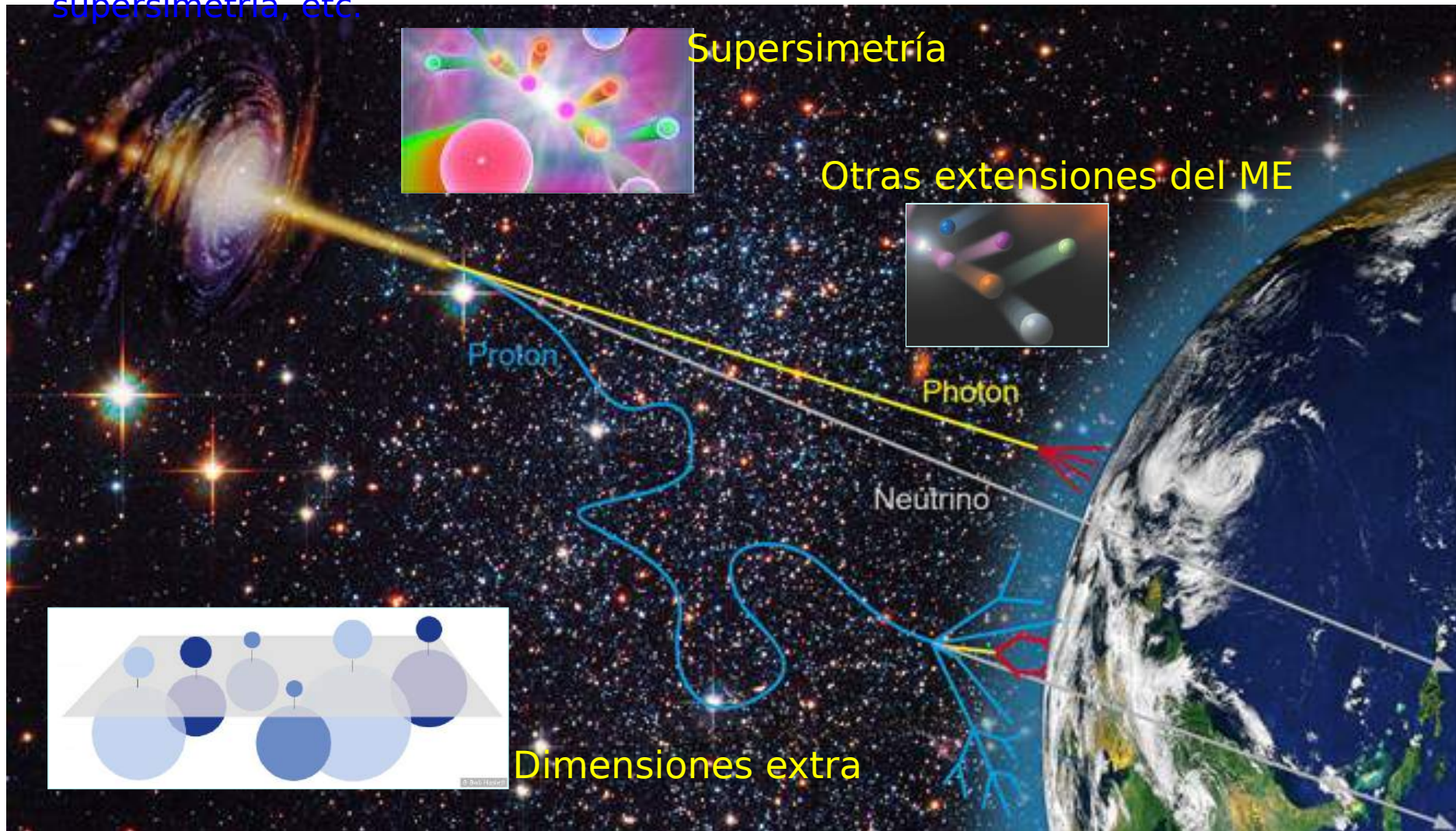
Violación Lorentz

Producción de partículas exóticas en colisiones con materia

3) ¿Por qué el interés en este campo?

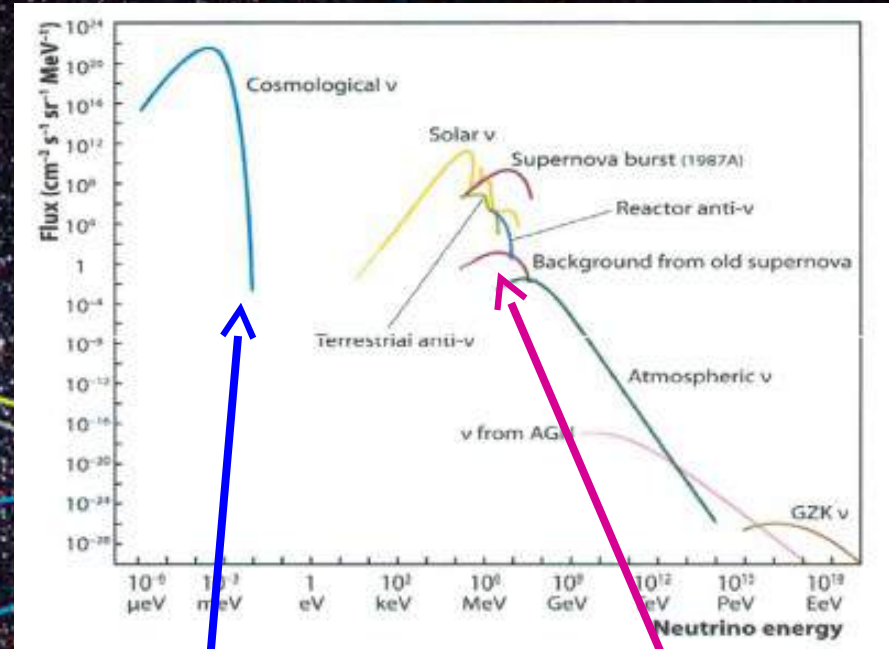
● Límites a escenarios Nueva física:

Gravedad cuántica, violación de Lorentz, dimensiones extras, supersimetría, etc.



3) ¿Por qué el interés en este campo?

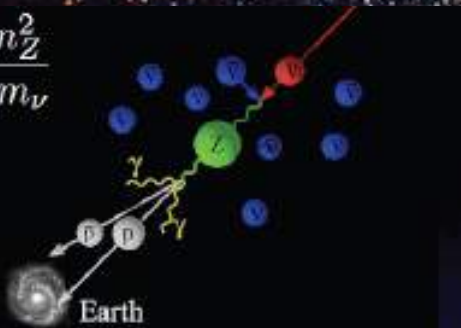
- Límites a flujos de fotones y neutrinos del fondo cósmico del universo:



Proton

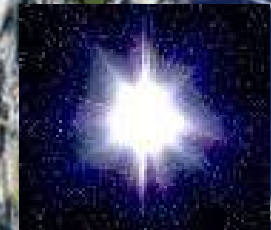
Z-Bursts

$$E_{\nu}^{\text{res}} = \frac{m_Z^2}{2m_{\nu}}$$



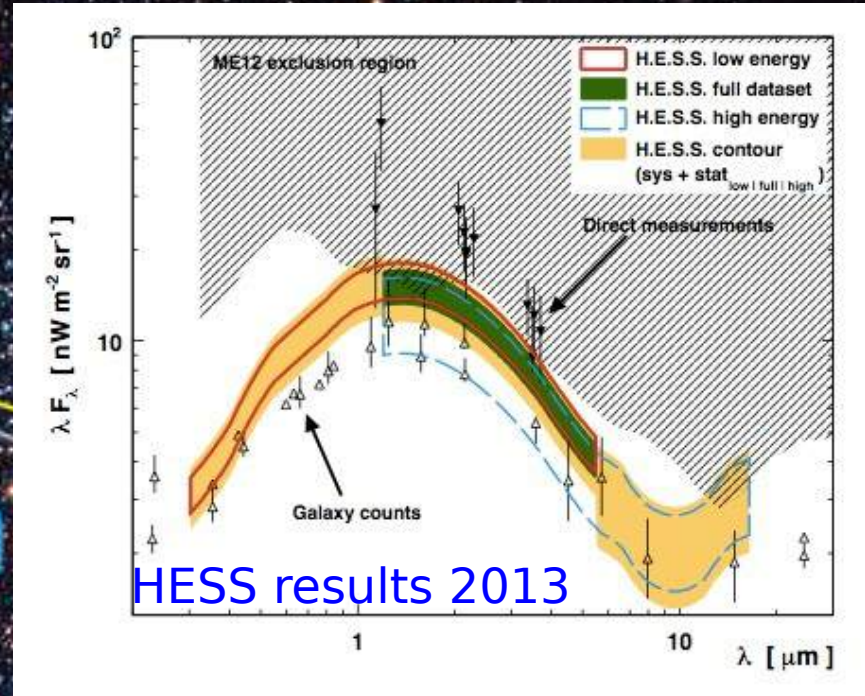
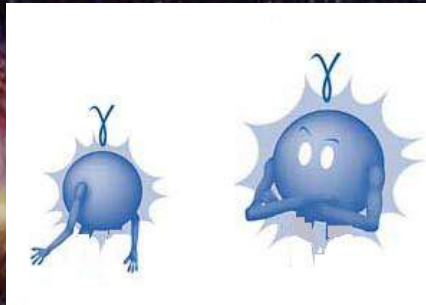
Neutrinos reliquia

Neutrinos de SN



3) ¿Por qué el interés en este campo?

- Límites a flujos de fotones y neutrinos del fondo cósmico del universo:



Andrómeda
Infrarojo (ESA)

Flujo de fotones extragalácticos

3) ¿Por qué el interés en este campo?

● Física de partículas:

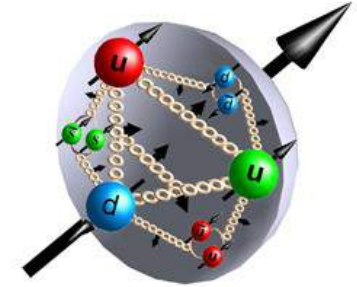
Estudio de secciones eficaces pn , γn , νn a muy altas energ

Pruebas de modelos de producción hadrónica

Distribución de partones en nucleones

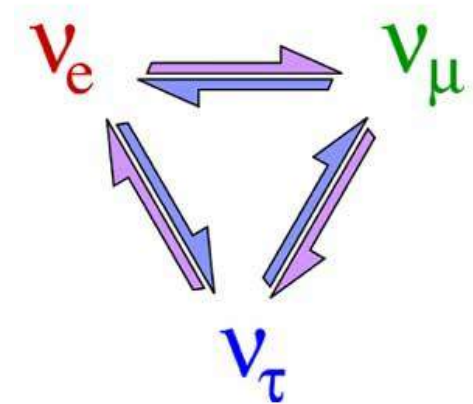
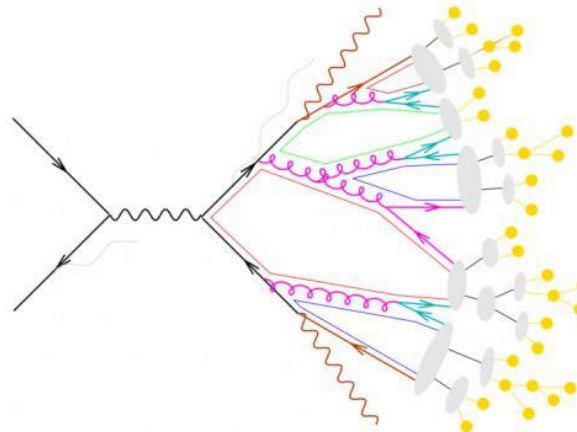
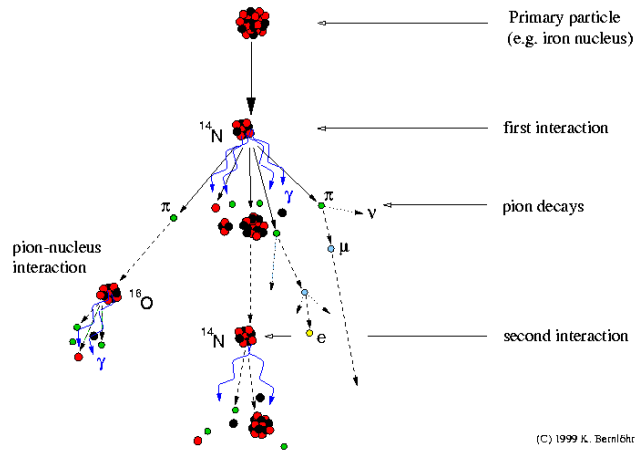
Producción de nuevas partículas

Propiedades del neutrino (masa, momento magnético), oscilaciones (ángulos mezcla, Δm)



Distribuciones partónicas

Development of cosmic-ray air showers



Modelos de interacción hadrónica
Secciones eficaces

Hadronización

Oscilaciones de neutrinos

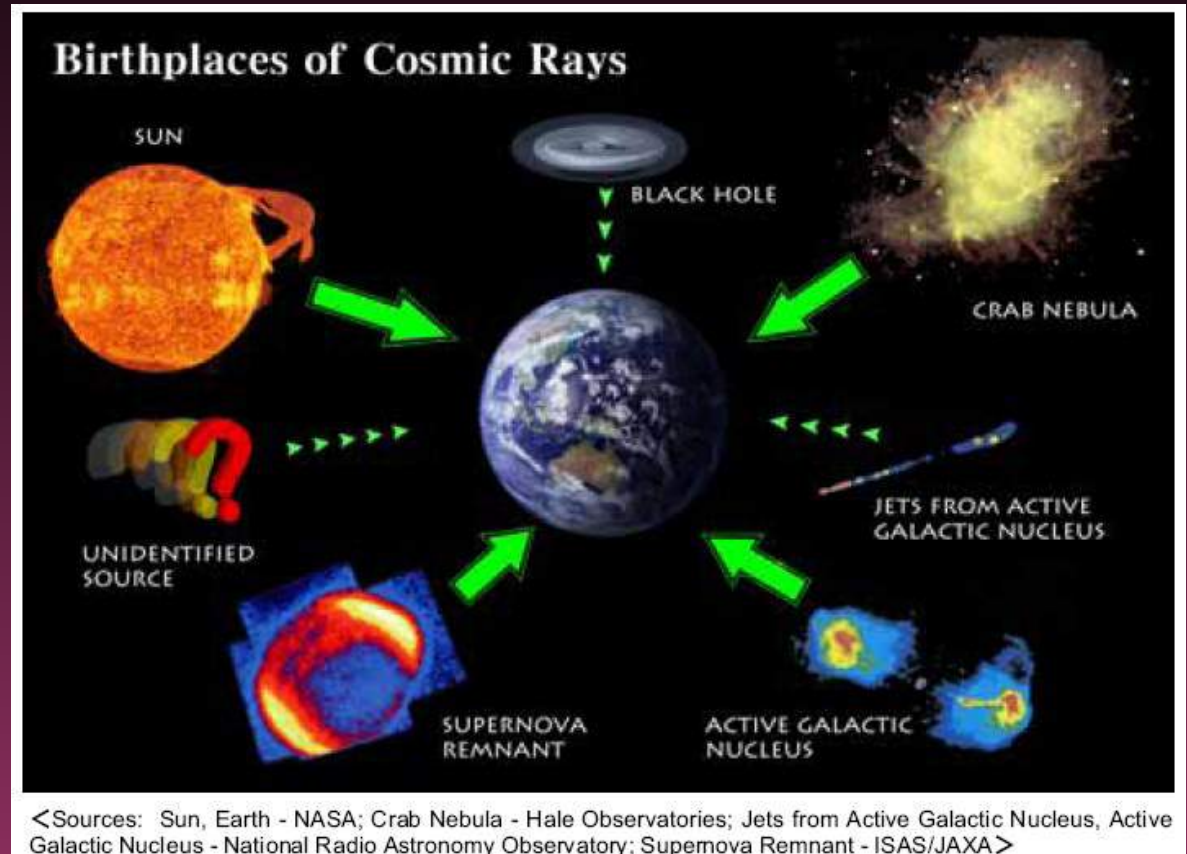
4) Rayos cósmicos

¿Qué son los rayos cósmicos?

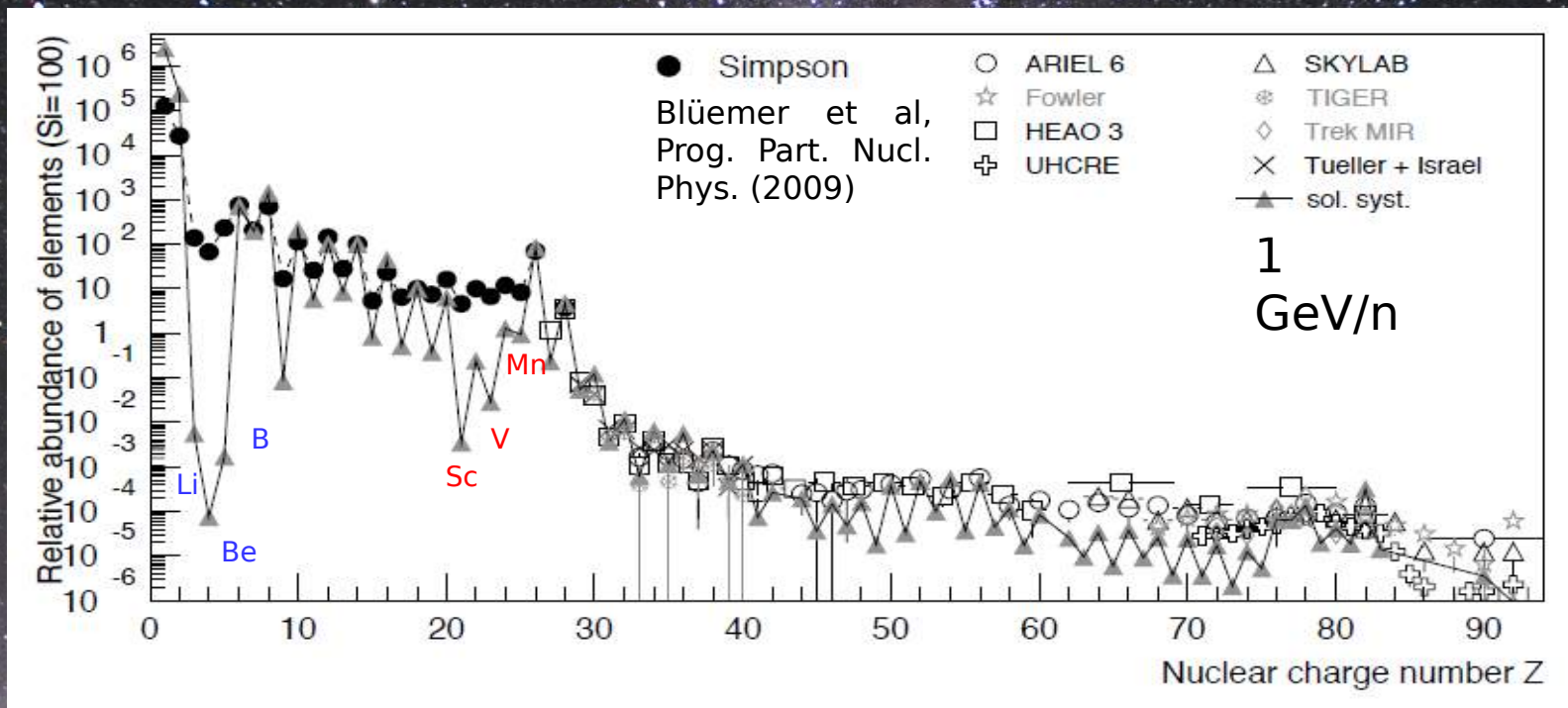
- 1) Electrones
- 2) Núcleos atómicos
- 3) Neutrones
- 4) Antipartículas



$$E = \text{MeV} - 1020 \text{ eV}$$



4) Rayos cósmicos



CR {

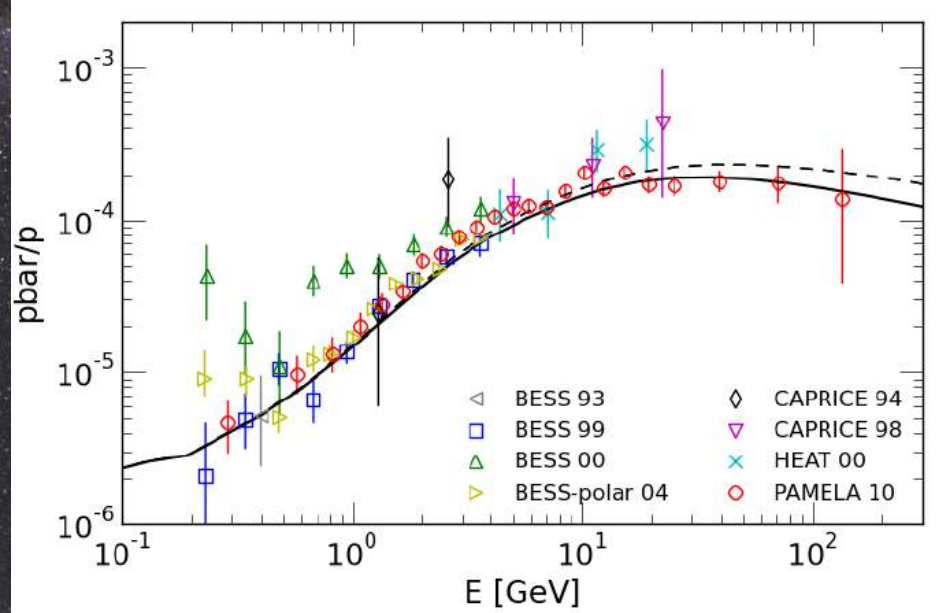
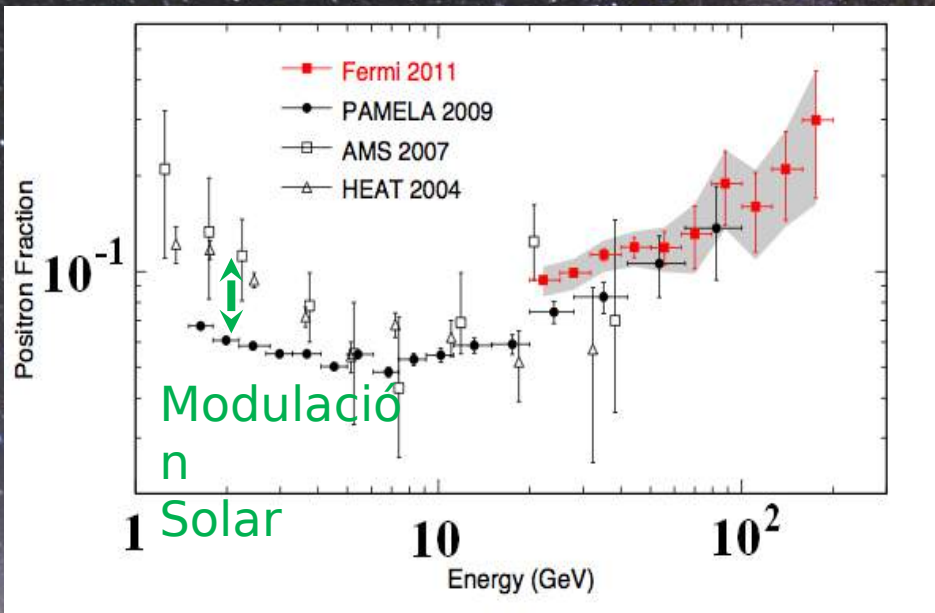
- Núcleos (98 %)
- Electrones (2 %)

{

- H (85 %)
- He (12 %)
- $Z \geq 3$ (3 %)

4) Rayos cósmicos

Composición

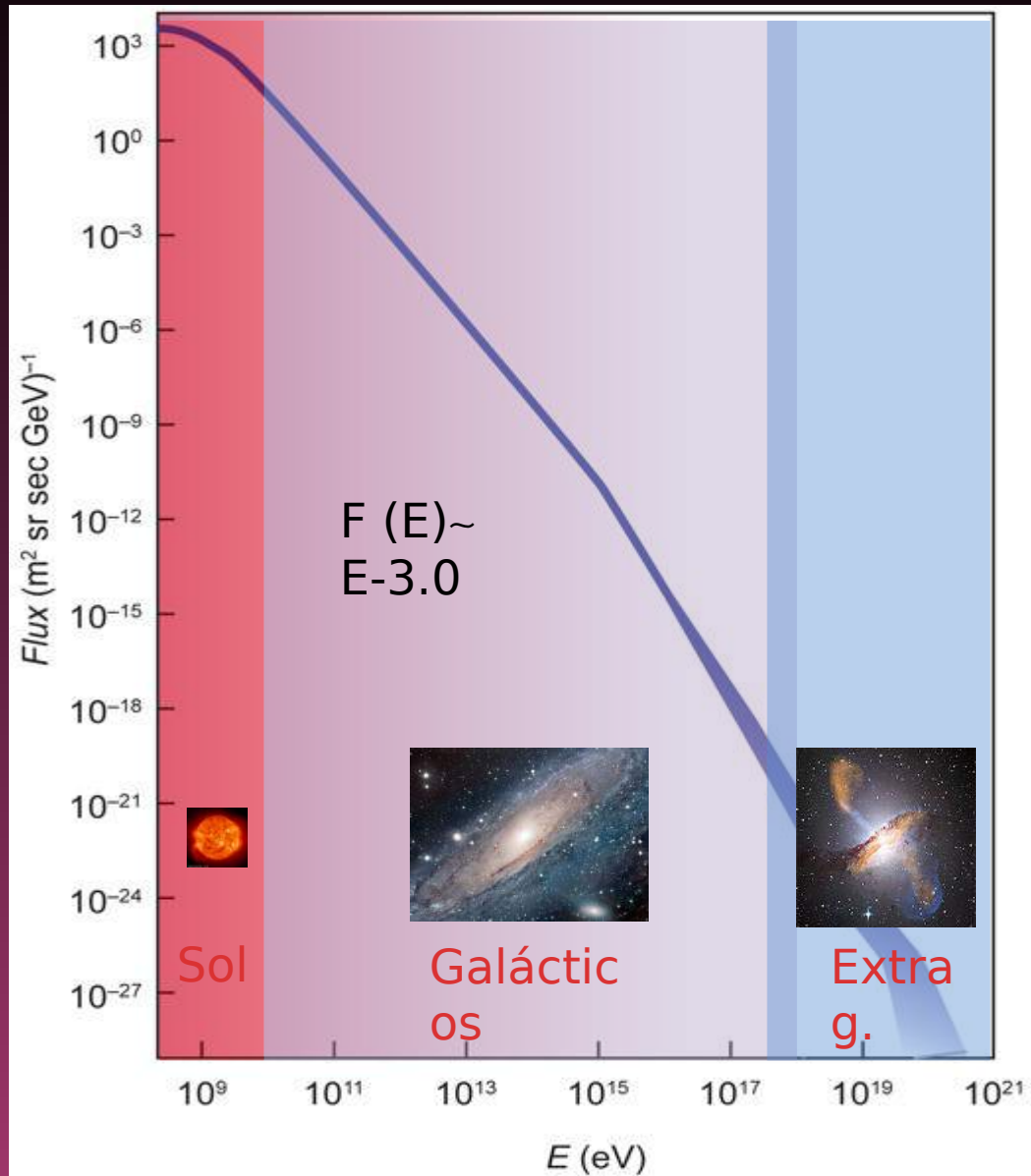


$$\frac{e^+}{(e^- + e^+)} = 30 - 1 \%$$

$$\frac{p^-}{p^+} = 10^{-2} - 10^{-4} \%$$

4) Rayos cósmicos

Espectro de energía



4) Rayos cósmicos

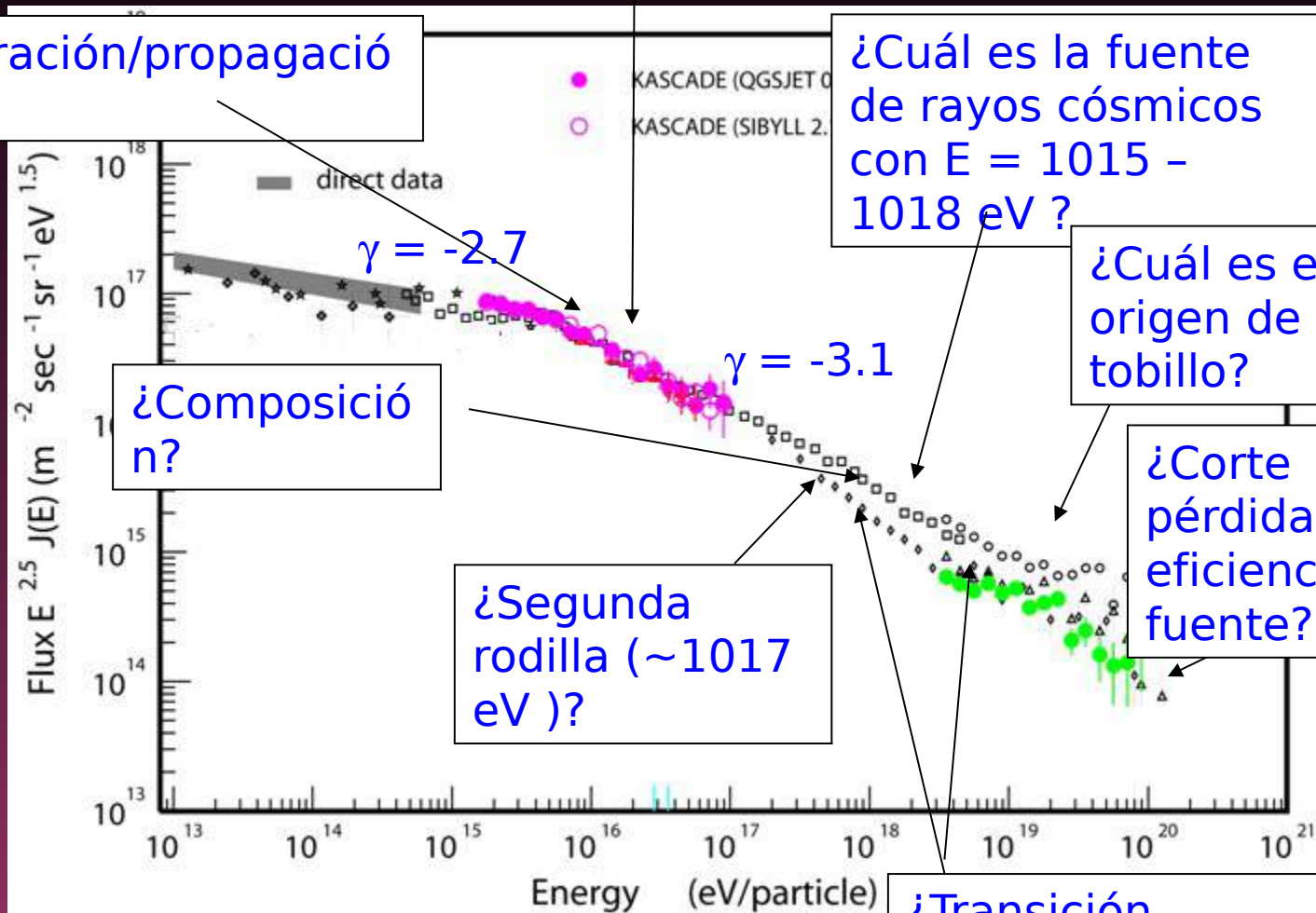
¿Cuál es el origen de la rodilla?

Acceleración/propagación?

¿Cuál es la fuente de rayos cósmicos con $E = 10^{15} - 10^{18}$ eV?

¿Cuál es el origen de la tobillo?

¿Corte GZK o pérdida de eficiencia de fuente?

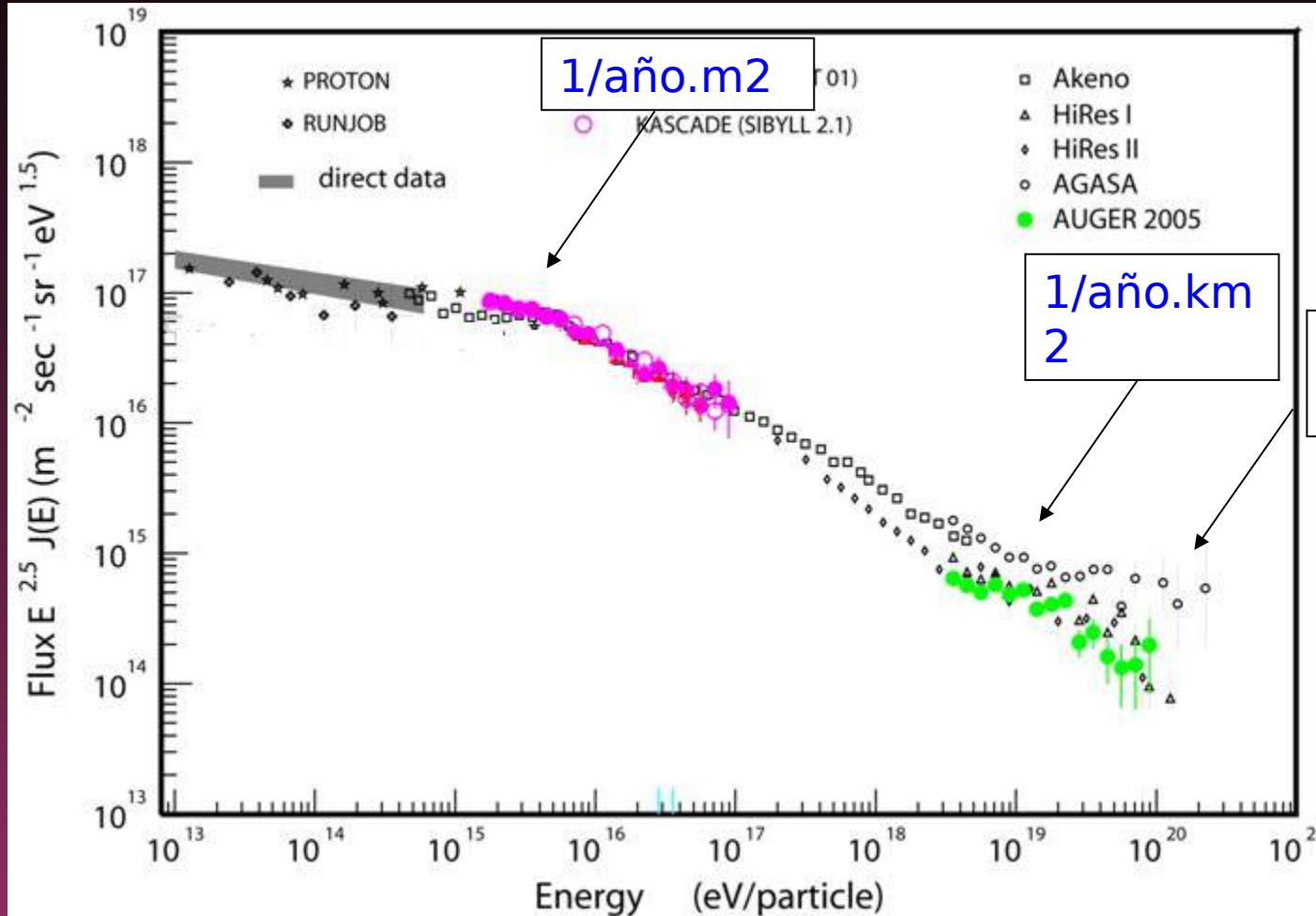


¿Composición?

¿Segunda rodilla ($\sim 10^{17}$ eV)?

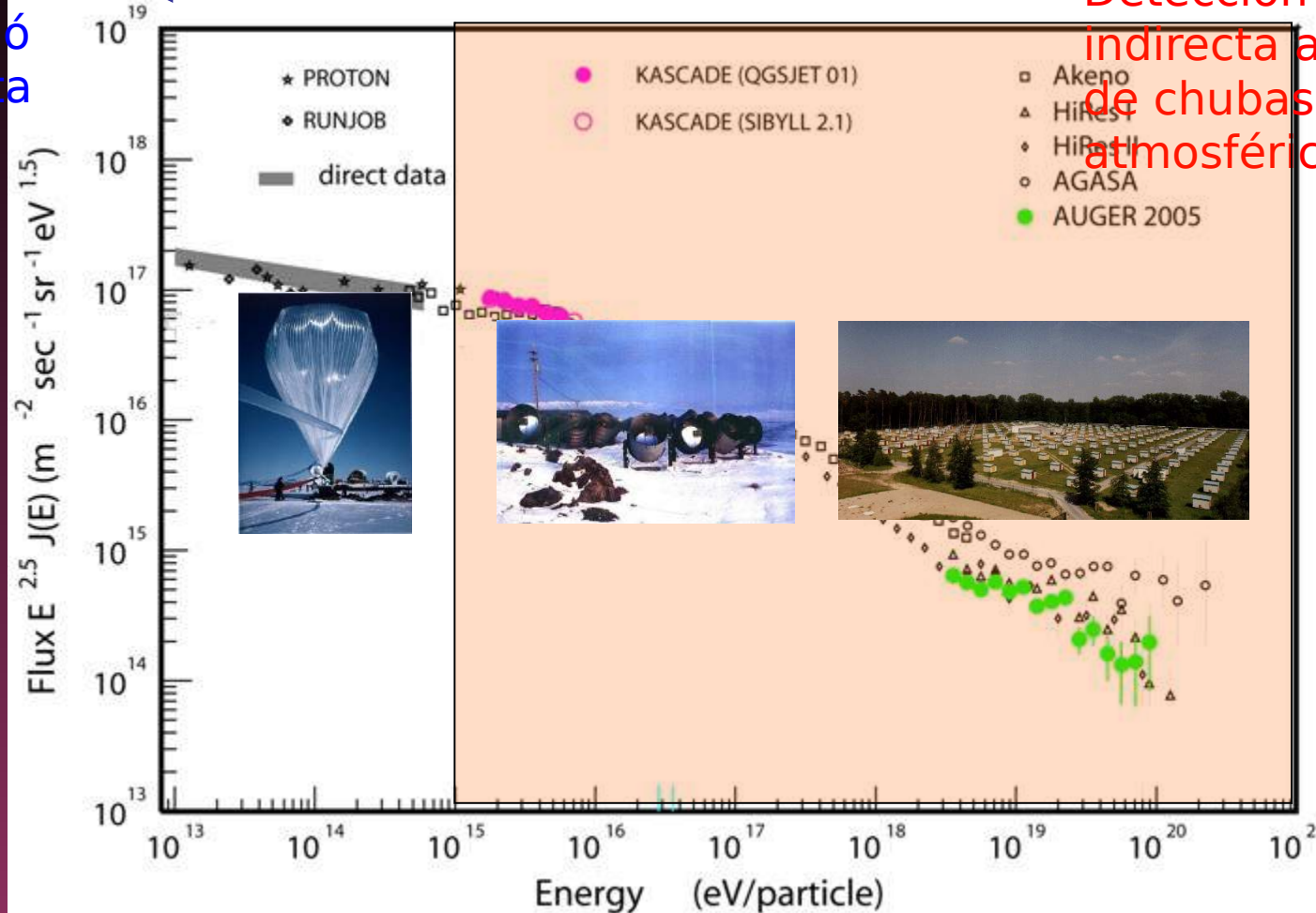
¿Transición galáctica-extragaláctica?

4) Rayos cósmicos



4) Rayos cósmicos

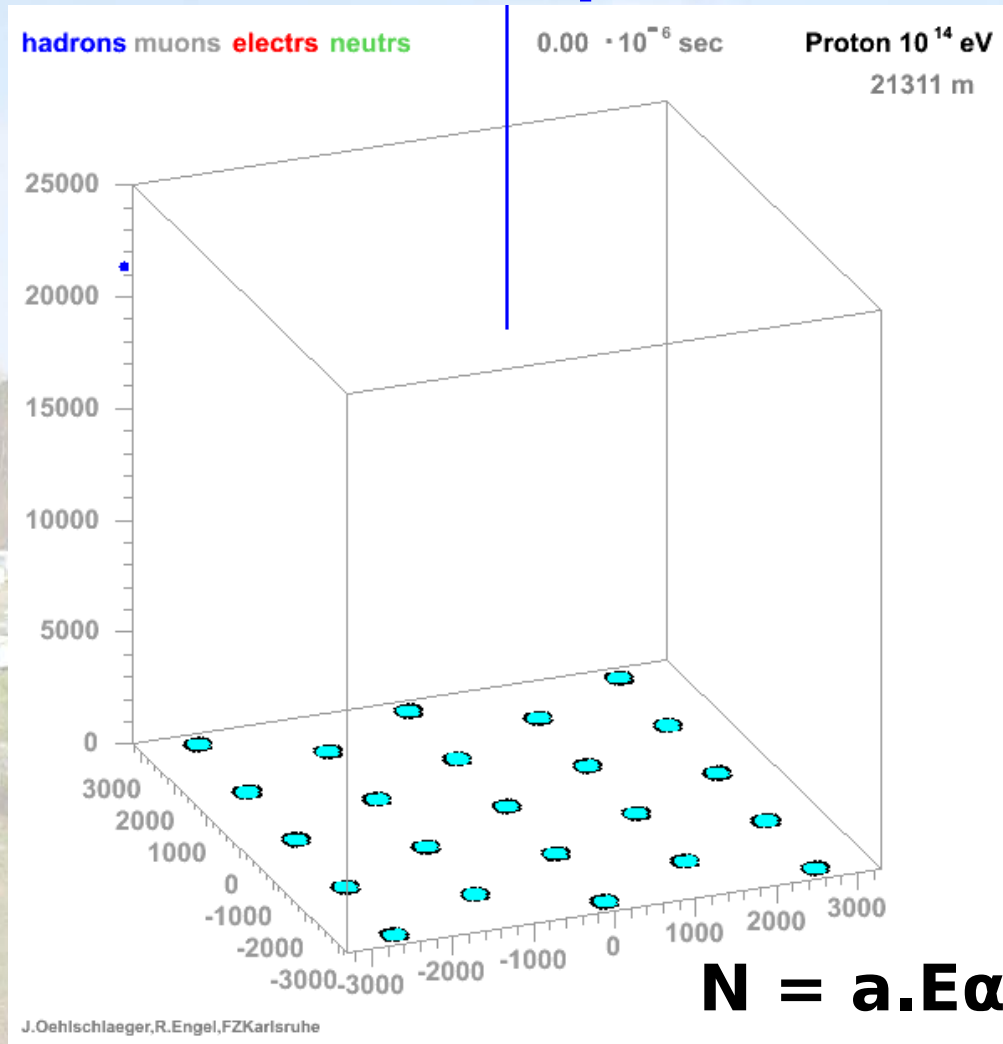
Detección directa



Detección indirecta a través de chubascos atmosféricos

4) Rayos cósmicos

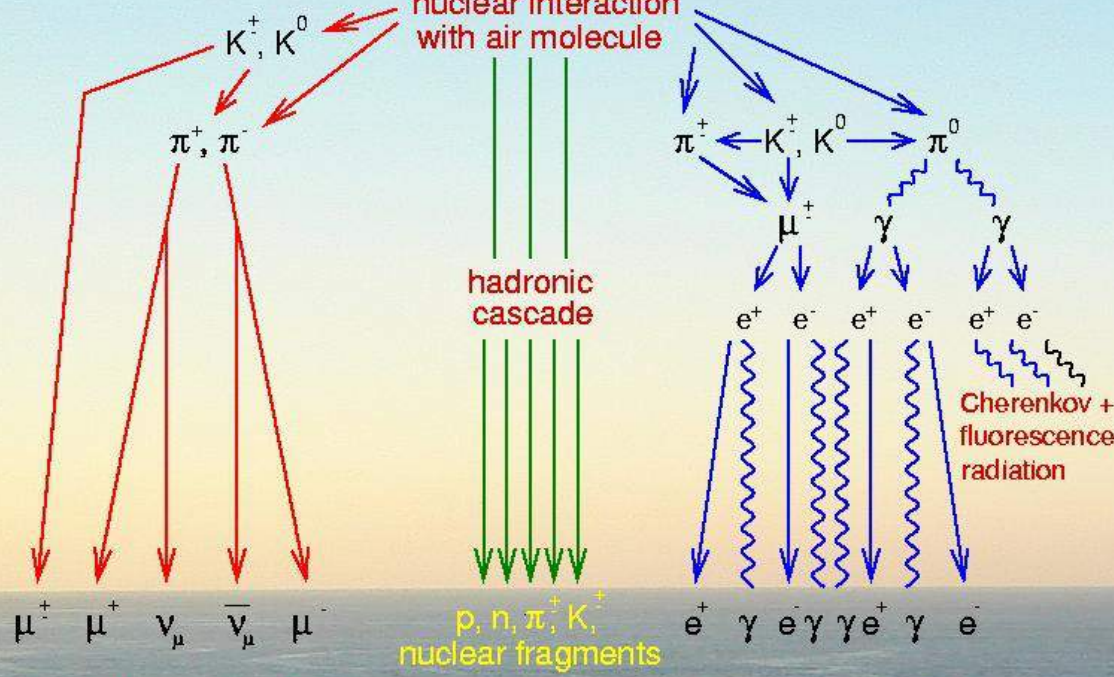
Detección: Chubascos de partículas



Primary Particle



nuclear interaction with air molecule



muonic component, neutrinos

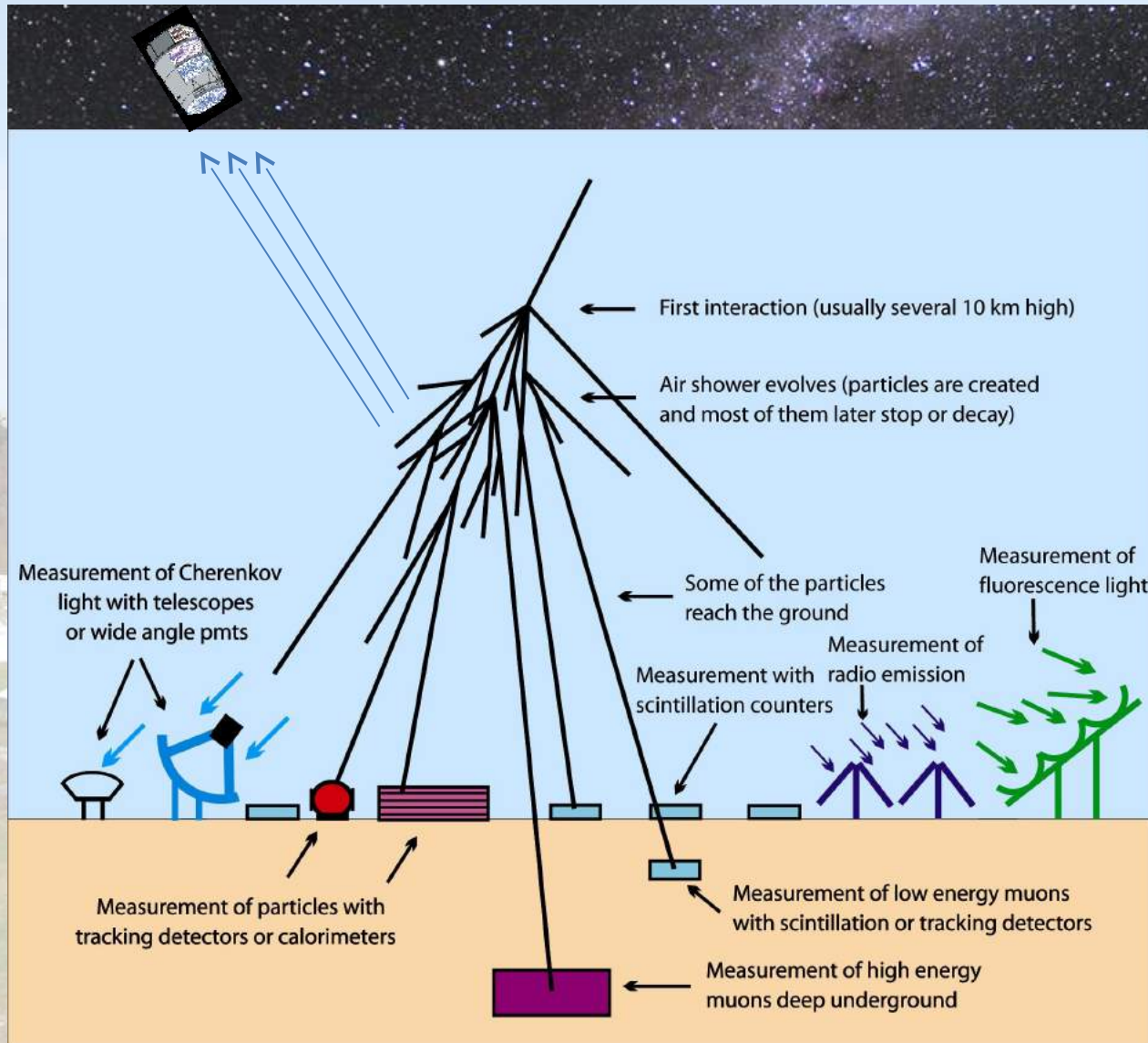
hadronic component

electromagnetic component

Cherenkov + fluorescence radiation

4) Rayos cósmicos

Detección



El experimento KASCADE



Karlsruhe Shower Core and Array Detector

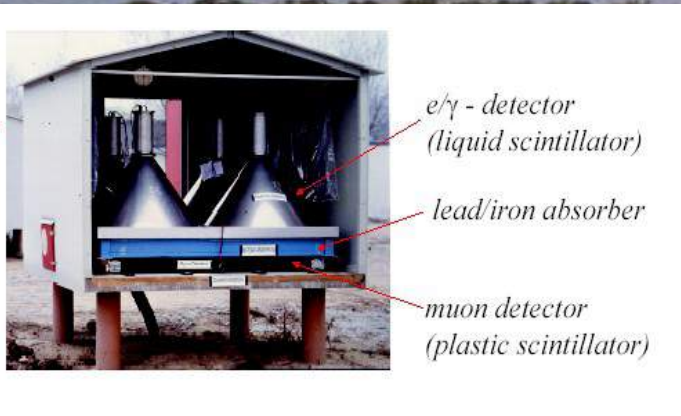
- **Componentes:**

- Red terrestre con 252 detectores de centelleo para e/γ y μ .
- Detector central (Calorímetro, detectores de μ)
- Muon tracking detector

- **Observables:**

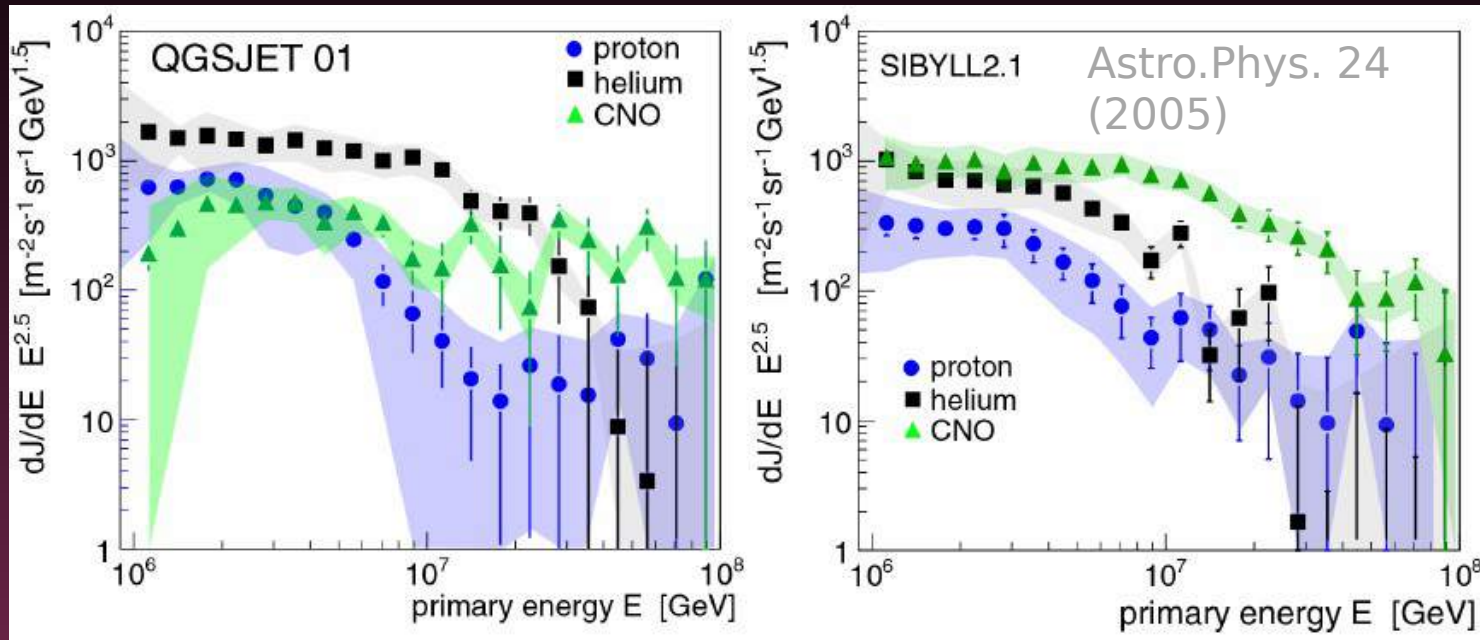
N_e , N_μ , N_{hadron}

- **$E = 10^{14} - 10^{17}$ eV**



4) Rayos cósmicos

El experimento KASCADE



Resultados

- Rodilla producida por componente ligera
- Abundancias relativas muestran dependencia con modelo de interacción hadrón

$$E_{\max} \sim Ze\beta_s \cdot B \cdot TV_s \quad \beta_s = \frac{V_s}{c}$$

Vs: Velocidad de la onda de choque

4) Rayos cósmicos

El experimento KASCADE-Grande

$E = 10^{16} - 10^{18}$ eV



- Observables
- Ne
 - N_μ , ρ_μ , τ_μ
 - N_{ch} , ρ_{ch} , τ_{ch}
 - N_h , ΣE_h
 - H_μ , η

KASCADE-Grande Collaboration

Institut für Kernphysik & Institut für Experimentelle Kernphysik
KIT - Karlsruhe Institute of Technology

W.D.Apel, K.Bekk, J.Blümer, H.Bozdog, F.Cossavella,
K.Daumiller, P.Doll, R.Engel, J.Engler, M.Finger, H.J.Gils,
A.Haungs, D.Heck, D.Huber, T.Huege, D.Kang, H.O.Klages,
K.Link, M.Ludwig, H.-J.Mathes, H.J.Mayer, M.Melissas, J.Milke,
J.Oehlschläger, N.Palmieri, T.Pierog, H.Rebel, M.Roth, H.Schieler,
F.G.Schröder, R.Smida, H.Ulrich, A.Weindl, J.Wochele,
M.Wommer

Universität Siegen
Experimentelle Teilchenphysik
P. Buchholz, C.Grupen

Universität Wuppertal
Fachbereich Physik
D. Fuhrmann,
R. Glasstetter, K-H. Kampert

University Trondheim, Norway
S. Ostapchenko

IFSI, INAF
and University of Torino
M. Bertaina, E. Cantoni,
A. Chiavassa, F. Di Pierro,
C. Morello, G. Navarra*,
G. Trincherro

* deceased
Universidad Michoacana
Morelia, Mexico
J.C. Arteaga



Radboud University
Nijmegen
J.R.Hörandel

National Centre for
Nuclear Research, Lodz
P. Łuczak, J. Zabierowski

Institute of Physics and Nuclear
Engineering and University
Bucharest
I.M. Brancus, B. Mitrica,
M. Petcu, O. Sima, G. Toma

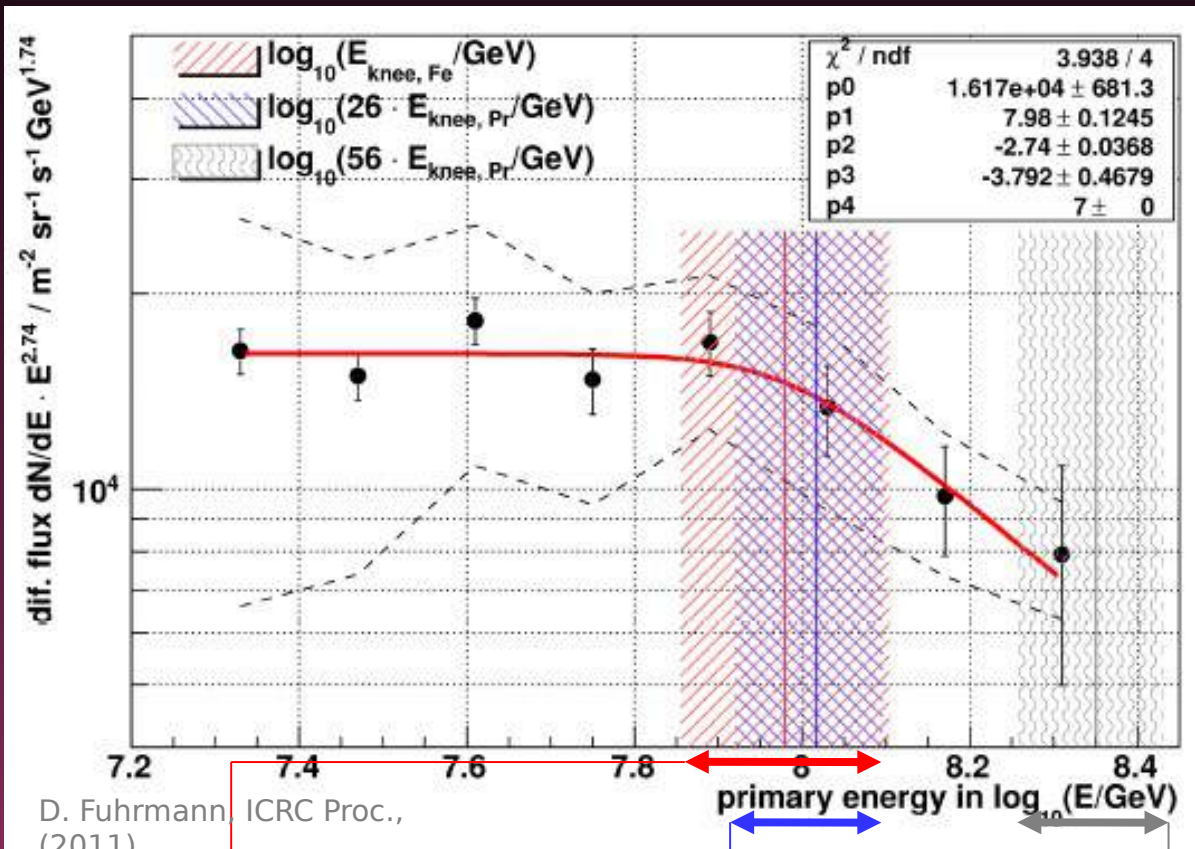
Universidade Sao Paulo, Brasil
V. de Souza

<http://www-ik.fzk.de/KASCADE-Grande/>

Jan 2012

4) Rayos cósmicos

Resultados: KASCADE Grande



Campos magnéticos responsable de rodillas

KASCADE-Grande

Esperado si $E_k \propto Z$ y datos de KASCADE

Esperado si $E_k \propto A$

4) Rayos cósmicos

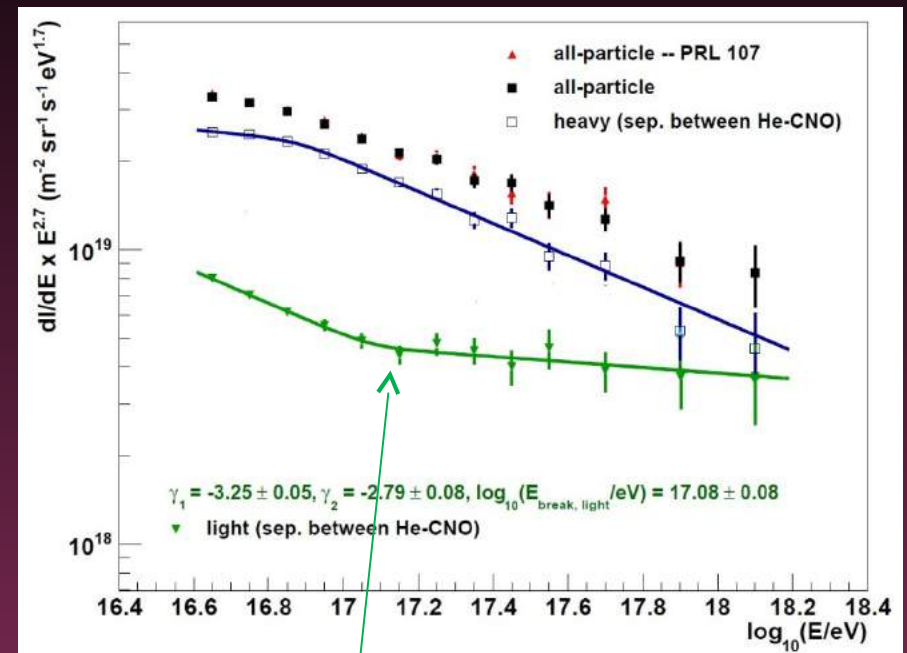
Resultados: KASCADE Grande

W.D.Apel, Phys. Rev. D 87 (2013)

Descubrimiento de nueva estructura en componente ligera: tobillo

¡El flujo de rayos cósmicos ligeros se recupera!

¿Transición galáctica – extragaláctica?



$$\log_{10}(E_{\text{break, light}} / \text{eV}) = 17.08 \pm 0.08$$

Rayos cósmicos ultraenergéticos y el corte

GZK

The Volcano Ranch Array near Albuquerque, New Mexico

1962: Descubrimiento del primer evento
con $E > 10^{20}$ eV



1959-1

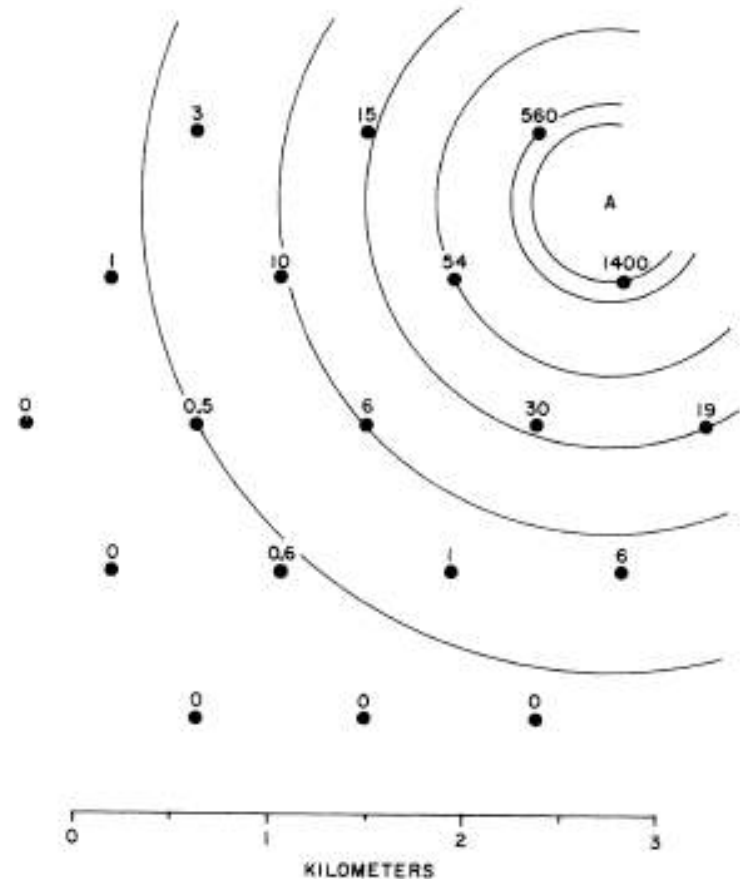


FIG. 1. Plan of the Volcano Ranch array in February 1962. The circles represent 3.3-m^2 scintillation detectors. The numbers near the circles are the shower densities (particles/ m^2) registered in this event, No. 2-4834. Point "A" is the estimated location of the shower core. The circular contours about that point aid in verifying the core location by inspection.

VOLUME 10, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

15 FEBRUARY 1963

EVIDENCE FOR A PRIMARY COSMIC-RAY PARTICLE WITH ENERGY 10^{20} eV†

John Linsley

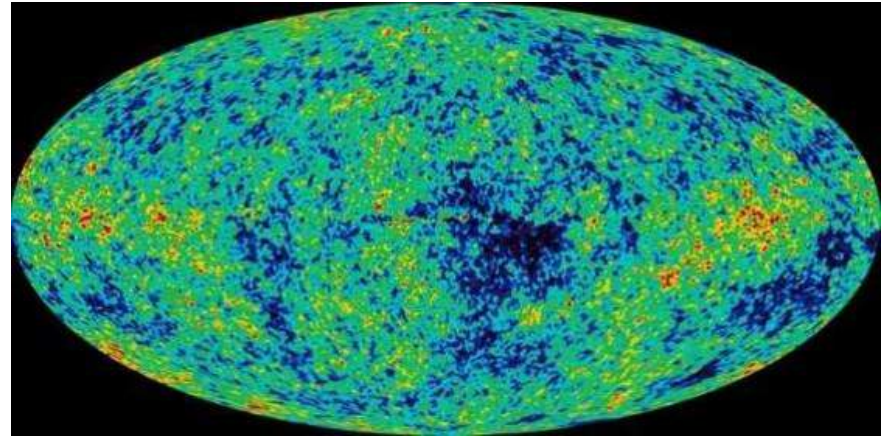
Laboratory for Nuclear Science, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts

(Received 10 January 1963)

Rayos cósmicos ultraenergéticos y el corte

GZK

1964: Descubrimiento radiación Cósmica de Fondo

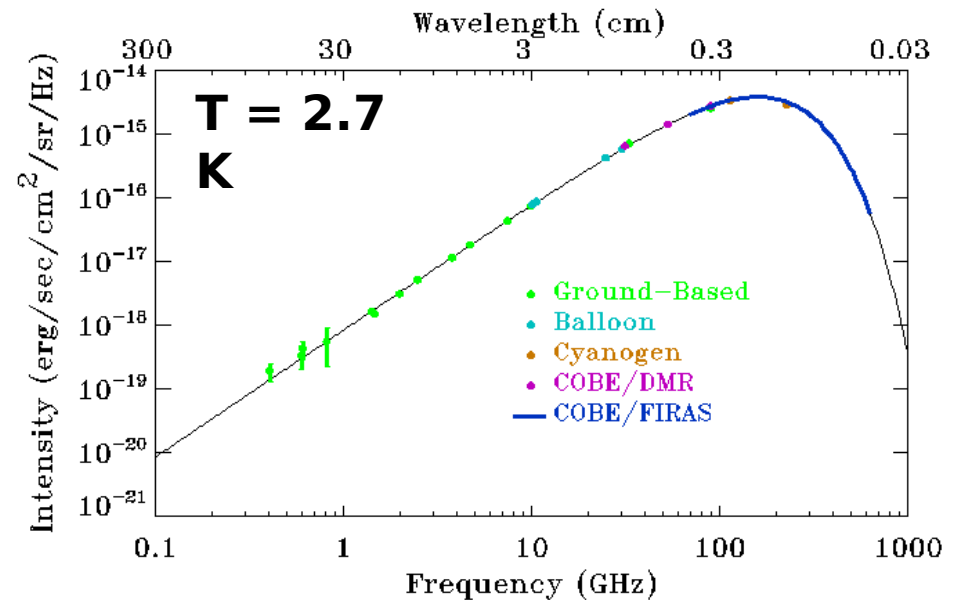


R. Wilson y A. Penzias

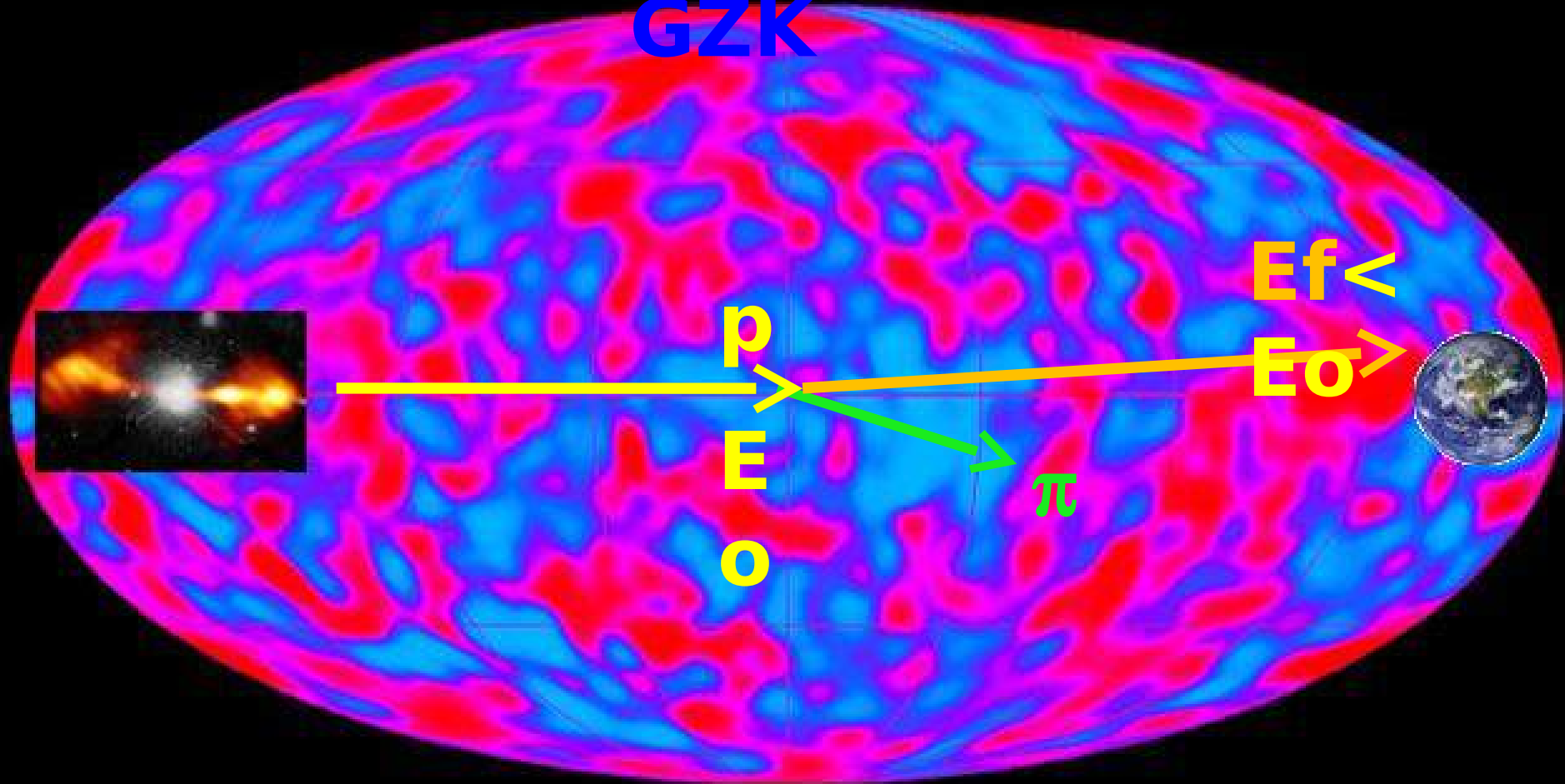
$$\langle n(\omega) \rangle = \frac{1}{e^{(\hbar\omega/kT)} - 1}$$

$$\langle E_\gamma \rangle \sim 6.3 \times 10^{-4} \text{ eV}$$

$n_\gamma \sim 411$
fotones/cm³



Corte GZK

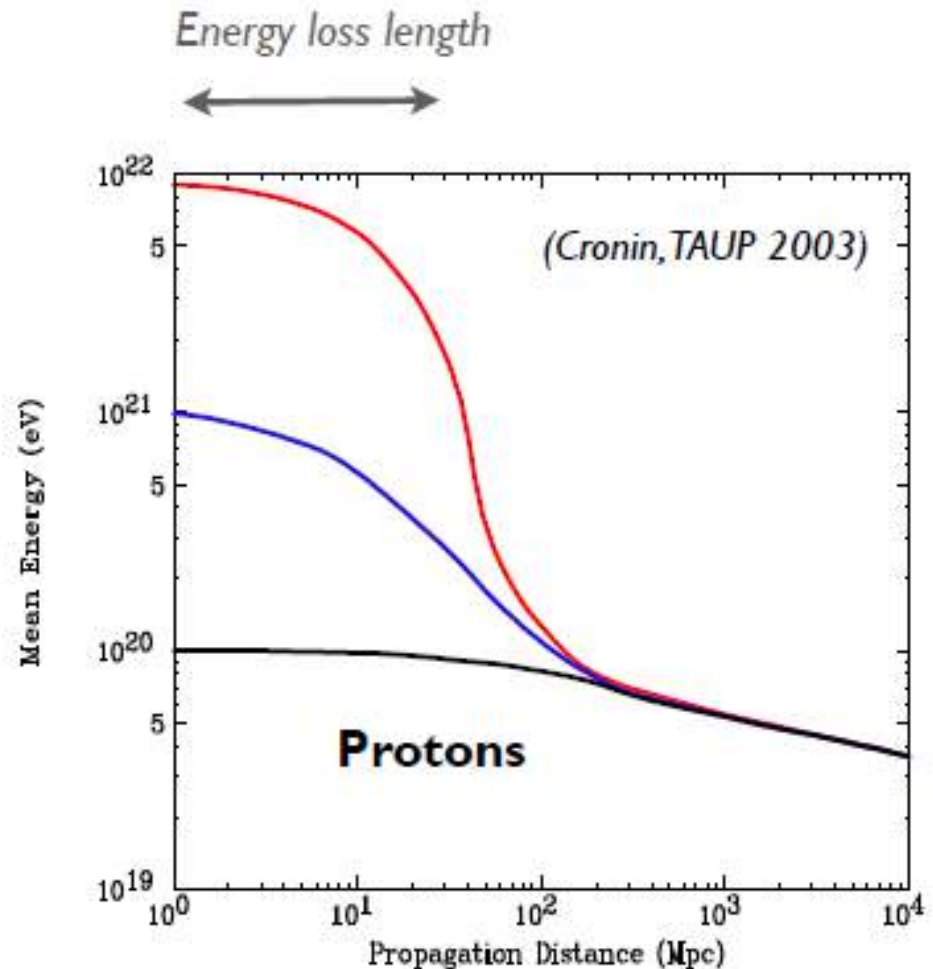


4) Rayos cósmicos

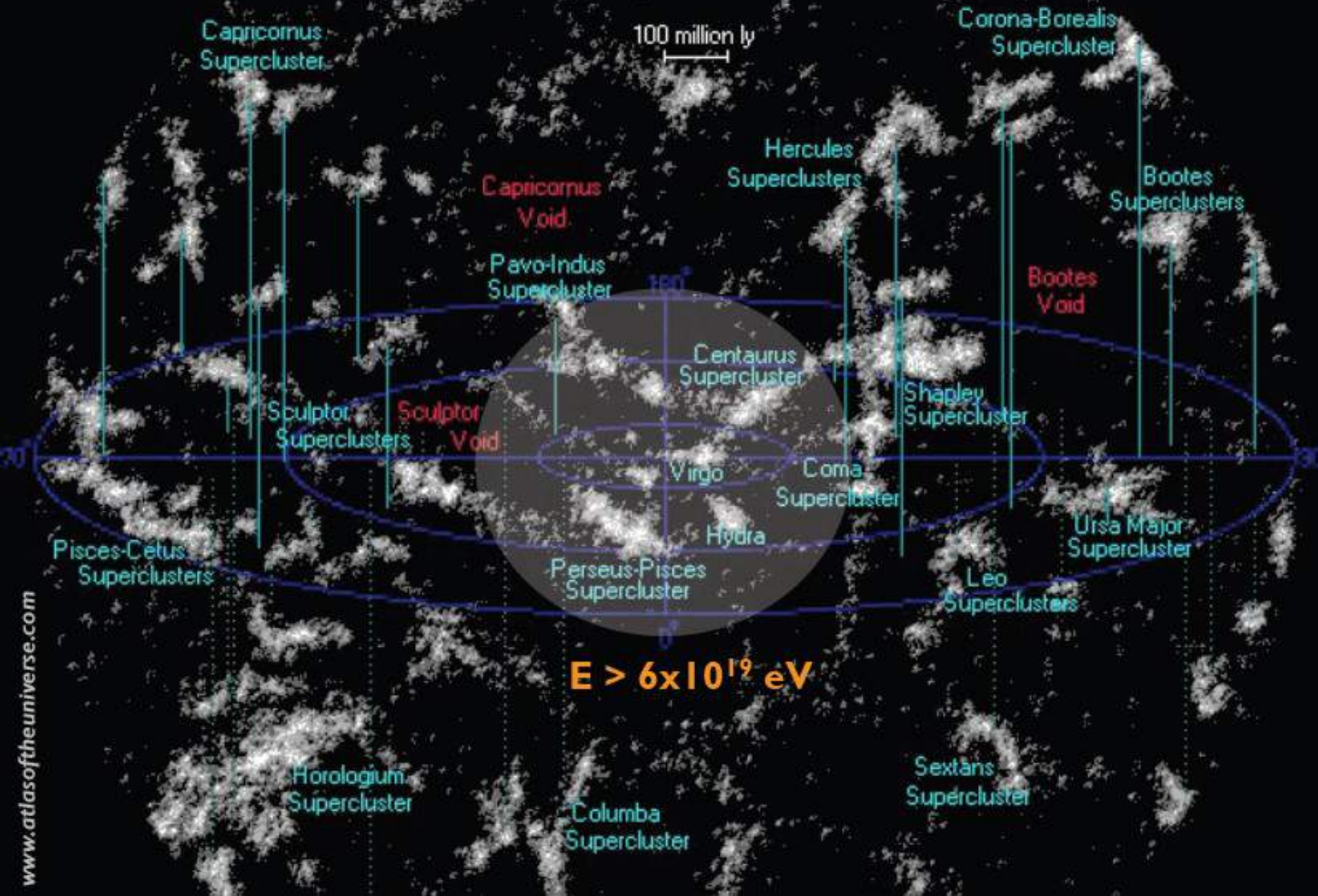
Rayos cósmicos ultraenergéticos y el corte GZK

Distancia promedio para protones de energía extrema: **100 Mpc**

¡Acceso a vecindario galáctico!

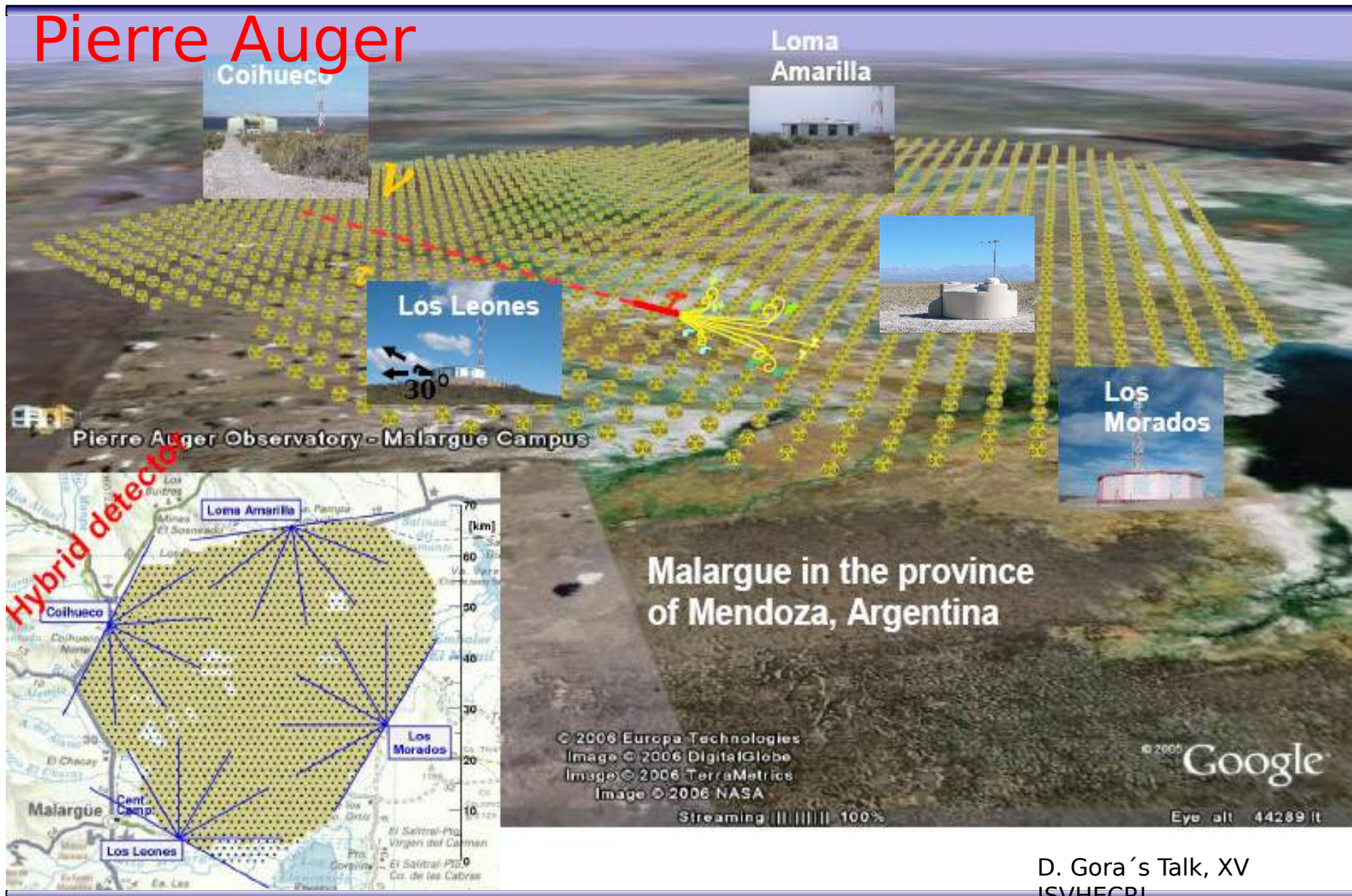


Distribution of Galaxies



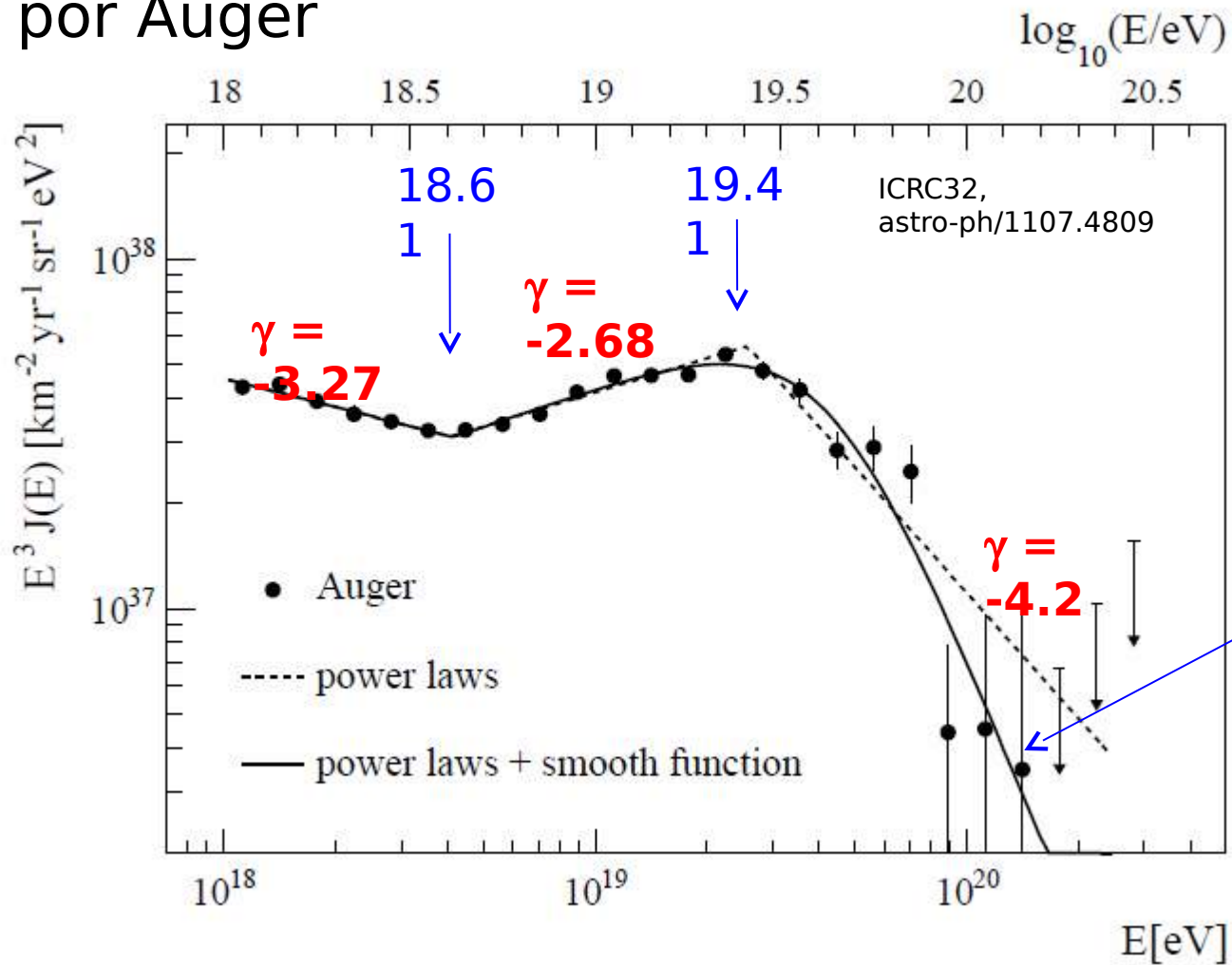
Rayos cósmicos UE y el observatorio

Pierre Auger



4) Rayos cósmicos

Espectro de rayos cósmicos ultraenergéticos medido por Auger



¿Límite de aceleración de las fuentes?

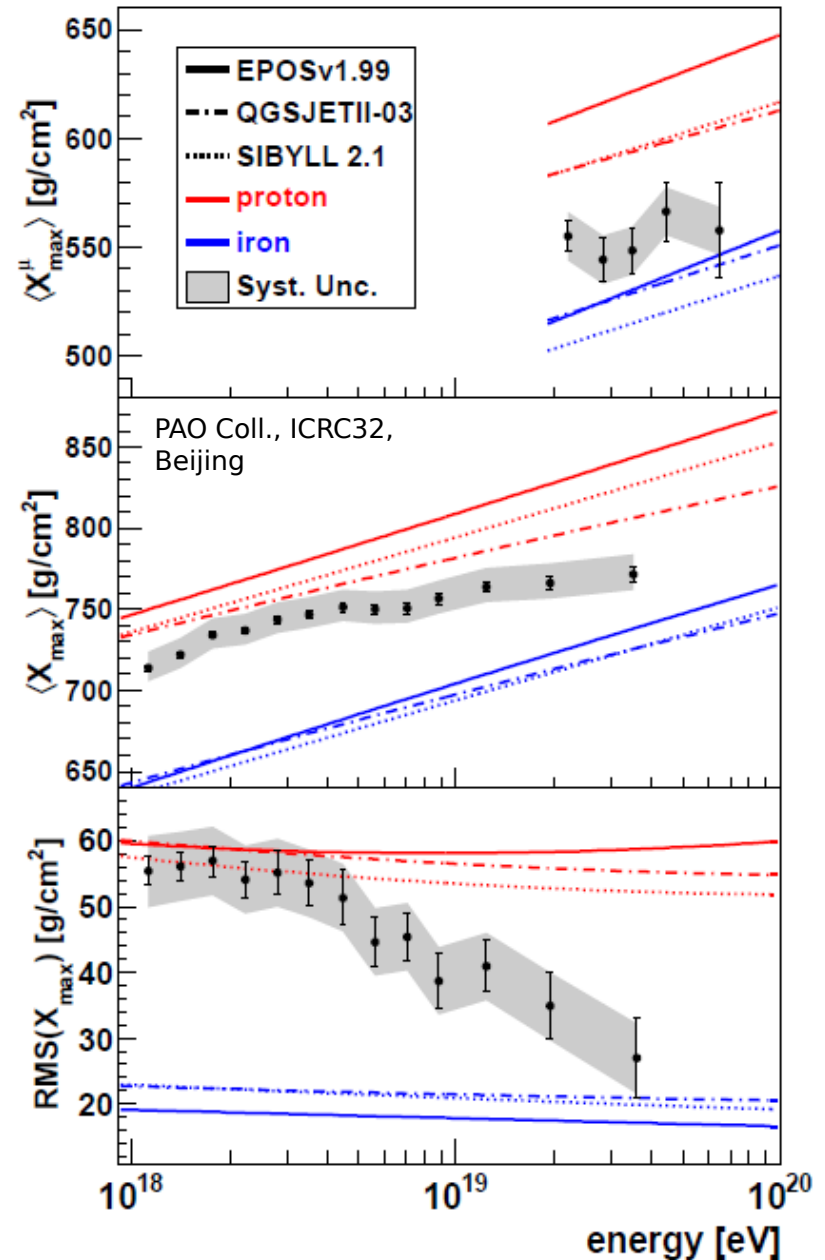
Corte GZK

4) Rayos cósmicos

Composición de los RCUE

Mediciones del PAO sugieren la presencia de **Fe** a energías extremas.

- Problemas en modelos de NGA's.
- Difícil producción de neutrinos:
Fe se disocia antes por reacciones nuc

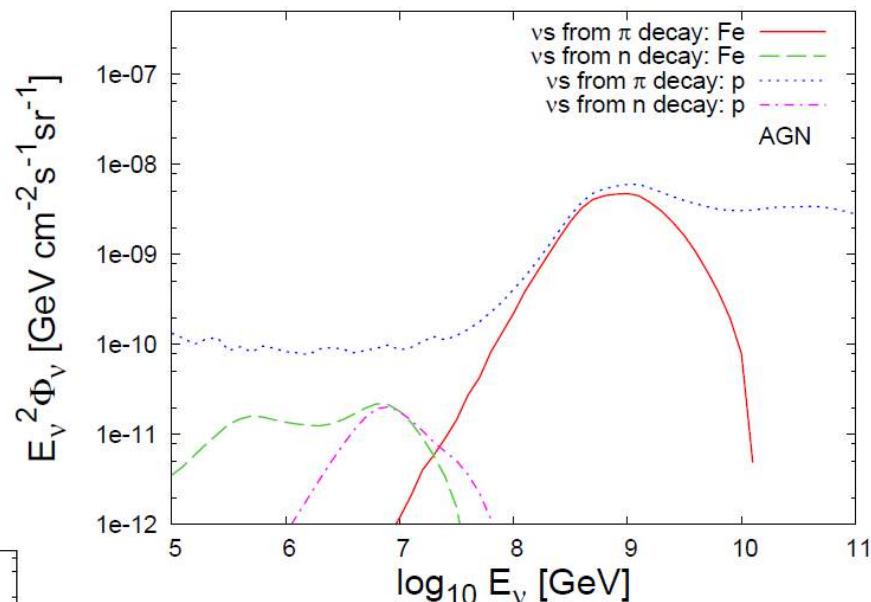
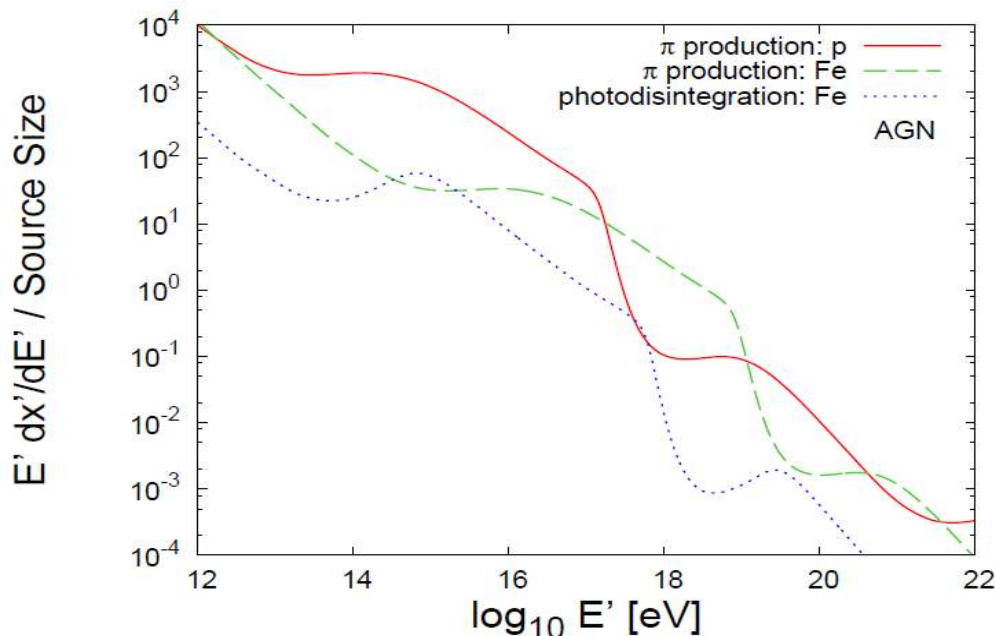


4) Rayos cósmicos

... Reducción en flujo esperado de neutrinos

ICECUB

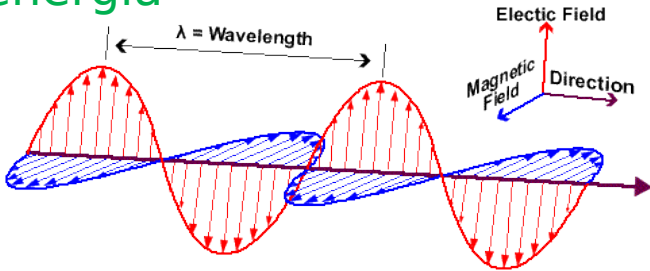
Source	$E \frac{dN_\mu}{dt}$	dN_S/dt
AGN (protons)	1.2 (0.34) yr ⁻¹	0.45 (0.089) yr ⁻¹
AGN (iron)	0.23 (0.13) yr ⁻¹	0.045 (0.037) yr ⁻¹



Interacciones γ Fe:
 Fotodesintegración más
 importante que producción de importantes
 piones.

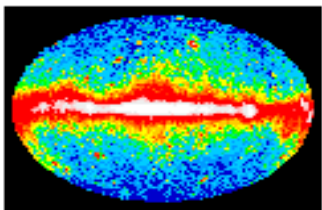
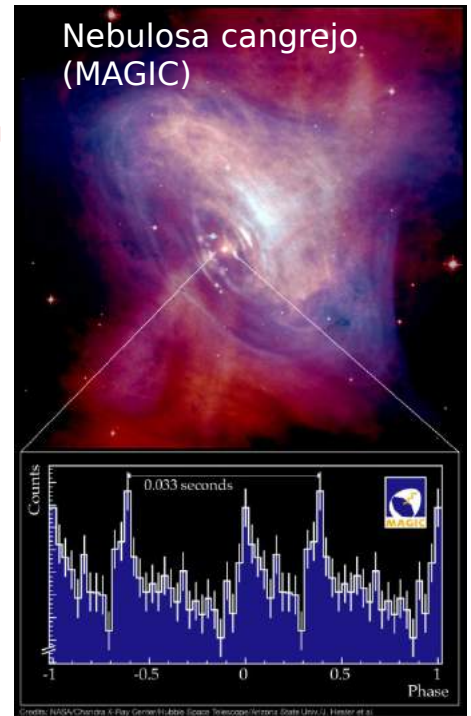
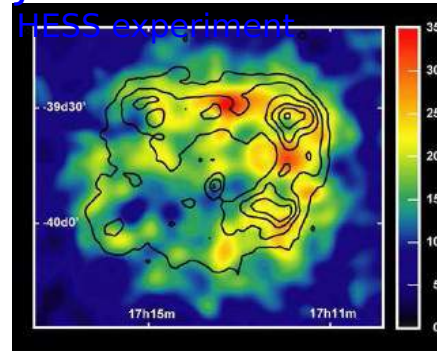
5) Rayos gamma

Radiación electromagnética de alta energía

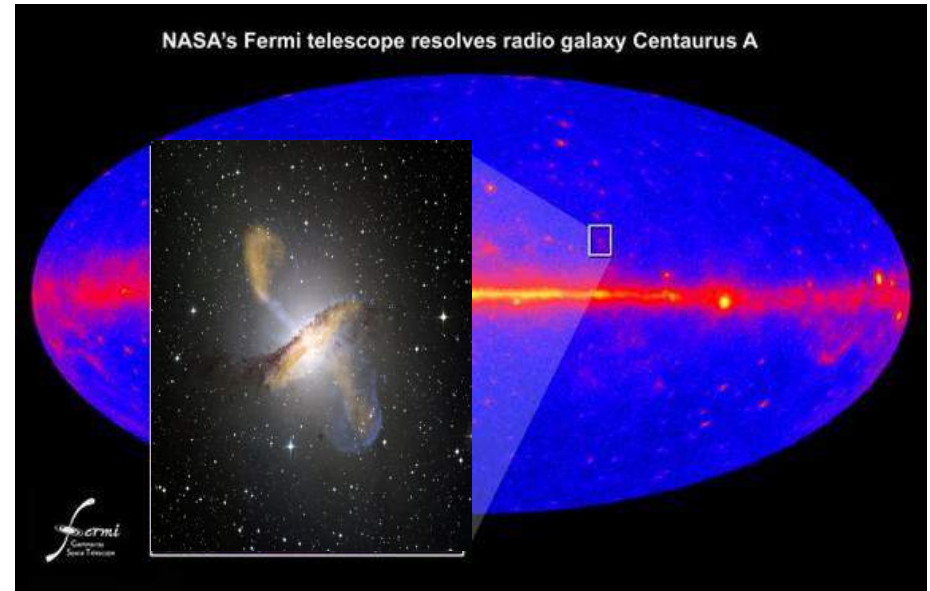
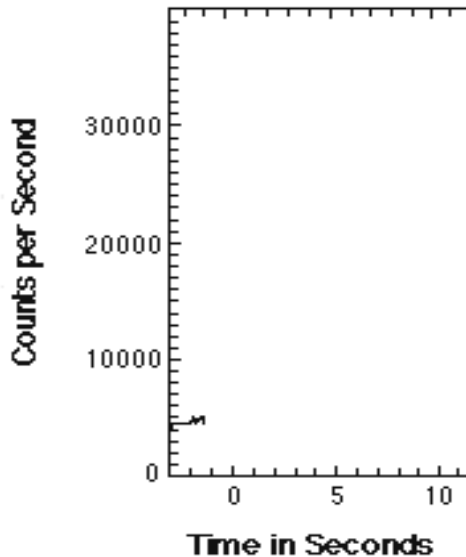


$$E = \text{MeV} - ?? \text{ eV}$$

SNR RX
J1713.7-3946
HESS experiment



GRB'
S



10 MeV - 100 GeV
Telescopios espaciales



Fermi-LAT

10 GeV - 60 TeV
Telescopios Cherenkov



HESS



MAGIC



VERITAS

10 GeV - 100 TeV

Chubascos de
partículas



Argo YBJ



Tibet AS

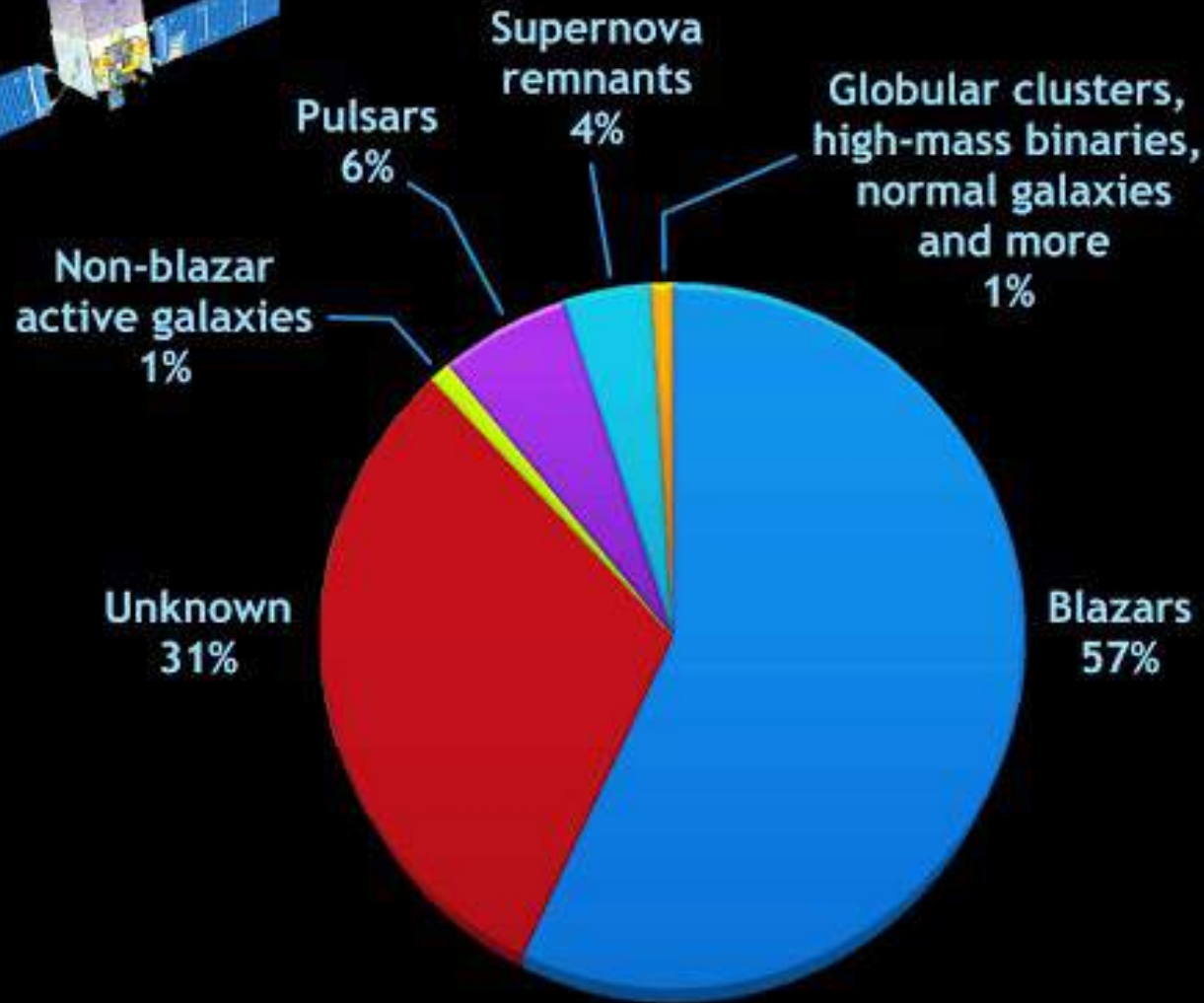
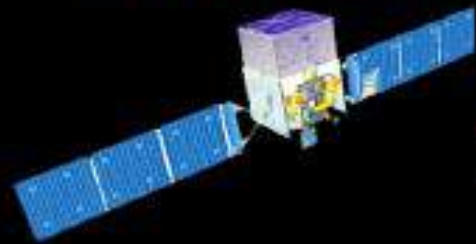


Milagro

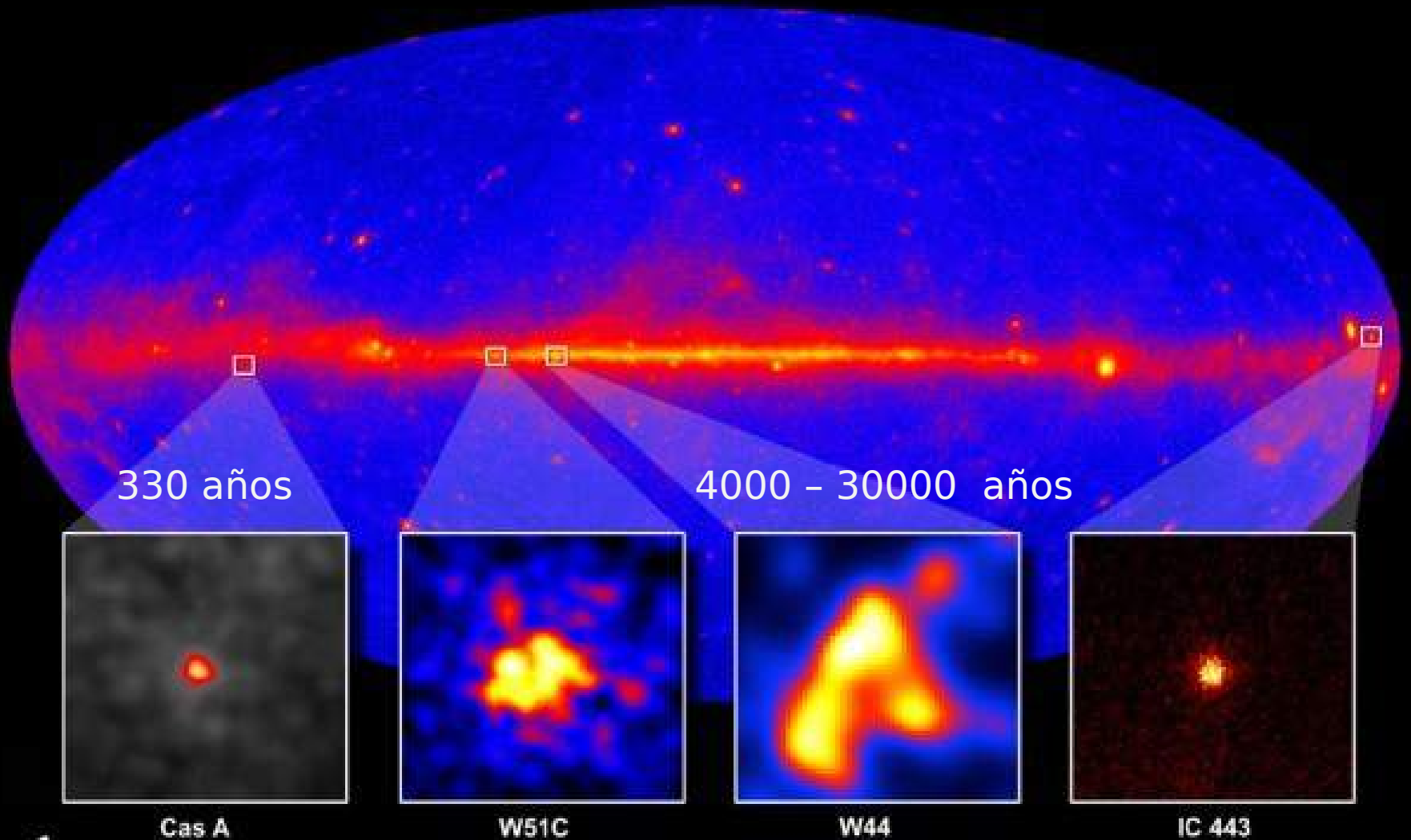


HAWC

What has Fermi found: The LAT two-year catalog

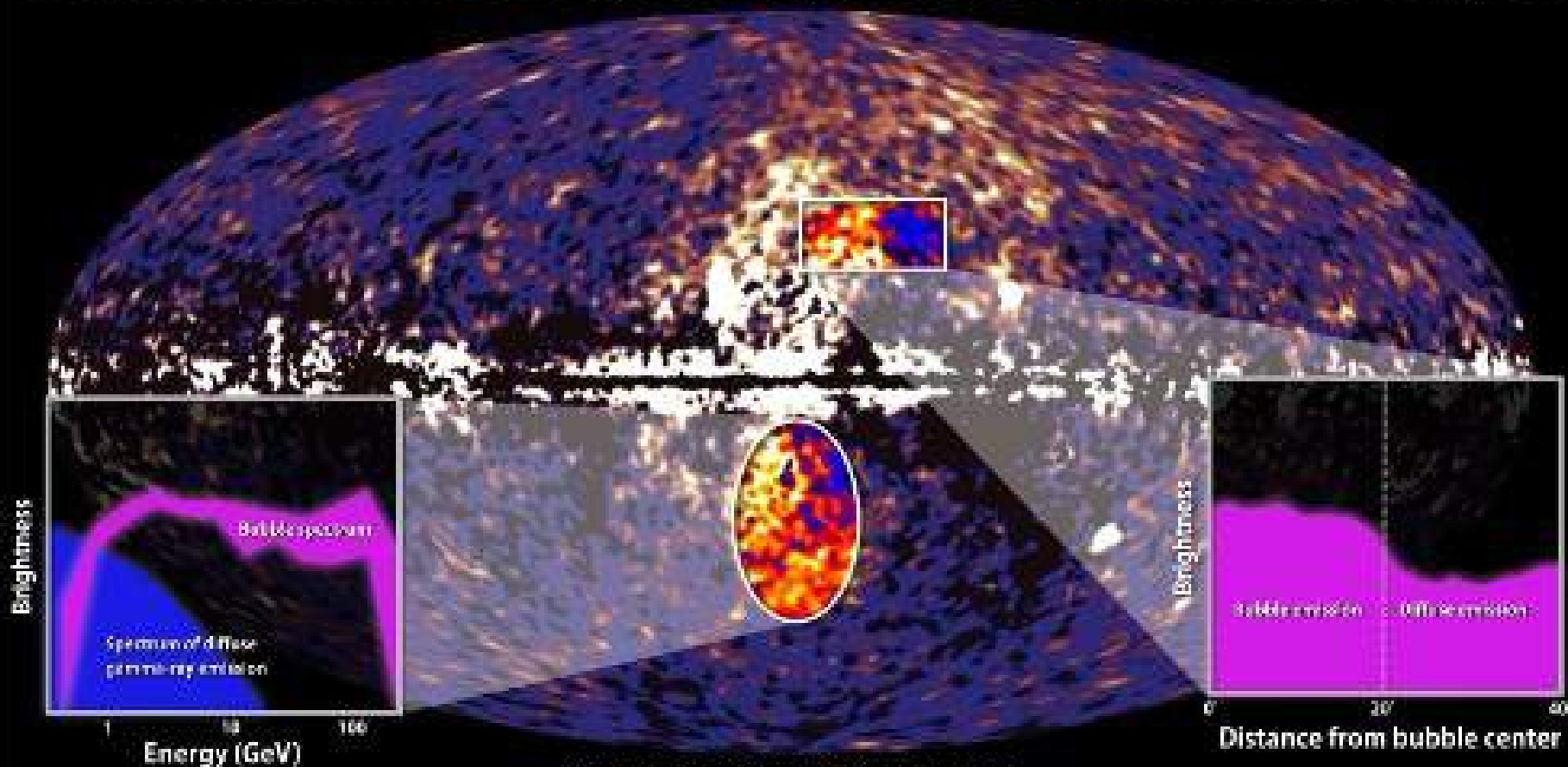


NASA's Fermi telescope resolves supernova remnants at GeV energies



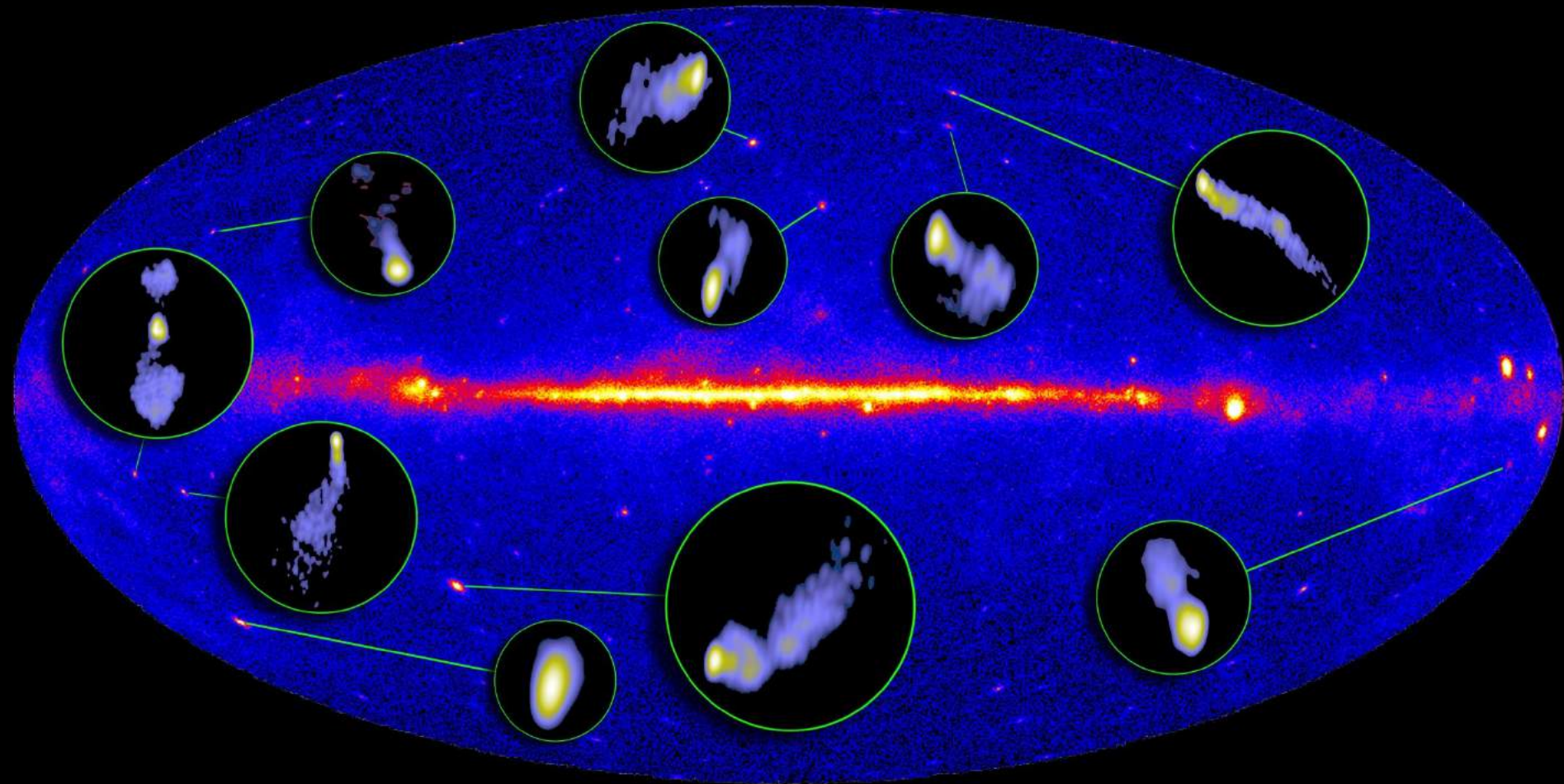
Remanentes más viejas emiten más gammas a energías a GeV's, pero no a más altas energías. Con las remanentes jóvenes sucede lo contrario.

Bubbles show energetic spectrum and sharp edges



Burbujas de Fermi. Descubiertas por FERMI-LAT. Poseen un espectro que no decae rápidamente. Perpendiculares a plano Vía Láctea. Tamaño ~ Kpc.

Posiciones de diferentes NGA's vistos por Fermi-LAT. En los círculos se muestran los jets en radio vistos por el VLBA.



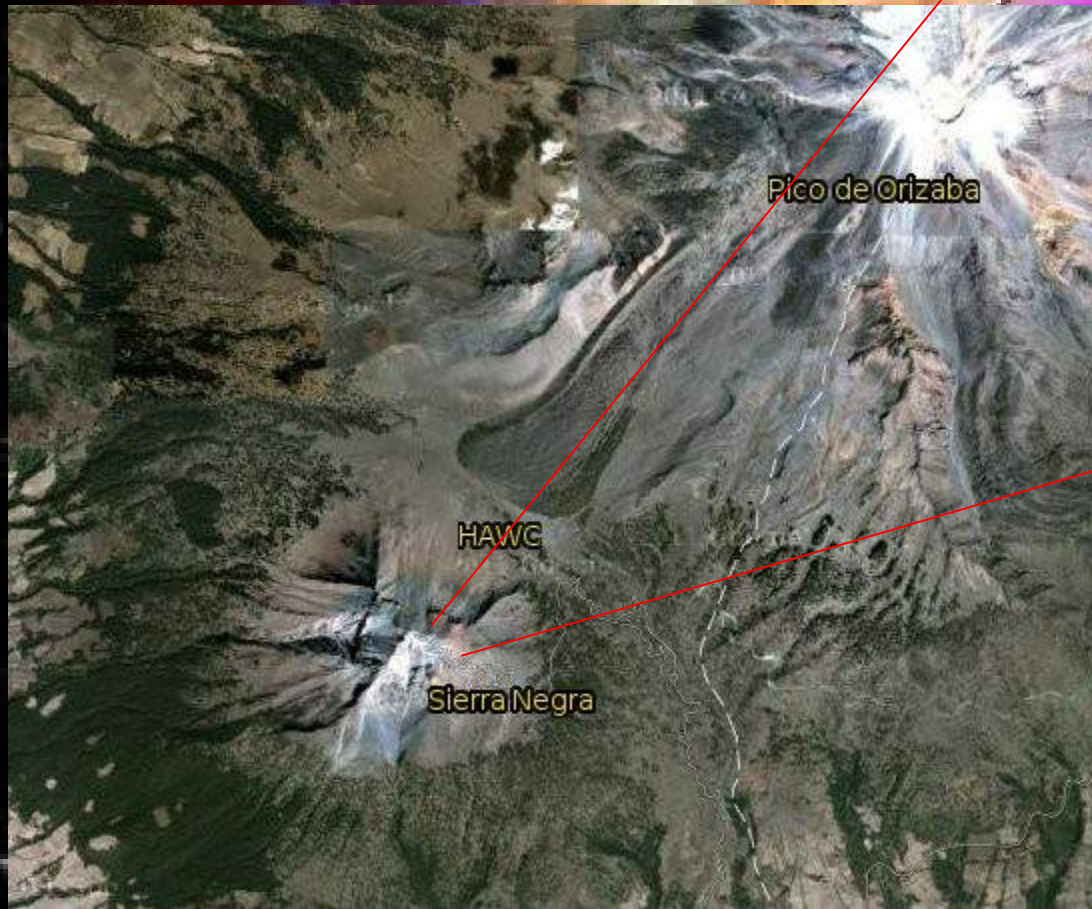
Se ha descubierto conexión entre emisiones en radio y gamma.
Mayor emisión en gammas -> Fuente más compacta.

Rayos gamma

DetECCIÓN rayos gamma con HAWC

Características:

Sierra La Negra,
Puebla



Rayos gamma

Detección rayos gamma con HAWC

Características:

Sierra La Negra,

Puebla

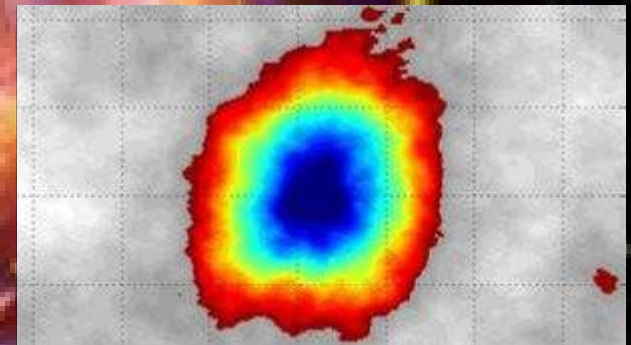
4100 m a.s.l.

$E = 10 \text{ GeV} - 100 \text{ TeV}$

300 detectores

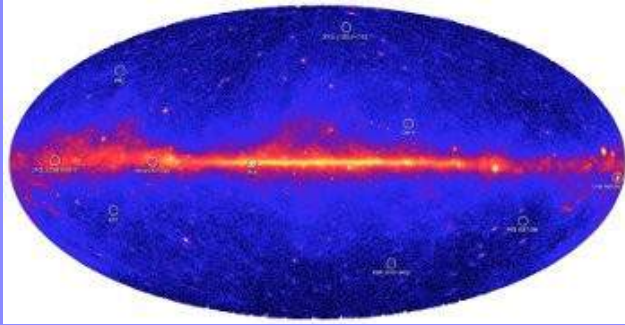


- 4.3 m altura
- 7.3 m diámetro
- Física de rayos cósmicos
- Física de rayos

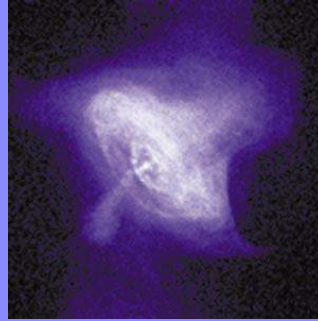


Sombra del detector

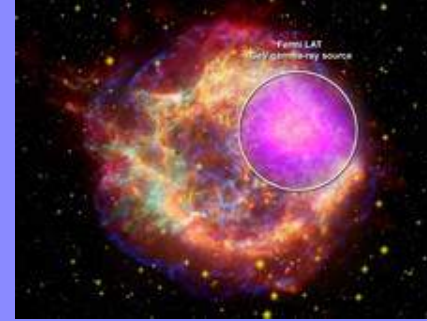
Astrofísica de rayos gamma en HAWC



Nubes moleculares



Pulsars

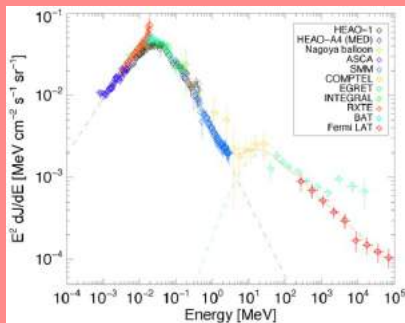


Supernova Remnants



Superbubbles

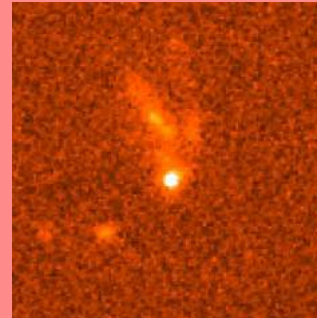
Galáctico



Background



Núcleos de galaxia activa



GRB



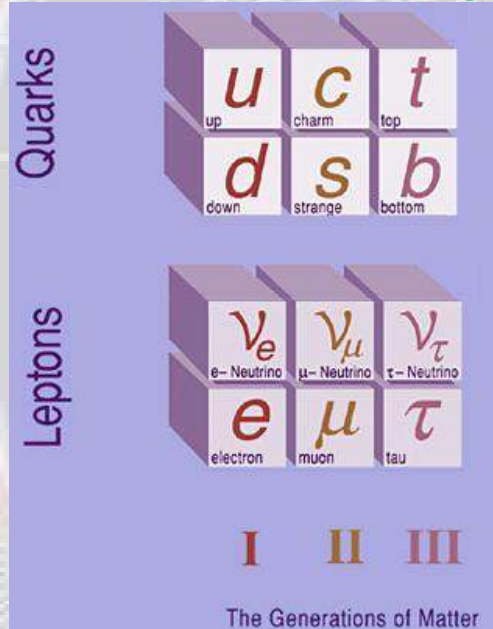
Cúmulos de galaxias

Extragaláctico

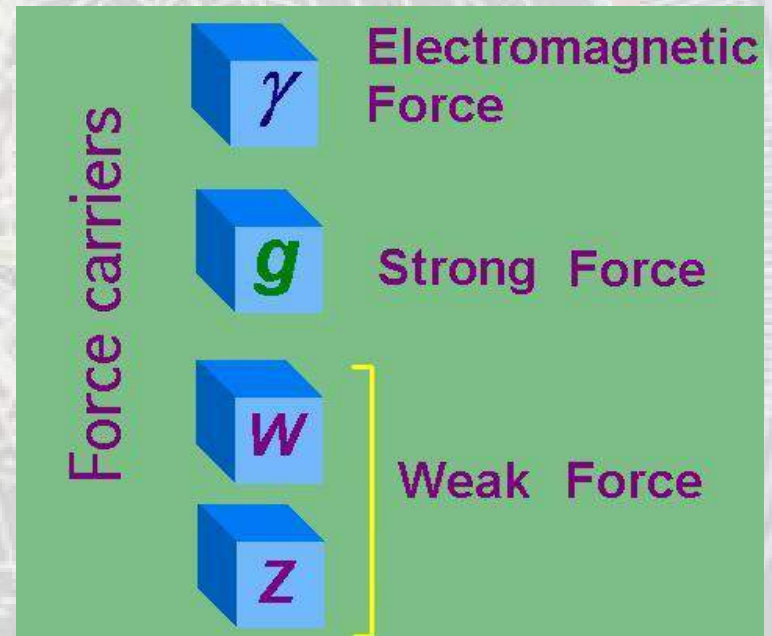
6) Neutrinos

Propiedades

- 1) Partículas que interaccionan débilmente.
- 2) No carga eléctrica.
- 3) Partículas ligeras.
- 4) Muy penetrantes



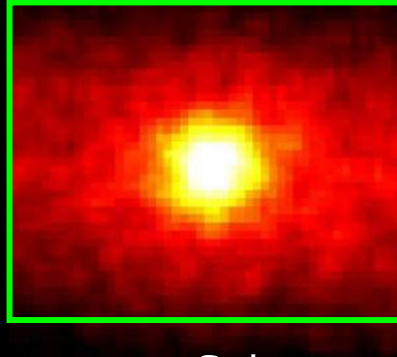
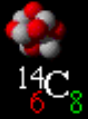
Fermiones
 $S(\text{espín}) = 1/2$



Bosones
 $S(\text{espín}) = 1$

Neutrinos astrofísicos

$E < \text{GeV}$



Sol



Estrellas

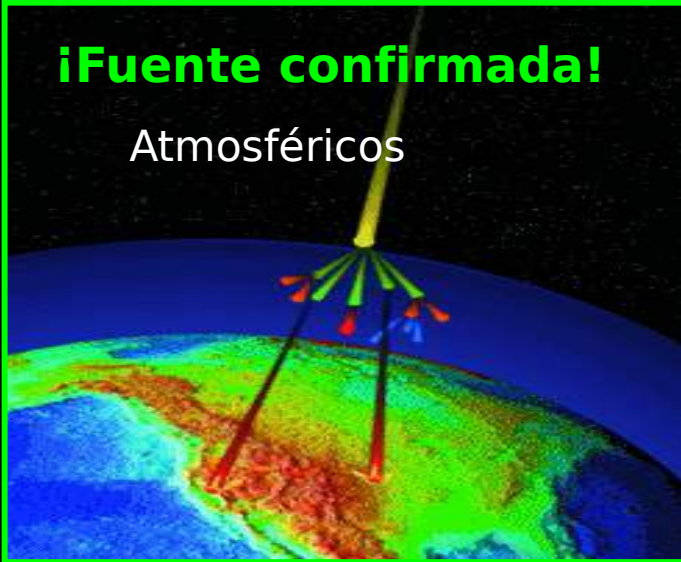


Supernovas

$E = \text{GeV} - ?? \text{ eV}$

iFuente confirmada!

Atmosféricos



Vía Láctea



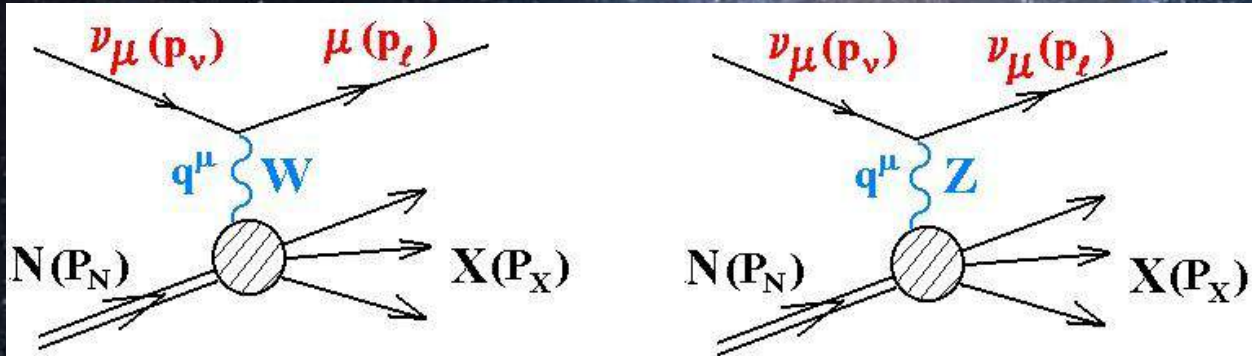
Núcleos galácticos
activos



6) Neutrinos

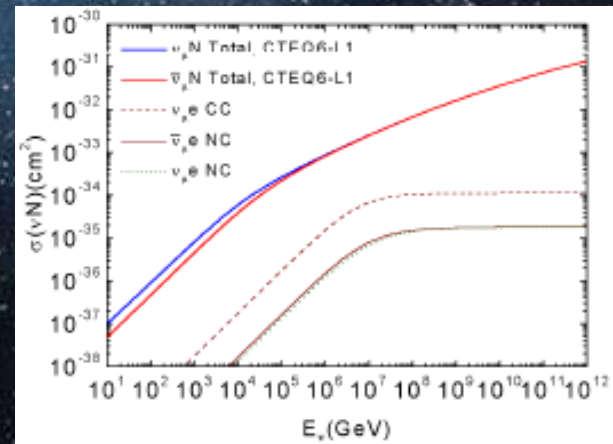
* Detección indirecta basadas en interacciones débiles

Observación de leptón secundario (l) y chubasco (X)

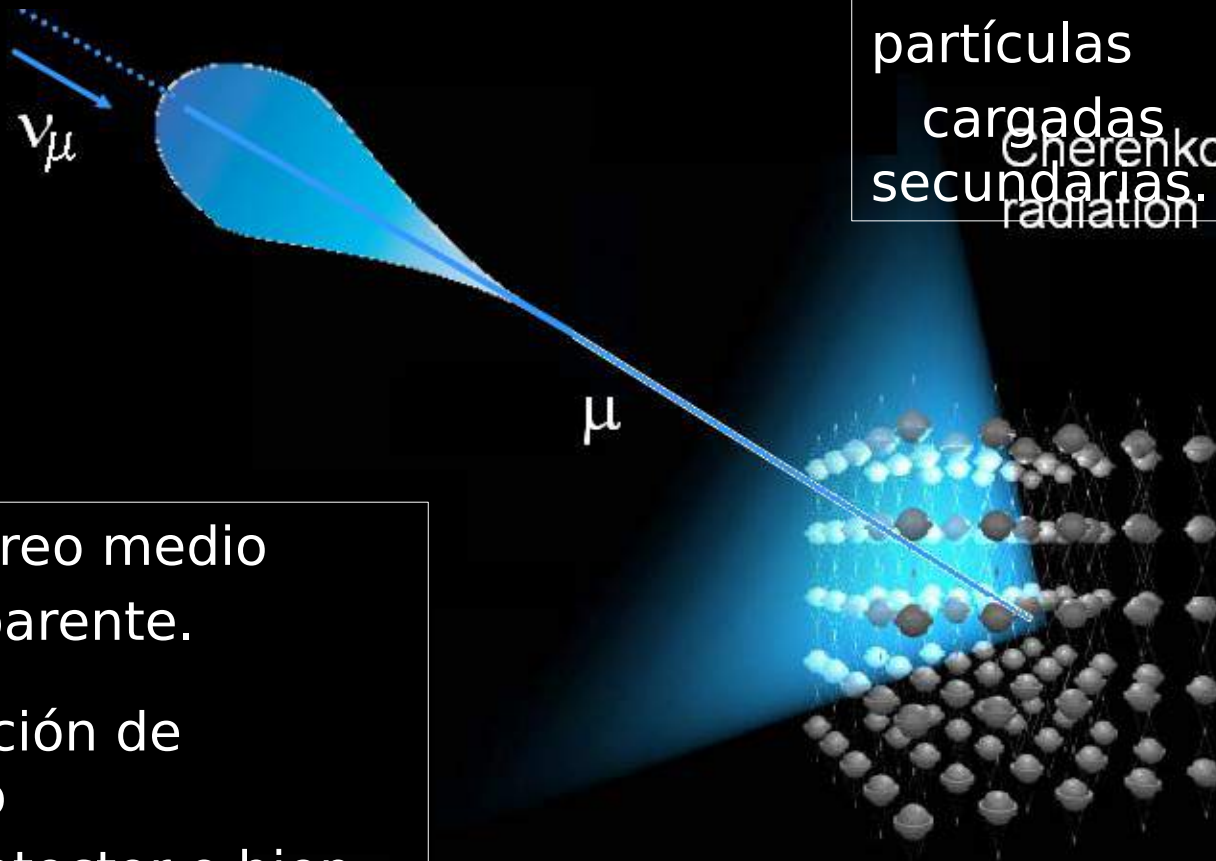


* Monitorear grandes volúmenes de material debido a sección eficaz y flujos pe

$$\sigma_{\nu N} / \sigma_{pp} [10 \text{ GeV}] = 10^{11}$$



Radiación Cherenkov



Neutrinos con $E > \text{GeV}$.

Observar radiación Cherenkov de partículas

cargadas secundarias.

Cherenkov radiation

Monitoreo medio transparente.

Interacción de neutrino con detector o bien...

6) Neutrinos

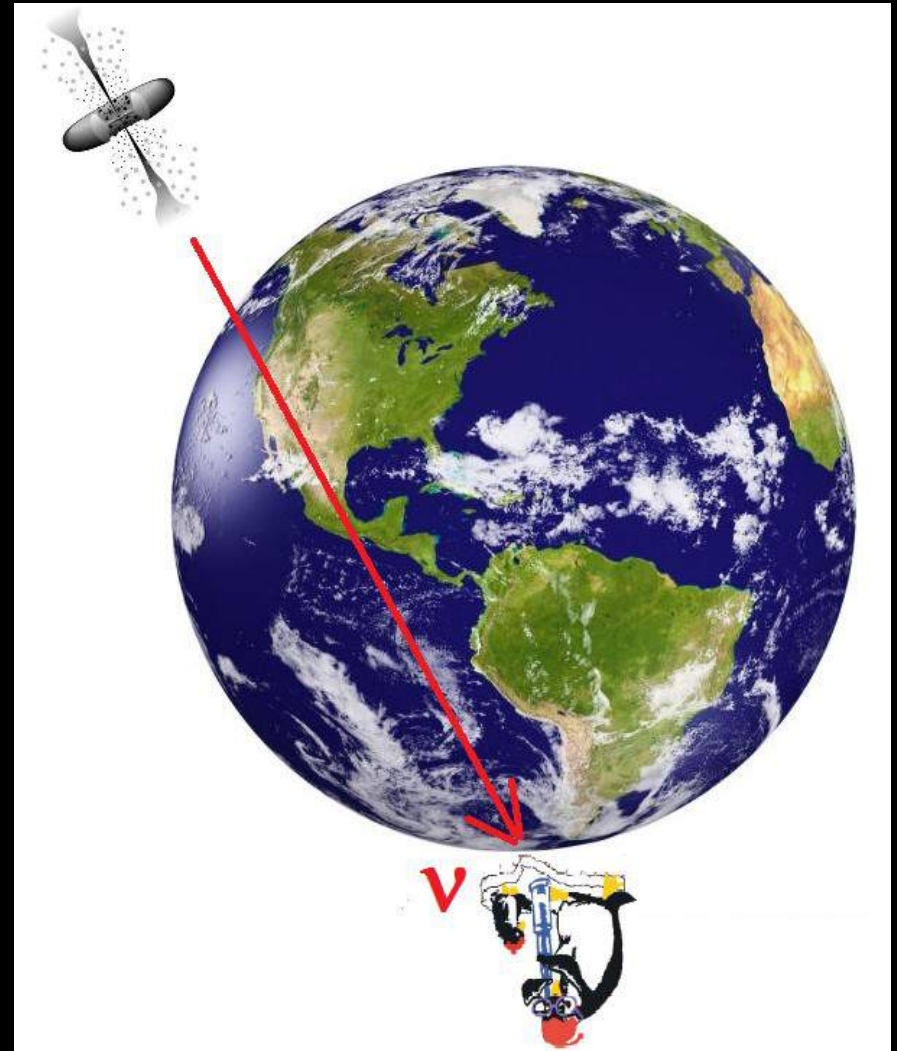
Detectores Cherenkov

Interacción de neutrino con material alrededor de detector.

Observación también puede ser llevada a cabo hacia abajo.

Tierra como filtro de neutrinos.

Neutrinos atmosféricos usados para calibrar instrumento.



6) Neutrinos



Chubascos horizontales de partículas:

Mayor cantidad de material disponible para colisiones a lo largo del horizonte



$$X_{\text{hor}}^{\text{atm}} = 3.6 \times 10^4 \text{ cm.w.e} \quad (\text{Atmósfera, horizonte})$$

$$X_{\text{che}}^{\text{water}} = 10 \times 10^4 \text{ cm.w.e} \quad (\text{Detector Cherenkov de } 1 \text{ km}^3)$$

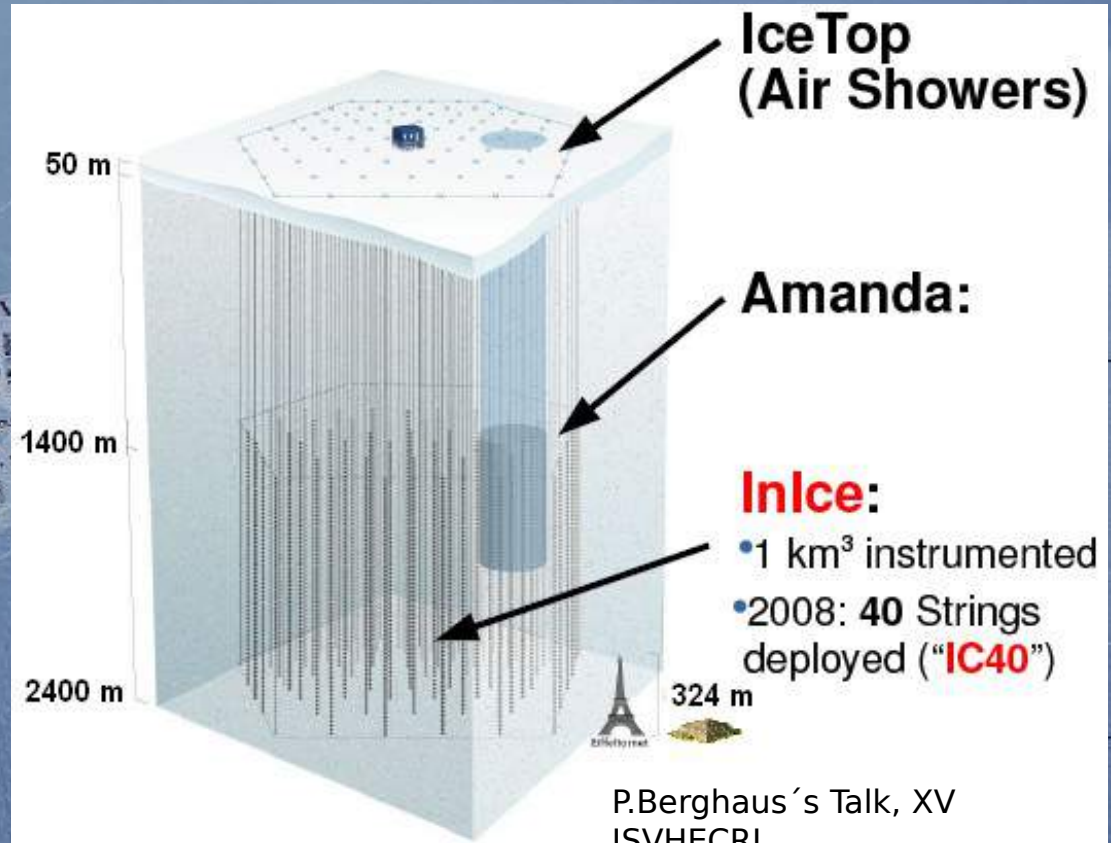


6) Neutrinos

Technique	Medium	Energy	Detector
Cherenkov	Water	GeV	Baikal, Nestor, Antares
Cherenkov	Ice	100 GeV	AMANDA, ICECUBE
Radio Cherenkov	Ice	$> 10^5$ GeV	RICE, ANITA, FORTE
Radio Cherenkov	Salt	$> 10^8$ GeV	SalSA
Radio Cherenkov	Moon	$> 10^{11}$ GeV	GLUE, LOFAR
Acoustic	Water, Salt, Ice	$> 10^9$ GeV	SAUND, ACORNE, SPATS
Air Showers	Air	$> 10^8$ GeV	AUGER, JEM EUSO

ICECUBE/ICETOP

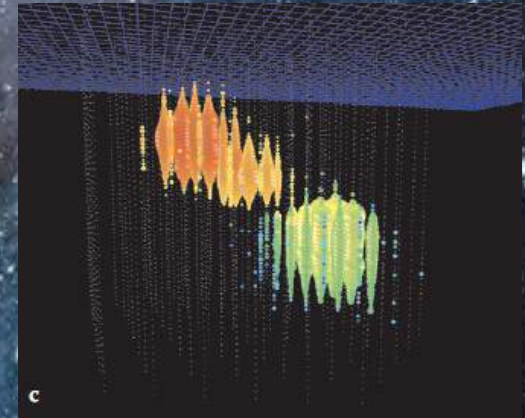
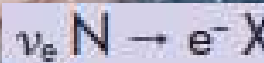
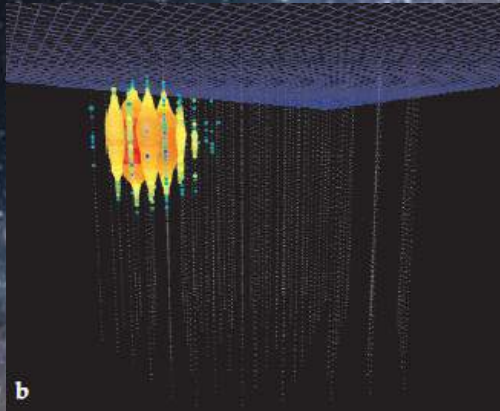
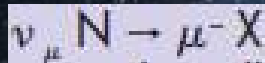
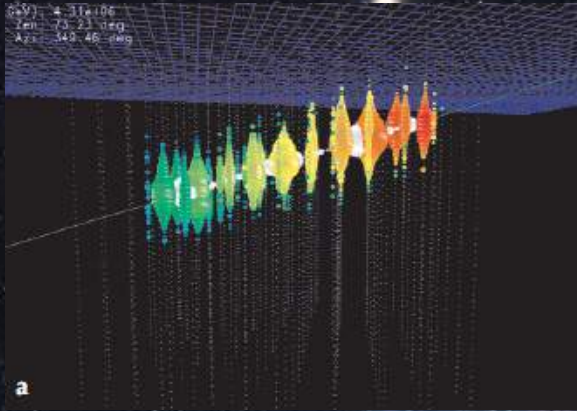
Amundsen-Scott South Pole Station



F. Halzen

6) Neutrinos

Canales de detección en Icecube



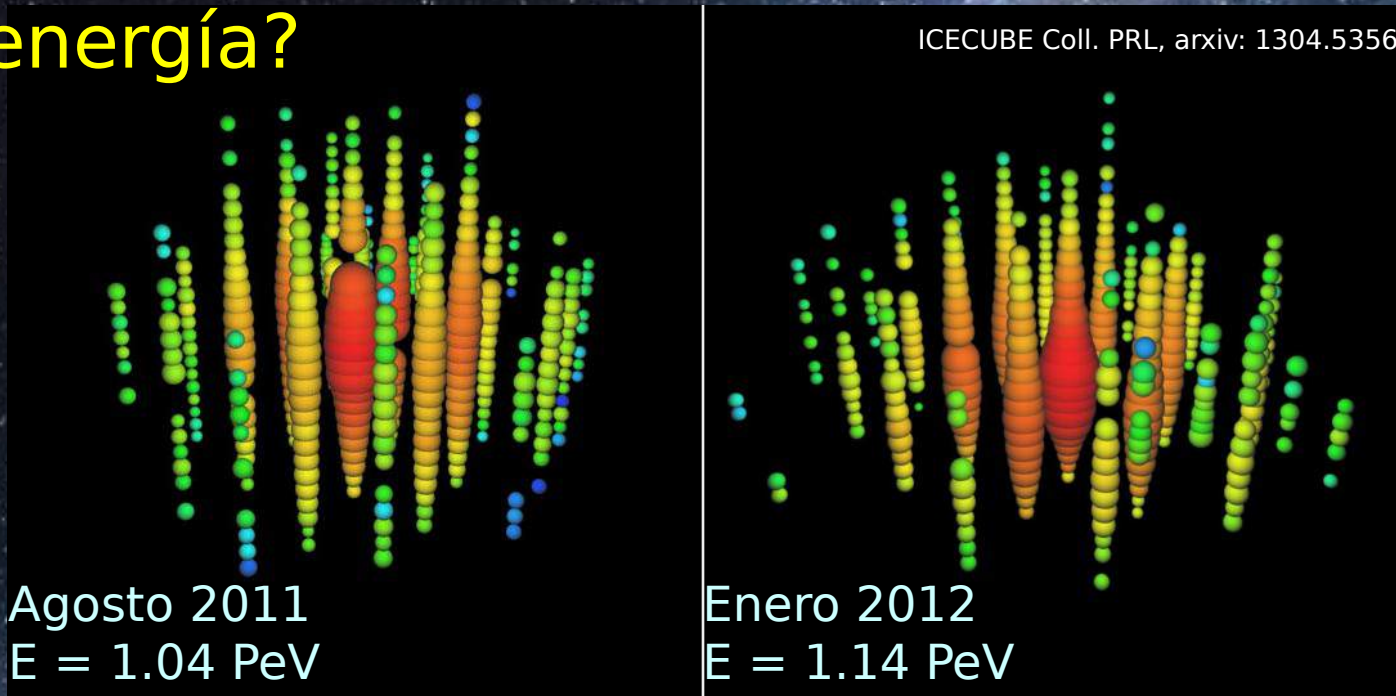
Observación del muón

Observación de una cascada
debido a X y el electrón

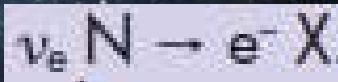
Observación de dos chubascos
Debido a X y al decaimiento
Tau.

6) Neutrinos

¿Primera detección de neutrinos cósmicos de alta energía?



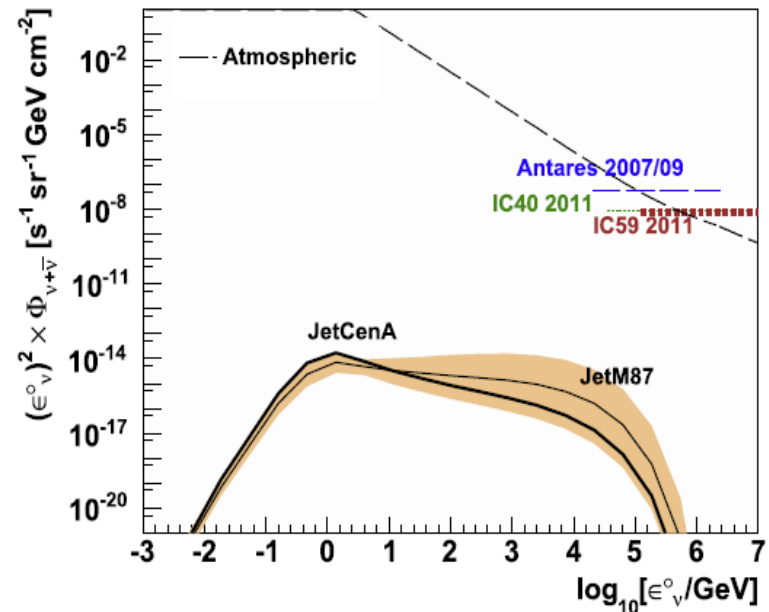
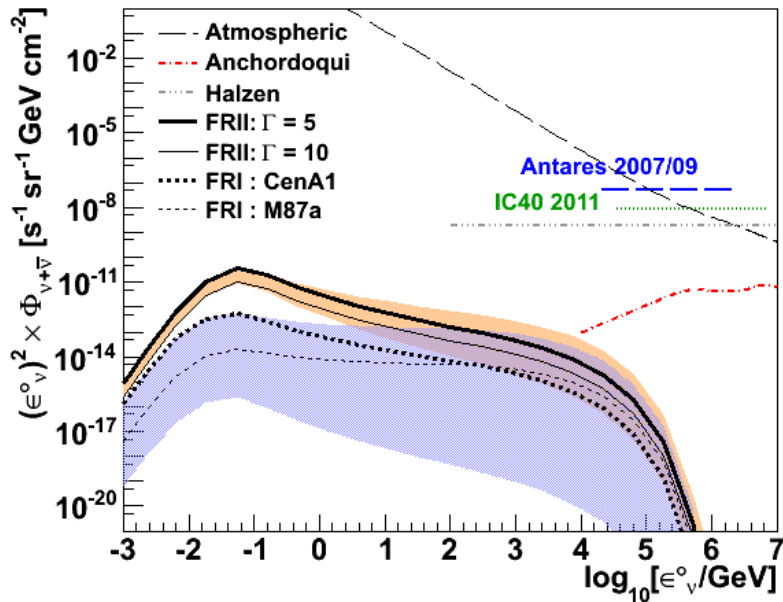
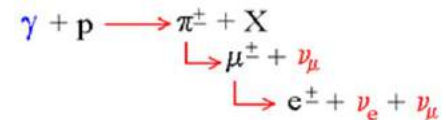
- A la fecha se han reportado en ICECUBE 28 eventos con $E > 30$ TeV
- Eventos tipo:



- Difícil conocer dirección original

6) Neutrinos

Flujo extragaláctico de ν 's de AGN's

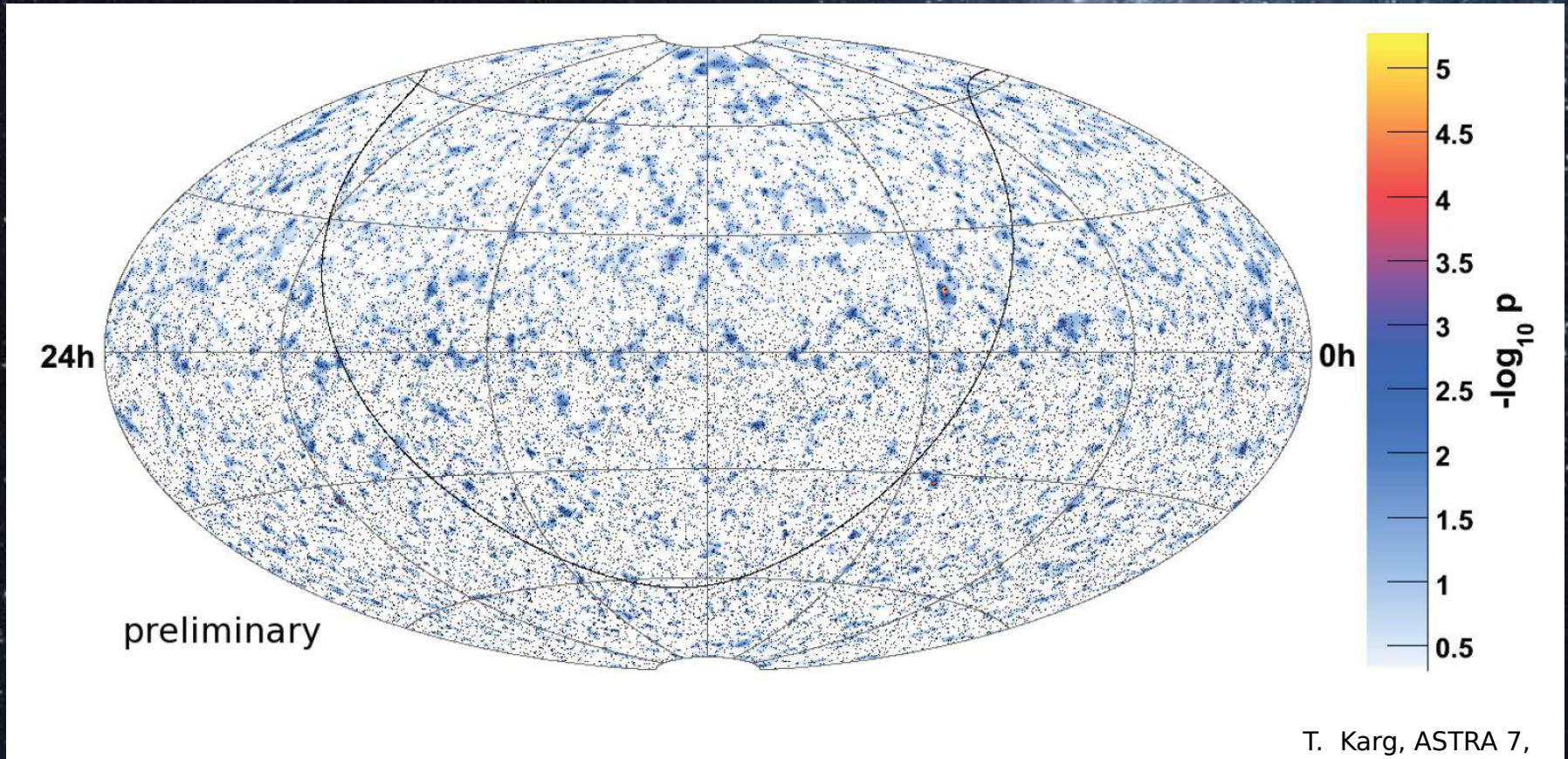


Límite observado por ICECUBE no puede ser explicado por emisión gamma de FRI, FRII y BL Lacs

J.C. Arteaga, Astrop, Phys. 37 (2012)

J.C. Arteaga, A. Martínez, Proc. of the ICRC 2013

6) Neutrinos



$E = \text{PeV} - 100\text{'s TeV}$: No exceso significativo de eventos sobre fondo uniforme.

7) Resumen

- La astrofísica de partículas estudia escenarios cósmicos donde tiene lugar la generación, interacción y propagación de partículas.
- Estrecha colaboración entre los campos de la astrofísica de partículas, la cosmología y la física de partículas.
- La astrofísica de partículas de altas energías:
 - Estudio de los rayos cósmicos, rayos gamma y neutrinos de alta energía.
 - Encontrar y comprender el funcionamiento de los aceleradores cósmicos de partículas.
 - Colocar límites a nueva física.
- Rayos cósmicos de alta energía ($E > 1$ PeV):
 - Se desconoce su origen.
 - En su propagación o aceleración podrían estar campos magnéticos.
 - Su composición cambia con la energía.
 - SNR y Núcleos de galaxias activas son las fuentes más probables
 - Mecanismo de Fermi de 1er orden podría ser el responsable de la

7) Resumen

- Rayos gamma de altas energías:

- Los nuevos telescopios de γ 's han descubierto una gran variedad de fuentes de rayos gamma , como remanentes de supernova y galaxias activas.
- Posible conexión con generación de rayos cósmicos.
- Mecanismo de producción puede ser de origen leptónico o hadrónico.

- Neutrinos de altas energías :

- ICECUBE ha reportado la primera observación de posibles eventos cósmicos.
- No se han localizado las fuentes.
- Canal más importante de producción es el mecanismo hadrónico.
- Podría abrir ventana a fenómenos muy energéticos ubicados más allá de nuestro vecindario galáctico.

¡Futuro muy interesante en el
campo de la física de
astropartículas!

Gracias por su
atención