



De la astronomía óptica a la de rayos gamma



Magda González
Instituto de Astronomía, UNAM
magda@astro.unam.mx

Definiciones Básicas

- Unidades:

eV

Energía que alcanza un electrón en un metro bajo una diferencia de potencial de 1Volt.

Unidad de energía: **erg** = g cm² / s²

Erg = Energía para mover 1 gramo, 2 centímetros en 2 segundos

erg = 6.2415 X 10¹¹ eV

eV = 1.602 x 10⁻¹¹ erg = 0.000000000001 erg Energía de la luz visible

eV

Energía que alcanza un electrón en un metro bajo una diferencia de potencial de 1Volt.

kilo eV = rayos X

Mega eV = liberada en decaimientos nucleares

Giga eV = (10^9) masa de la partícula Higgs (popularmente la partícula de Dios)

Tera eV = (10^{12}) energía alcanzada en el LCH del Cern

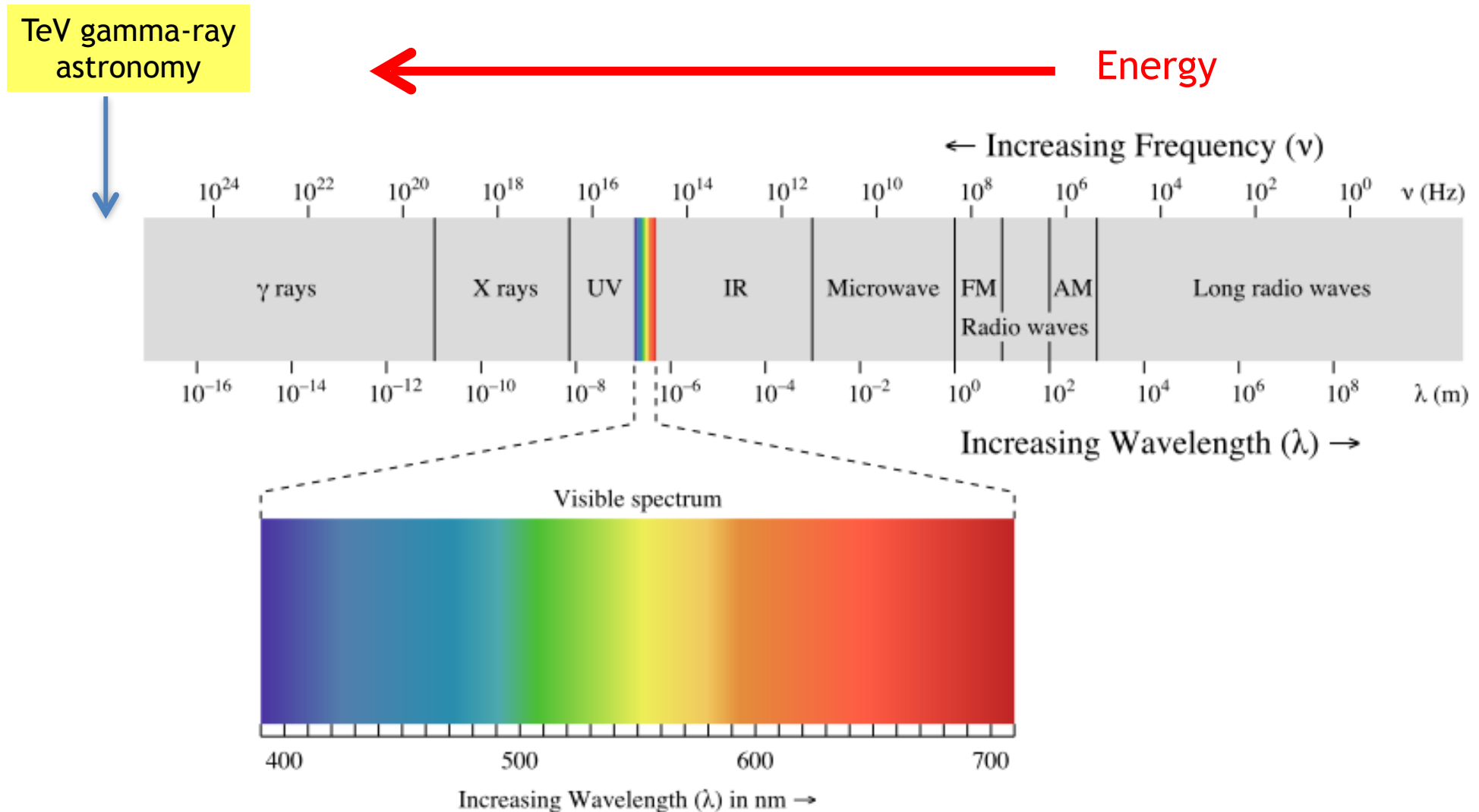
Peta eV

Exa eV = (10^{18}) energía de las partículas más energéticas que nos llegan del universo.

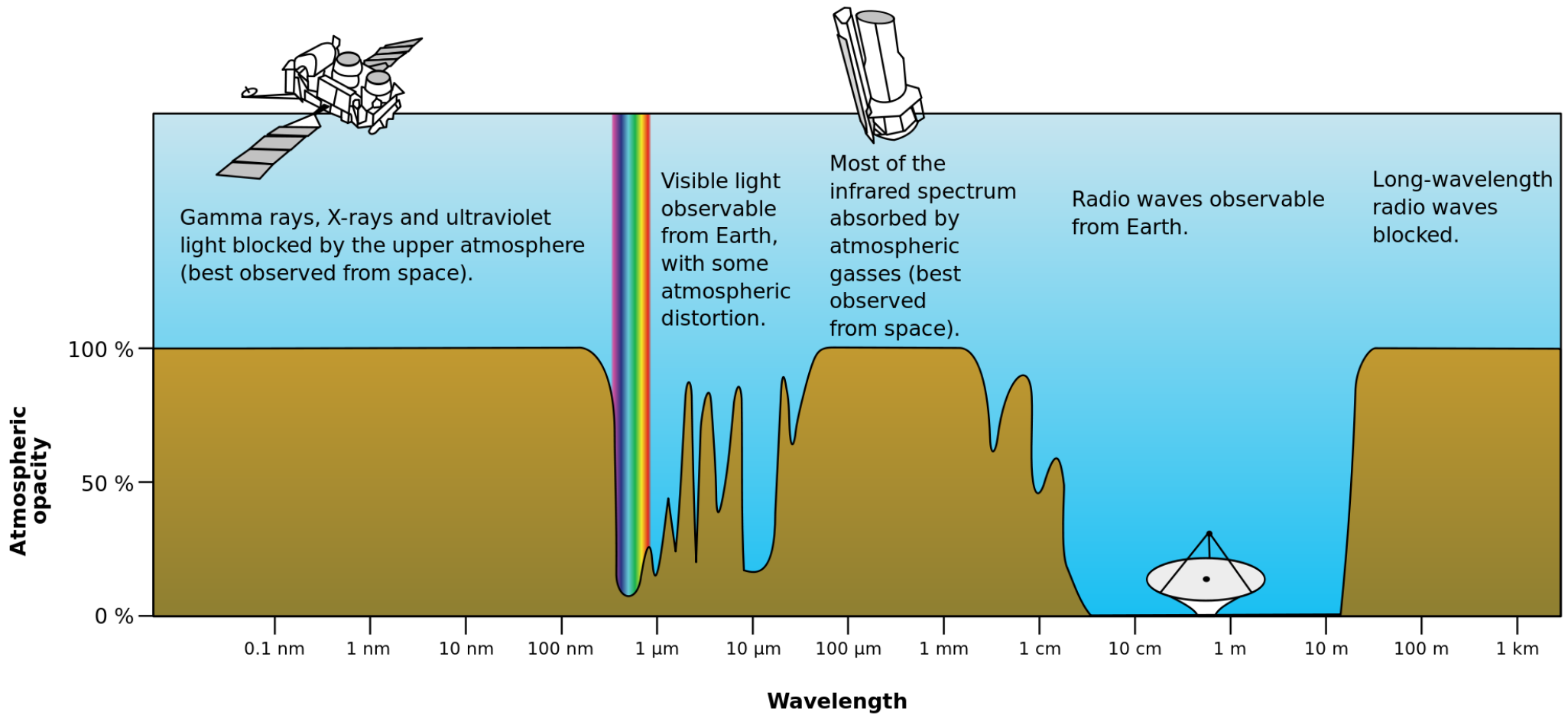
⇒ 10^{12} eV = 10 erg Energía para mover 10 gramos, 2 cm en 2 s.

⇒ 10^{18} eV = 10,000,000 erg **Energía para mover 10 Toneladas, 2 cm en 2 s.**

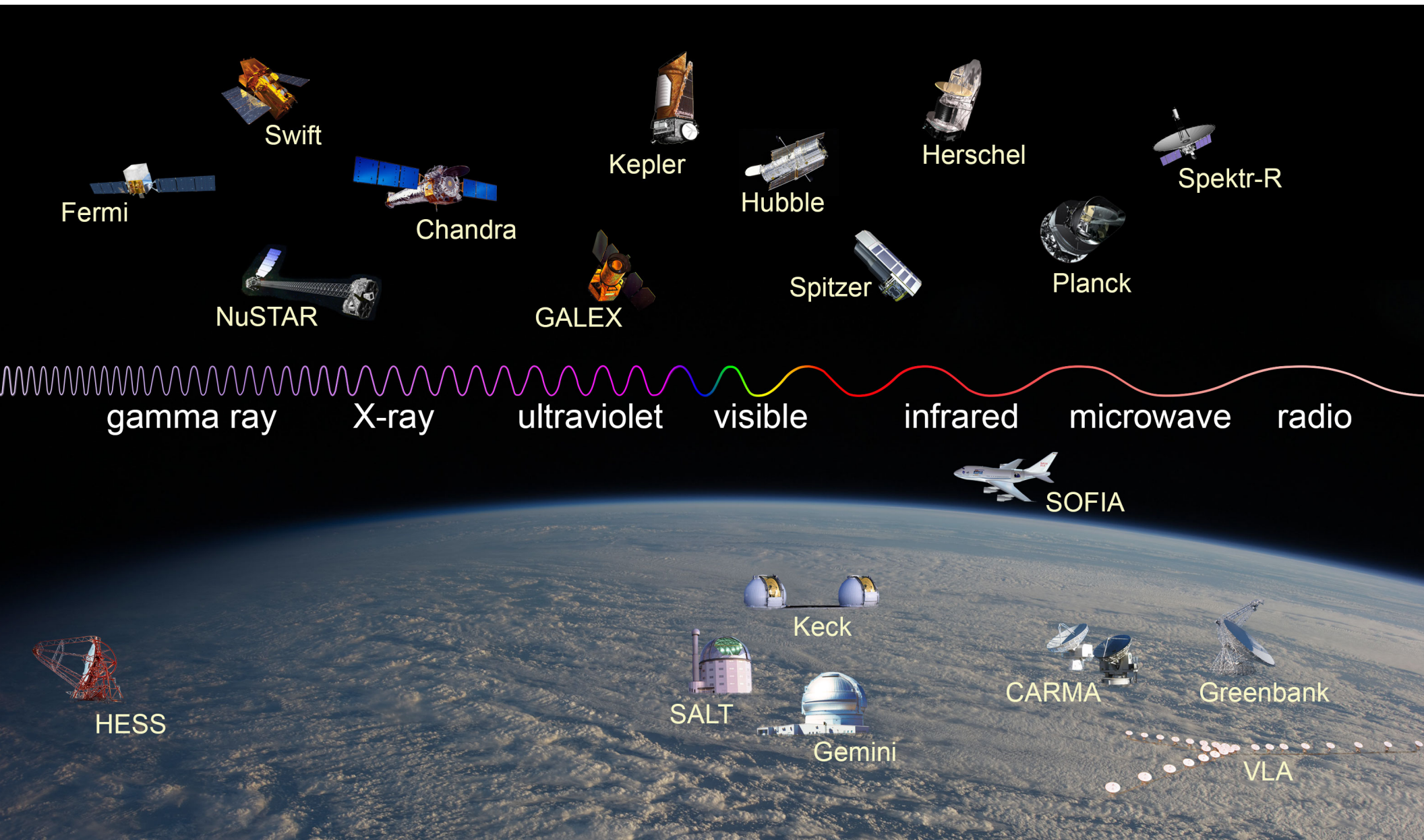
Espectro electromagnético

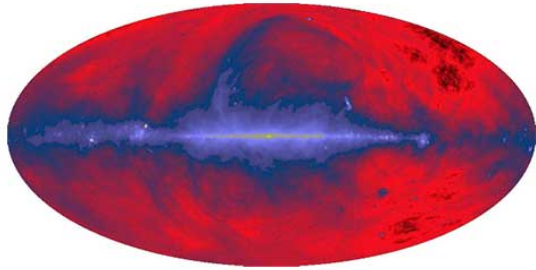


La atmósfera no es transparente en rayos gamma



Detección de radiación EM de otras energías es posible con satélites

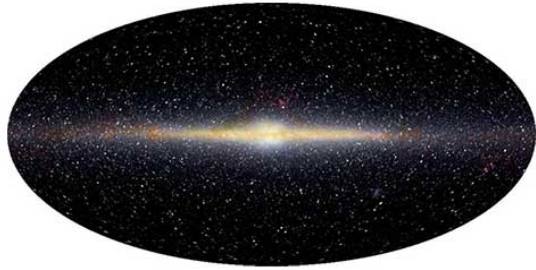




radio

$0.002 \text{ eV} = 2 \text{ meV}$

dispersión de electrones libres
en el gas ionizado interestelar



infra rojo

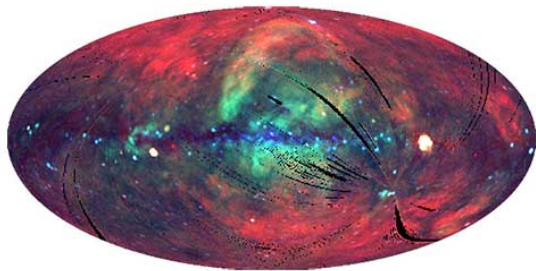
$0.01 - 2 \text{ eV}$

polvo interestelar
calentado por luz estelar
absorbida, cúmulos de
estrellas



optical

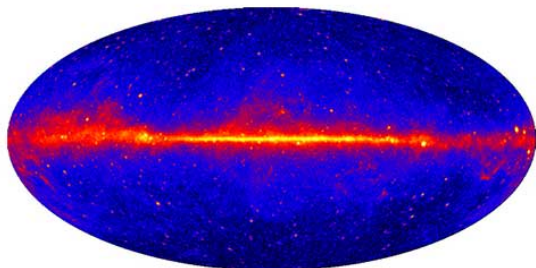
Planetas, Estrellas, gas de baja densidad y polvo



rayos-X

$1000 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$

gas ionizado



rayos gamma

$>100 \text{ MeV}$

Interacción de rayos cósmicos
con el gas interestelar

- Rayos gamma o fotones no tienen carga eléctrica

Como se obtiene un fotón con energías de TeVs?

Que fenómenos pueden producir fotones a altas energías?

Si es radiado por una partícula cargada, que energía debe tener esta partícula y como se acelera a esas energías?

Consecuencias:

1. Los procesos de producción son únicamente no-térmicos.

Porque?

Caso térmico - fuente: cuerpo negro - radian por su temperatura

con la ley de Wien, $0.2898 \text{ (cm K)} = \lambda_{\text{max}} T$, en su máximo.

→ Foton de **eV** equivale a temperaturas de $\sim 6000\text{K}$. **Superficie solar!!**

Fotón de **1MeV** equivale a temperaturas de $2 \times 10^9\text{K}$.

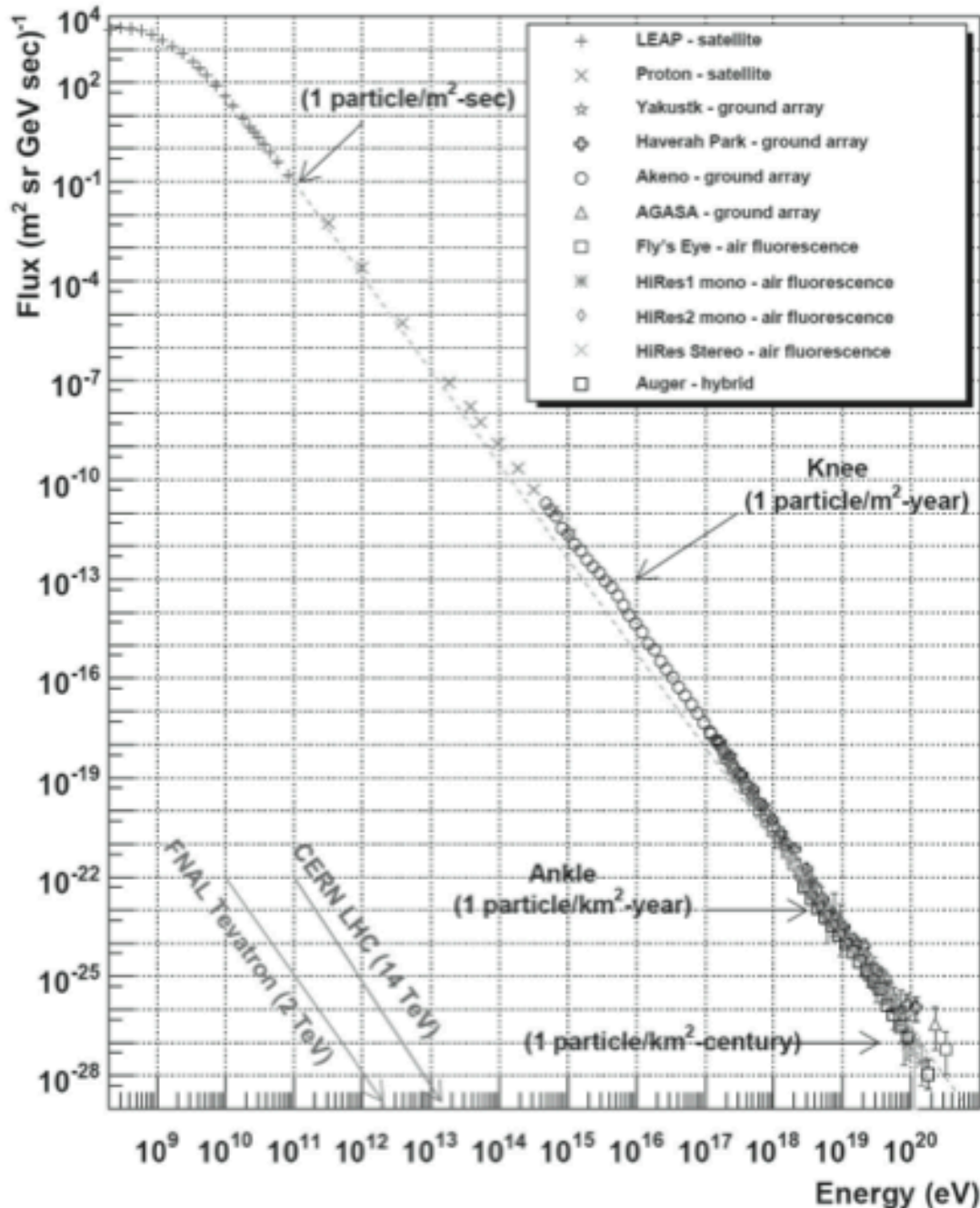
Fisión nuclear dentro del Sol a $T = 15 \times 10^6\text{K}!!$

Plasma de quark-gluon = $175\text{MeV} = 2 \times 10^{12}\text{K}$

Fotón de **10TeV** equivale a temperaturas de $2 \times 10^{16}\text{K}$

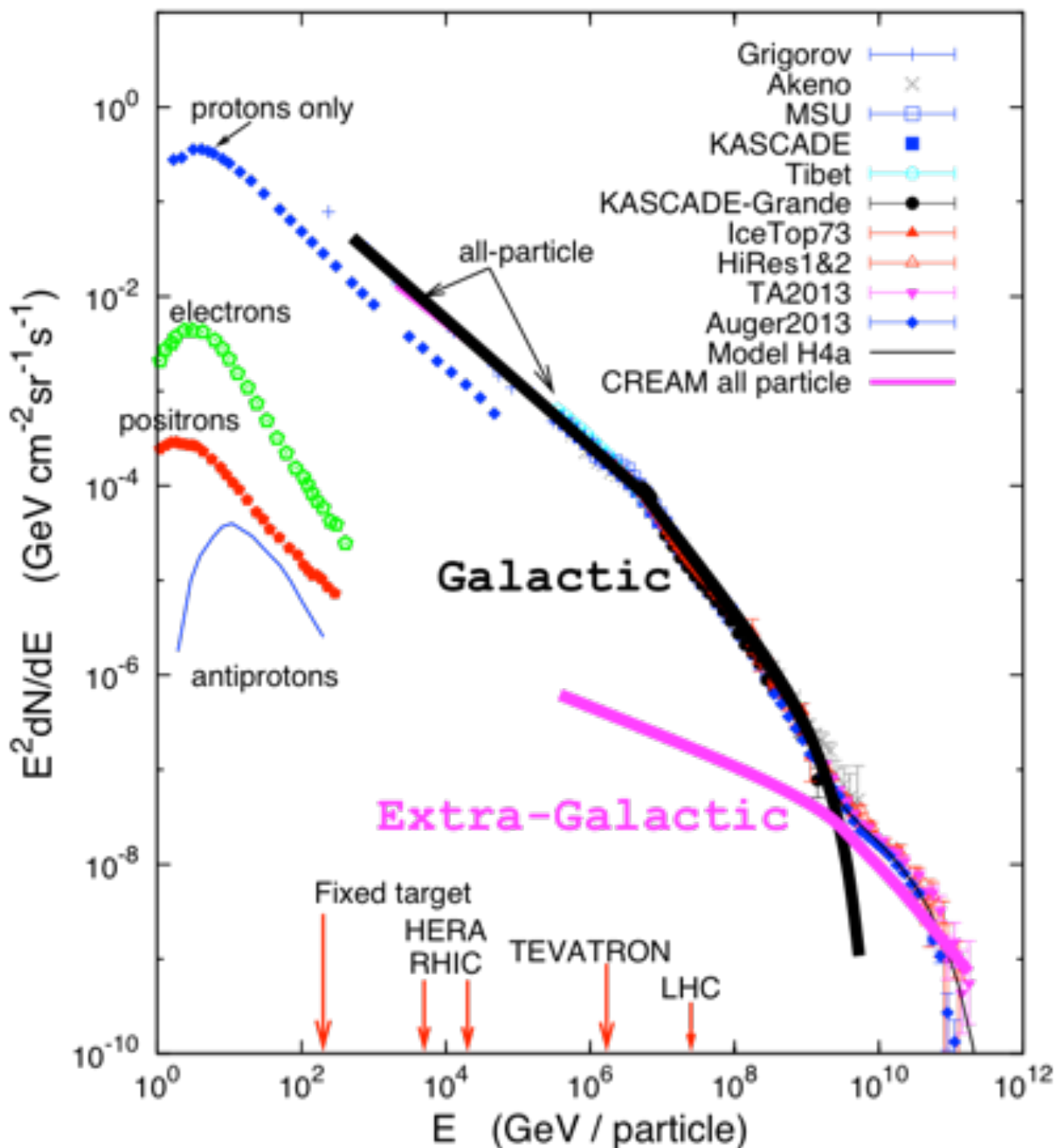
=> La energía de los rayos gama es tanta que procesos térmicos requieren temperaturas absolutas altísimas e inalcanzables.

Espectro de Rayos C3smicos



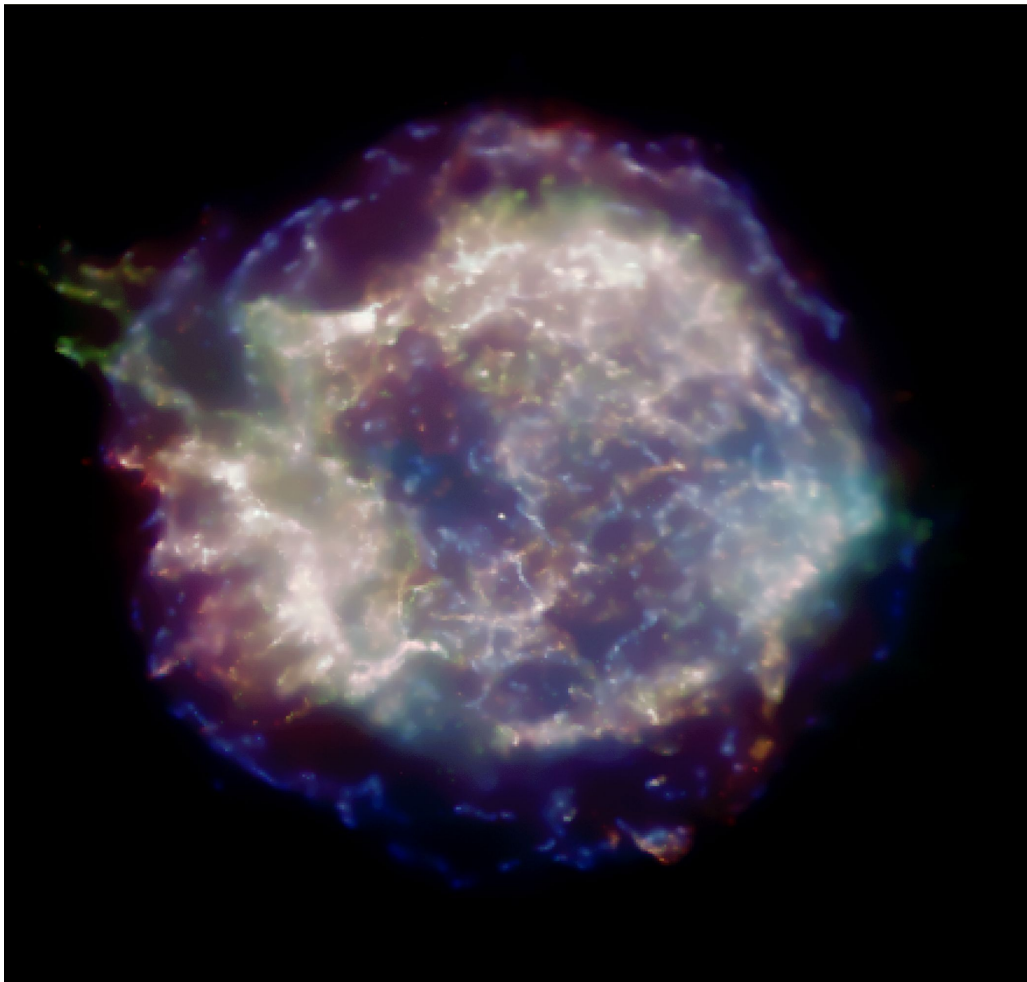
- 1912 descubierto por Victor Hess
- Se expande varias ordenes de magnitud
- Estructuras de rodilla, tobillo y corte GZK
- RC de ultra alta energa.

Energies and rates of the cosmic-ray particles



Rayos Cósmicos Galácticos

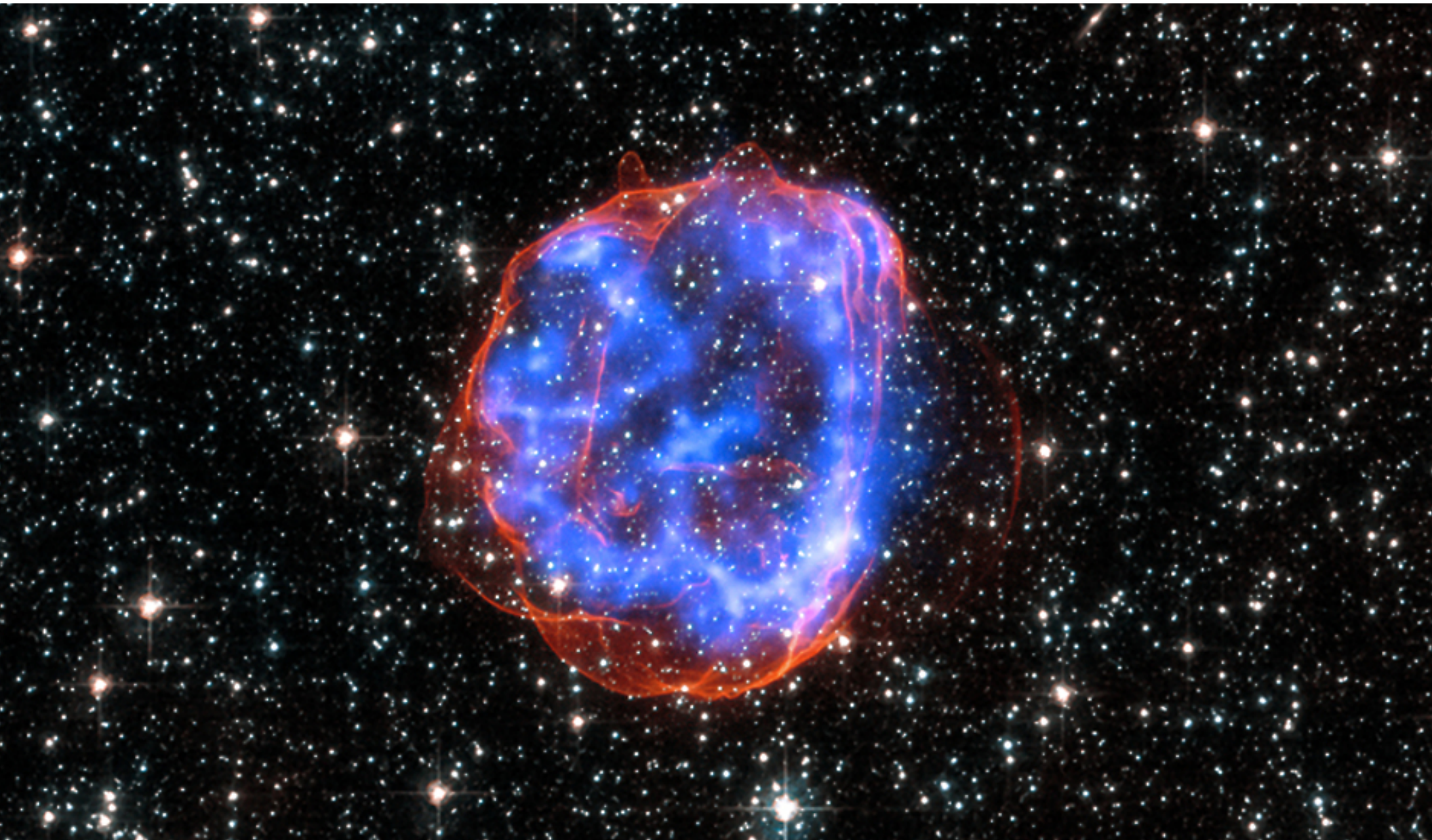
- Baade y Zwicky sugirieron en 1934 que *remanentes de supernovas* podían ser las fuentes de los rayos cósmicos galácticos.



Fritz Zwicky

Cas A, Chandra (NASA)

Chandra SNR 0519-69.0

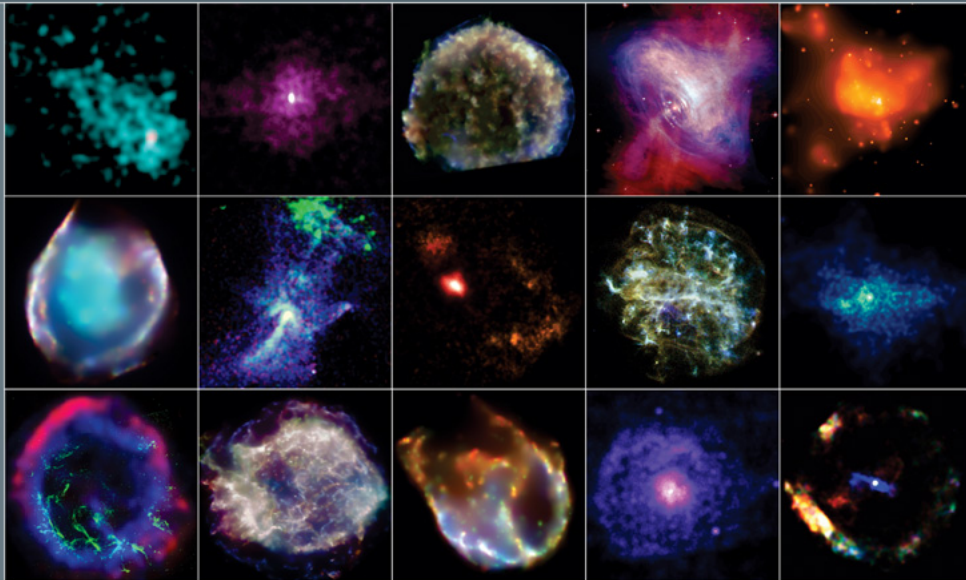


SNR

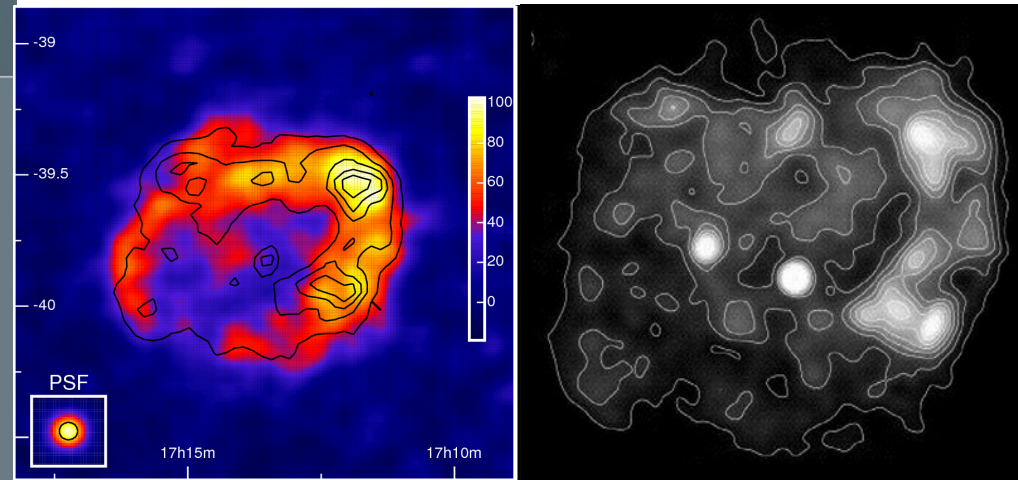
- Estructura que resulta de una explosión de supernova.
- En el centro comúnmente hay un pulsar (hoyo negro)
- El materia que lo forma puede tener velocidades hasta 10% de c .
Velocidades supersónico \rightarrow ondas de choque.
- Extender hasta decenas de parsecs ($\text{pc} = 3.26 \text{ ly}$, $3.09 \times 10^{13} \text{ km}$).
- Aceleran partículas hasta 10^{15} eV .

RXJ 1713.7-3946

SUPERNOVAE



CHANDRA X-RAY OBSERVATORY



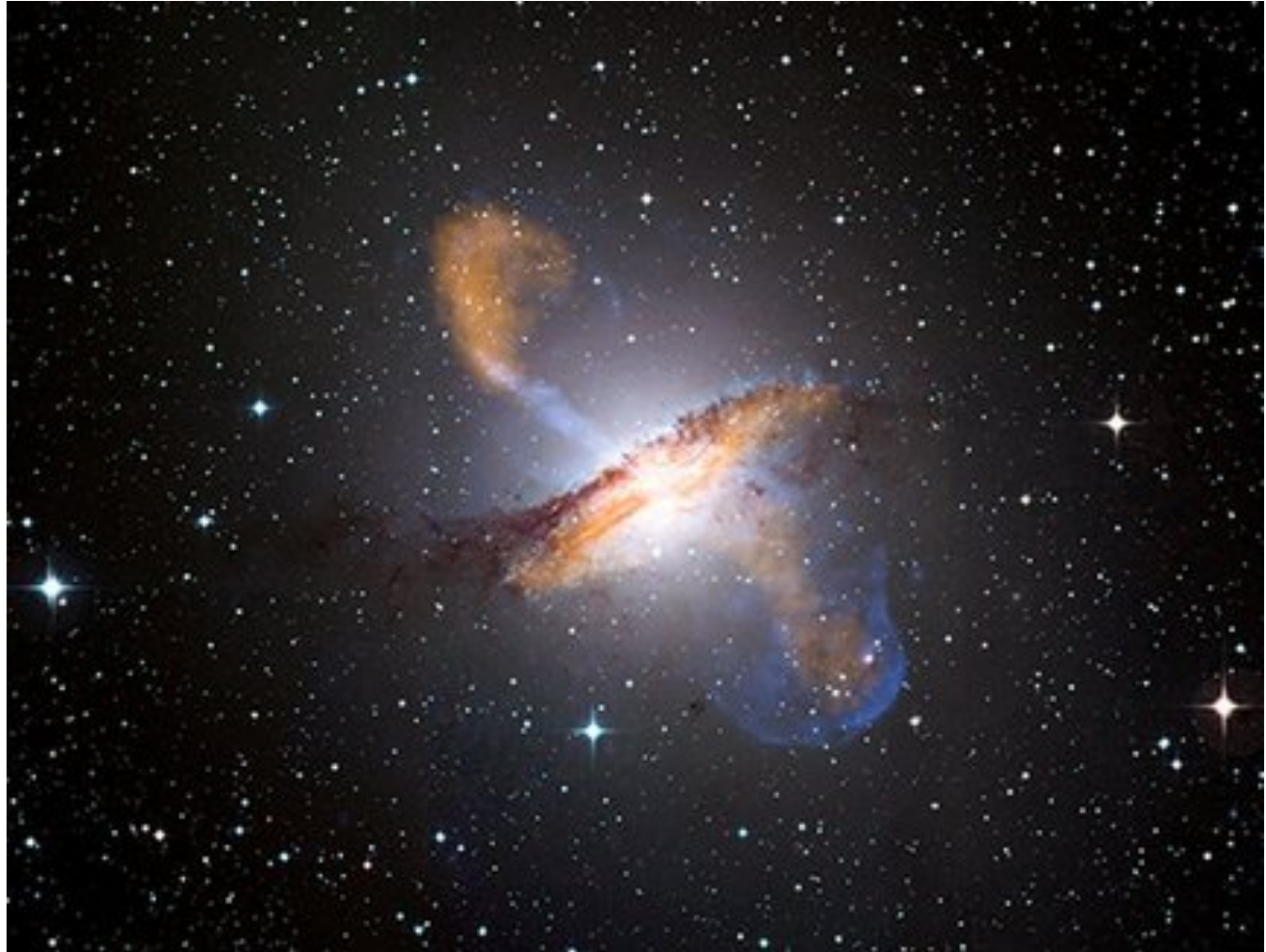
Gammas
HESS + ASCA

y

rayos X
ROSAT

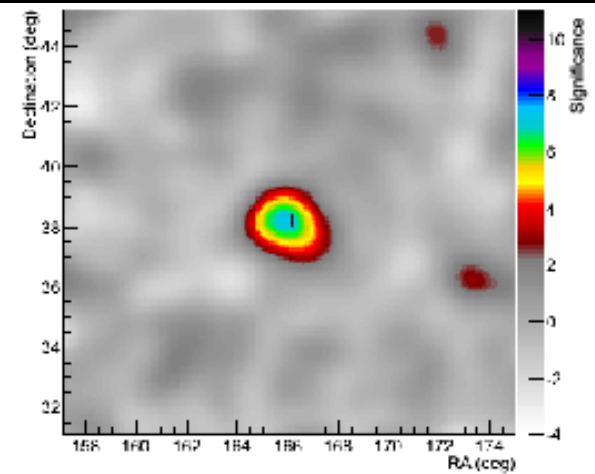
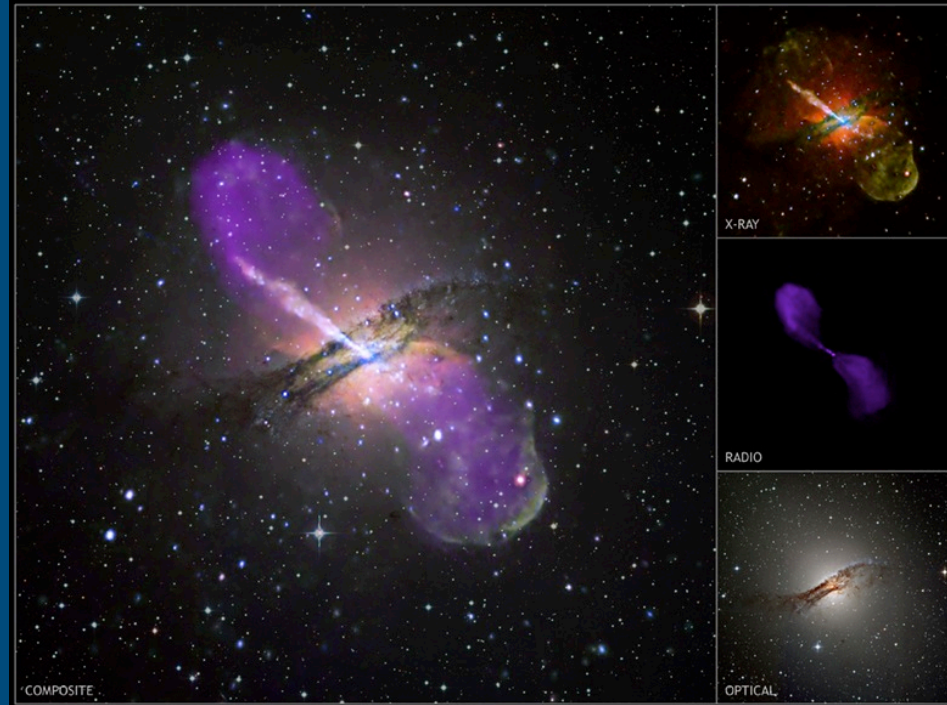
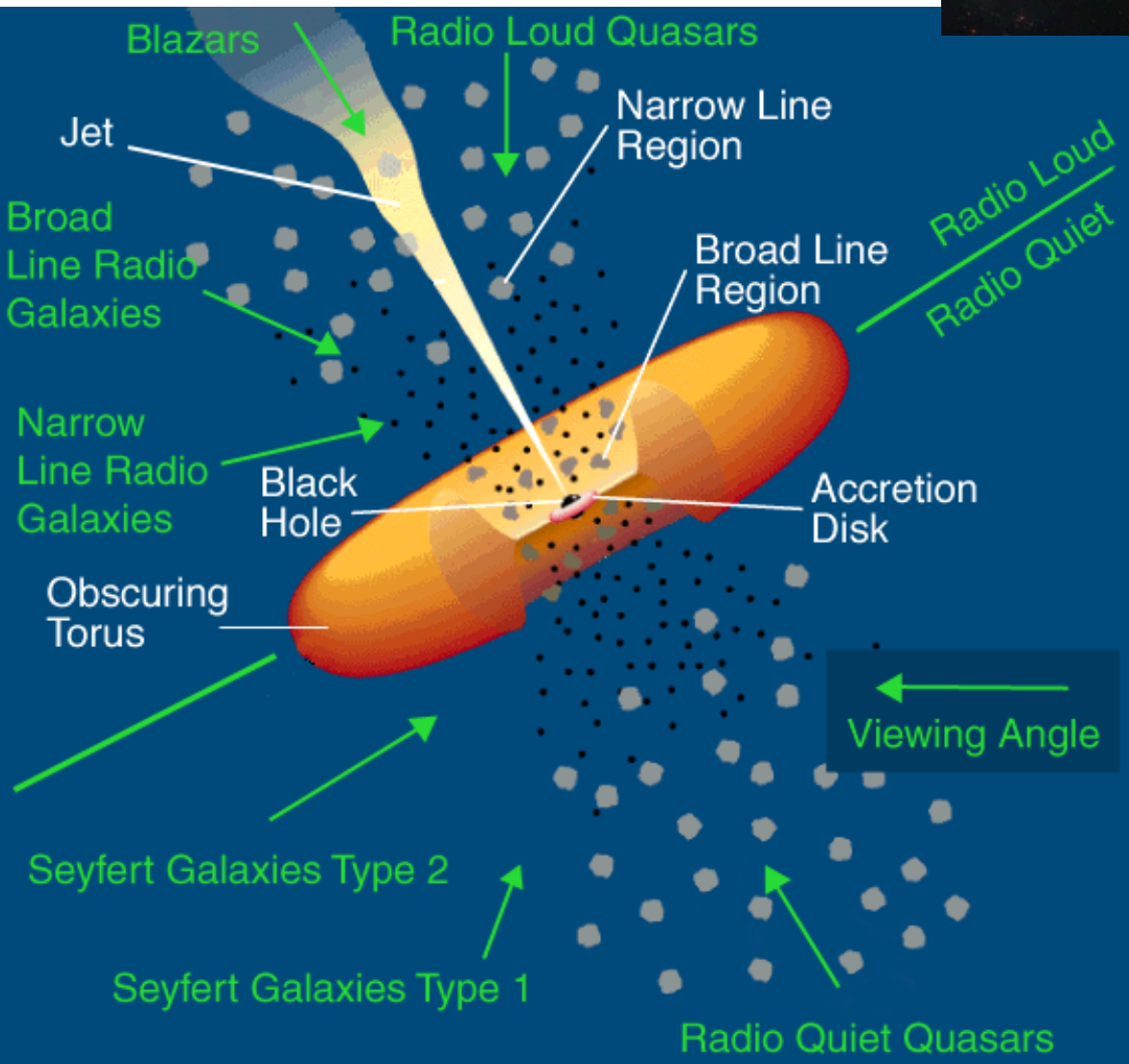
Fuentes Extragalácticas

- *Galaxias con centros activos* (AGN) son probablemente las fuentes de los rayos cósmicos más energéticos.
- los AGN consisten en un hoyo negro súpermasivo, un disco de acreción y dos chorros (jets) de material relativista interaccionando con el medio a medida que se extienden.



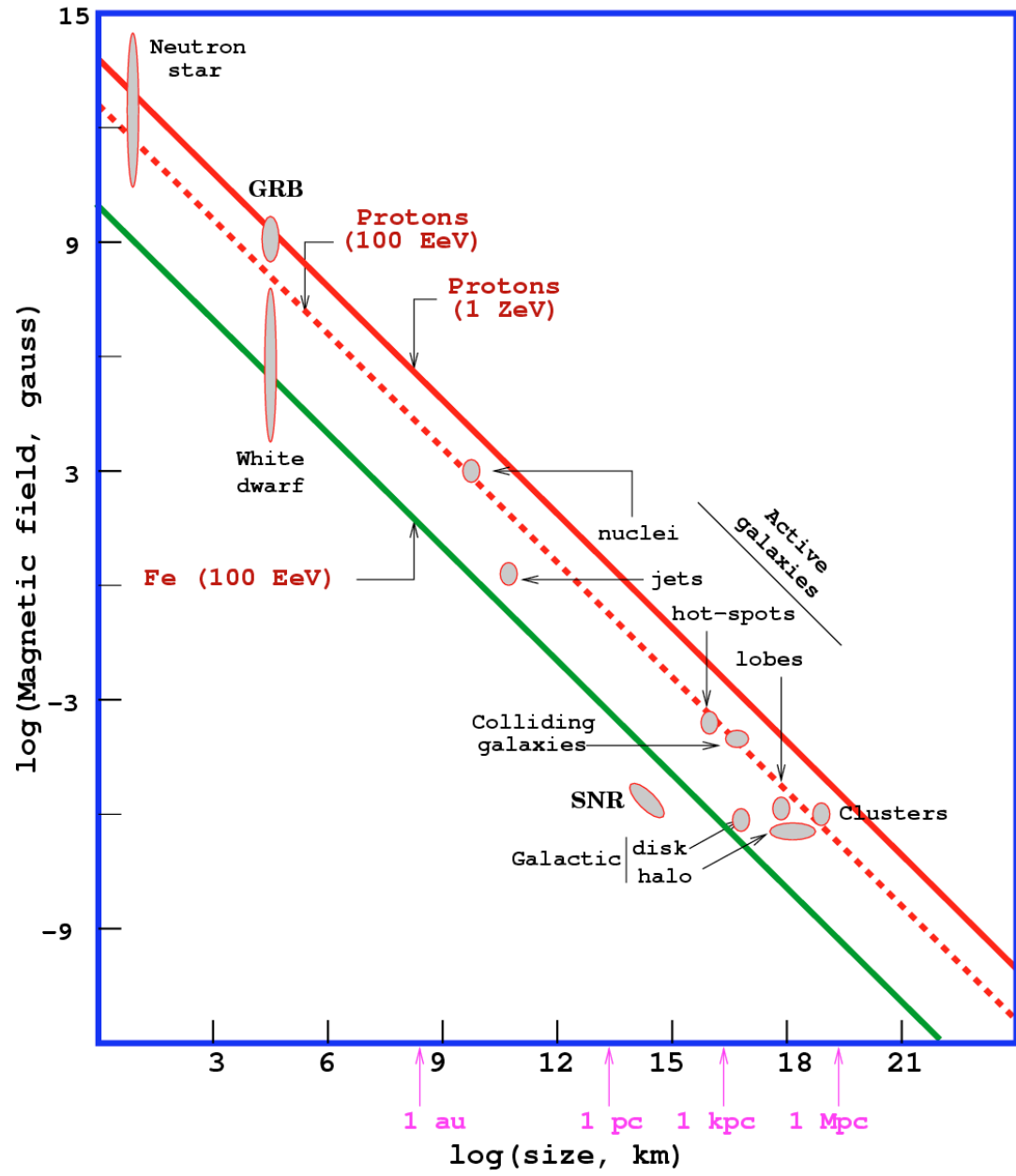
Centaurus A (ESO 2.2 m WFI + APEX + Chandra)

AGNs



Hillas-plot

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

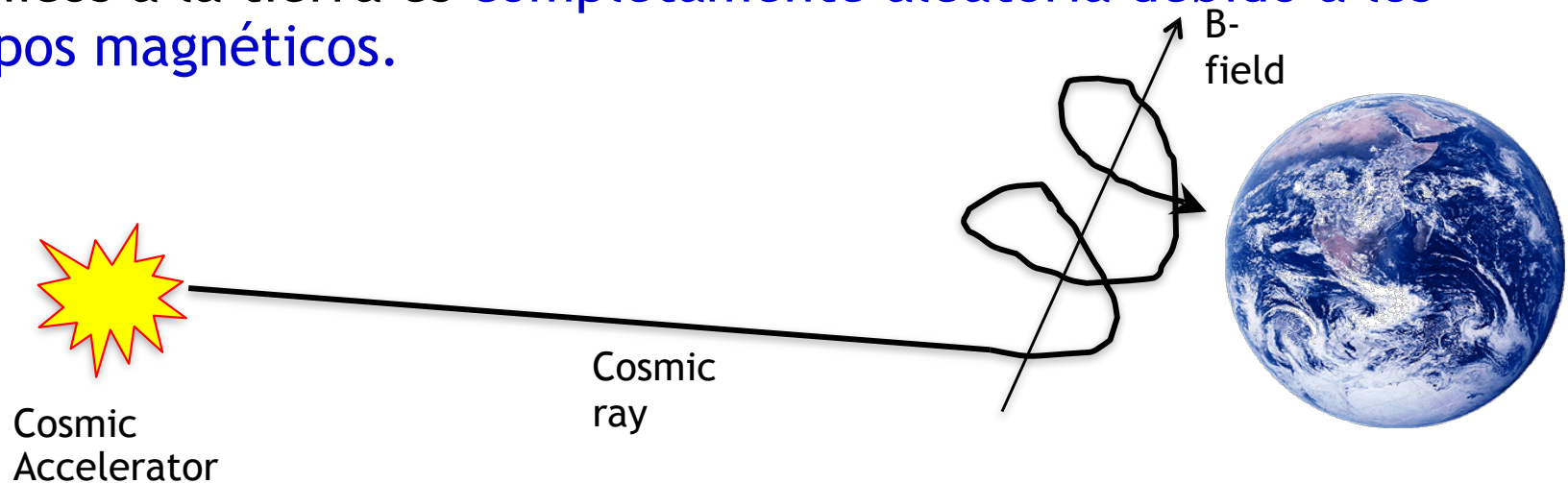


$$E_{\text{max}} \sim ZBL \quad (\text{Fermi})$$

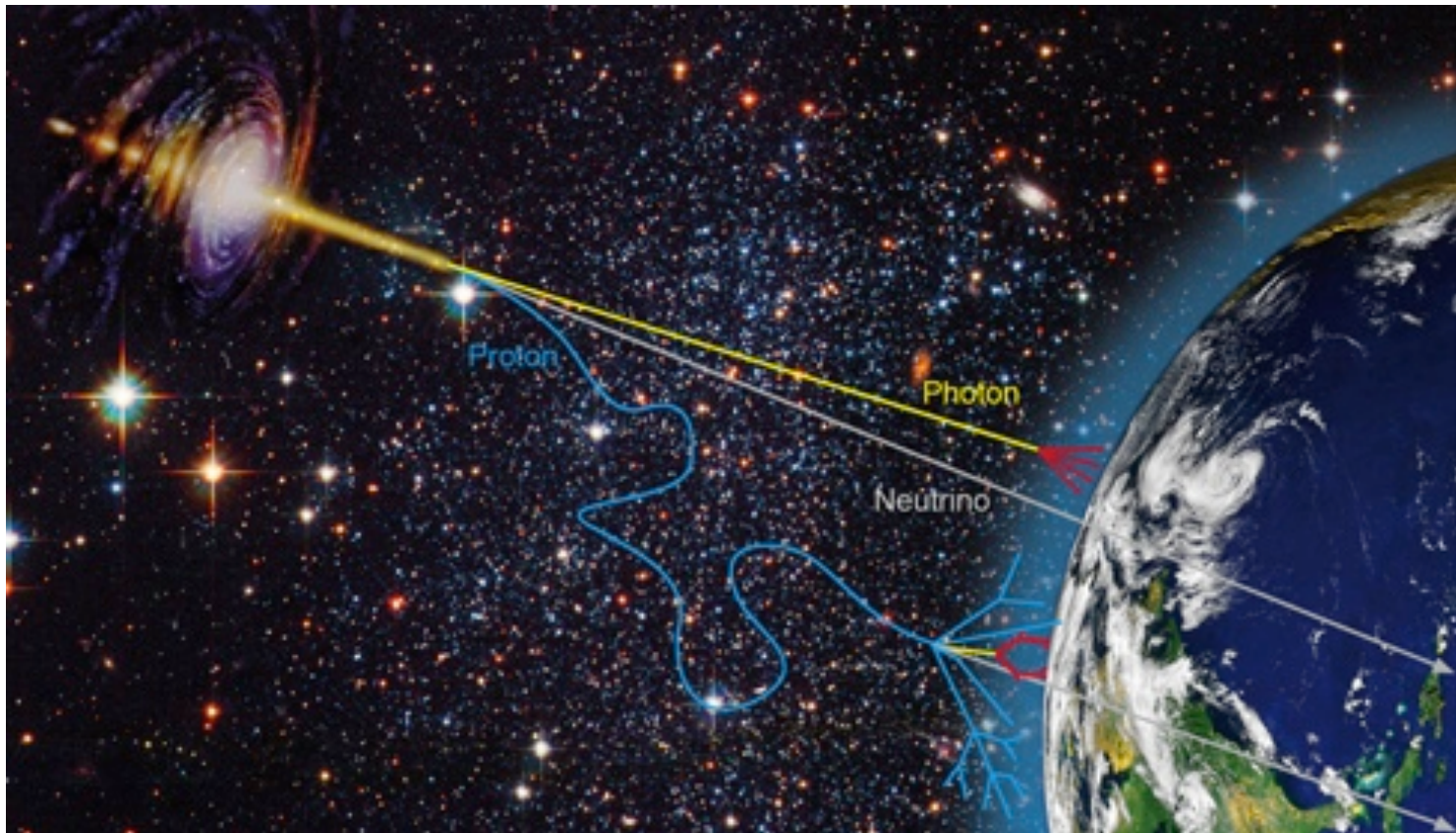
$$E_{\text{max}} \sim ZBL \Gamma \quad (\text{Ultra-relativistic shocks-GRB})$$

¿Astronomía de Rayos Cósmicos?

- Ninguna fuente de rayos cósmicos ha sido descubierta hasta ahora con rayos cósmicos.
- El problema: los rayos cósmicos son **cargados**, y el universo está lleno de **campos magnéticos**.
- Hasta 10^{19} eV (*por lo menos*) la dirección de llegada de los rayos cósmicos a la tierra es **completamente aleatoria debido a los campos magnéticos**.

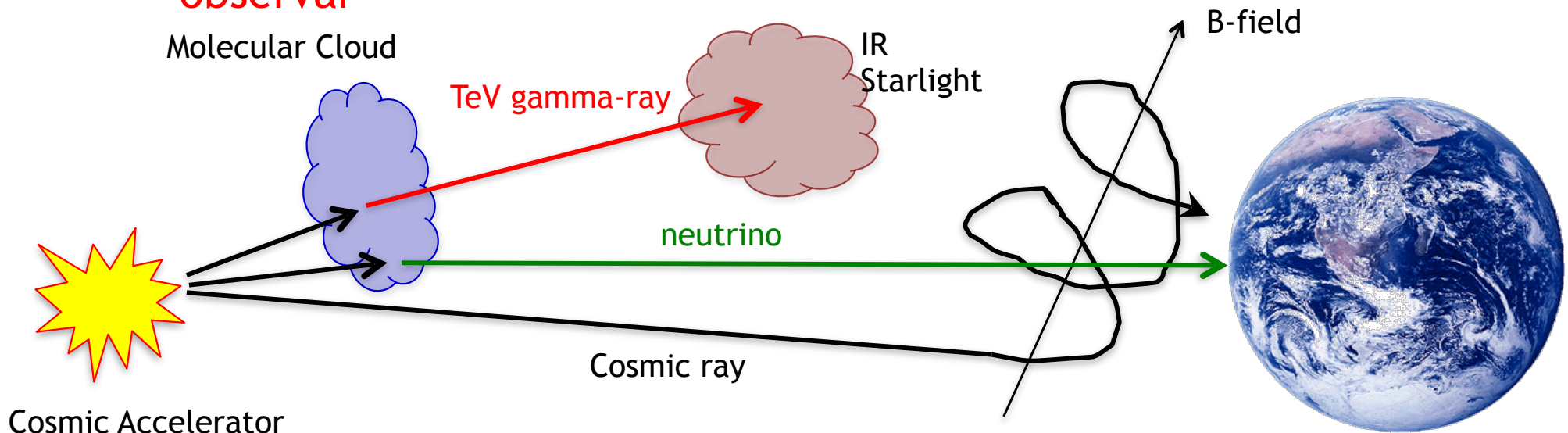


- Los rayos cósmicos *interaccionan* con su entorno
- Las interacciones producen entre otros *productos de decaimiento* :
 - **Rayos Gamma** **y** **Neutrinos**
- Ambos son neutros y nos llegan en línea recta apuntando a la fuente donde se produjeron!
- La energía que se escapa de las regiones más violentas se reparte en *rayos cósmicos, rayos gamma* y *neutrinos*.



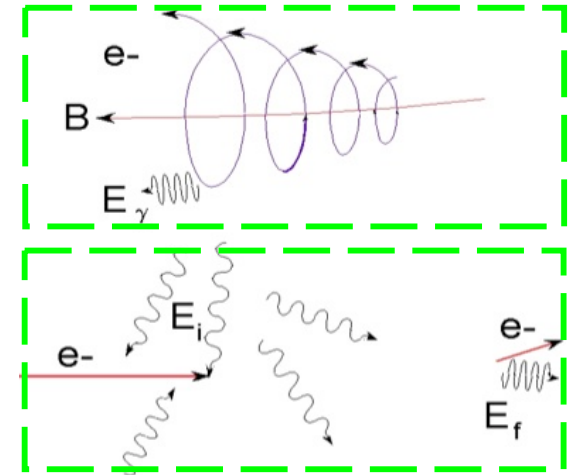
Astrofísica con Multi-Mensajeros

- Cada canal tiene fortalezas y debilidades:
 - Rayos cósmicos: ✓ mayor flujo, ✗ deflectados por campos magnéticos
 - Rayos Gamma-: ✓ no deflectados, ✗ atenuados, ✗ origen ambiguo
 - Neutrinos: ✓ no deflectados, ✓ no atenuados, ✗ difíciles de observar

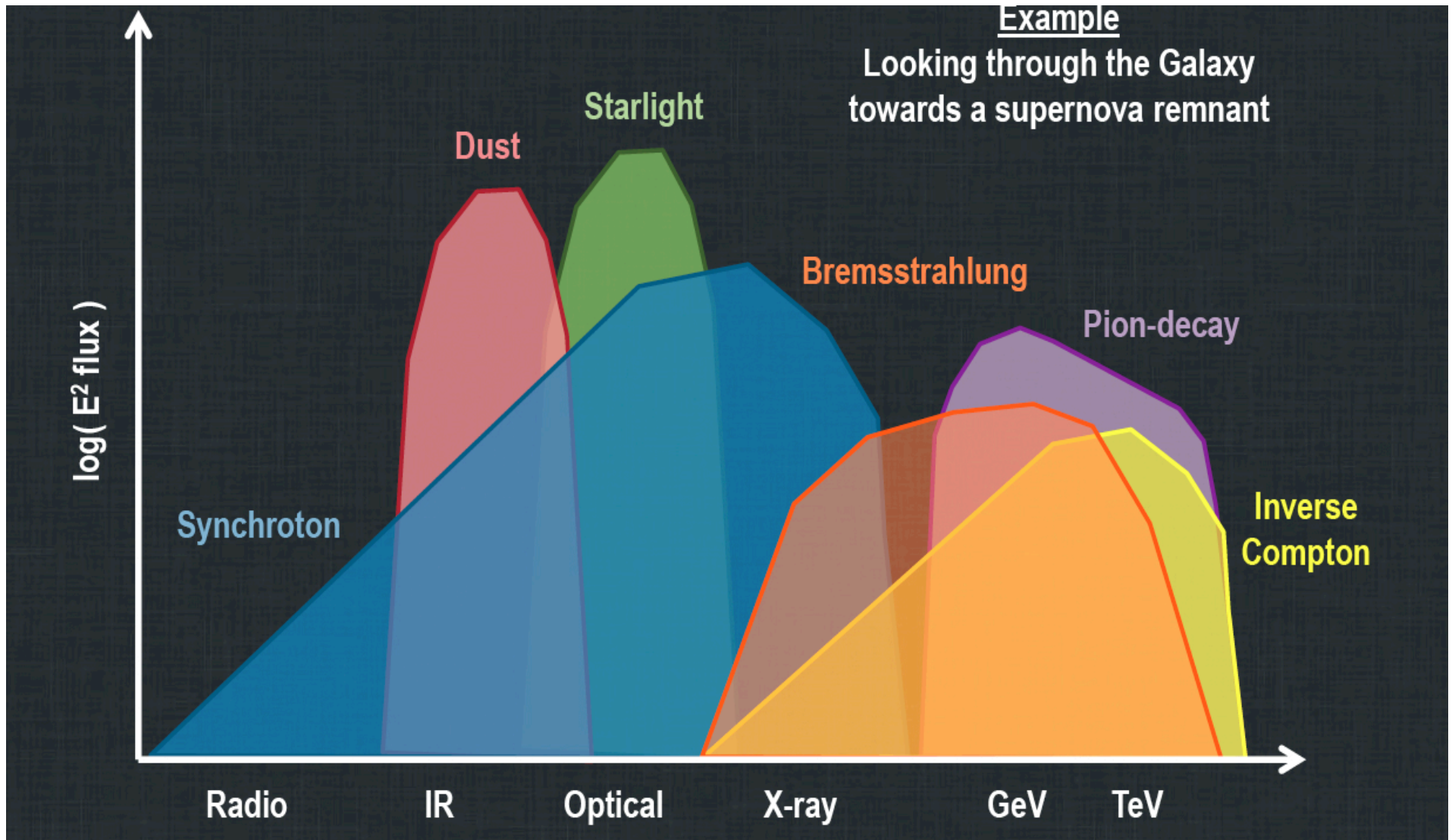


Otras fuentes de Rayos Gamma

- por **electrones de alta energía**
 - sincrotrón
 - Compton inverso
 - Bremsstrahlung
- por **protones de alta energía**
 - $p+p \rightarrow \pi^0 + \dots$ $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- por **aniquilación de materia-antimateria**
 - $e^-+e^+ \rightarrow \gamma\gamma$
 - $p+\text{anti-}p \rightarrow \pi^0 + \dots$
- por **aniquilación de materia oscura**
 - $X+X \rightarrow$ partículas del Modelo Estándar $\rightarrow \gamma\gamma$

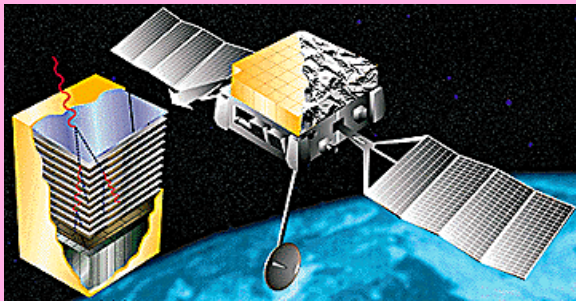


Fotones no térmicos



Observatorios de rayos gamma

Amplio Campo de visión,
Operación Continua



Fermi
AGILE
EGRET

Sensibles a las mas altas
energías



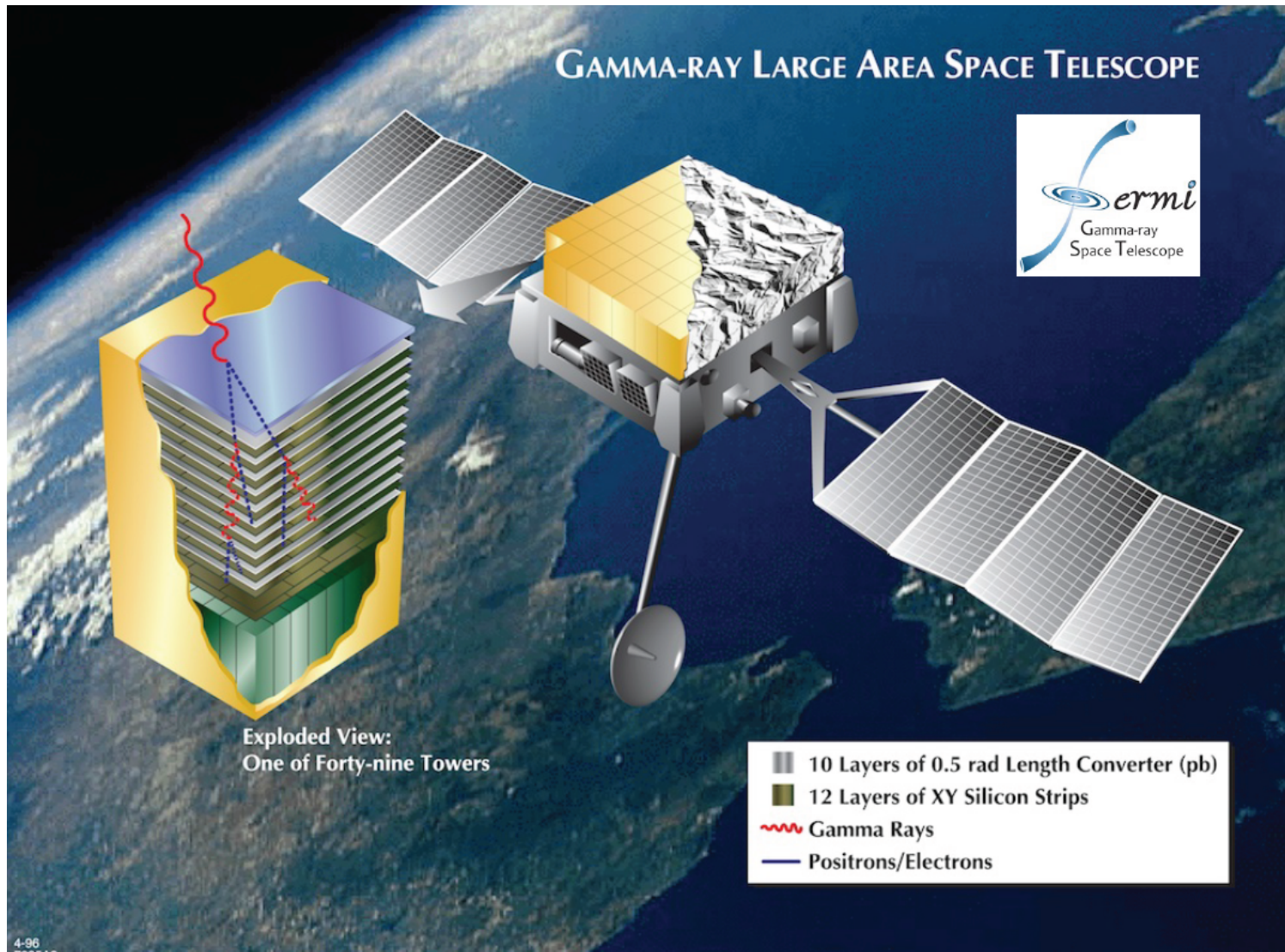
HAWC – Sierra Negra

ARGO
Milagro
Tibet AS γ



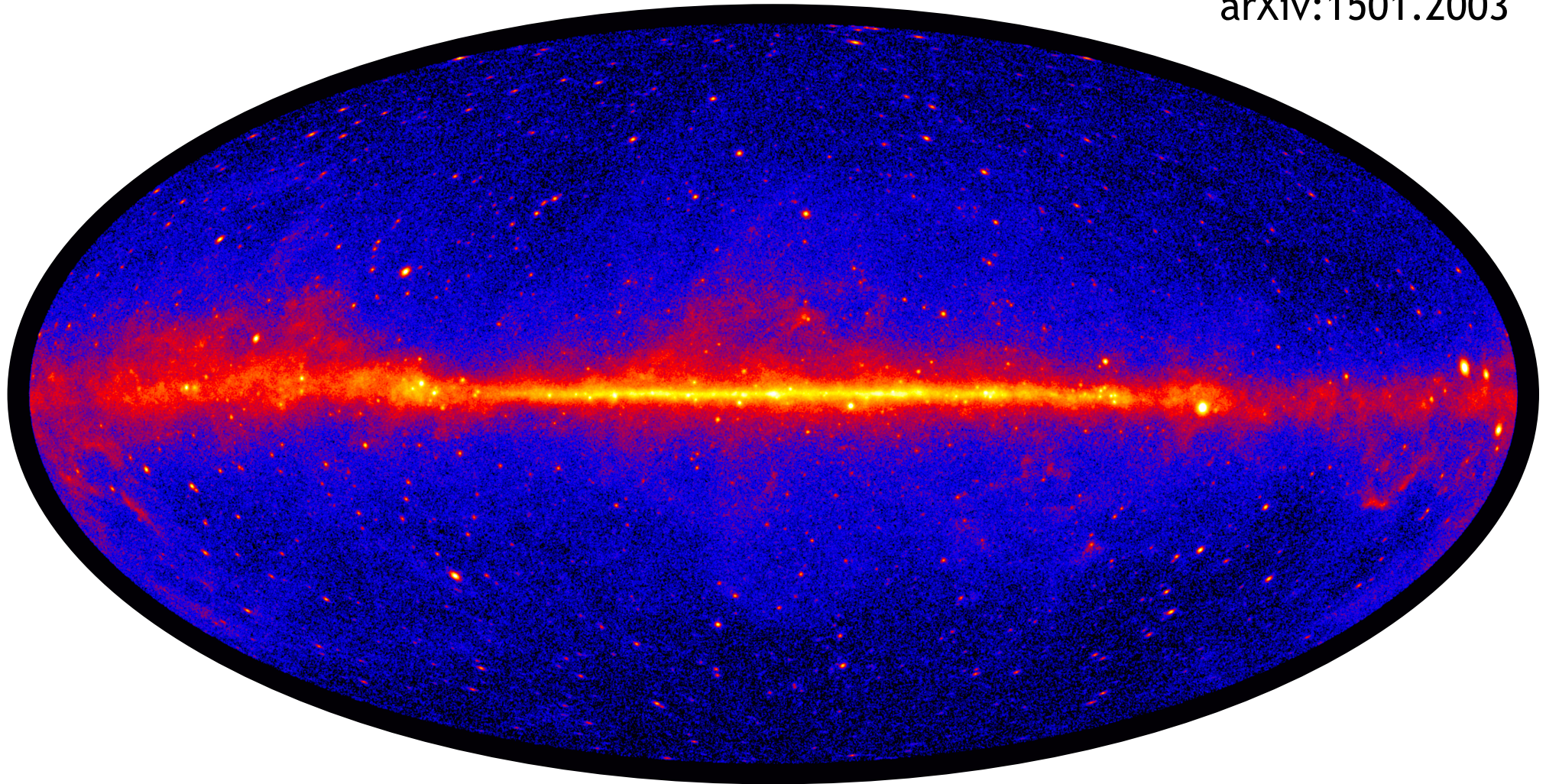
CTA
VERITAS
HESS
MAGIC
M@TE

Observatorio FERMI de rayos gamma



El Universo en Rayos Gamma FERMI

arXiv:1501.2003



Catálogo de 4 años de observaciones de FERMI >10 MeV

arXiv:1501.2003

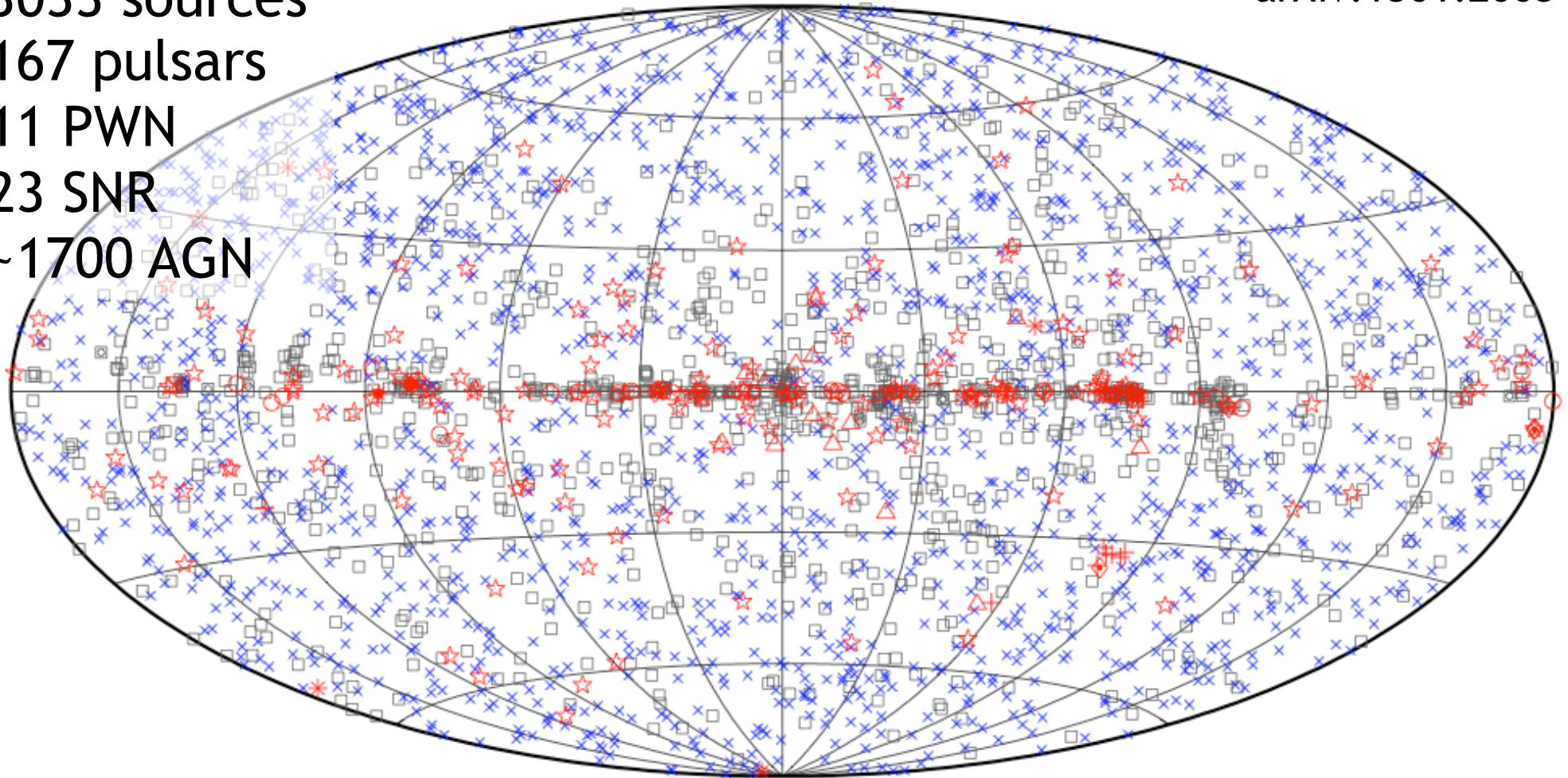
3033 sources

167 pulsars

11 PWN

23 SNR

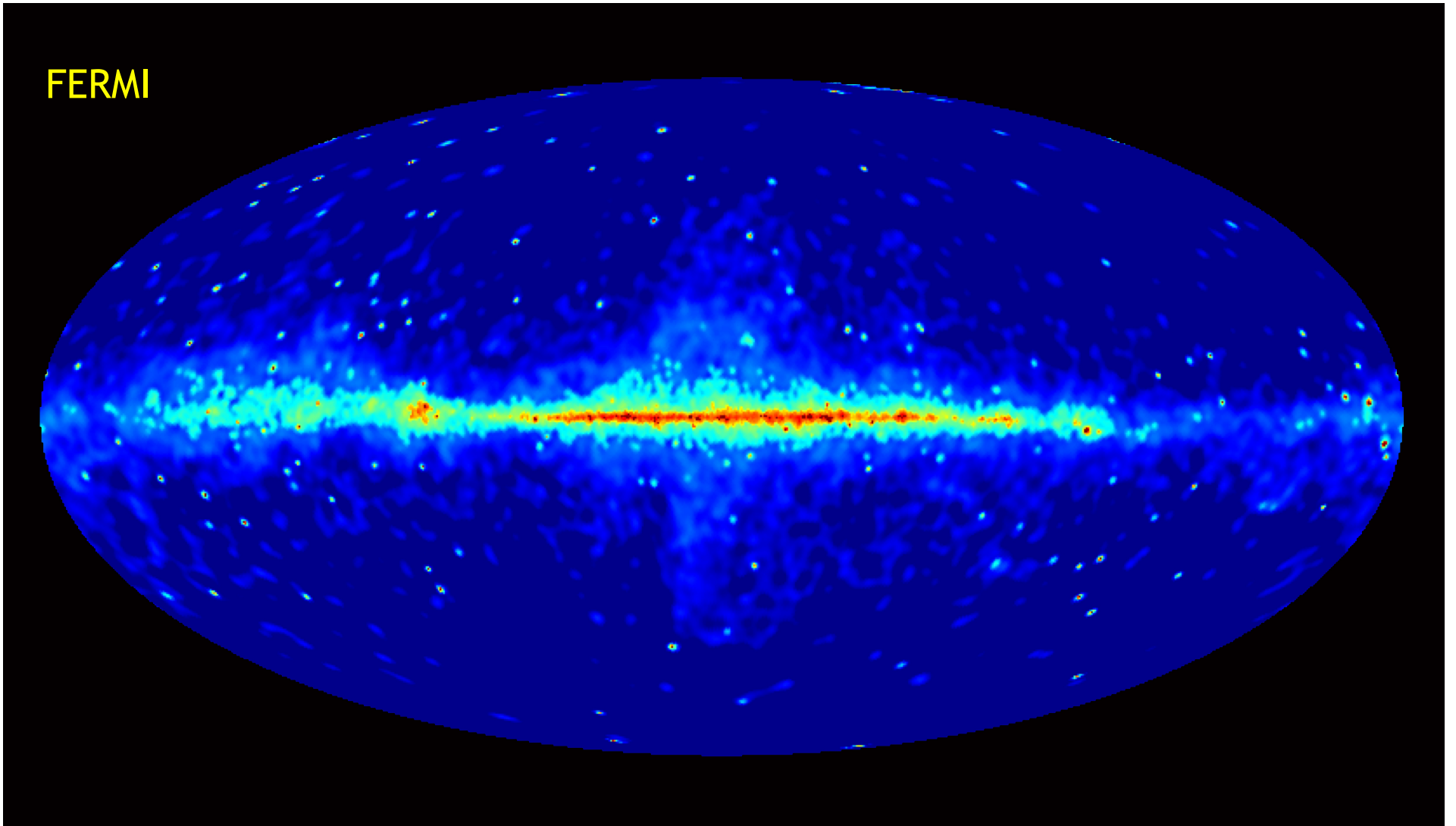
~1700 AGN



□ No association	⊠ Possible association with SNR or PWN	× AGN
☆ Pulsar	△ Globular cluster	* Starburst Galaxy
⊠ Binary	+ Galaxy	○ SNR
★ Star-forming region		◇ PWN
		★ Nova

Rayos Gamma Energías > 100 GeV

FERMI



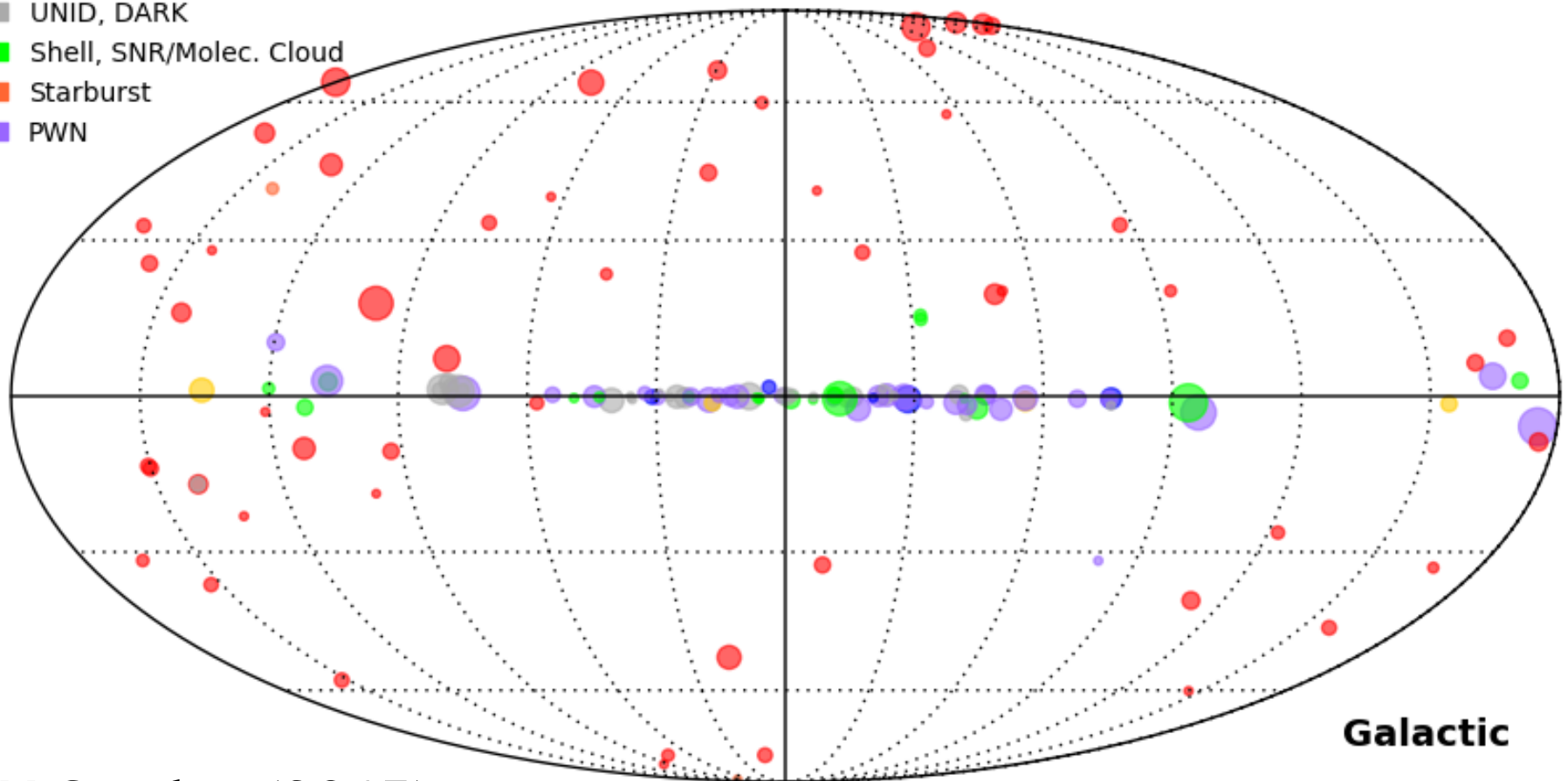
¿Por qué estudiar el Universo con fotones de TeV?

- Rayos gamma de TeV son los de mas alta energía que se han detectado hasta ahora - es la *frontera de la energía* en astronomía!
- Fuentes de TeV son los procesos mas energéticos del universo radiando mas de 15 órdenes de magnitud en energía, del radio a TeV!
- Abrir una nueva ventana de observación en astronomía que lleva a *grandes descubrimientos imprevistos*
- Entre las posibilidades :
 - la ventana a energías de TeV lleve a la identificación directa de las *fuentes de rayos cósmicos* resolviendo un misterio de más de 100 años...!
 - descubrir regiones de *decaimiento o aniquilación de materia oscura*.

Universo en TeV (10^{12} eV)

- Star Forming Region, Cat. Var., Globular Cluster, Massive Star Cluster
- HBL, IBL, FSRQ, FRI, AGN (unknown type), LBL
- Gamma BIN, XRB, PSR
- UNID, DARK
- Shell, SNR/Molec. Cloud
- Starburst
- PWN

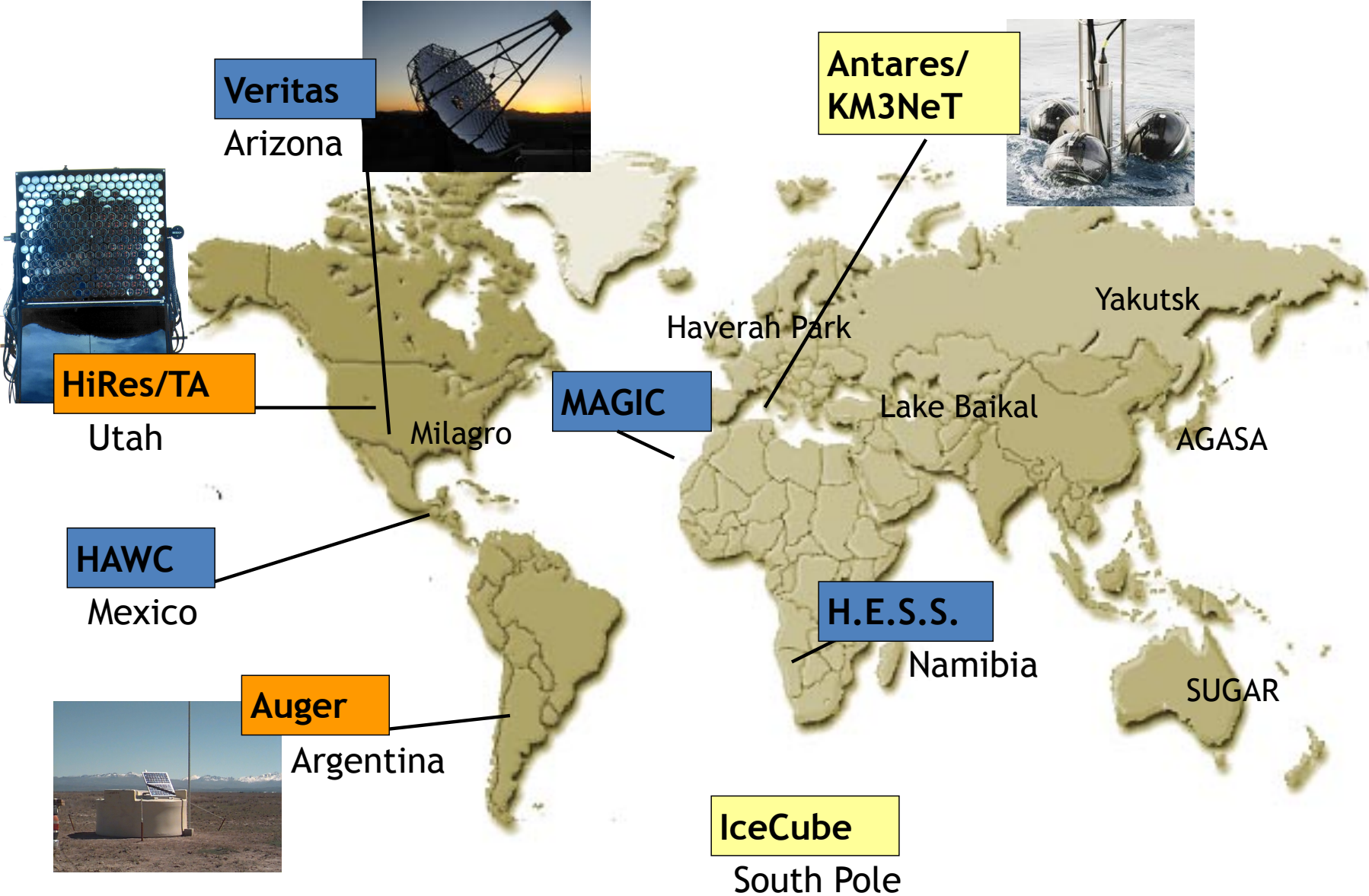
<http://tevcat.uchicago.edu>



TeV Catalog (2015)

- ~176 fuentes (>100 Galacticas).
- No es un mapa completo - catalogo fuertemente sesgado.

Un esfuerzo global





**High
Cherenkov**

Altitude

Water

un detector de rayos gamma y rayos cósmicos con energías de 100 GeV a 100 TeV
situado en las faldas del Volcan Sierra Negra, Puebla
a 4,100 msnm y a (19° N, 97° W)

HAWC (High Altitud Water Cherenkov)
Agosto 2013 .- 30/300 detectores operar
Agosto 2014.- 1/3 operación científica
Marzo 2015.- Inaugurado



HAWC

- Es un proyecto binacional entre E. U. A. y México
- Observatorio de rayos gamma de muy alta energía:
100 GeV - 100 TeV
- Capaz de escudriñar 2/3 del cielo
- Ciclo de operación > 97%
- Ideal para la detección de fuentes transitorias, extensas y de espectro duro en TeVs.

Instituciones Participantes de México:

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP),
Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV--IPN),
Centro de Investigación en Computación del Instituto Politécnico Nacional (CIC-- IPN),
Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE),
Universidad Autónoma de Chiapas,
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo,
Universidad de Guadalajara (U de G),
Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH),
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto de Astronomía (IA-UNAM), Instituto de Ciencias Nucleares (ICN-UNAM), Instituto de Física (IF-UNAM), Instituto de Geofísica (IGeof-UNAM)
Universidad Politécnica de Pachuca (UPP).



Instituciones Participantes de Estados Unidos de Norteamérica:

Colorado State University,
George Mason University,
Georgia Institute of Technology,
Los Alamos National Laboratory,
Michigan State University,
Michigan Technological University,
NASA/Goddard Space Flight Center,
Ohio State University at Lima,
Pennsylvania State University,
University of California, Irvine,
University of California, Santa Cruz,
University of Maryland,
University of New Hampshire,
University of New Mexico, University of Utah,
University of Wisconsin -- Madison





HAWC Collaboration Meeting
UNAM, México, 6-10 January, 2016



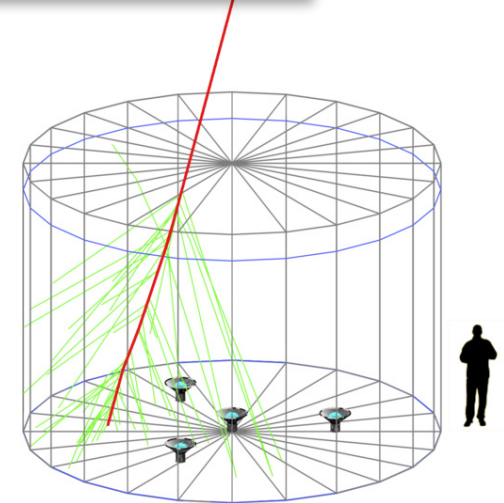
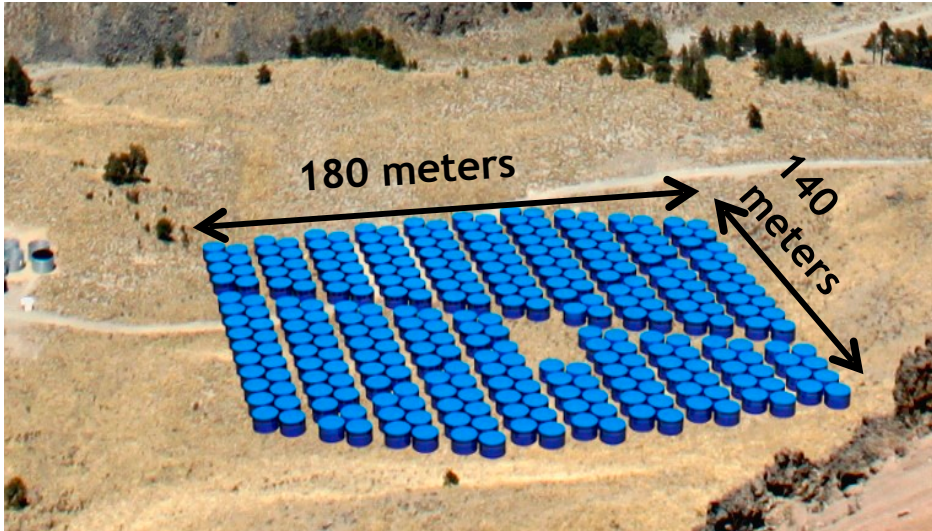


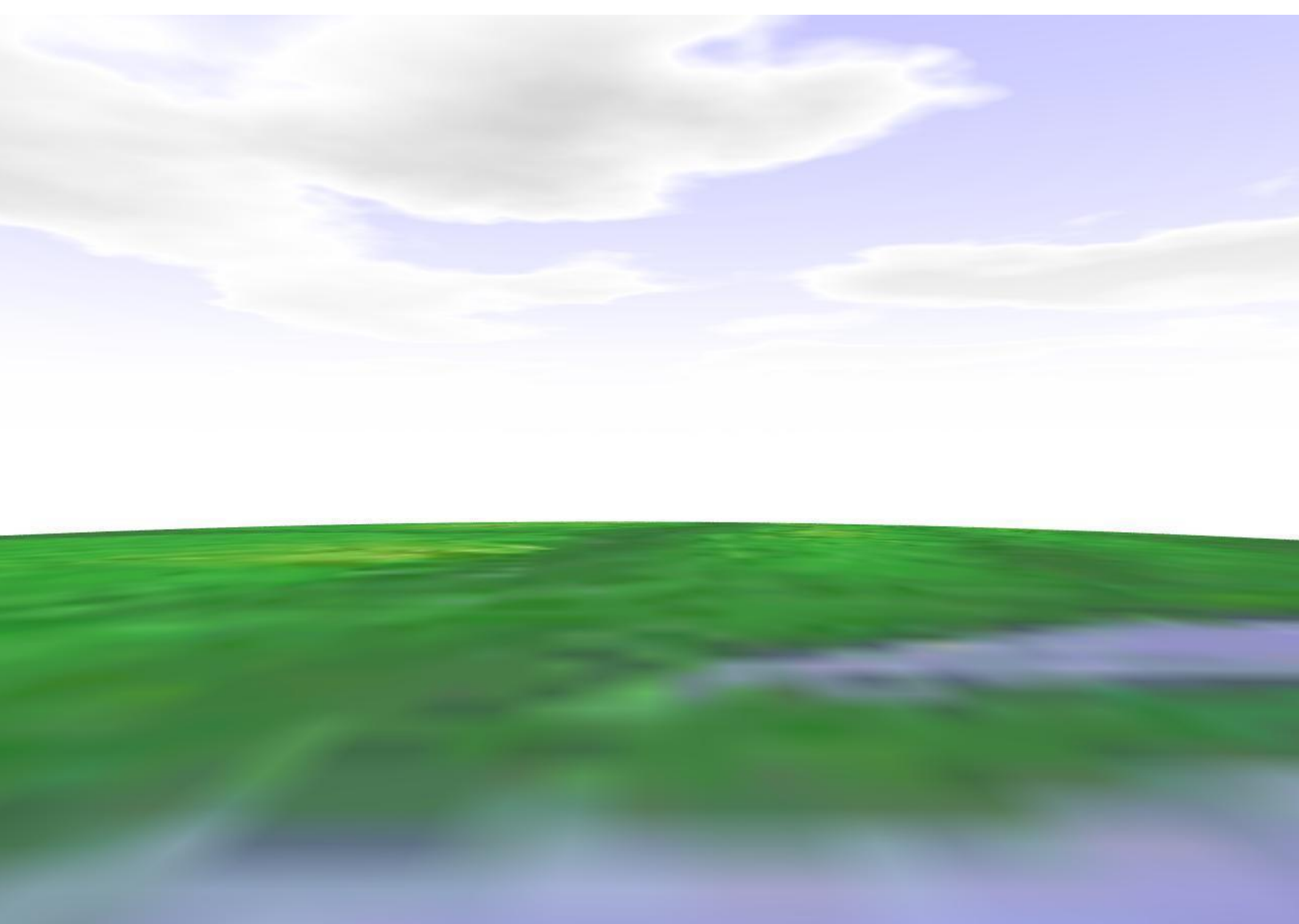
Gran Telescopio
Milimétrico

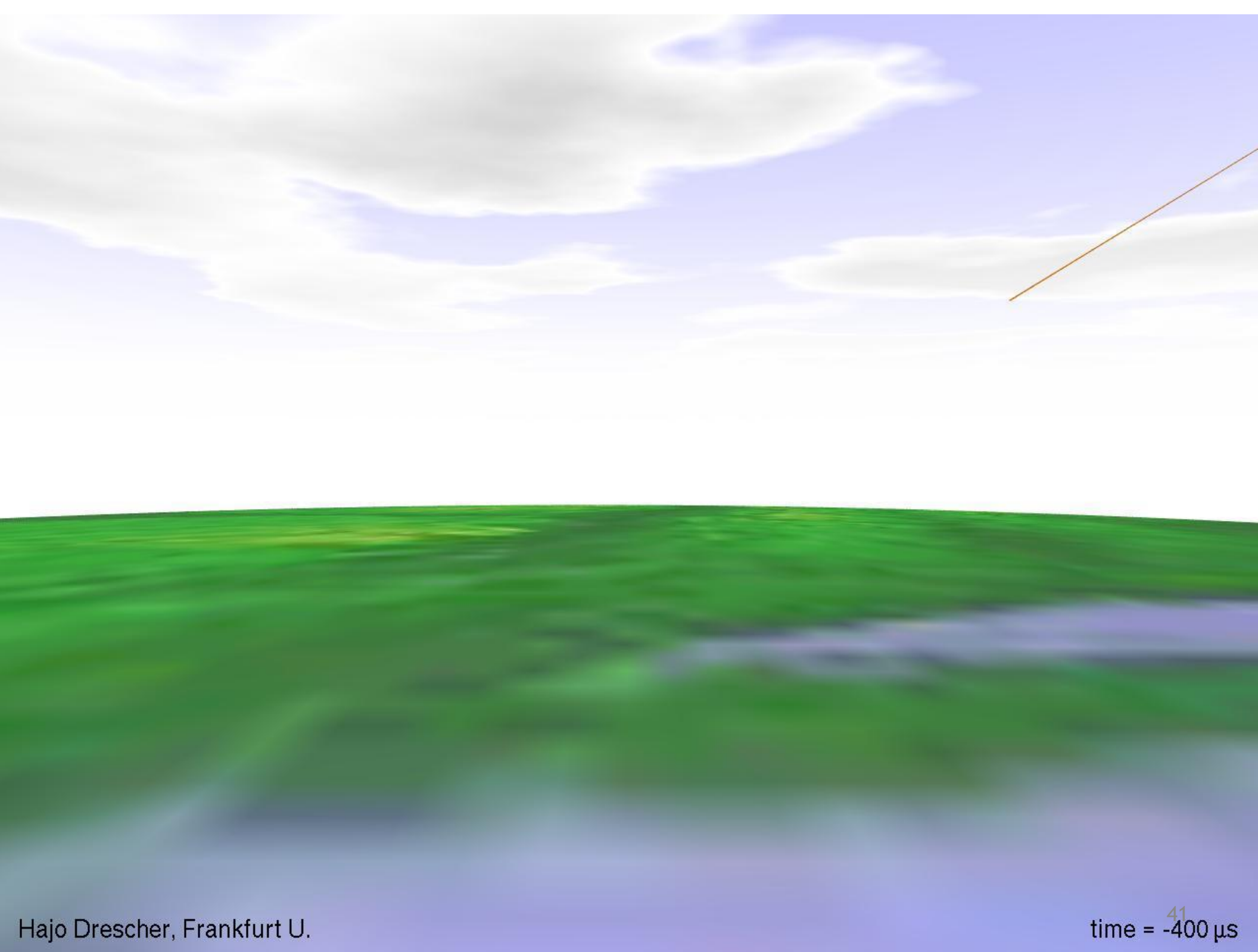
Parque Nacional
Pico de Orizaba.

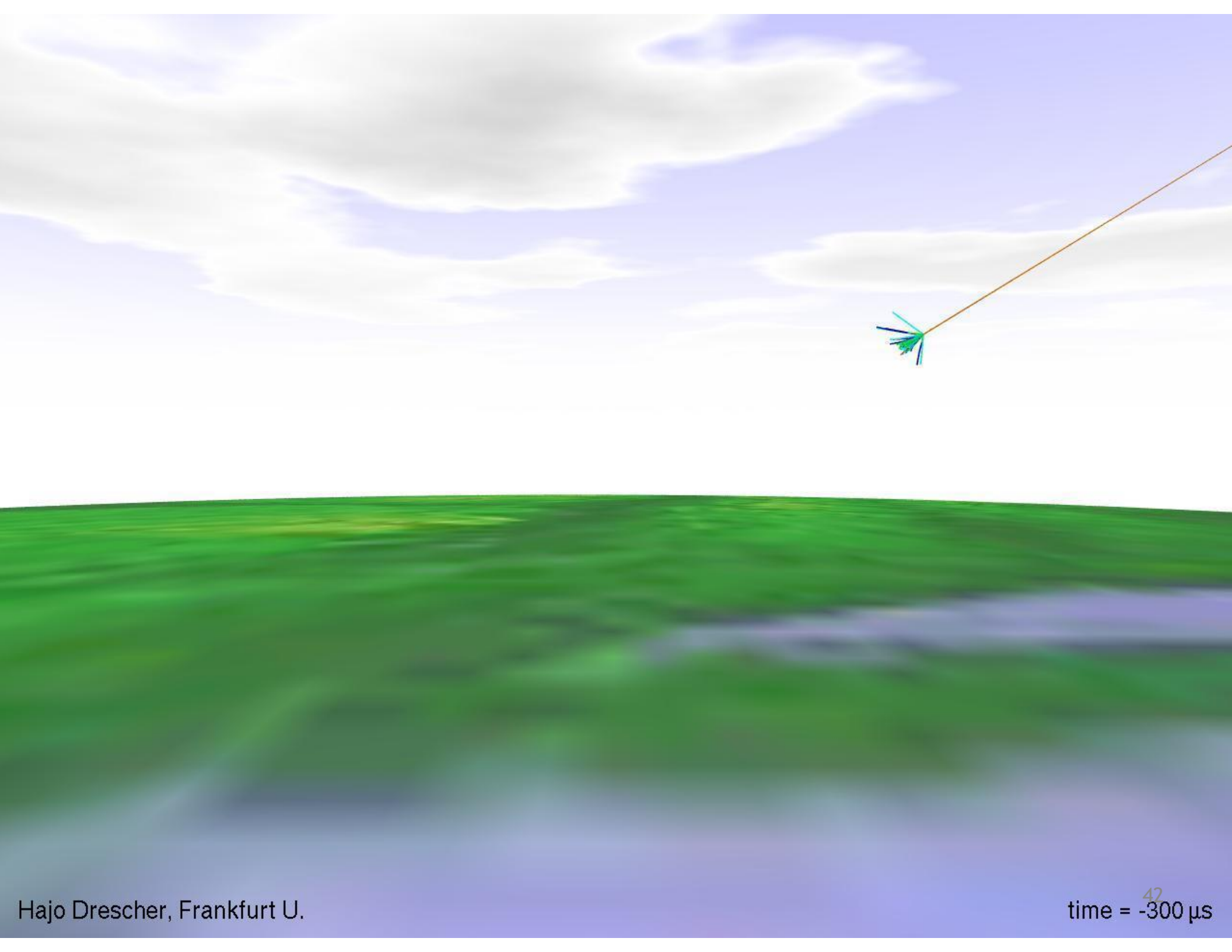


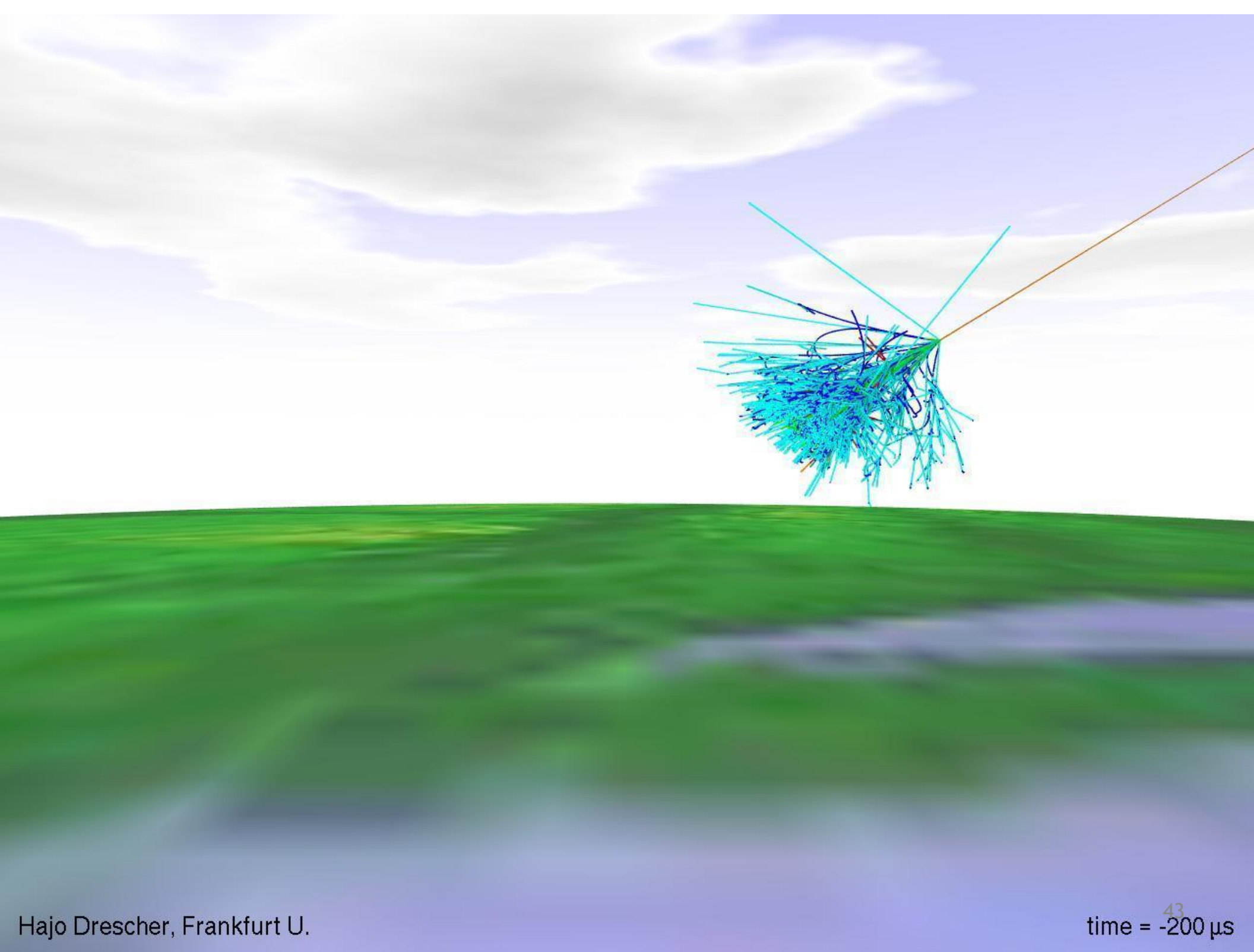
- Consiste en un arreglo de 300 módulos o detectores de agua Cherenkov, de 7.3 m de diámetro y 4.5 m de altura de agua (6.5 m de altura total del detector). Cada módulo con 4 fotomultiplicadores.

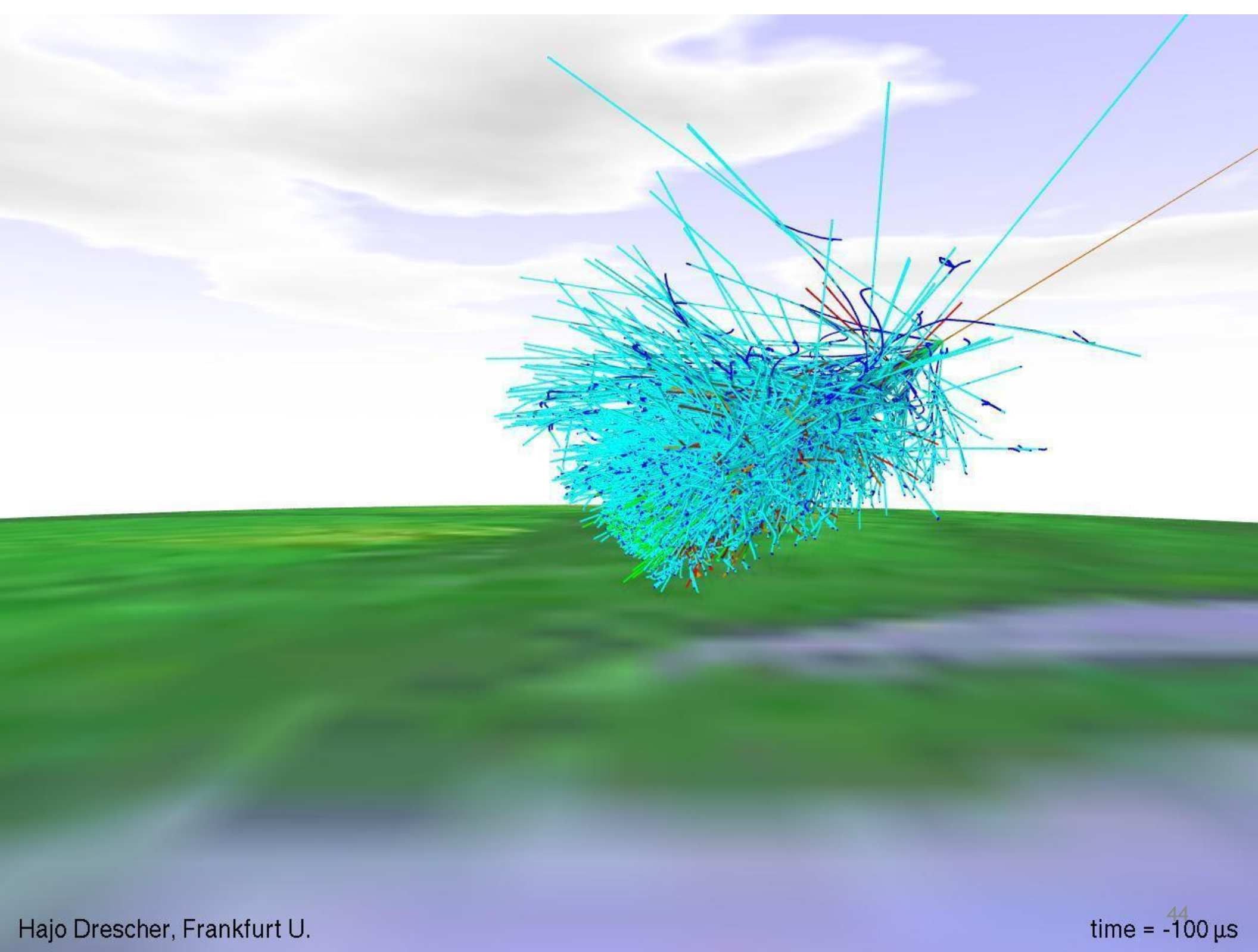


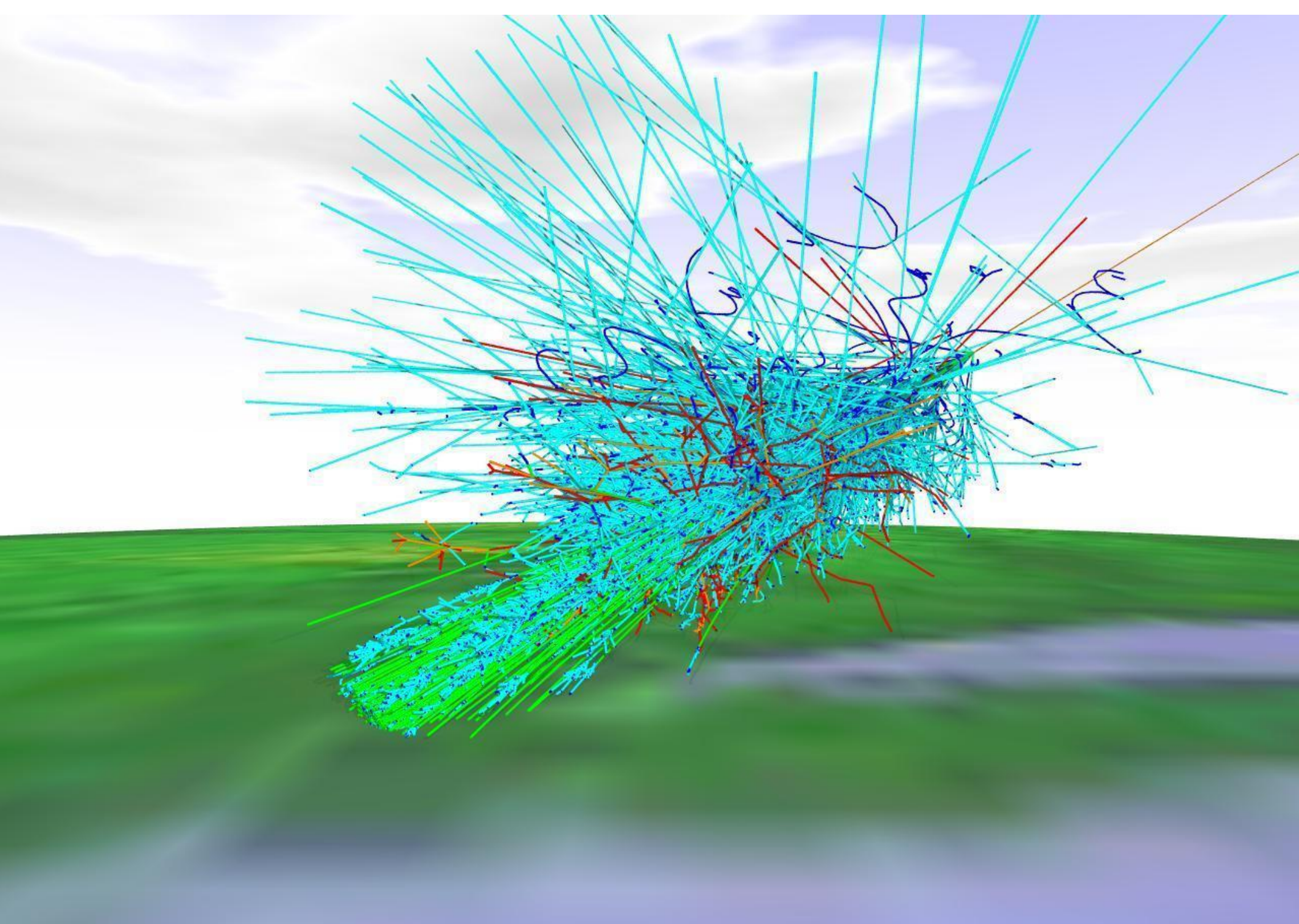


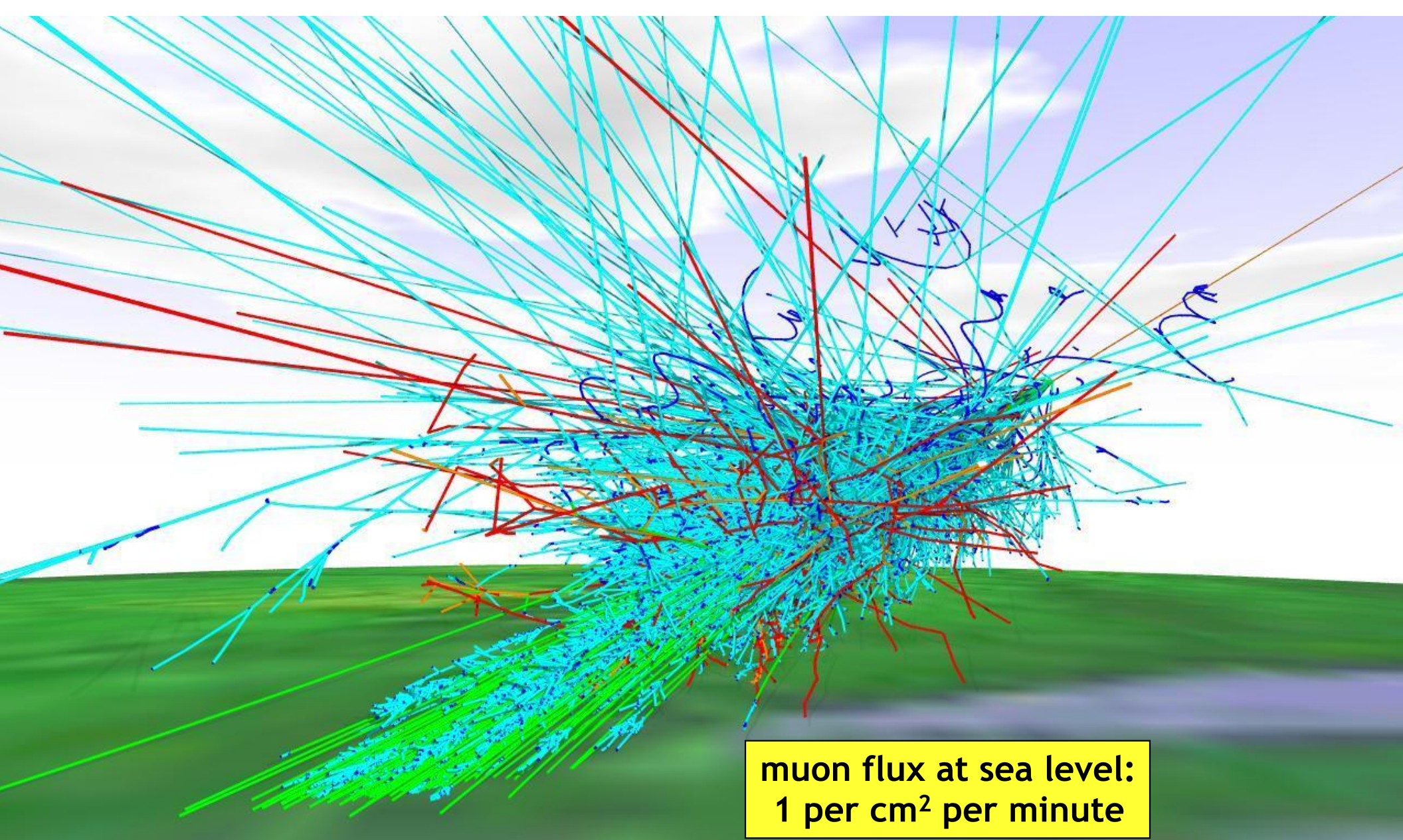






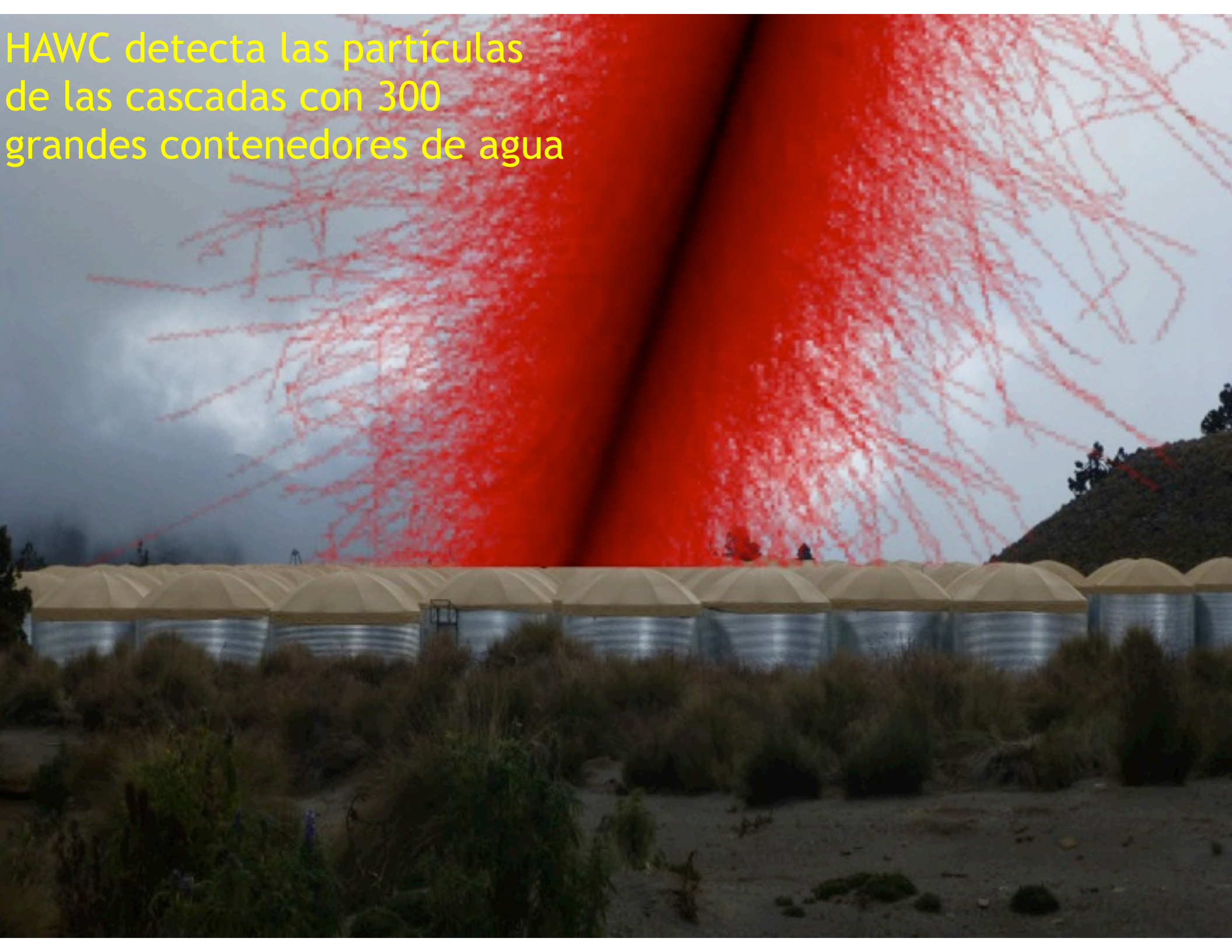




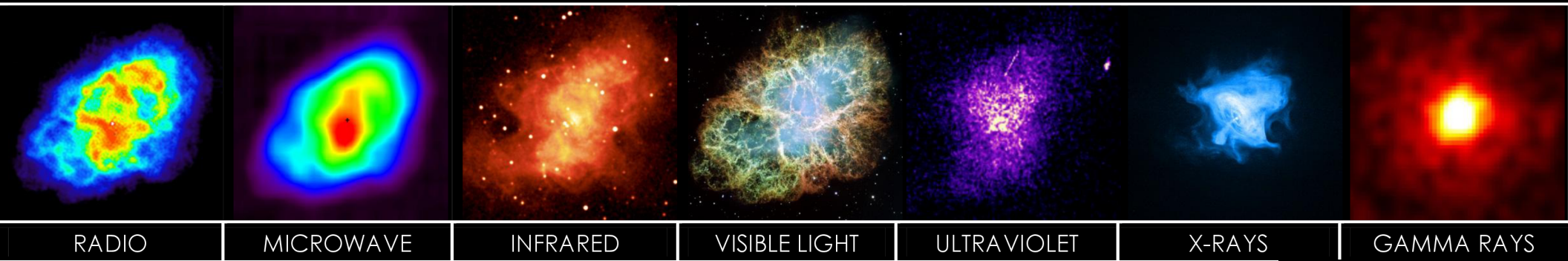


**muon flux at sea level:
1 per cm² per minute**

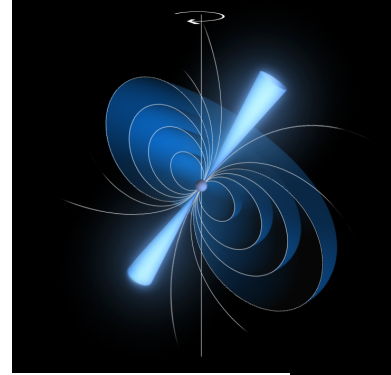
HAWC detecta las partículas
de las cascadas con 300
grandes contenedores de agua



CRAB NEBULA



Crab - pulsar (30 ms) + remanente
1/3 pulsares detectados en MeV tienen periodo de ms
Emisión gamma pulsada hasta unos GeV
Gamma - candela estándar



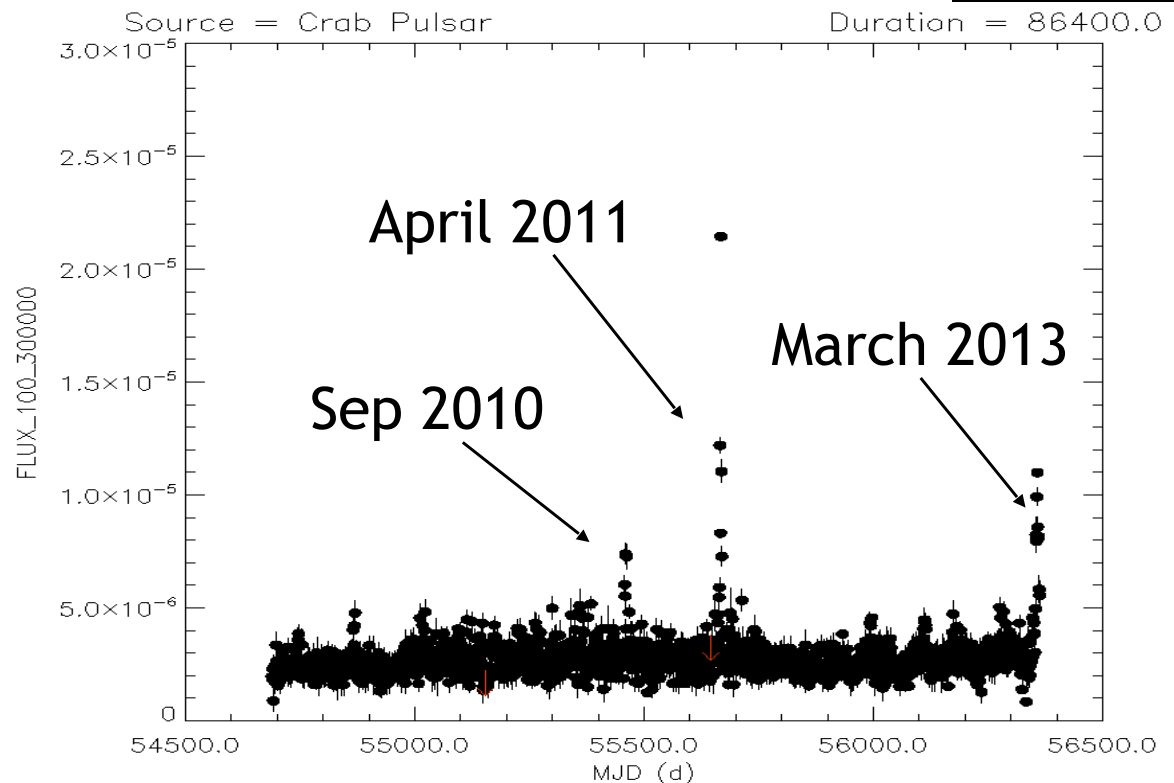
Fermi-LAT >100 MeV

Considered a reference source

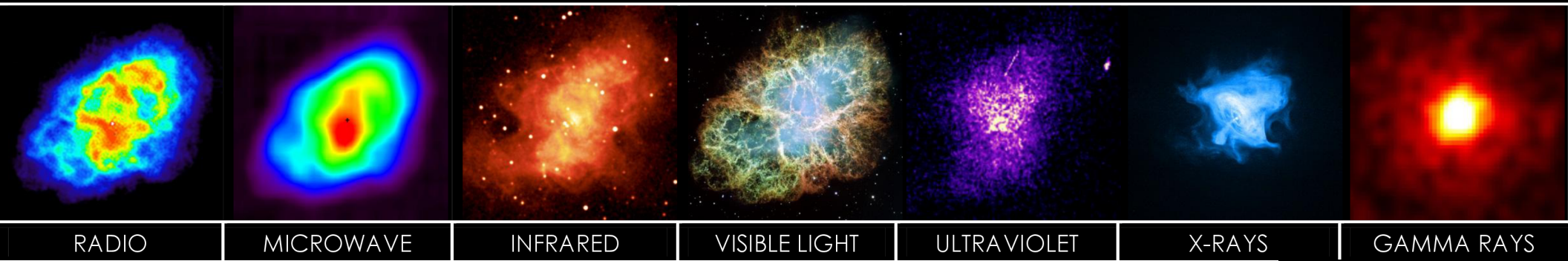
Sep. 2010: Fermi and AGILE observe a 3x flare at > 100 MeV

April 2011: Fermi and AGILE observe a 30x flare!

Mar. 2013: Fermi and AGILE observe a 4-5x flare



CRAB NEBULA

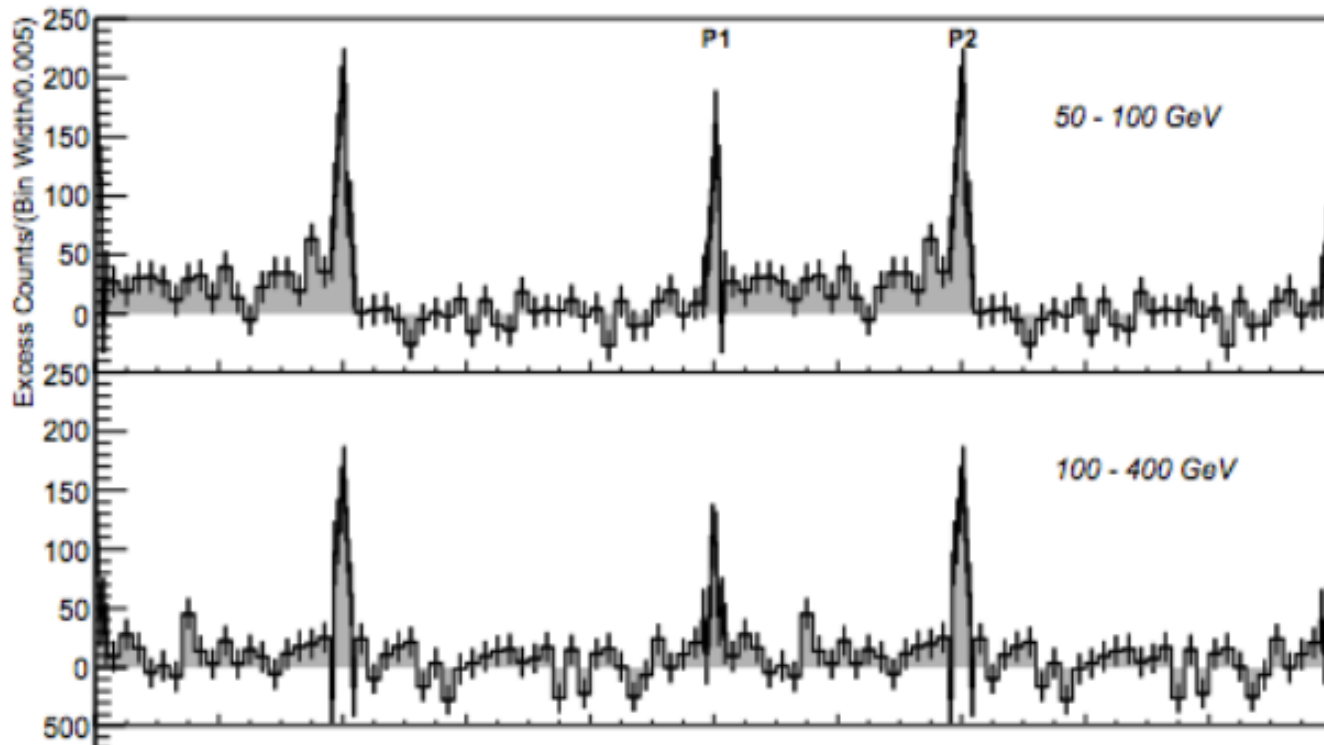
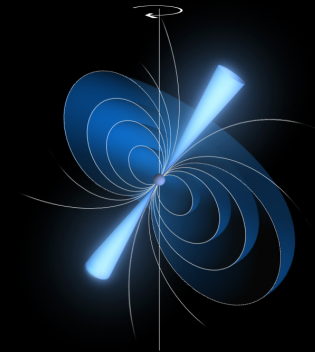


Crab - pulsar (30 ms) + remanente

1/3 pulsares detectados en MeV tienen periodo de ms

Emisión gamma pulsada hasta unos GeV

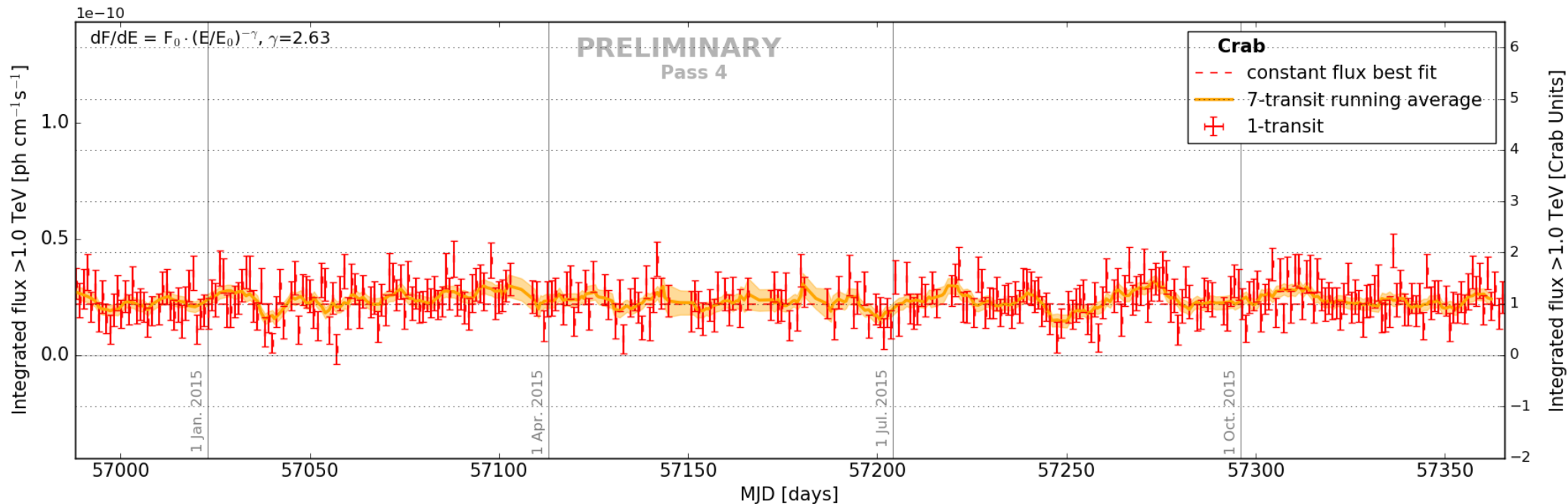
Gamma - candela estándar



2008 .- pulsaciones a 25 GeV
2011.- pulsaciones a 100 GeV
2014.- pulsaciones a 400 GeV
2016.- pulsaciones a 1000 GeV

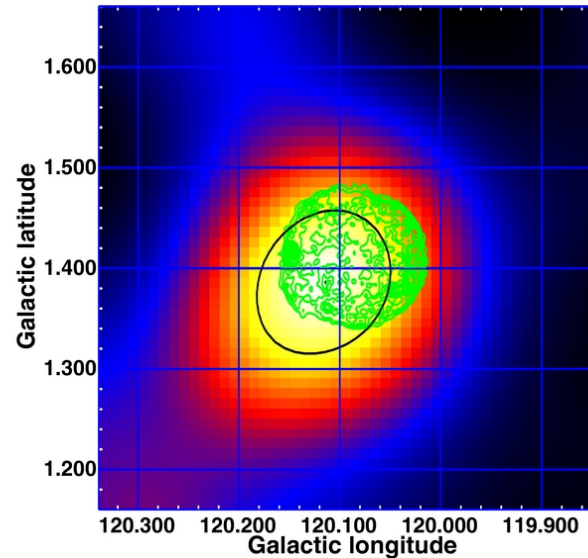
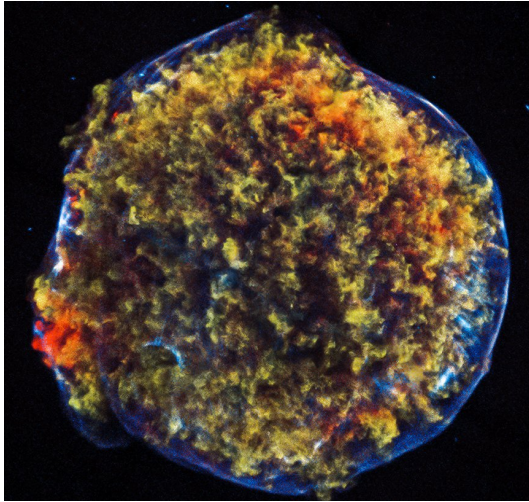
HAWC y el Crab

- Los flares del Crab se extienden a TeV?
- No actividad en radio, IR y X-rays.
- Datos de Nov 26 2014 - Dec 9 2015.
- $>80\sigma$ en 315 transitos.
- Curva de luz en días siderales.
- Consistente con flujo constante.



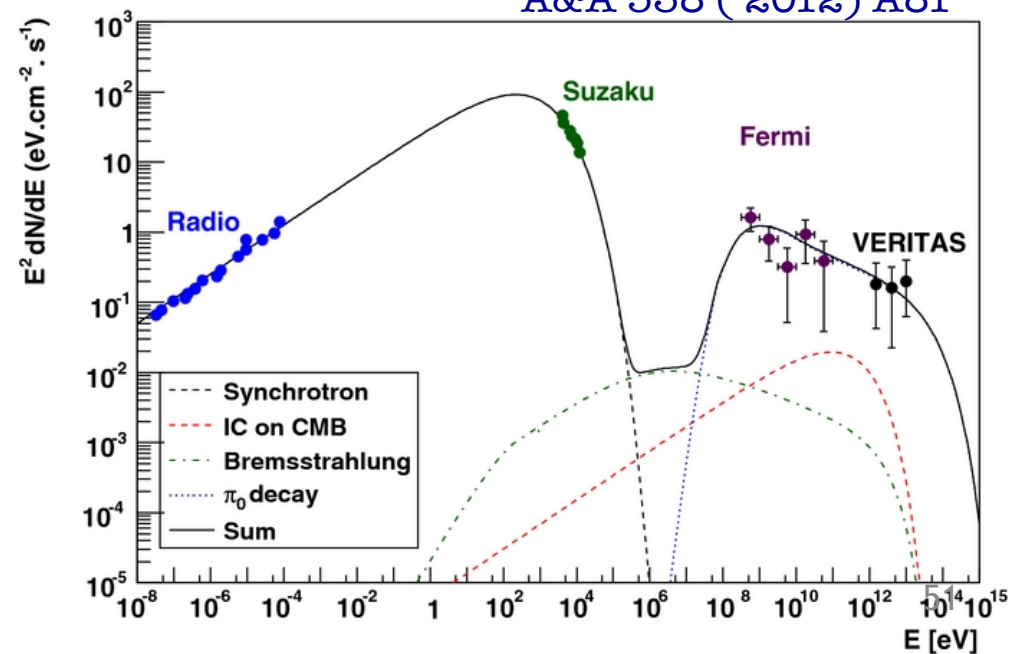
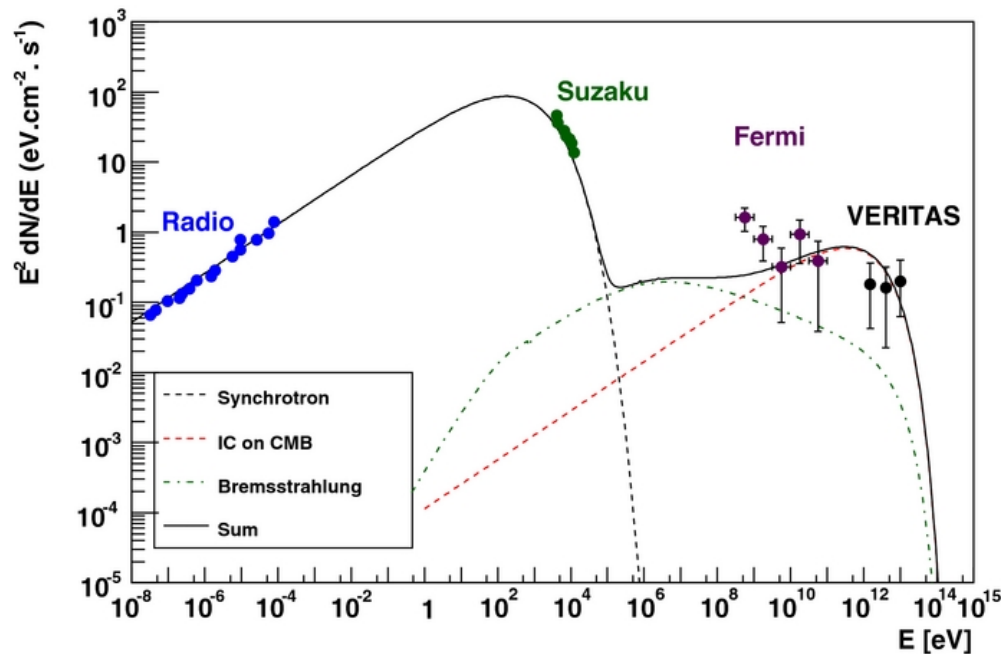
SN 1572 (Remanente de SN Tycho)

Chandra, X rays



Giordano, F., et al,
ApJ (2012) 744

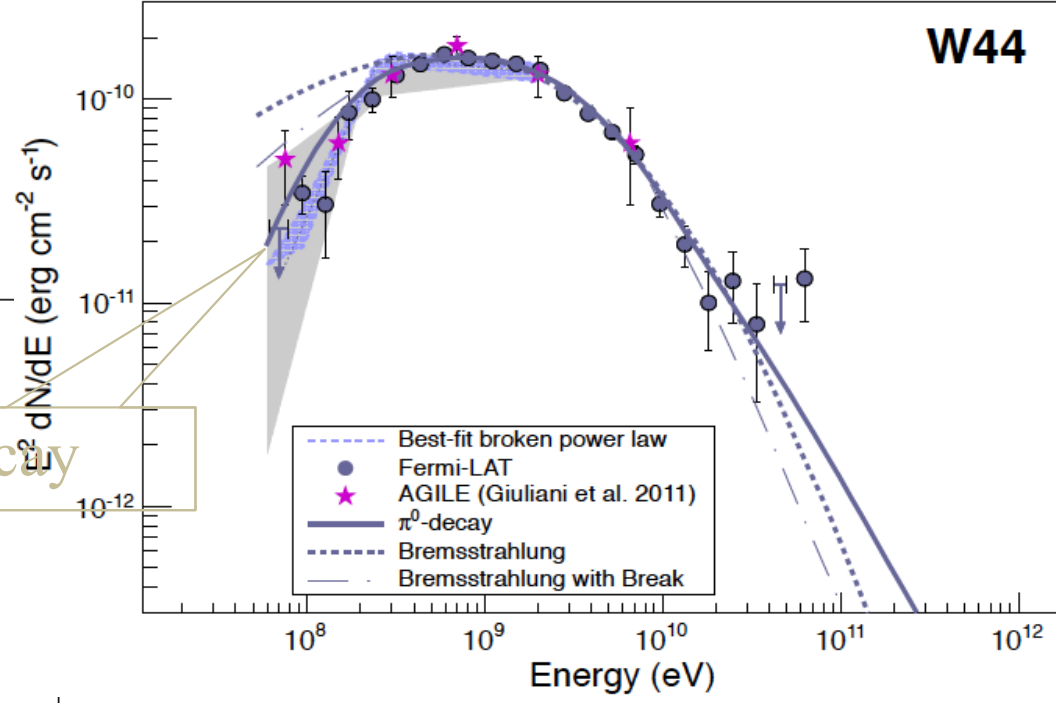
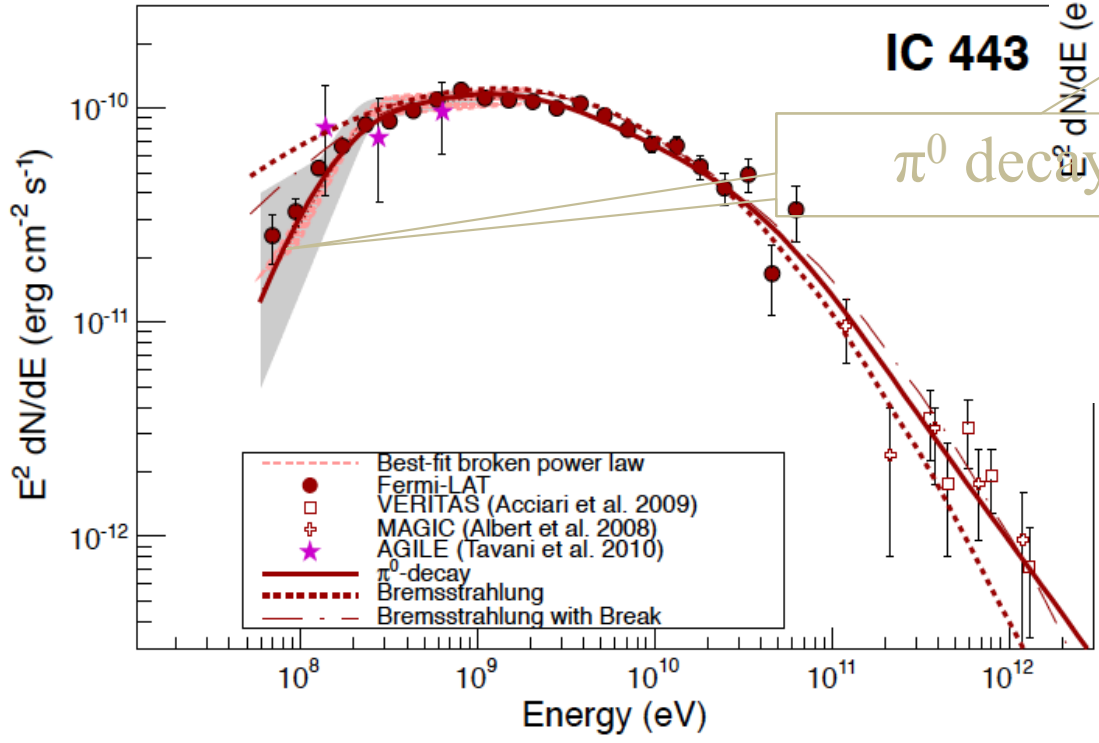
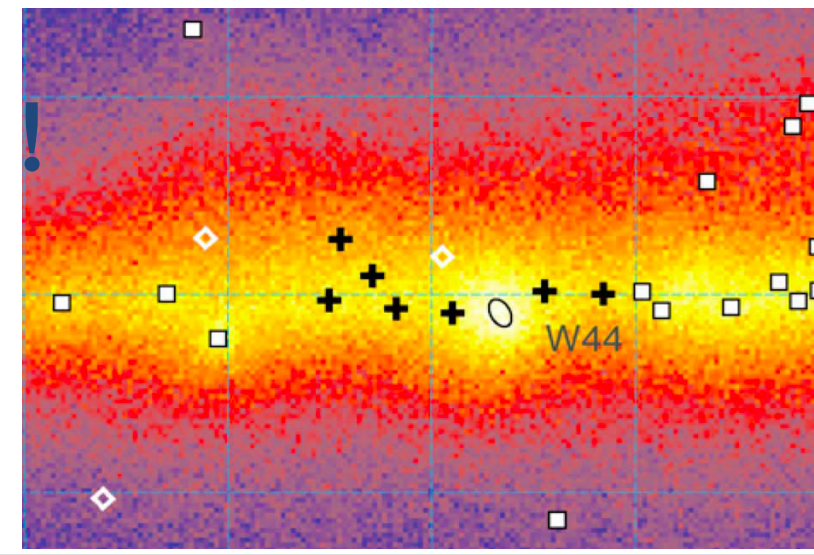
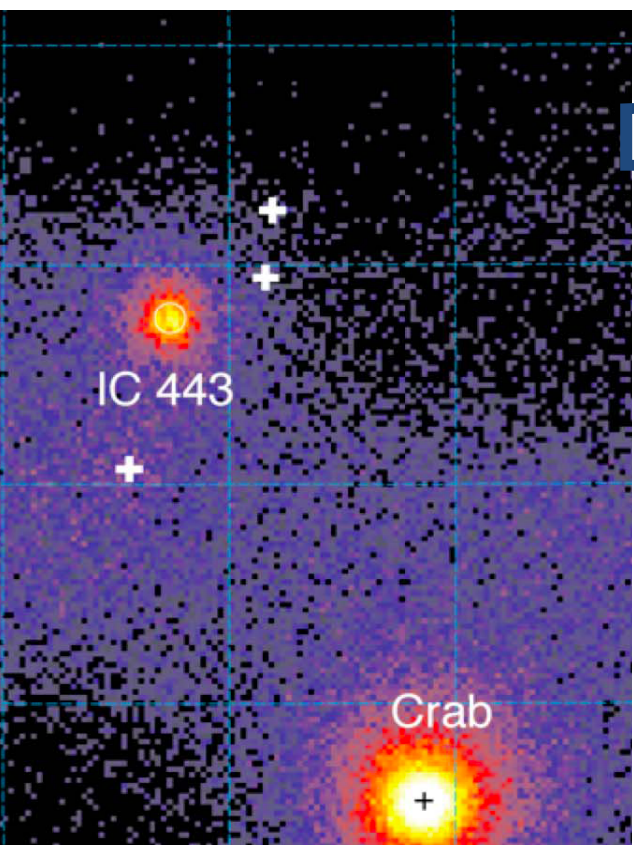
G. Morlino and D. Caprioli,
A&A 538 (2012) A81



Decaimiento π^0 en SNR

IC 443 & W44

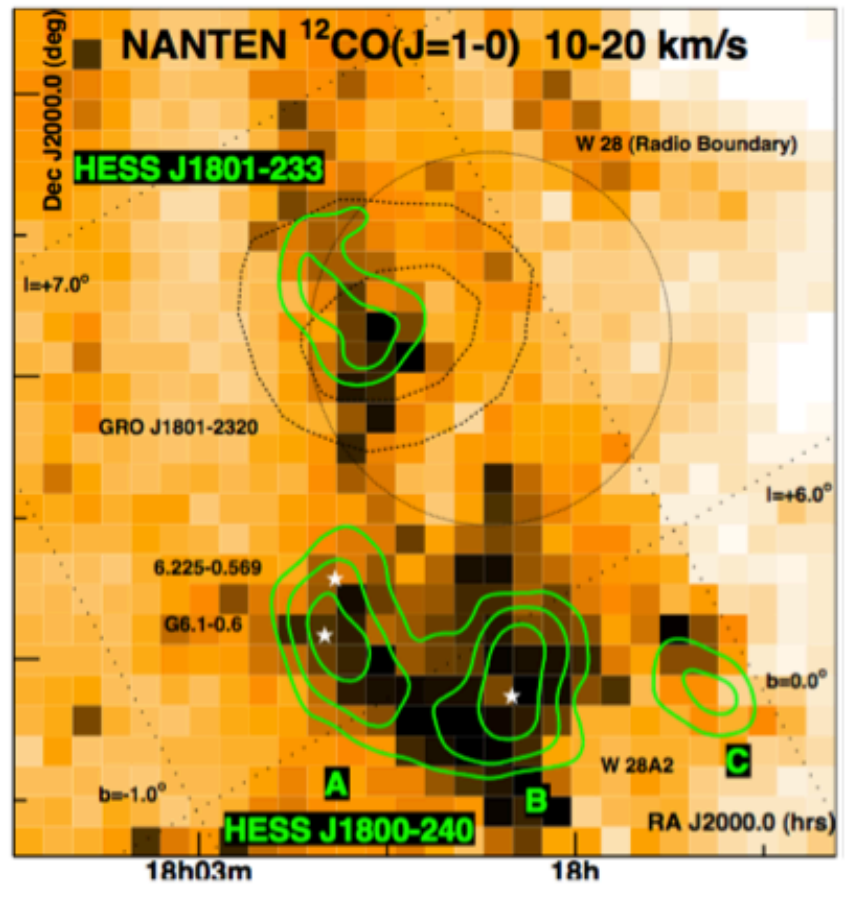
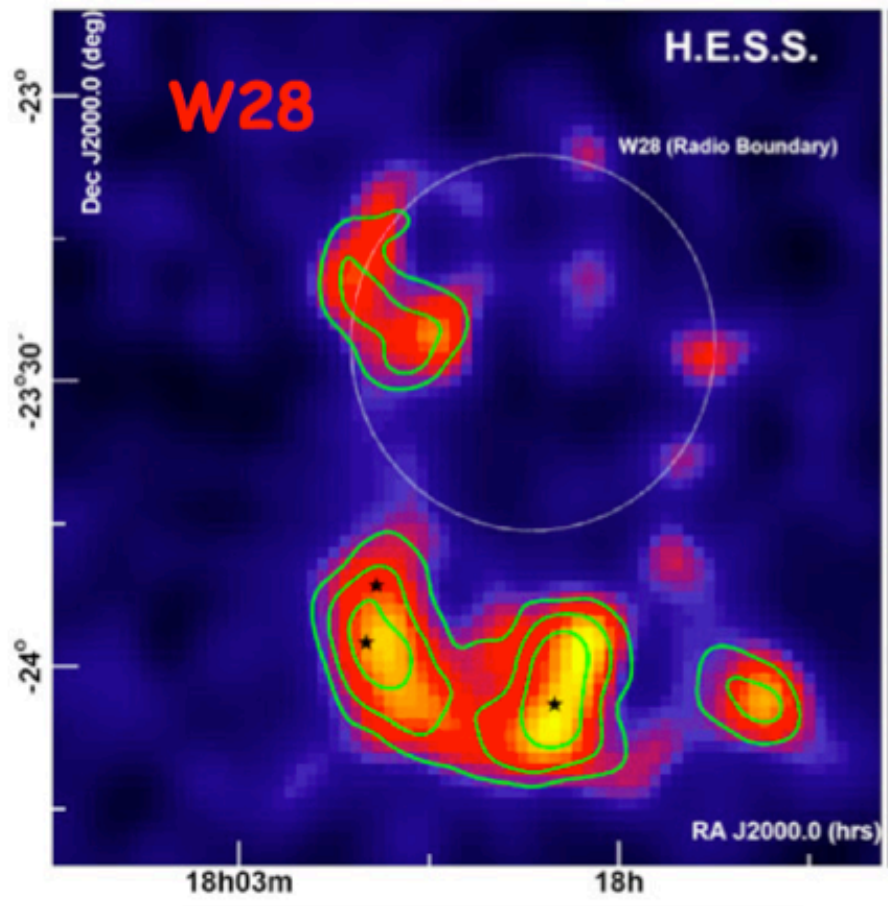
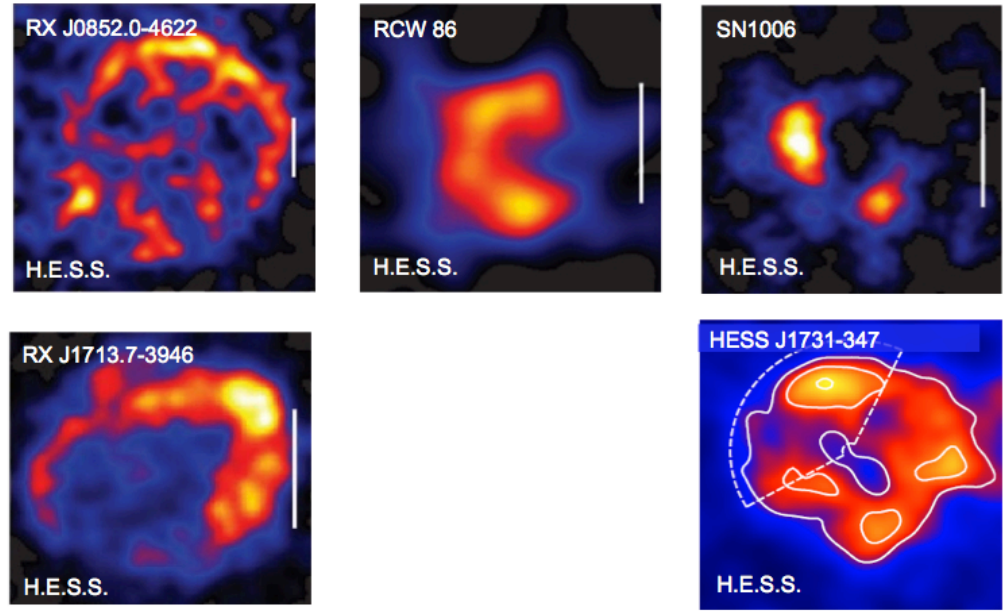
Fermi & AGILE



Ackermann et al (Fermi Collab) '13
arXiv:1302.3307

SNR, energía suficiente y hay ondas de choque

SNR (13) SNR+nubes (9)
Espectro en su mayoría compatible con procesos hadrónicos



Geminga

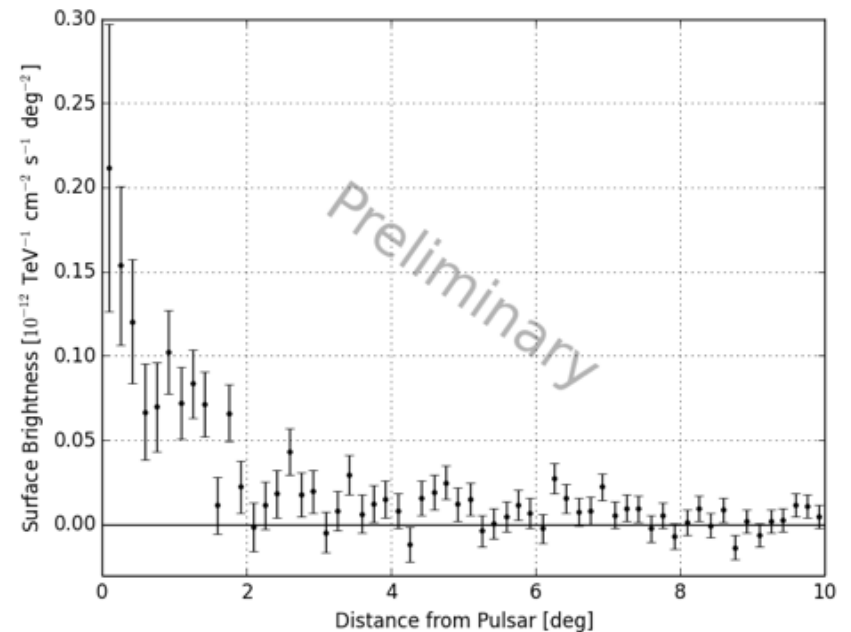
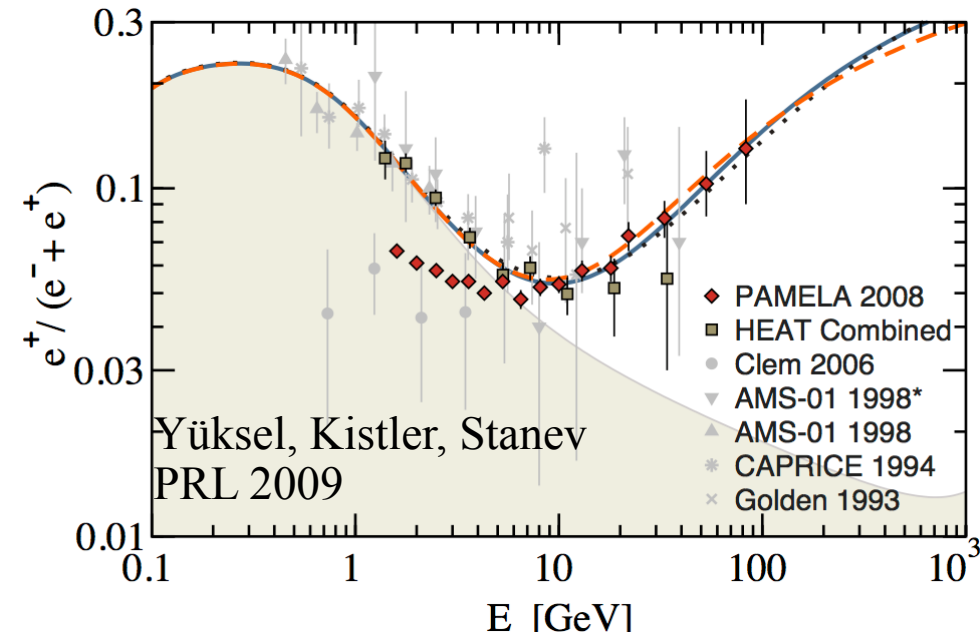
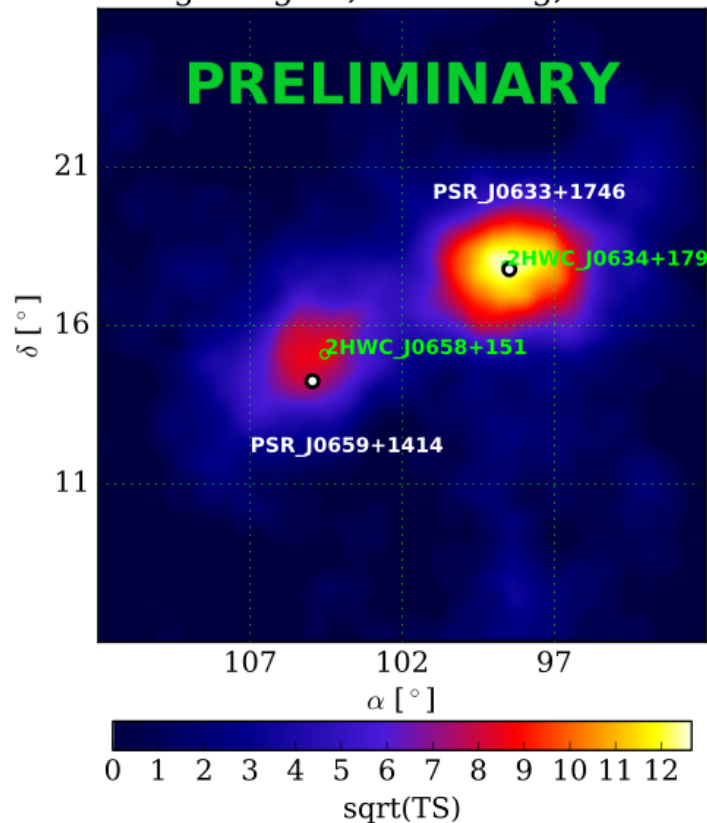
Pulsar mas cercano (750 ly) de edad media (3×10^5 y)

Posible acelerador de rayos cósmicos - positrones (Yuksel et al 2009)

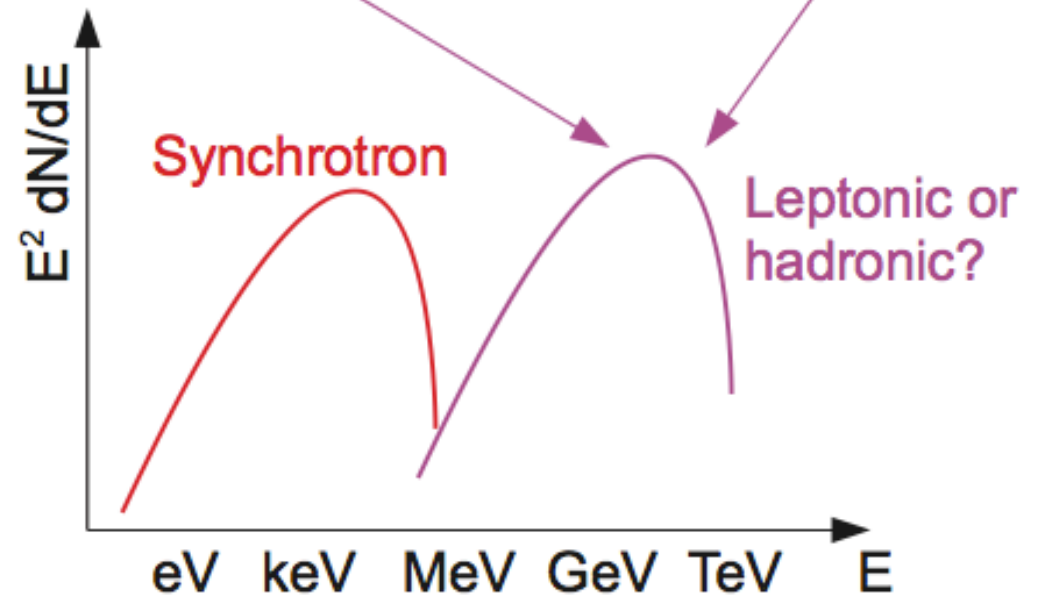
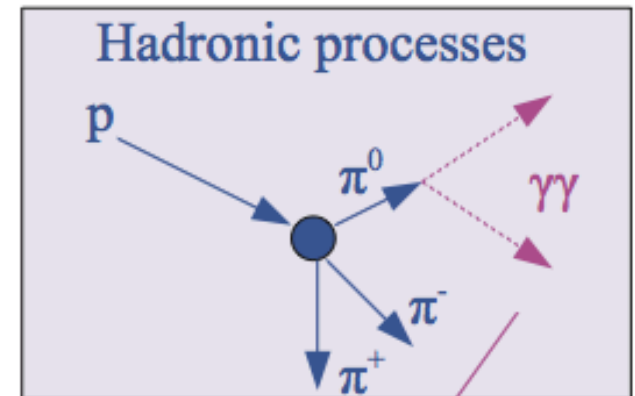
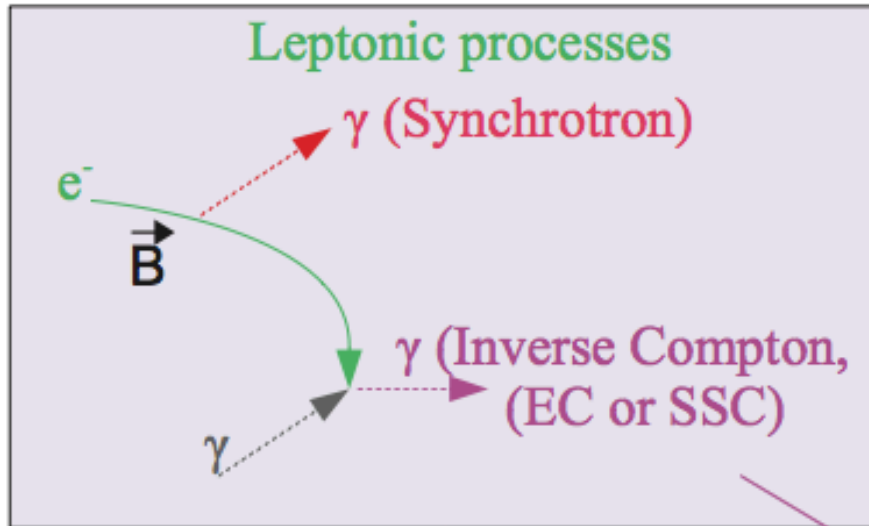
Descubierto en gammas por Milagro -> HAWC

Tamaño de 2-3 grados mayor al de en rayos

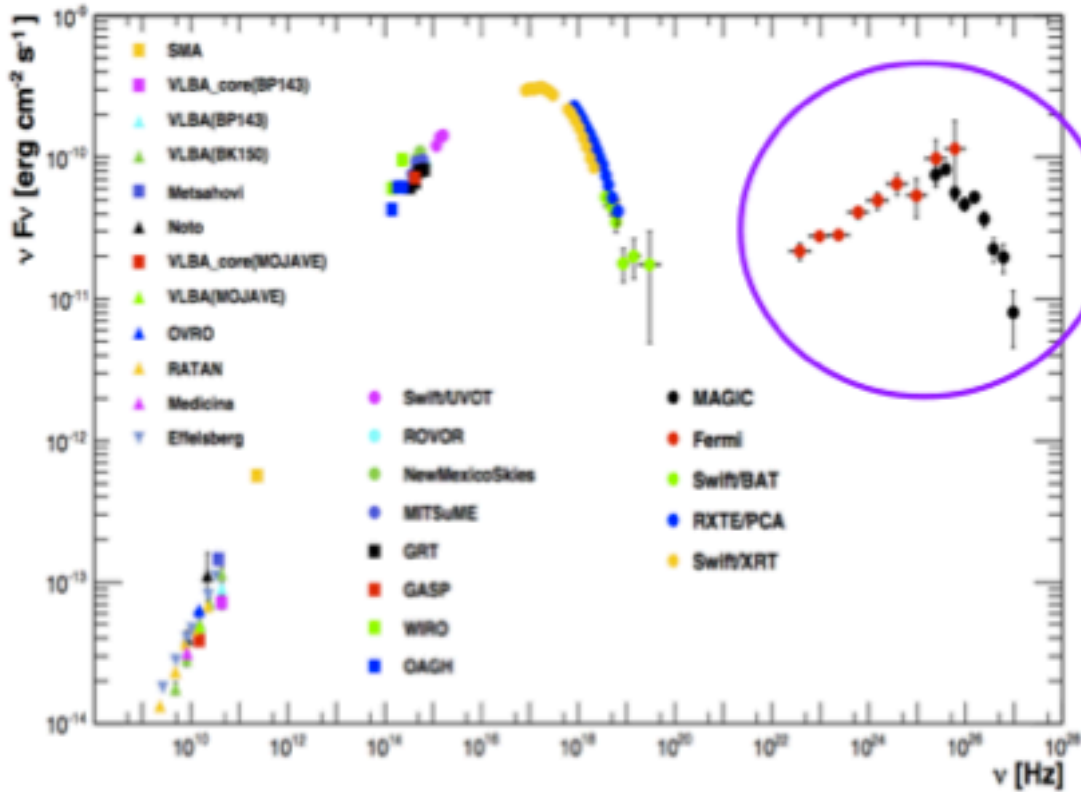
X Geminga Region, Disk 2 deg, index -2.2



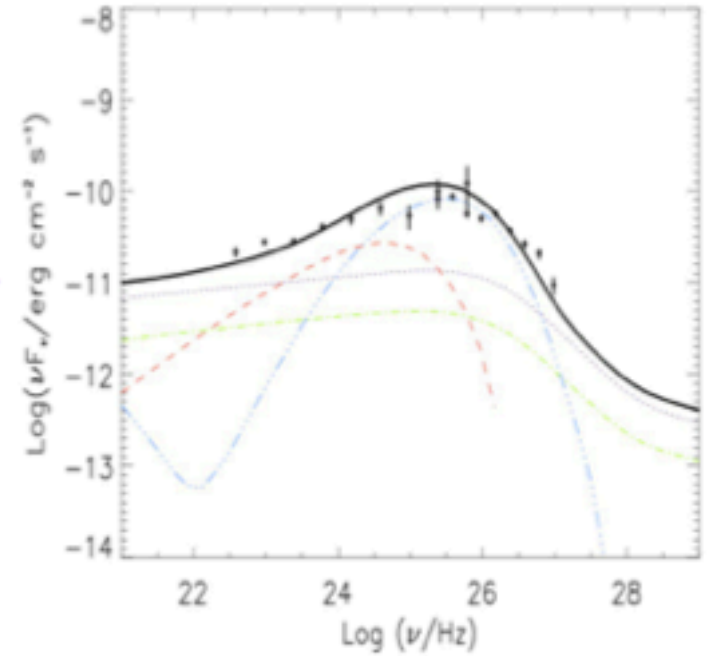
Blazares



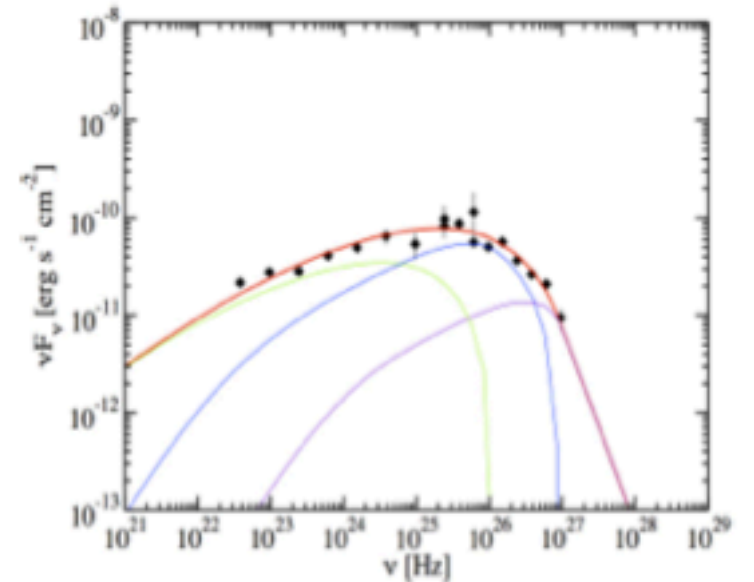
Mrk 421



Hadronic



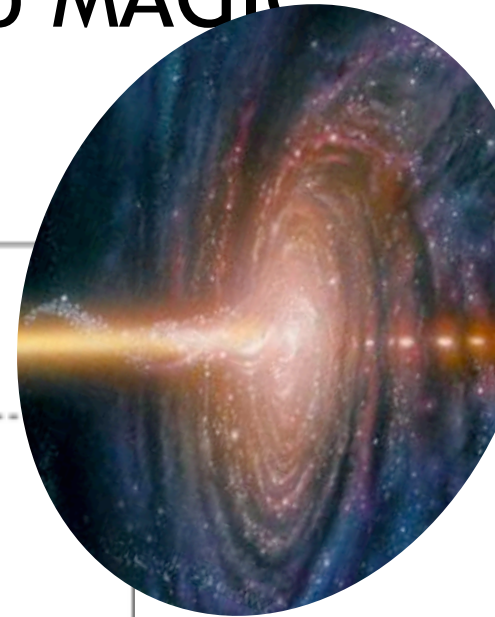
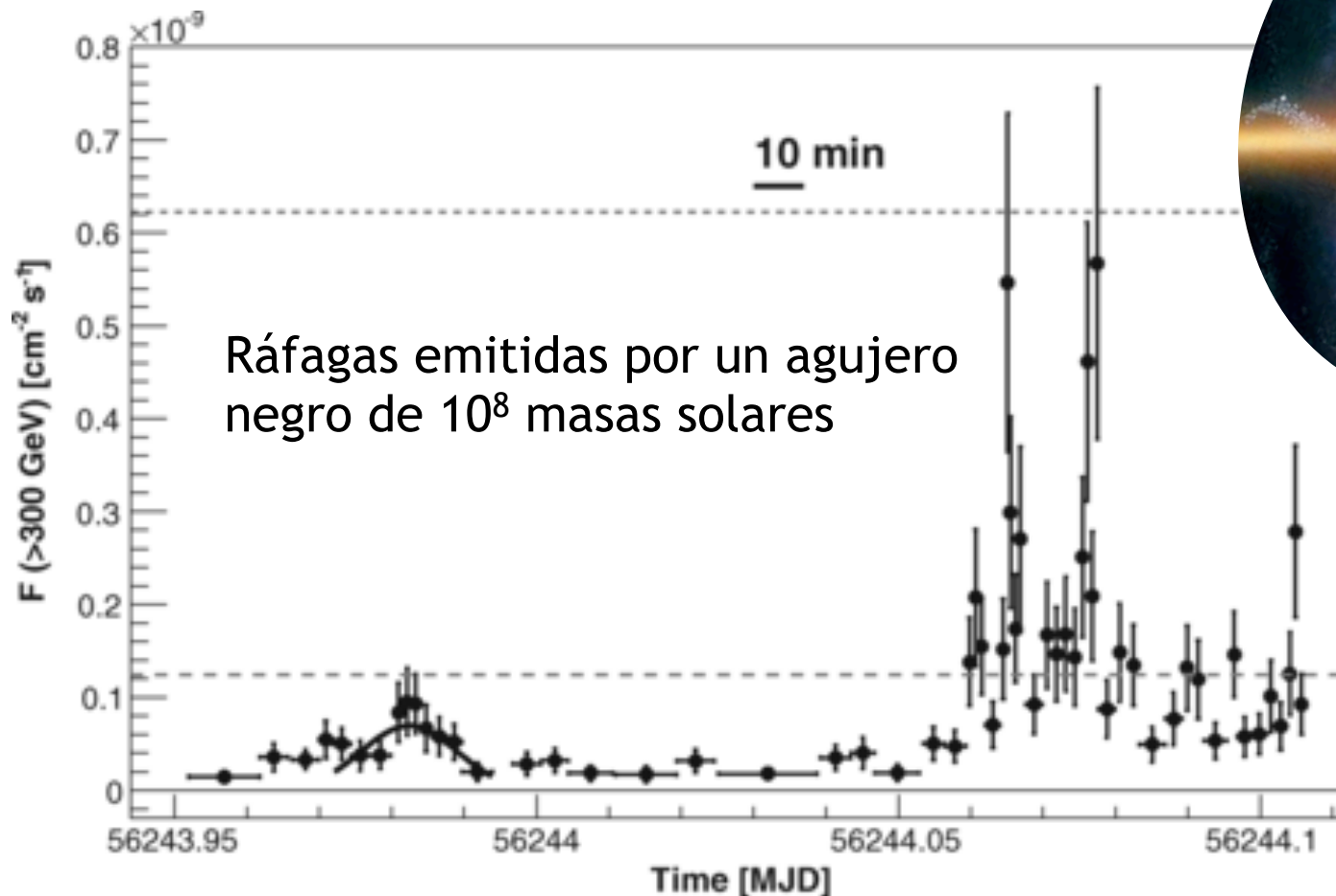
SSC – 3 electron populations



Abdo, et al., 2011

Variabilidad del cielo en TeV

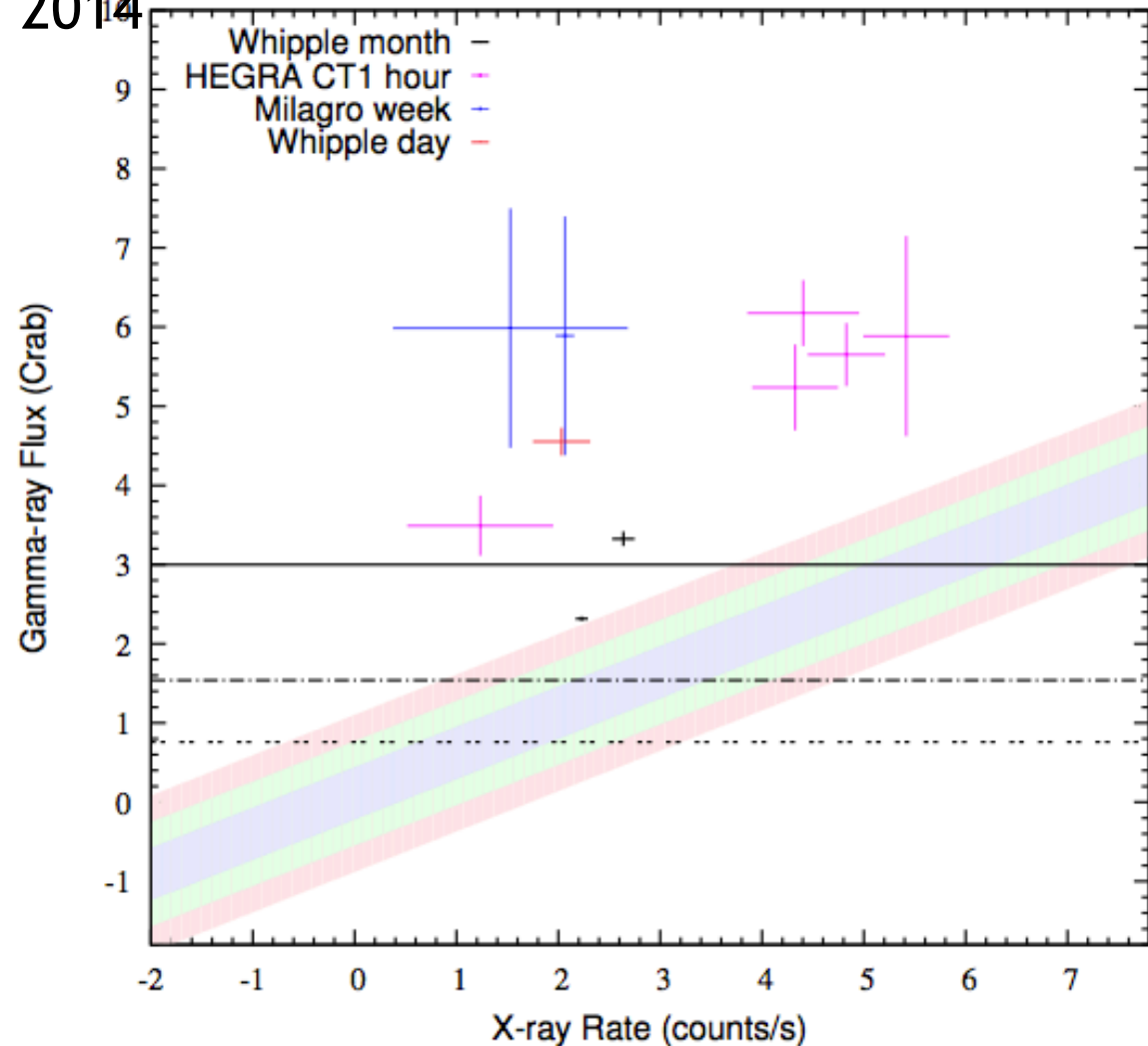
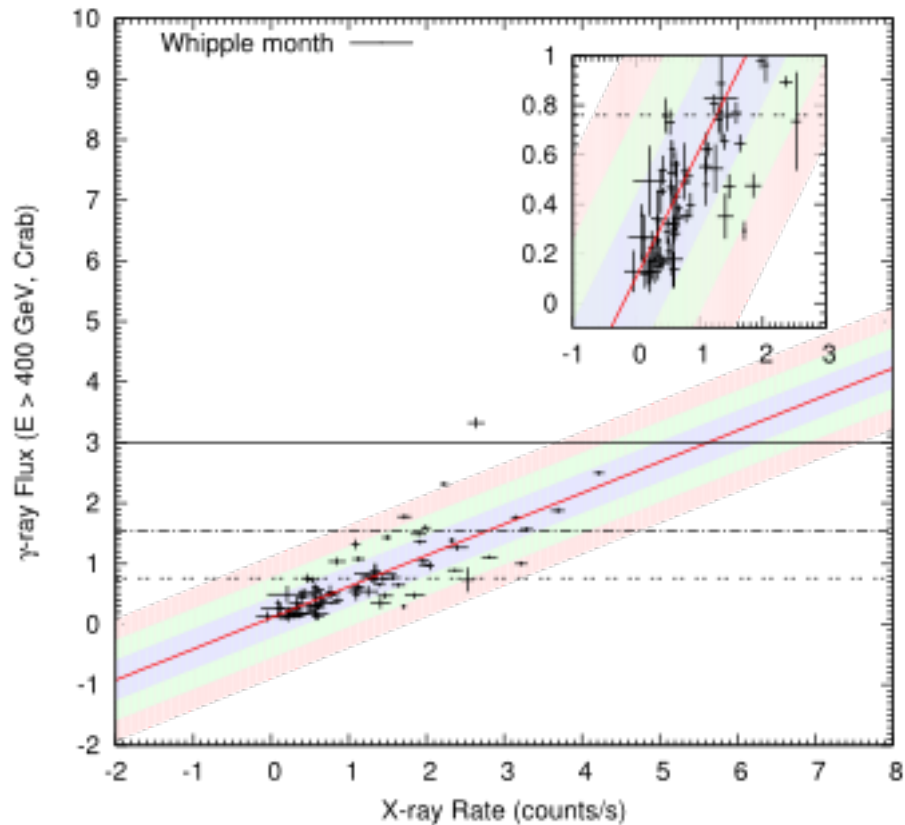
- IC310 observado por el telescopio MAGIC (Science, 28 November 2014)

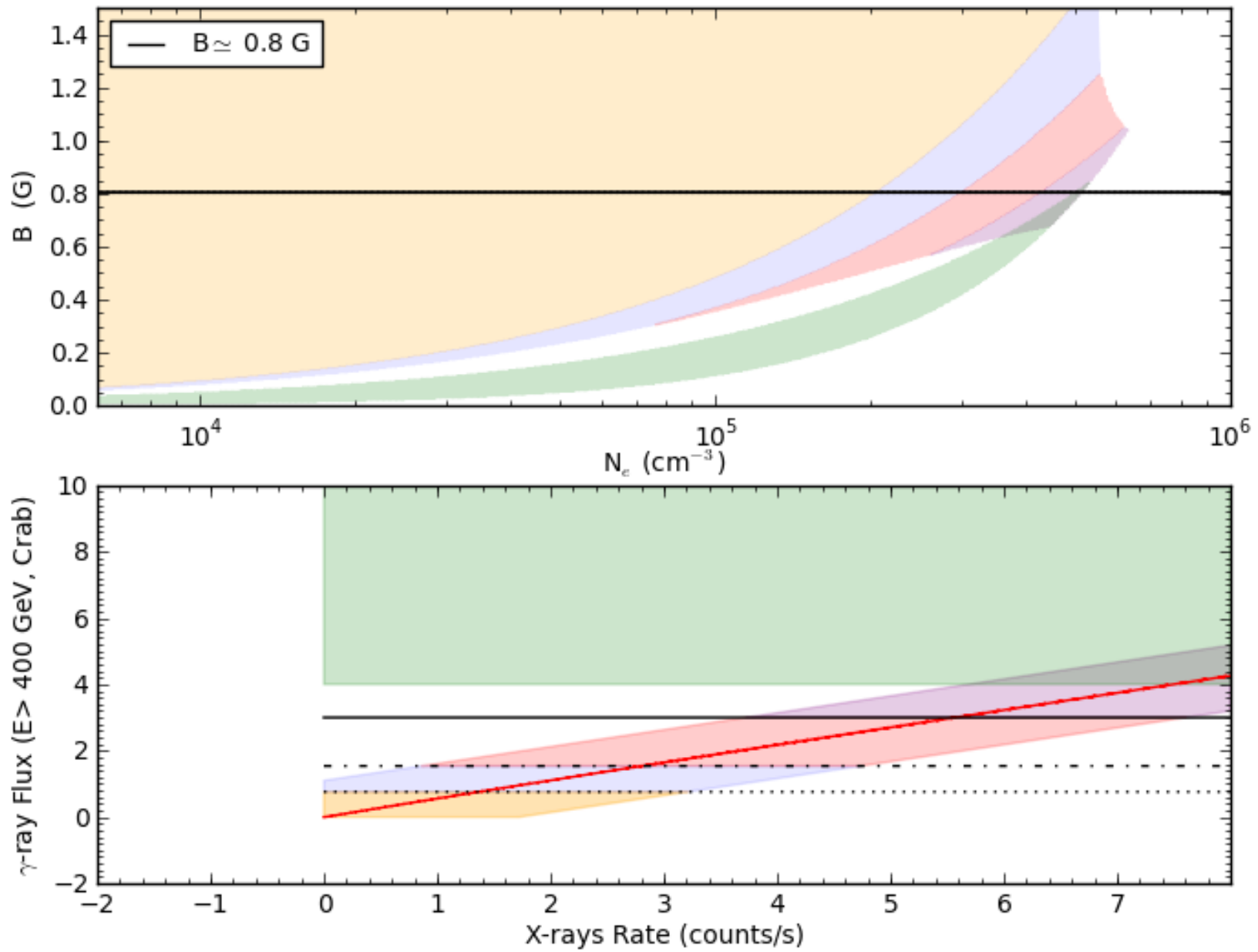


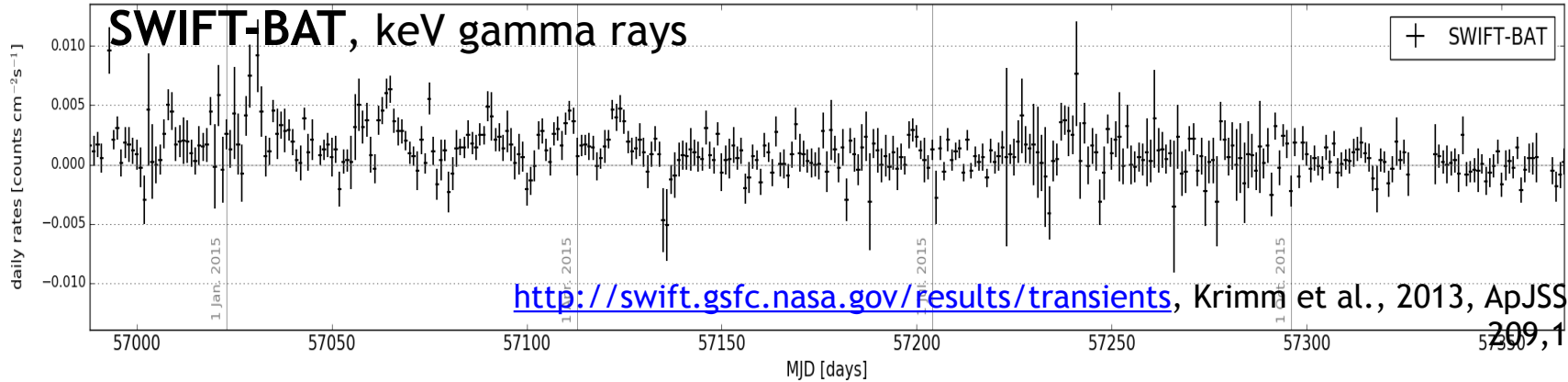
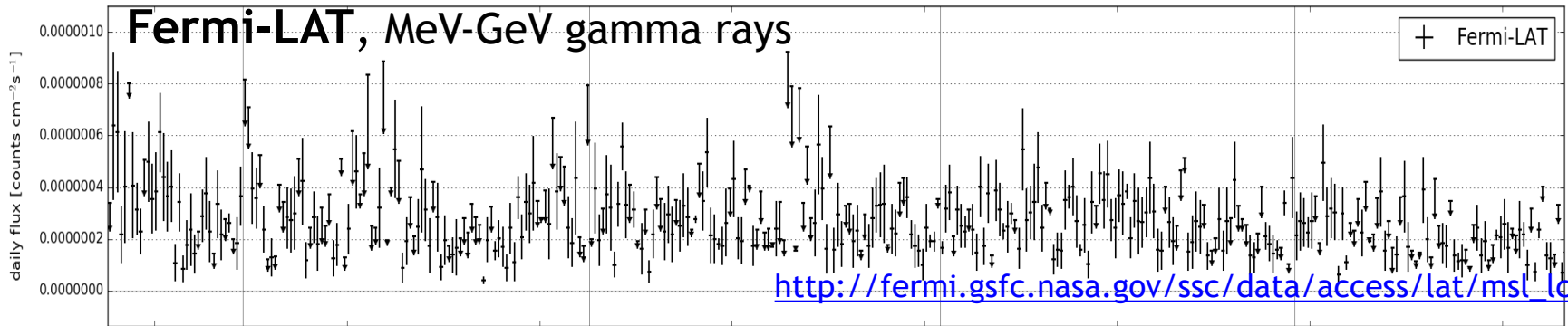
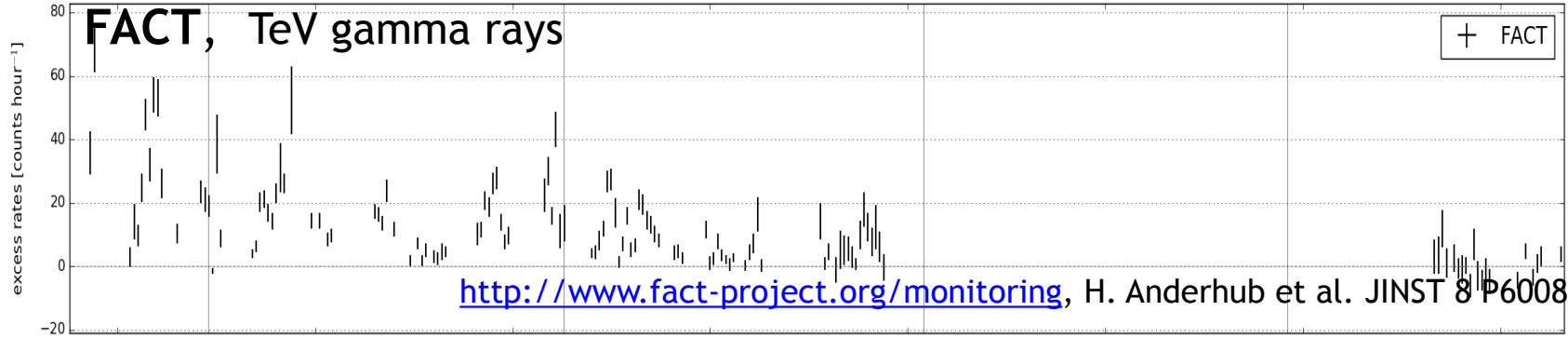
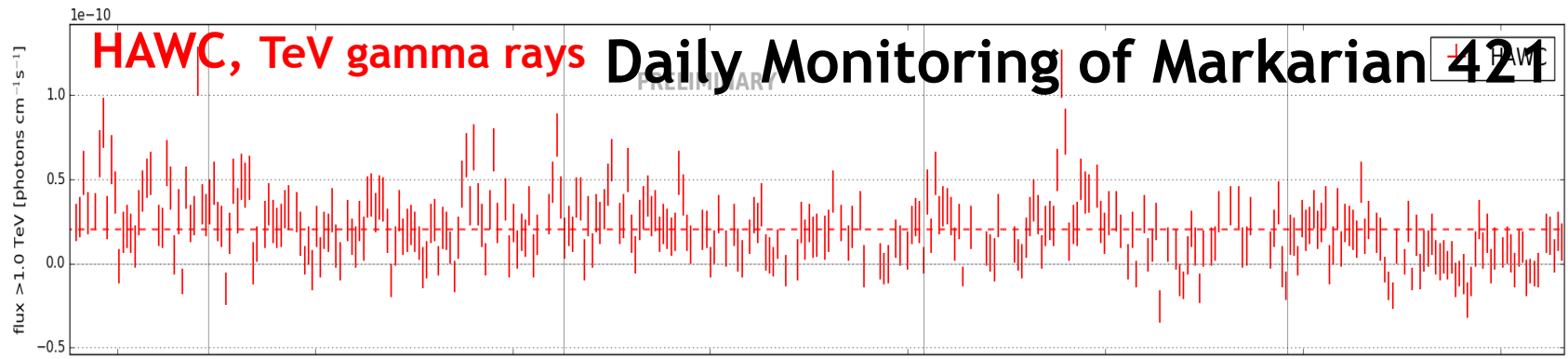
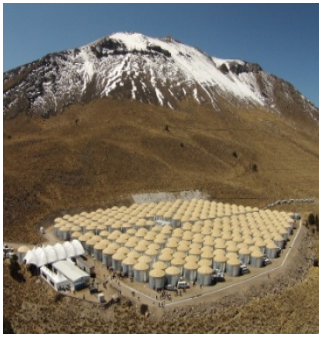
Mrk 421

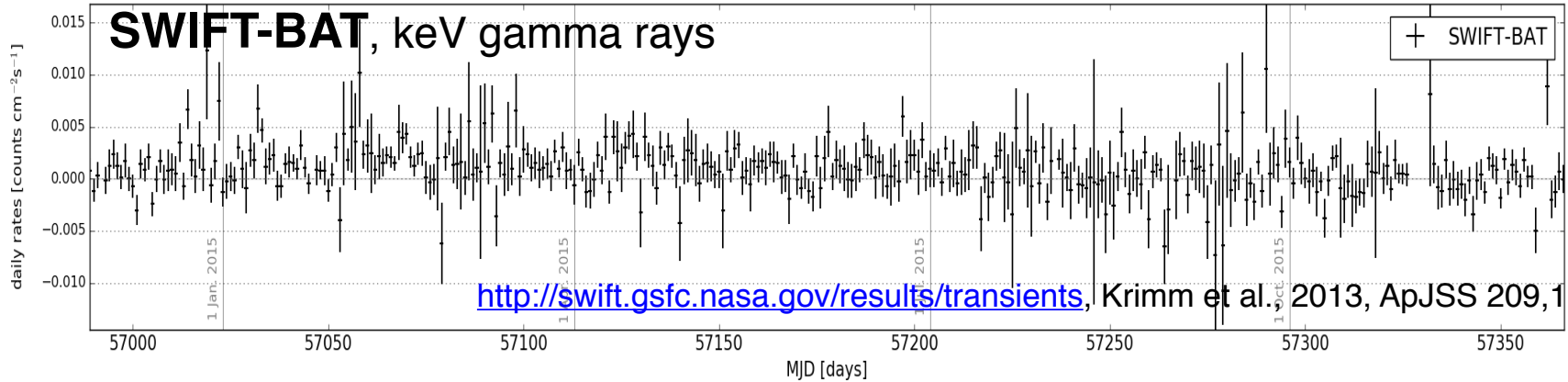
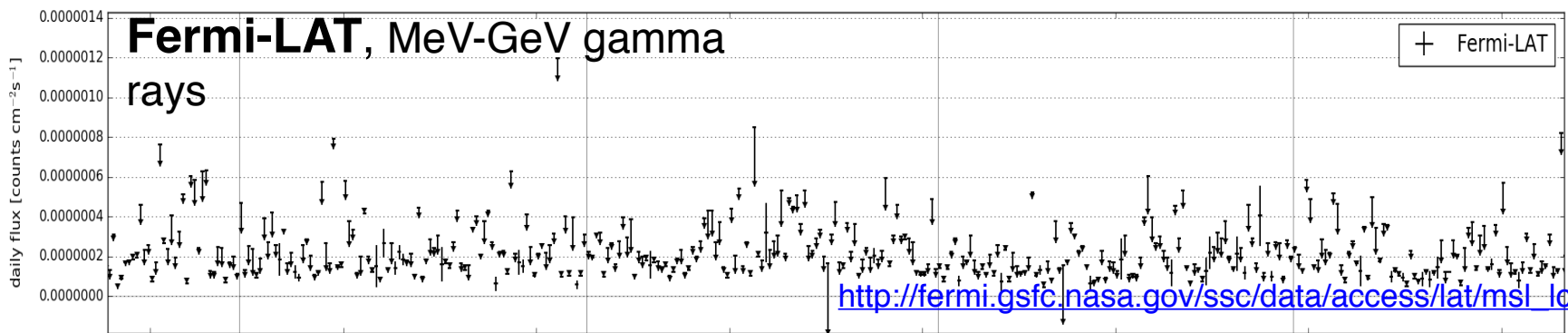
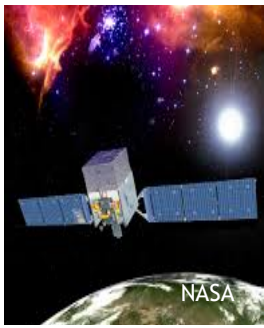
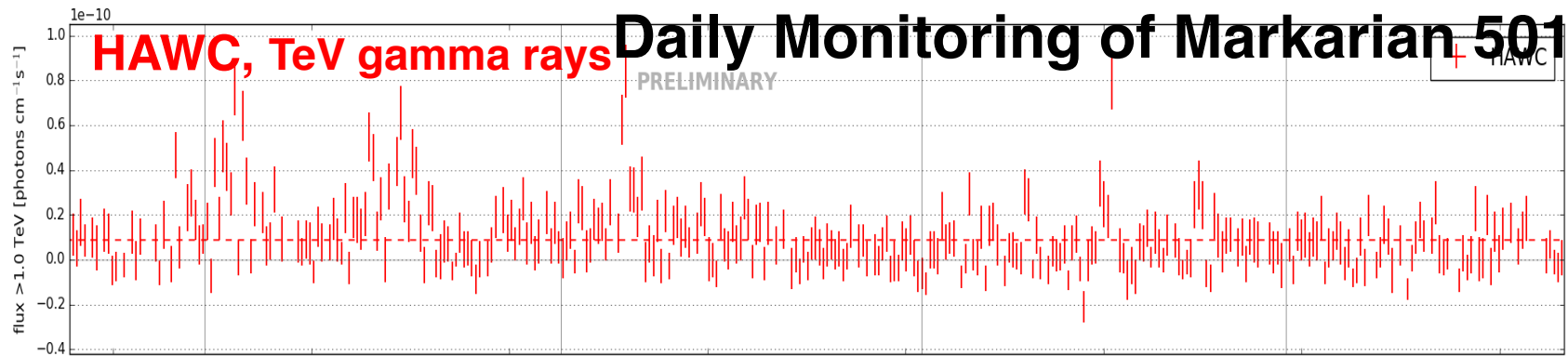
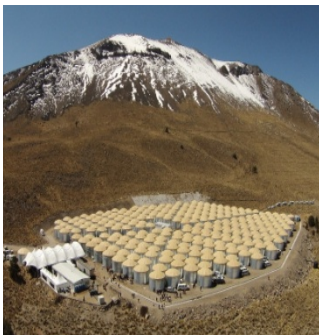
Estudio correlación X y γ ,
Patricelli & Gonzalez, 2016

14 años de datos, Acciari, et al., 2014









<http://www.fact-project.org/monitoring>, H. Anderhub et al. JINST 8 P6008

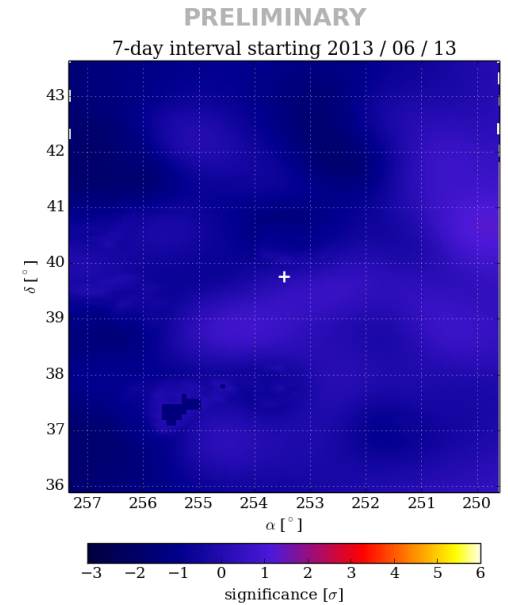
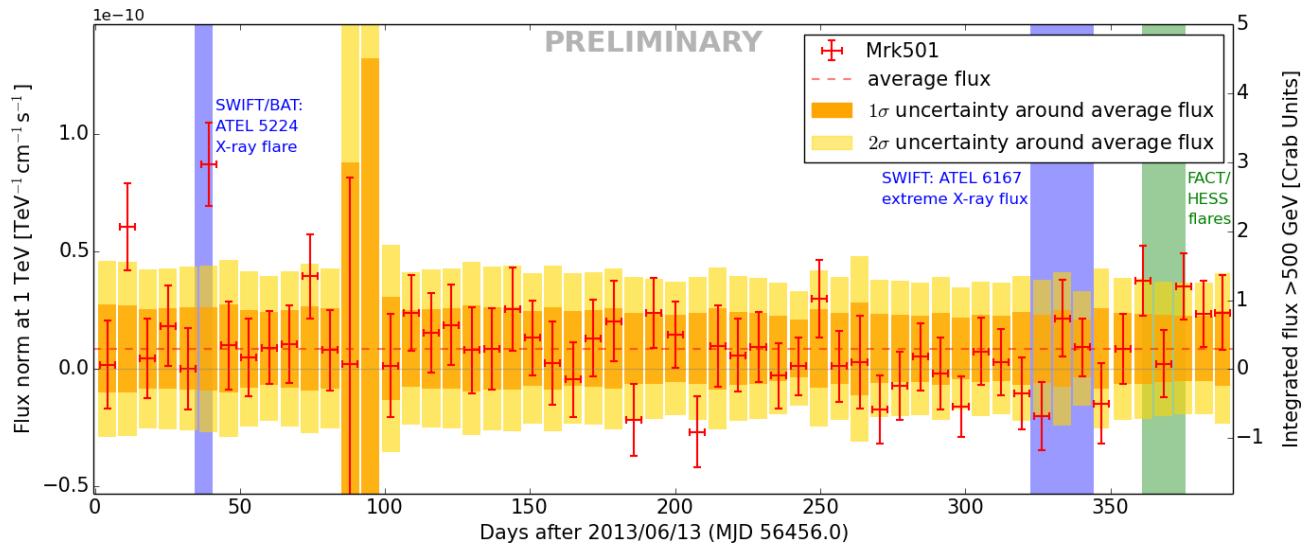
http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/msl_lc

<http://swift.gsfc.nasa.gov/results/transients>, Krimm et al. 2013, ApJSS 209, 1

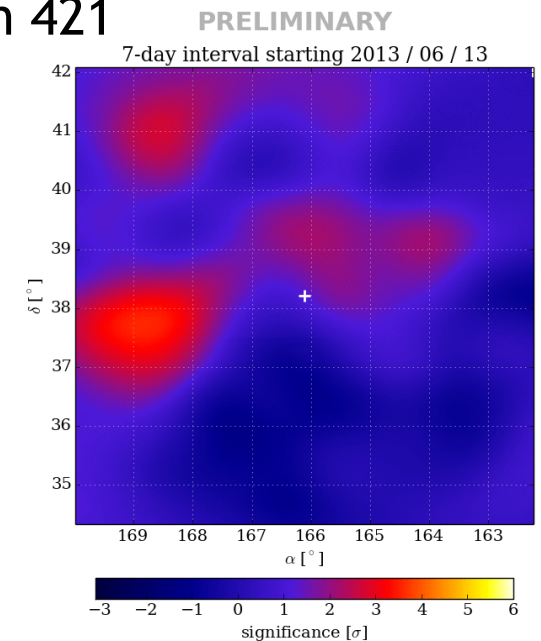
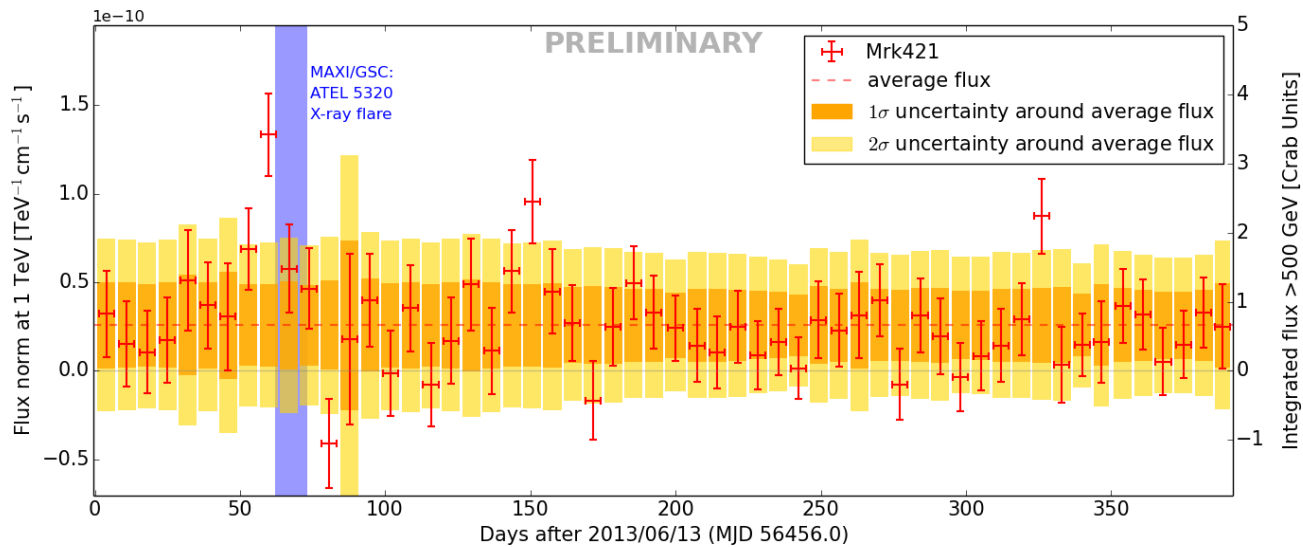
Curvas de luz de AGNs

HAWC-111

Markarian 501



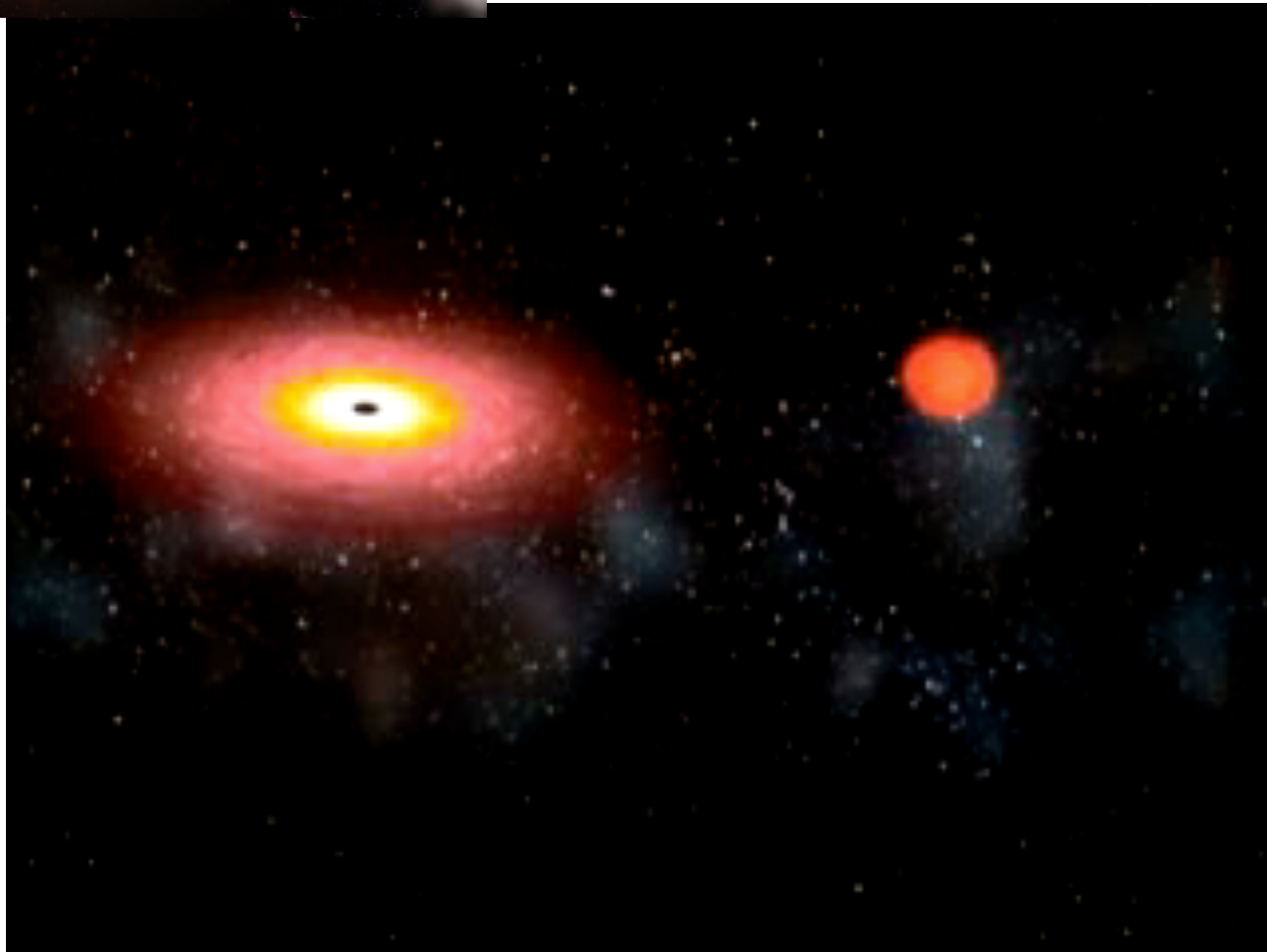
Markarian 421



Destellos de Rayos Gamma

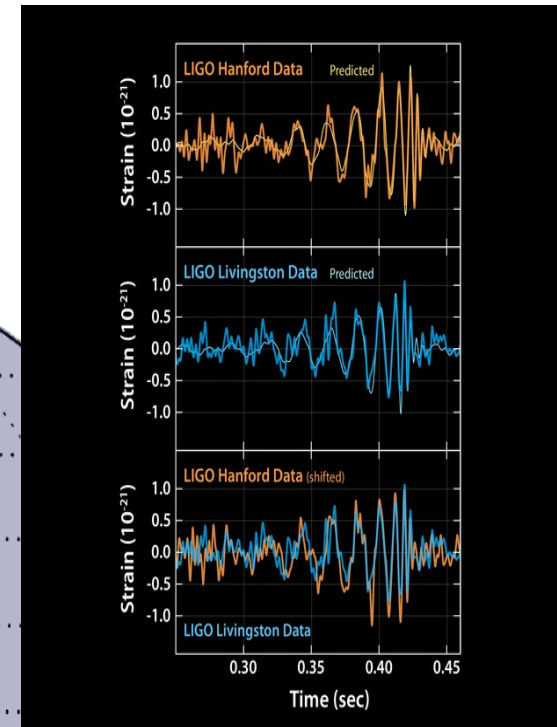
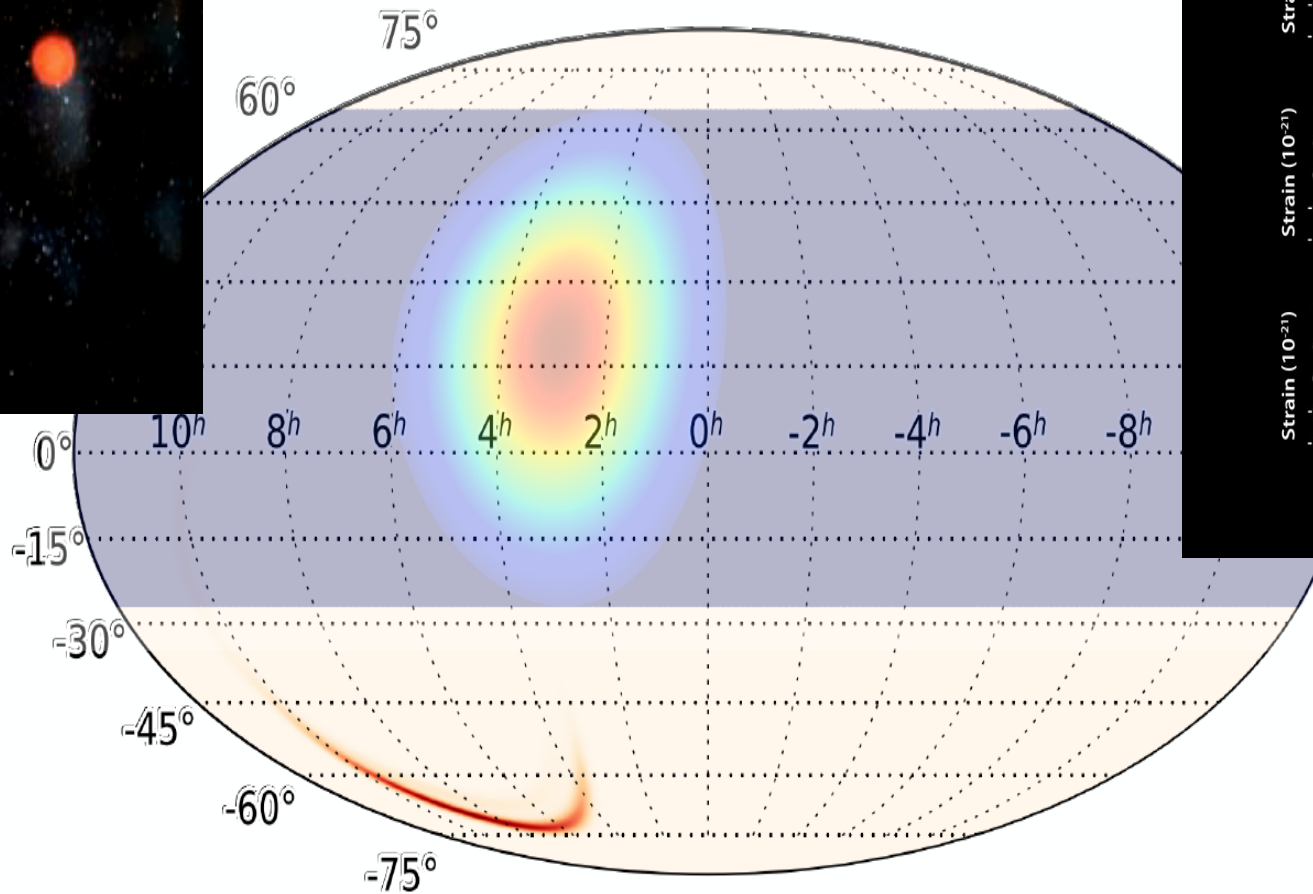
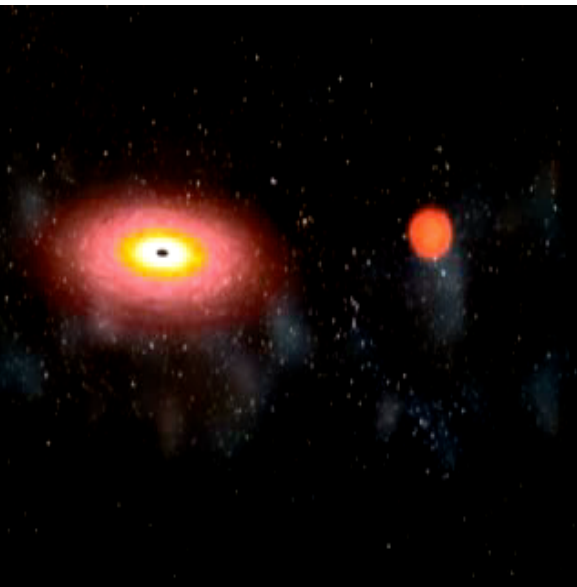


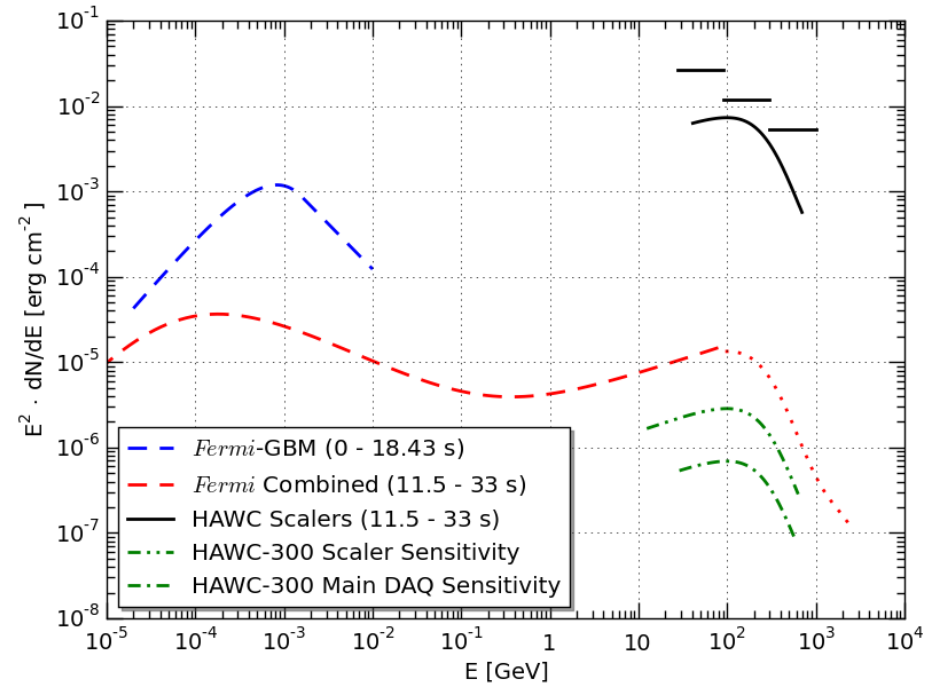
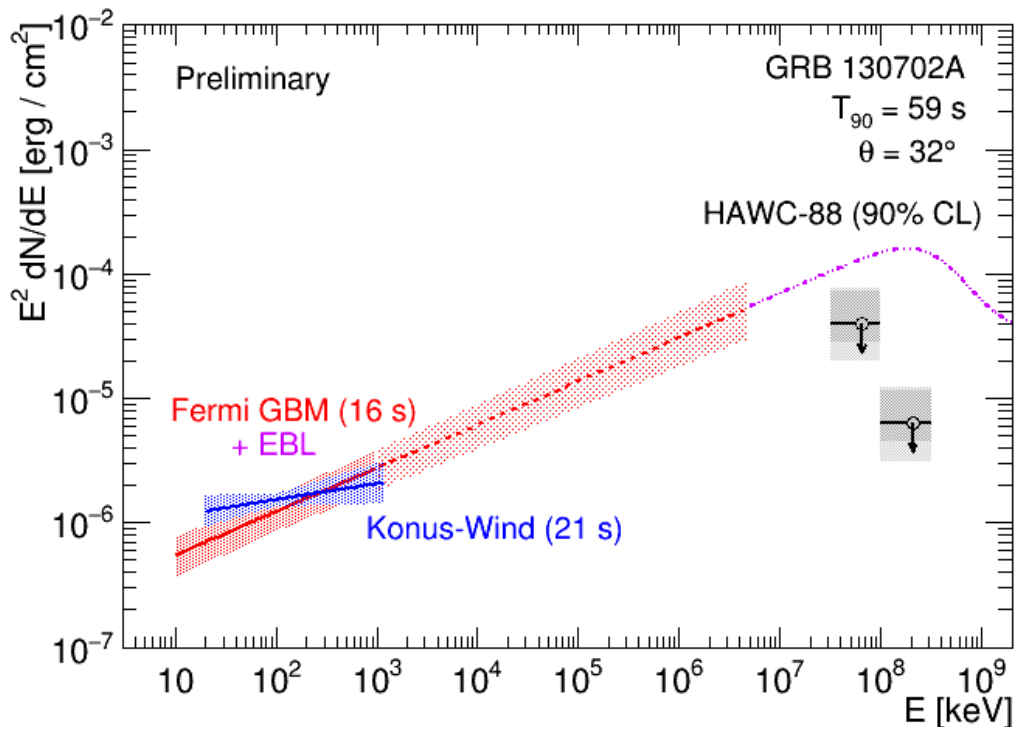
Los fenómenos mas energéticos.
Masa solar radiada en segundos.



El evento de ondas gravitacionales detectado por LIGO el 16 de Septiembre del 2015

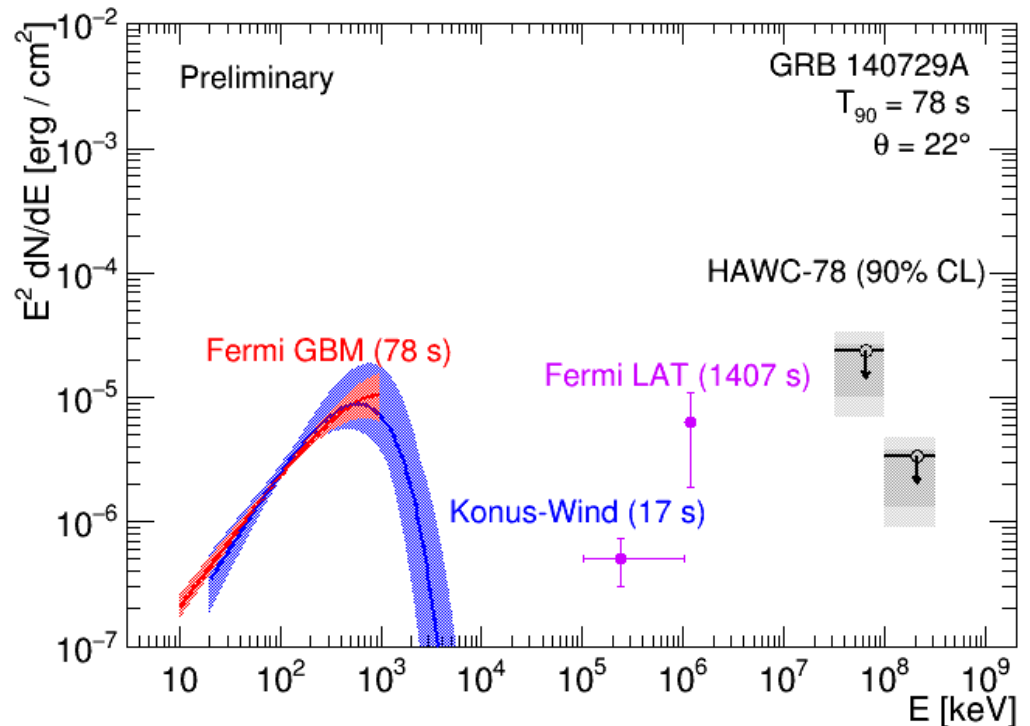
LIGO TRIGGER → 2015-09-14 09:50:45 UTC (REVISED MAP from January)



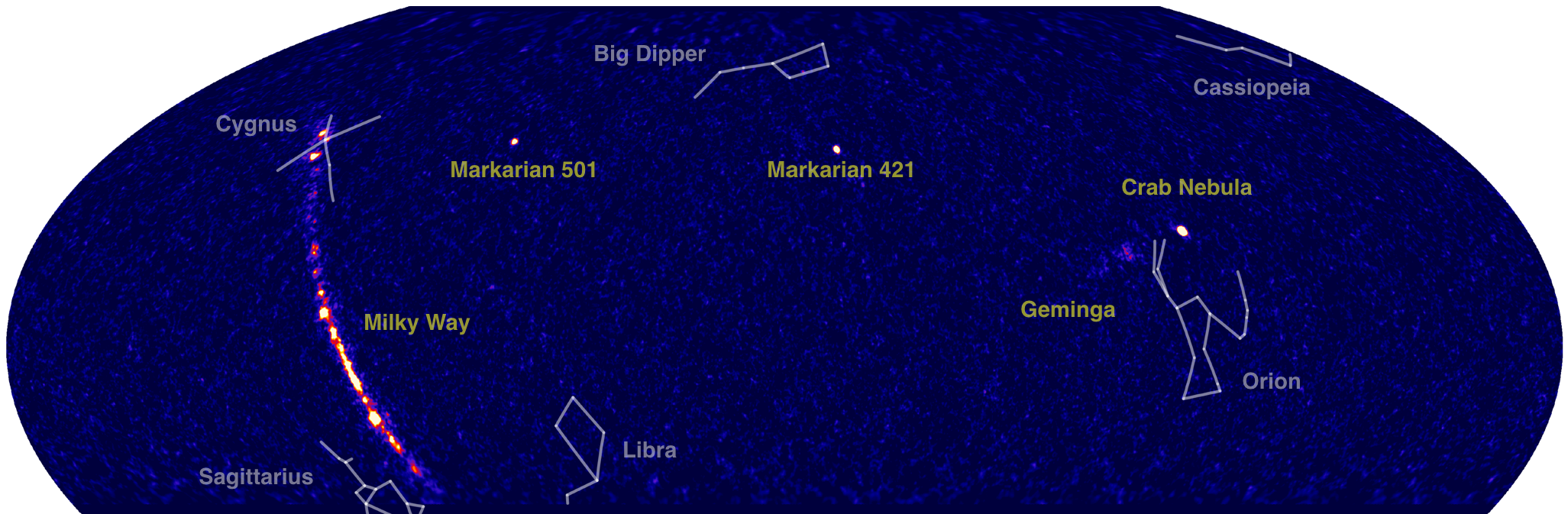


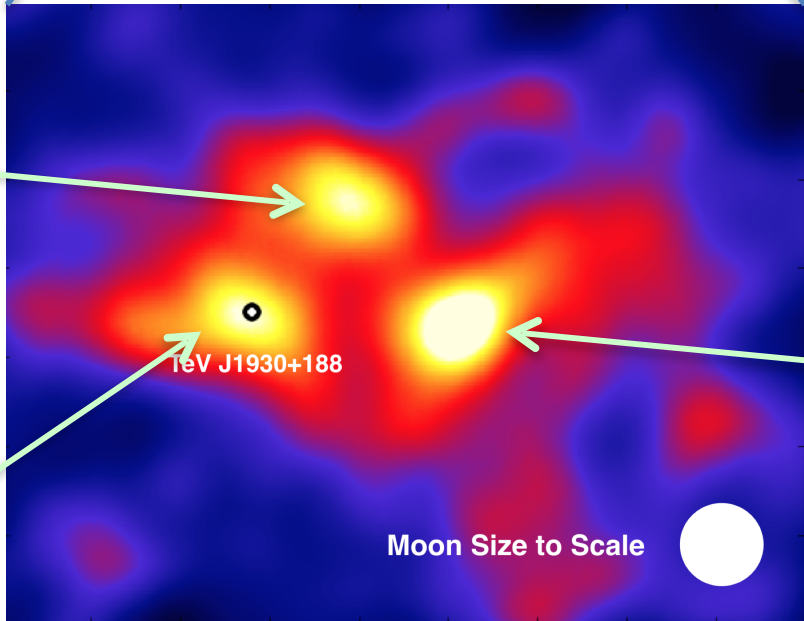
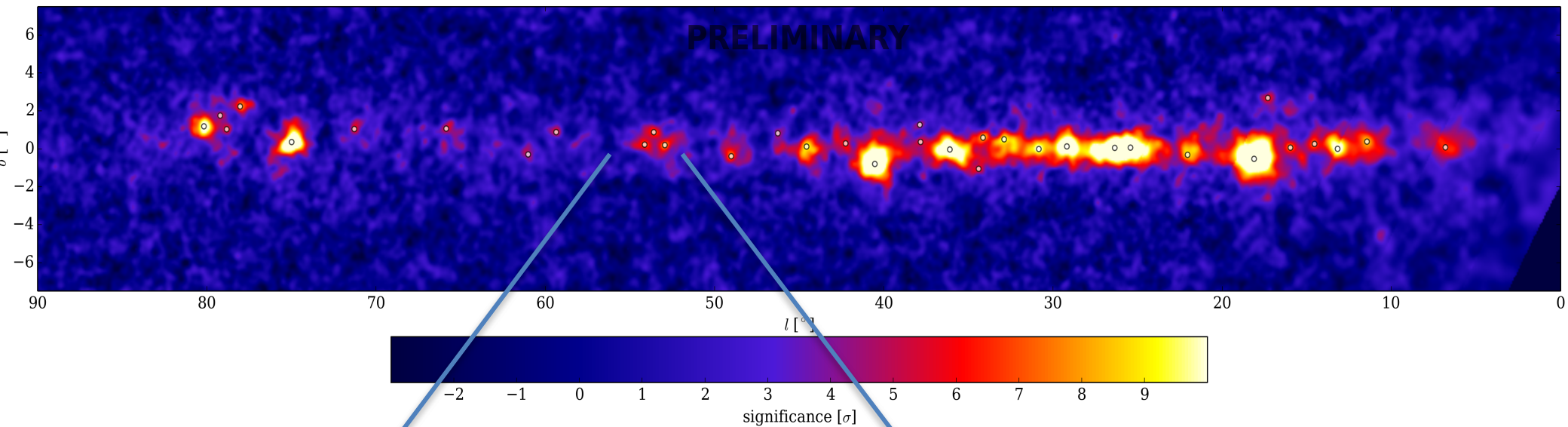
Búsqueda de emisión en TeV en T90
 en GRBs observados por satélites.

No detección hasta ahora



mapa del cielo en gammas de HAWC





Asociación
incierto

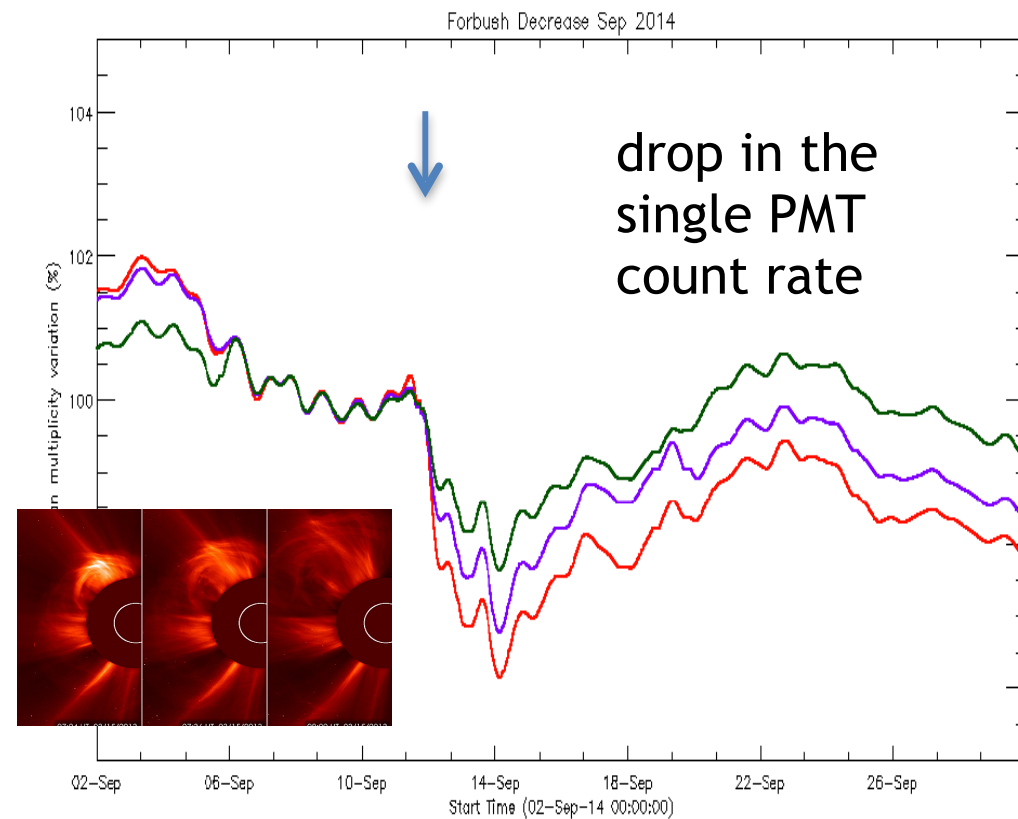
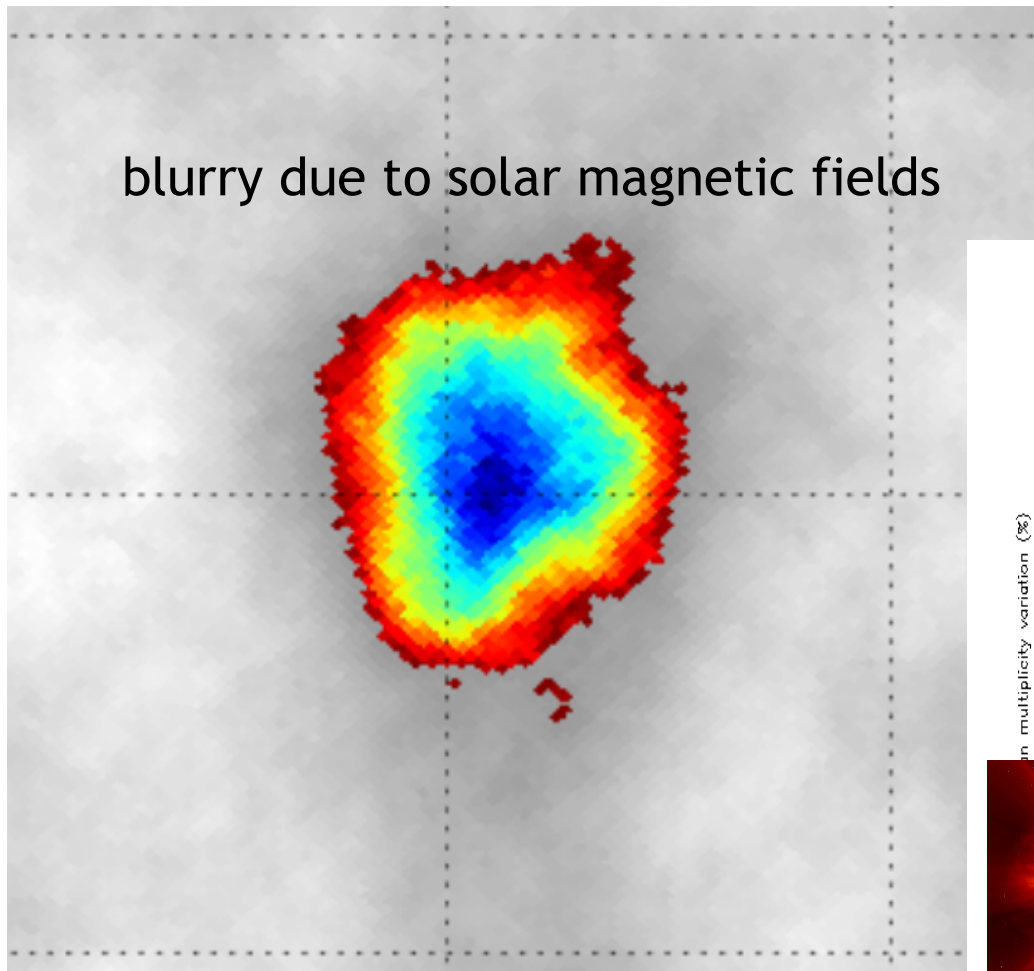
Remanente de
supernova con
pulsar muy
energético

~40 fuentes identificadas
el primer año
1/4 de ellas son nuevas

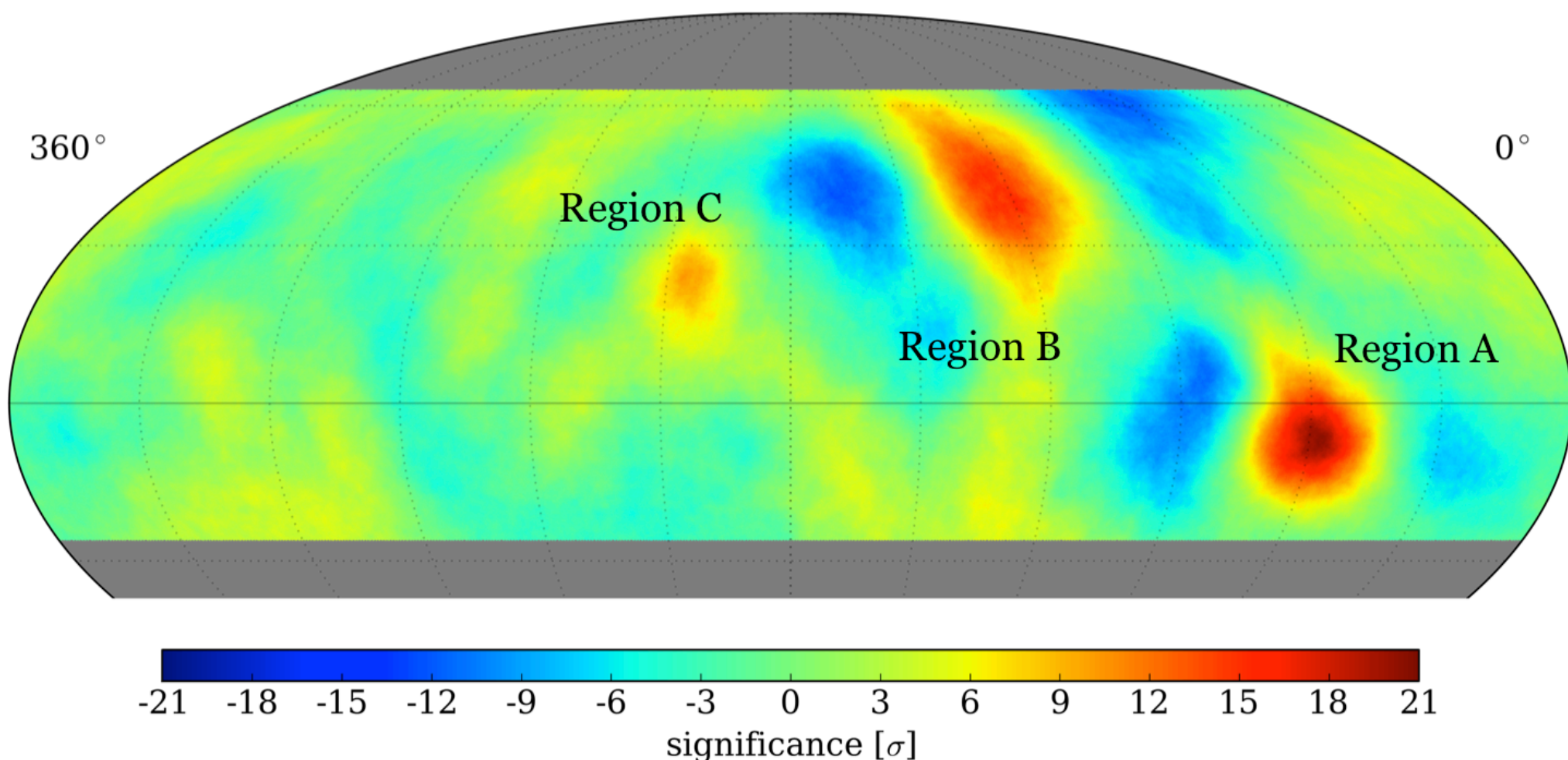
Pulsar a ~ 26,000 años
luz

Sombra del Sol y decrementos de Forbush

- CME in Earth direction modify the geomagnetic environment



Anisotropía de CR hasta 10 TeV (7.3σ , 6.5σ , 5.7σ) con espectro mas duro que el local. A y B ya observadas por Milagro y otros instrumentos. Giroradio de un proton de 10 TeV en campo magnético de $1\mu\text{G}$ es **0.01 parsecs**=2000 AU. No hay fuentes conocidas a estas distancias. (15 parsecs radio Via Lactea, 5×10^5 pc Sist Solar, **1.3 pc Alfa Centauri**)



2101500

2101250

2101000

FINANCIADO

Determinar el centro en un área 4 veces mayor que HAWC

Factor de 3-4 de ganancia para reconstruction la eficiencia de reconstruction $E_{\gamma} > 10 \text{ TeV}$

Puesta en marcha para primavera del 2017





GRACIAS

Estudiantes son bienvenidos

magda@astro.unam.mx

<http://hawc-observatory.org>