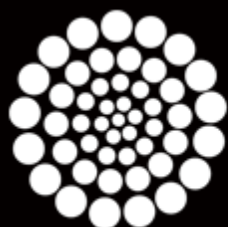




Surveying active galactic nuclei with the HAWC γ -ray observatory

Alberto Carramiñana

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

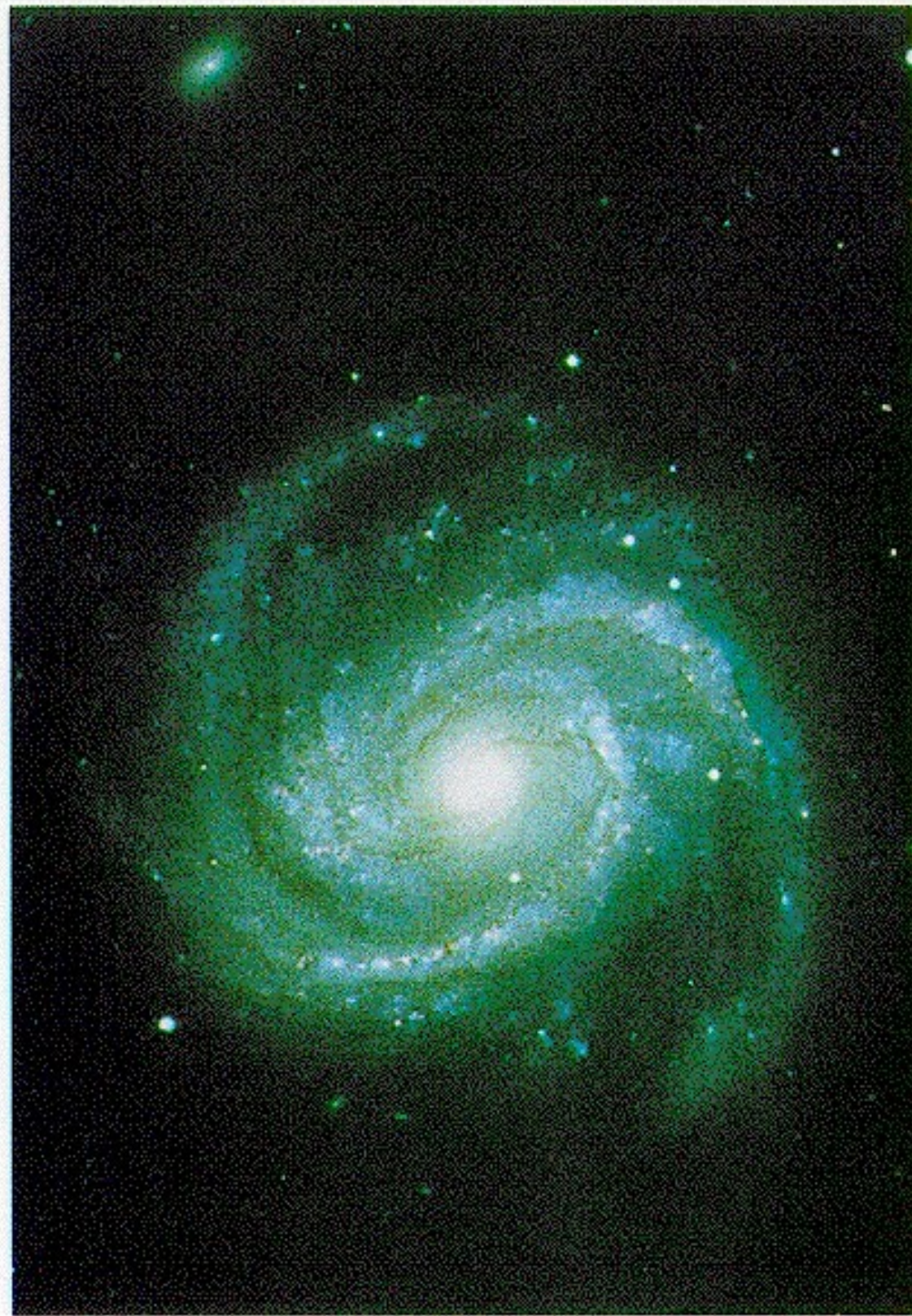


CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología

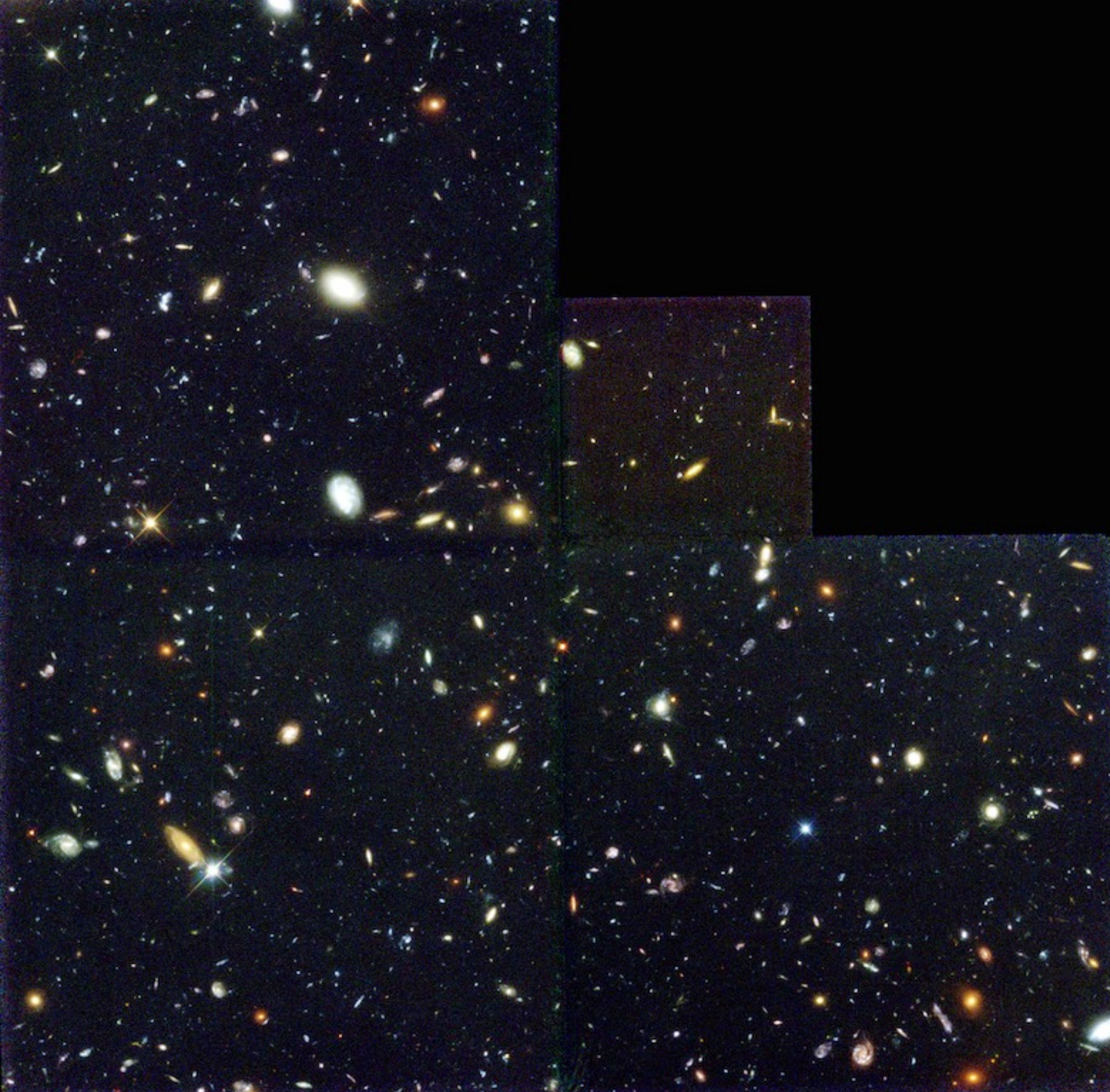
Reunión de la División de Rayos Cósmicos SMF
Puebla, 28 de noviembre de 2019



(a)



(b)





M 31

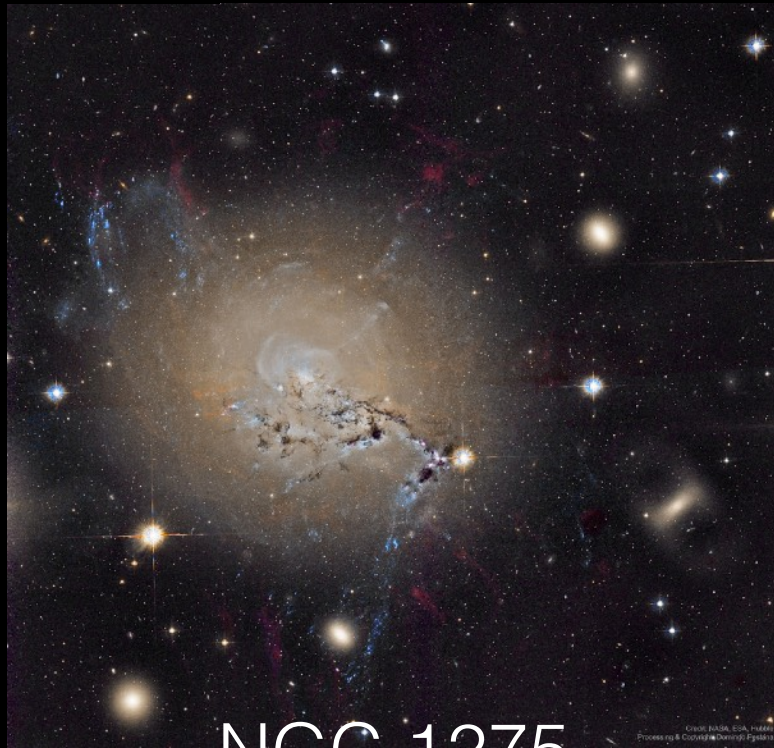


Arp 29

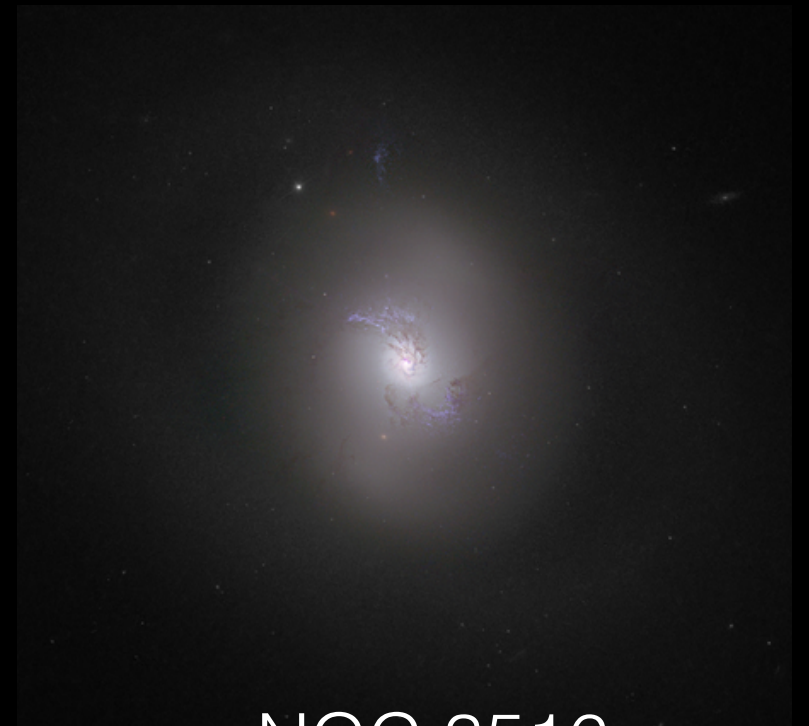
Seyfert galaxies (1943)



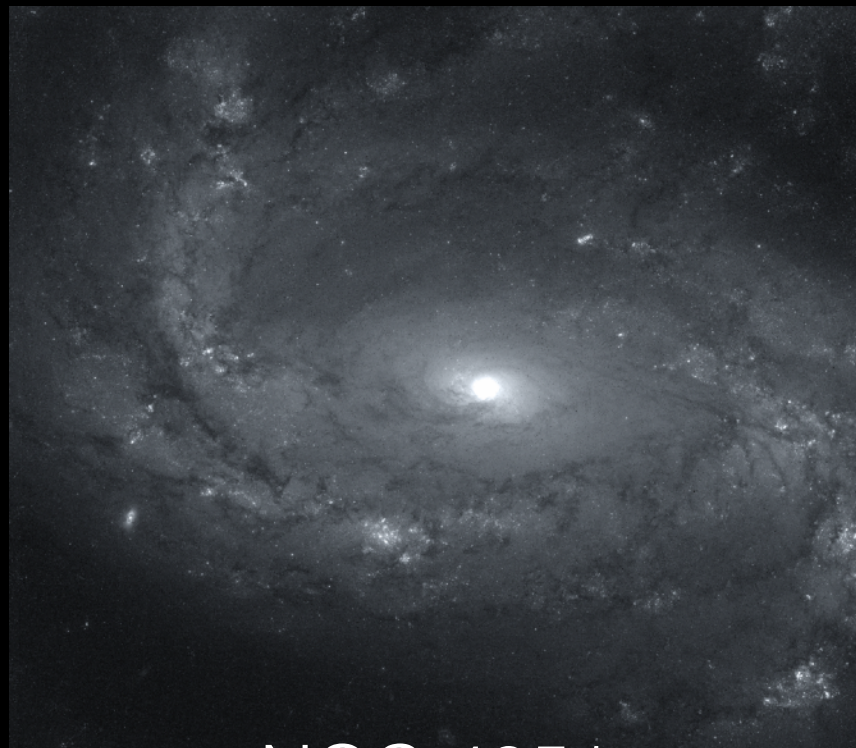
NGC 1068



NGC 1275



NGC 3516



NGC 4051



NGC 4151



NGC 7469

NOTA PRELIMINAR SOBRE GALAXIAS AZULES CON LINEAS DE EMISION *

Guillermo Haro

Mediante el uso de la técnica fotográfica desarrollada en el Observatorio de Tonantzintla para el estudio de estrellas de tipo T Tauri con fuerte radiación ultravioleta,¹ hemos investigado algunas regiones lejanas al ecuador galáctico —particularmente cerca de los polos galácticos— con el fin de descubrir nuevas estrellas enanas blancas u objetos muy azules o ultravioletas semejantes a los descubiertos por Humason y Zwicky² en la región del polo norte galáctico. Tres exposiciones, ligeramente desplazadas la una de la otra, fueron sucesivamente hechas en cada placa (Eastman 103aD), bajo filtros que aislan regiones espectrales en el amarillo, el azul y el ultravioleta, respectivamente. La duración de las tres exposiciones se escogió de tal modo que una estrella no enrojecida y de tipo espectral A0, produjera imágenes aproximadamente de la misma densidad a través de cada uno de los filtros empleados. En la práctica, y tomando como referencia las estrellas A0-A5 contenidas en las áreas cubiertas, se encontró que en la mayoría de nuestras placas una estrella normal de tipo espectral A mostraba, sistemáticamente, la imagen amarilla con una densidad aproximadamente igual a la imagen azul, siendo las imágenes azul y amarilla ligeramente más brillantes que la imagen ultravioleta.

El mismo material fotográfico obtenido para el descubrimiento de estrellas azules, (los resultados preliminares a este respecto se publicarán por separado en un futuro próximo) sirvió para la identificación de un buen número de galaxias que muestran intensa radiación ultravioleta. En algunas de estas galaxias la relación de densidades en sus tres imágenes es comparable a la relación de densidades en las tres imágenes de estrellas de extremo color violeta, tales como ciertas enanas blancas o el núcleo de nebulosas planetarias.

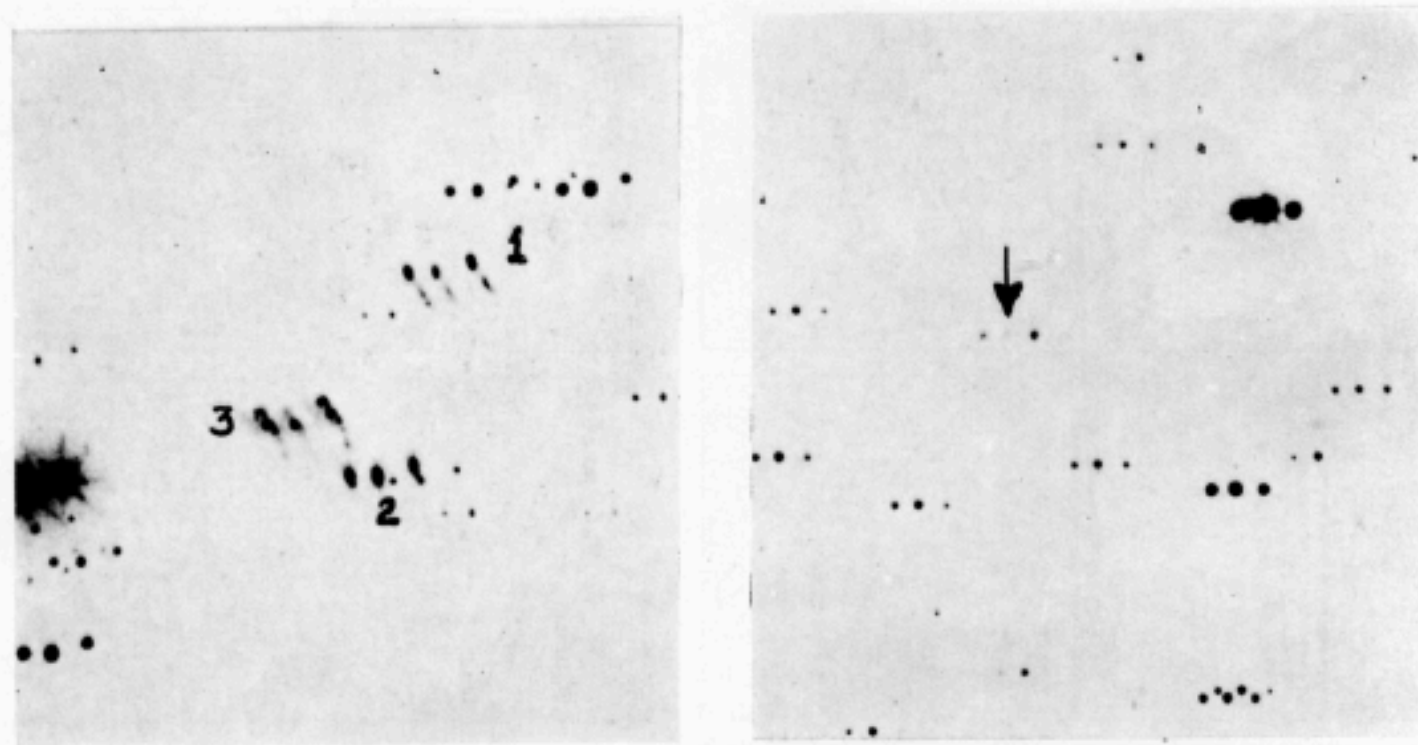


Figura 1. En estas fotografías en tres colores las galaxias señaladas con los números 1, 2, 3, son NGC 3991, 3994 y 3995, respectivamente. Cada una aparece (de derecha a izquierda) en luz ultravioleta, amarilla y azul. A la derecha del grabado se indican con una flecha las tres imágenes de la galaxia Nº 4 de la Tabla I.

Tonantzintla blue galaxies

1. NGC 3991:
emission line galaxy

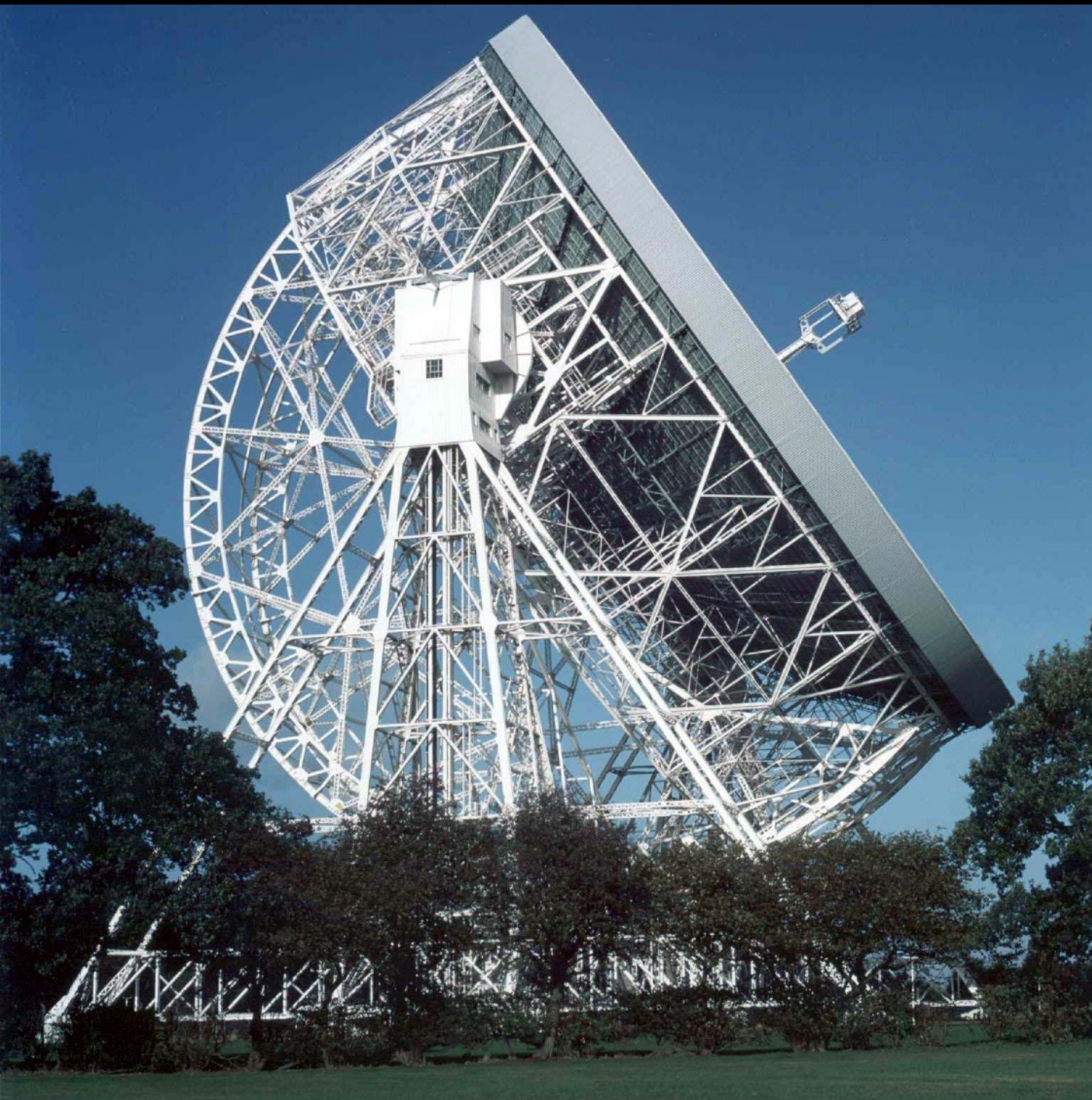
2. NGC 3994:
LINER AGN

3. NGC 3995:
Radiogalaxy

4. Mrk 36:
starburst galaxy

44 galaxias con líneas de emisión,
y/o excesos en el azul o UV.

Tonantzintla blue stars:
Iriarte & Chavira (1957)
Chavira (1958)

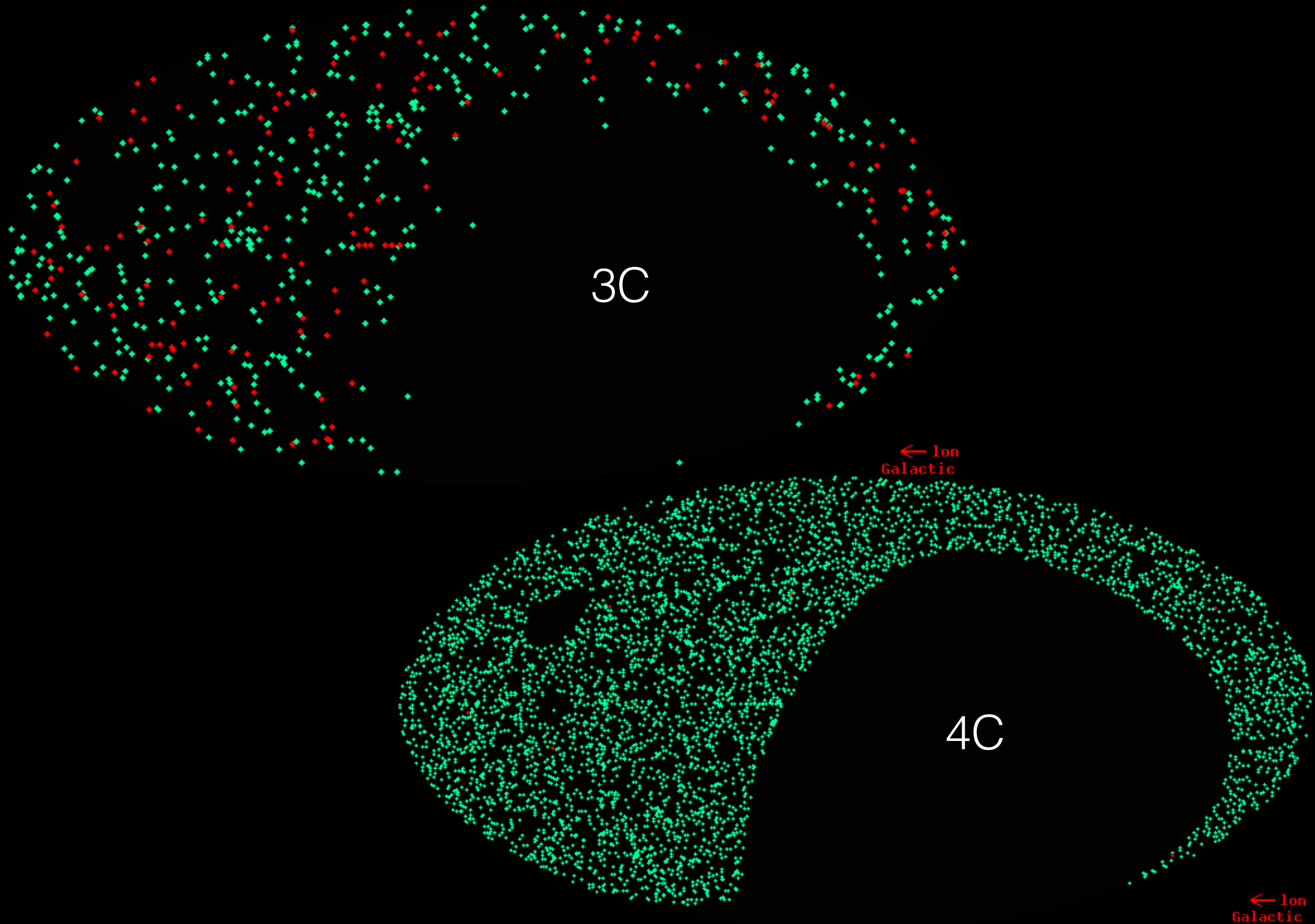


Cen A



Cambridge MRAO - 4C array

By Cmglee - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=33433735>



3C 273

No. 4881

May 18, 1963

NATURE

651

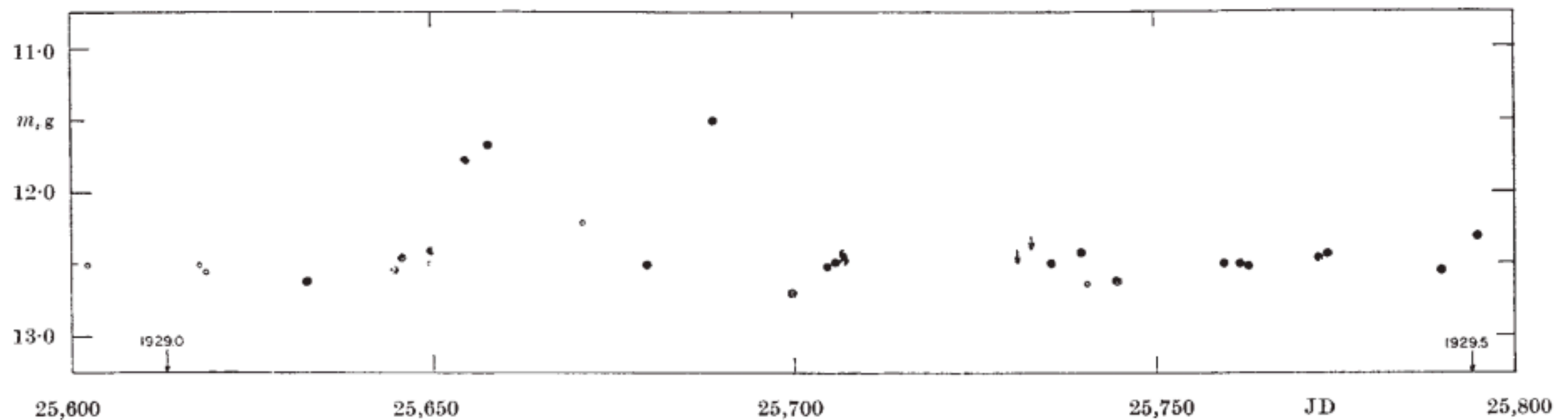
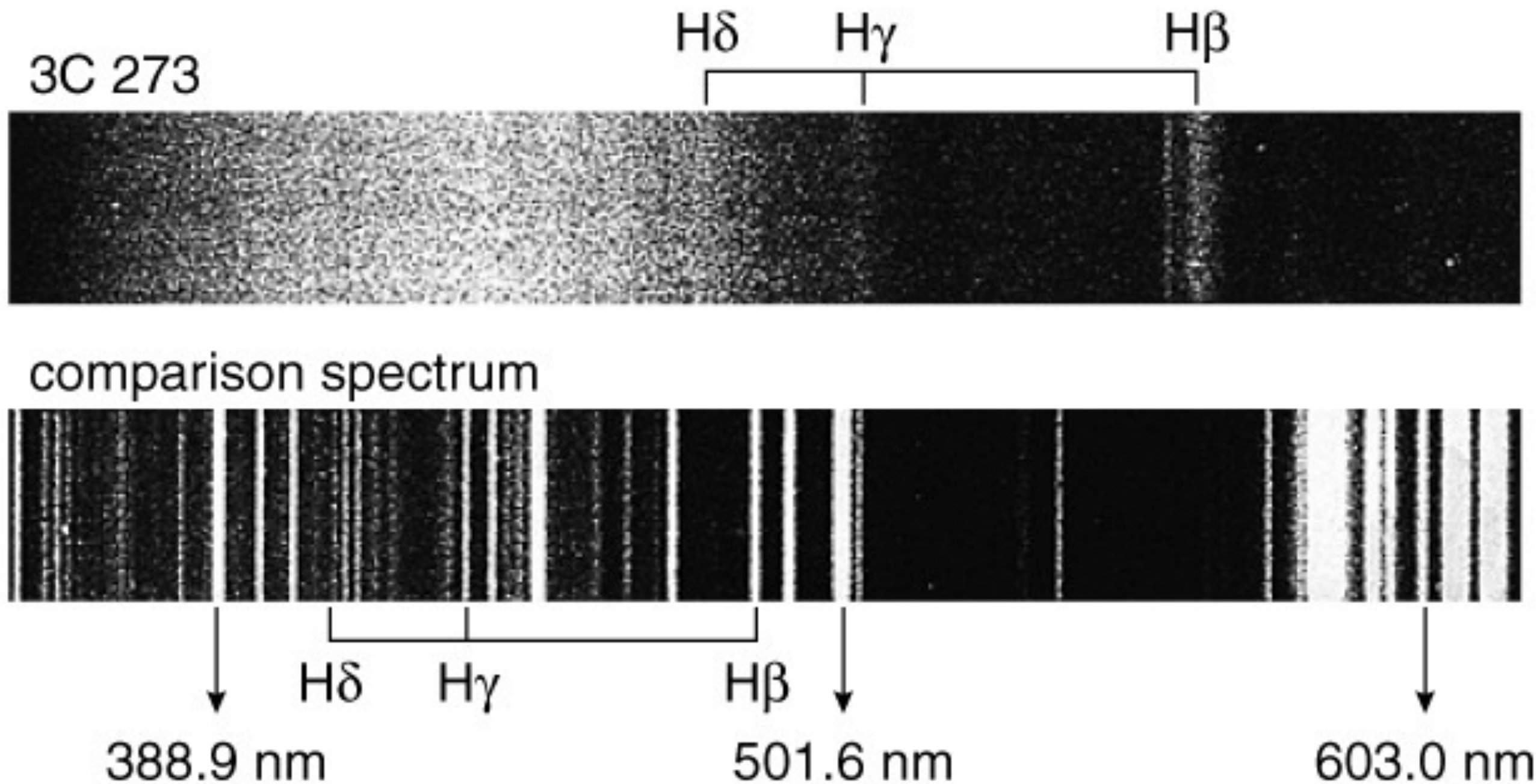


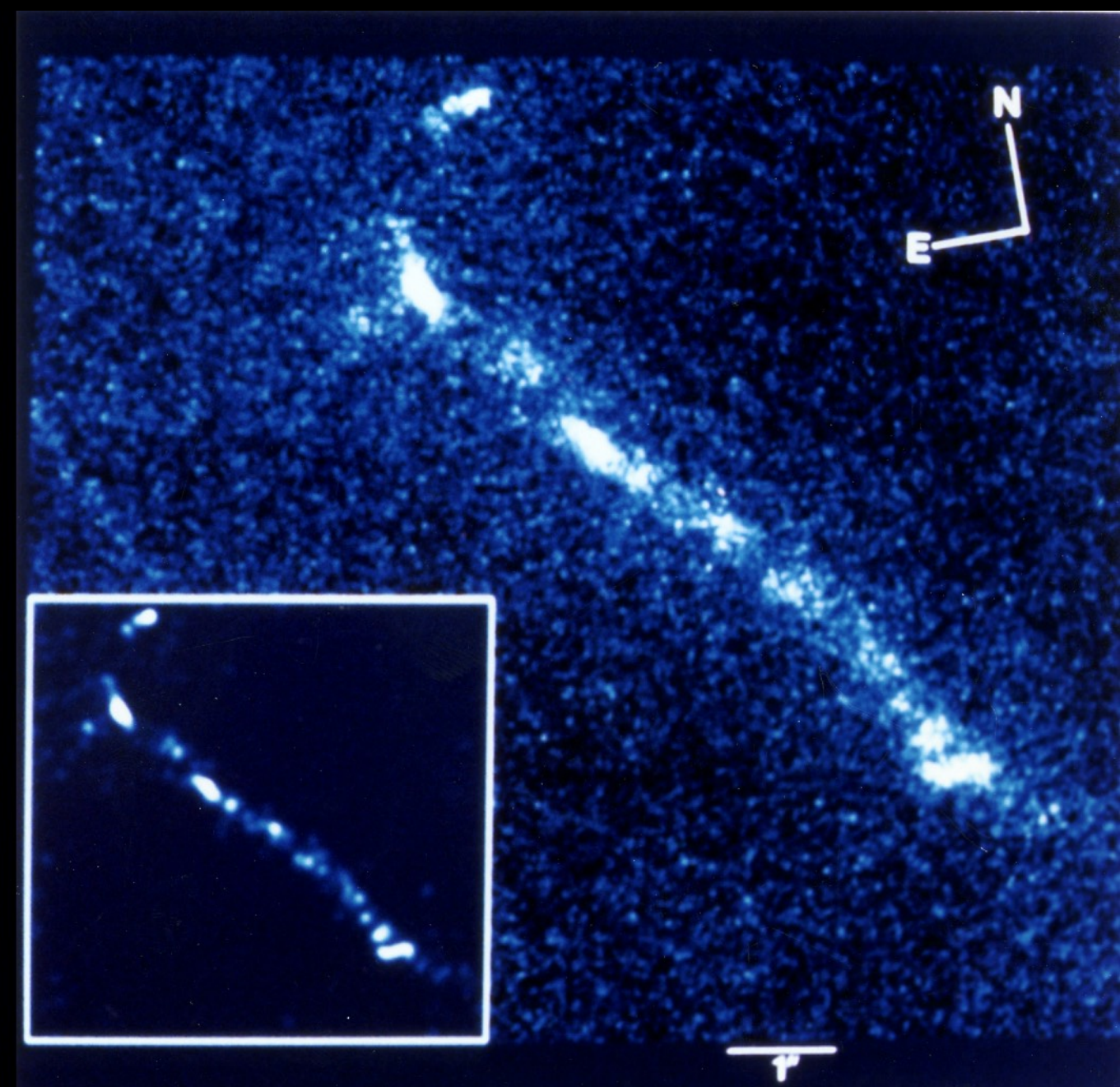
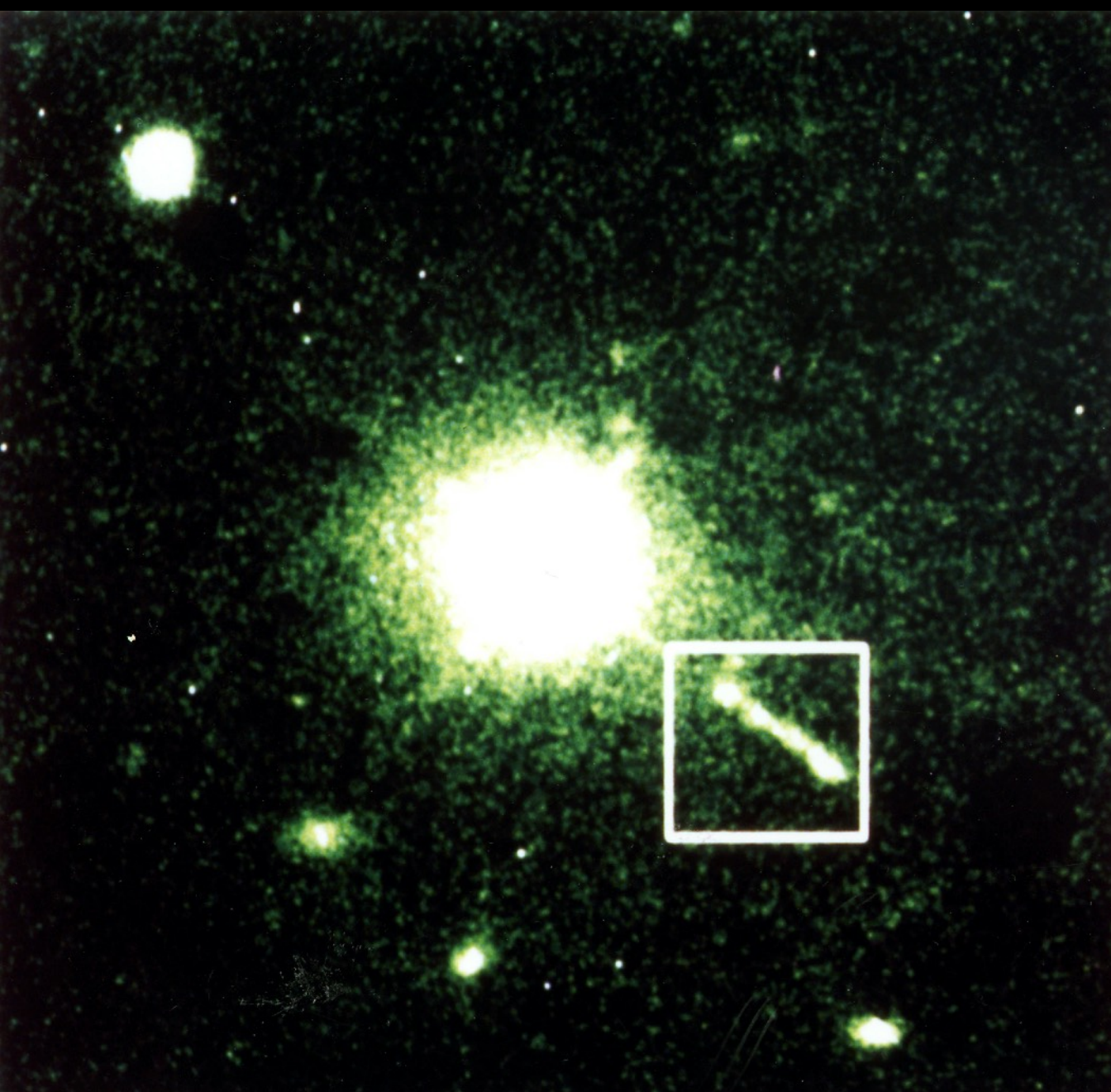
Fig. 2. Individual observations for 1929, plotted on an expanded time-scale to bring out the character of the apparent flashes. Black circles refer to strong measures; white circles to cases where the individual estimate was questionable for any reason; arrows indicate that the object was invisible on a plate reaching to the given magnitude



© Addison-Wesley Longman

Schmidt & Oke (1963)

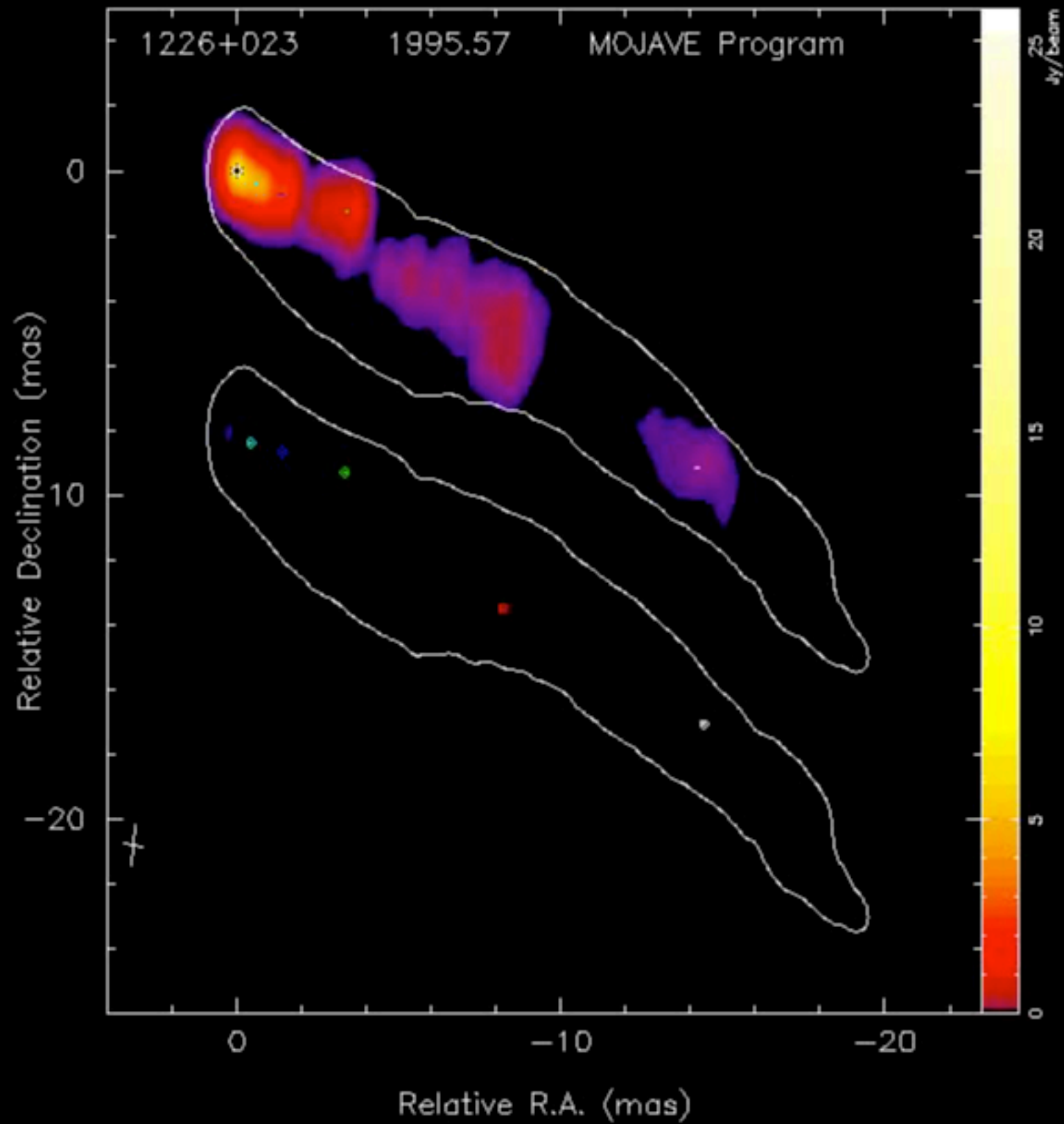




HST snaps optical jet of quasar 3c 273

Credit:

R.C. Thomson, IoA, Cambridge, UK;C.D. Mackay, IoA, Cambridge, UK;A.E. Wright, ATNF, Parkes, Australia



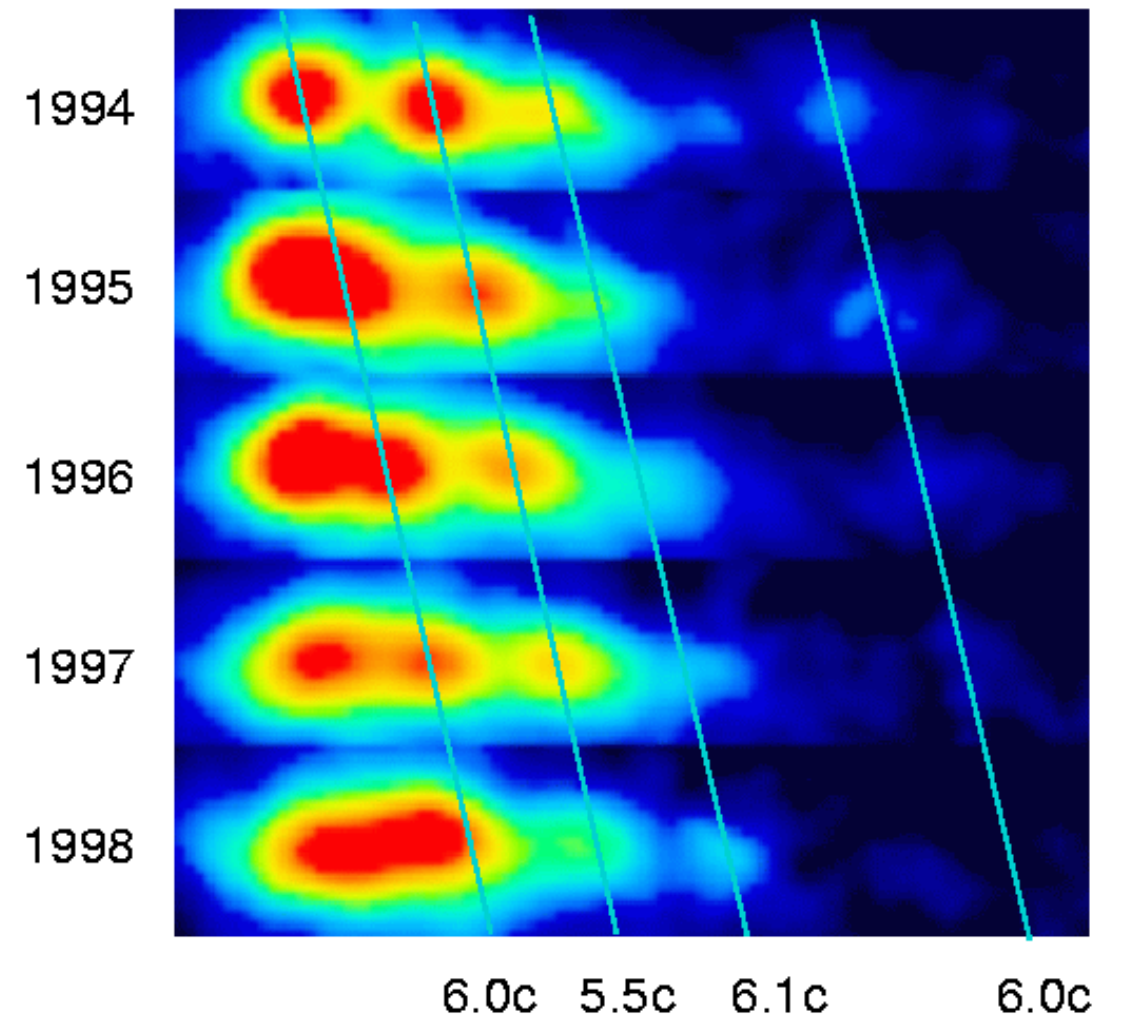
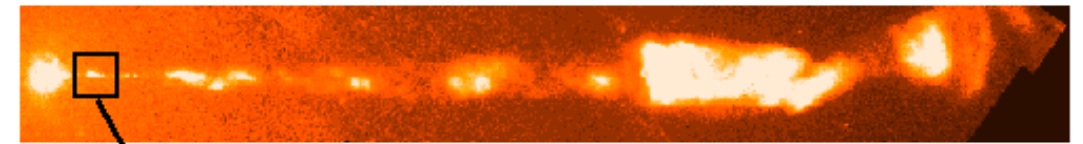
<https://www.physics.purdue.edu/MOJAVE/movies.html>



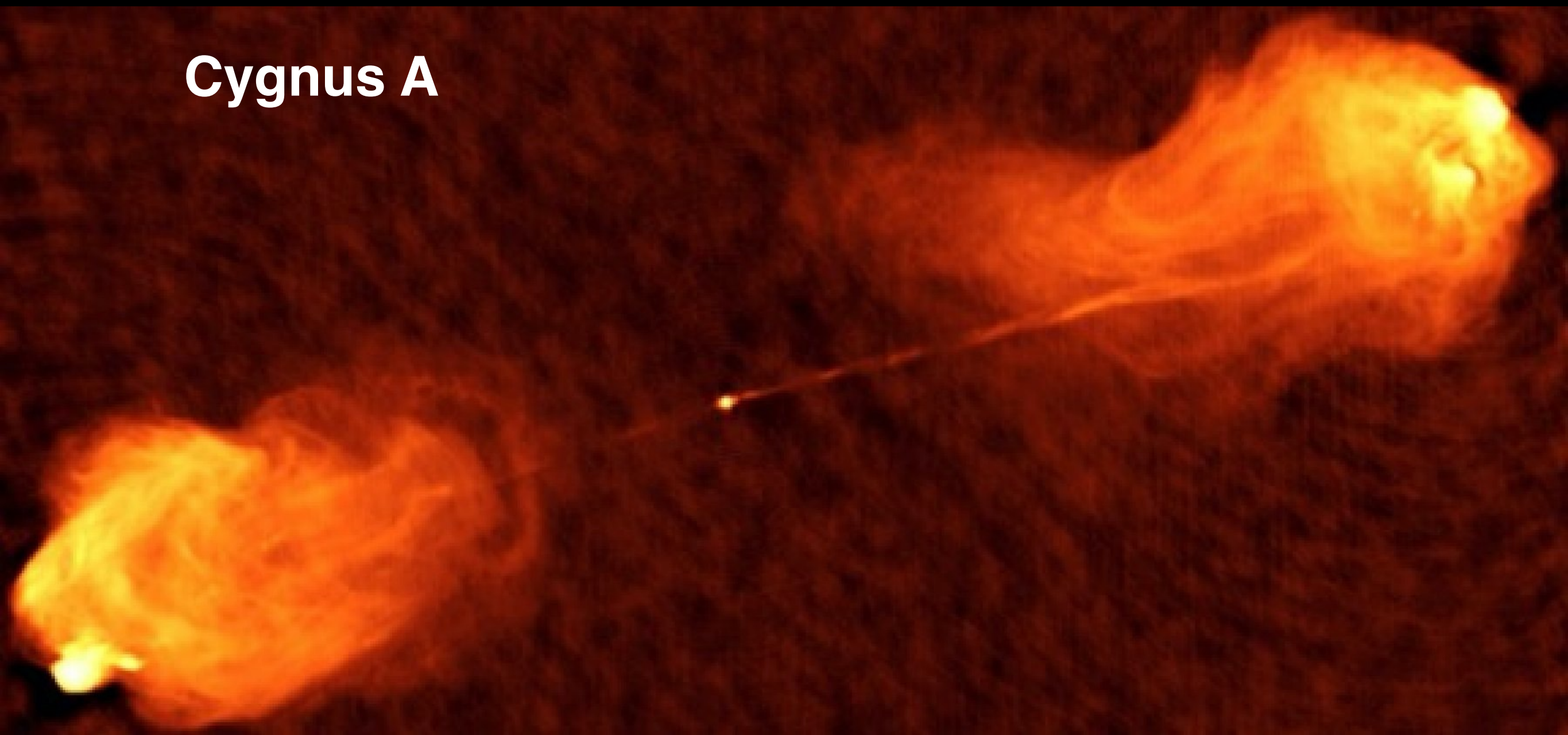
M 87 - apod.nasa.gov (20 mayo 2010)



Superluminal Motion in the M87 Jet



Cygnus A



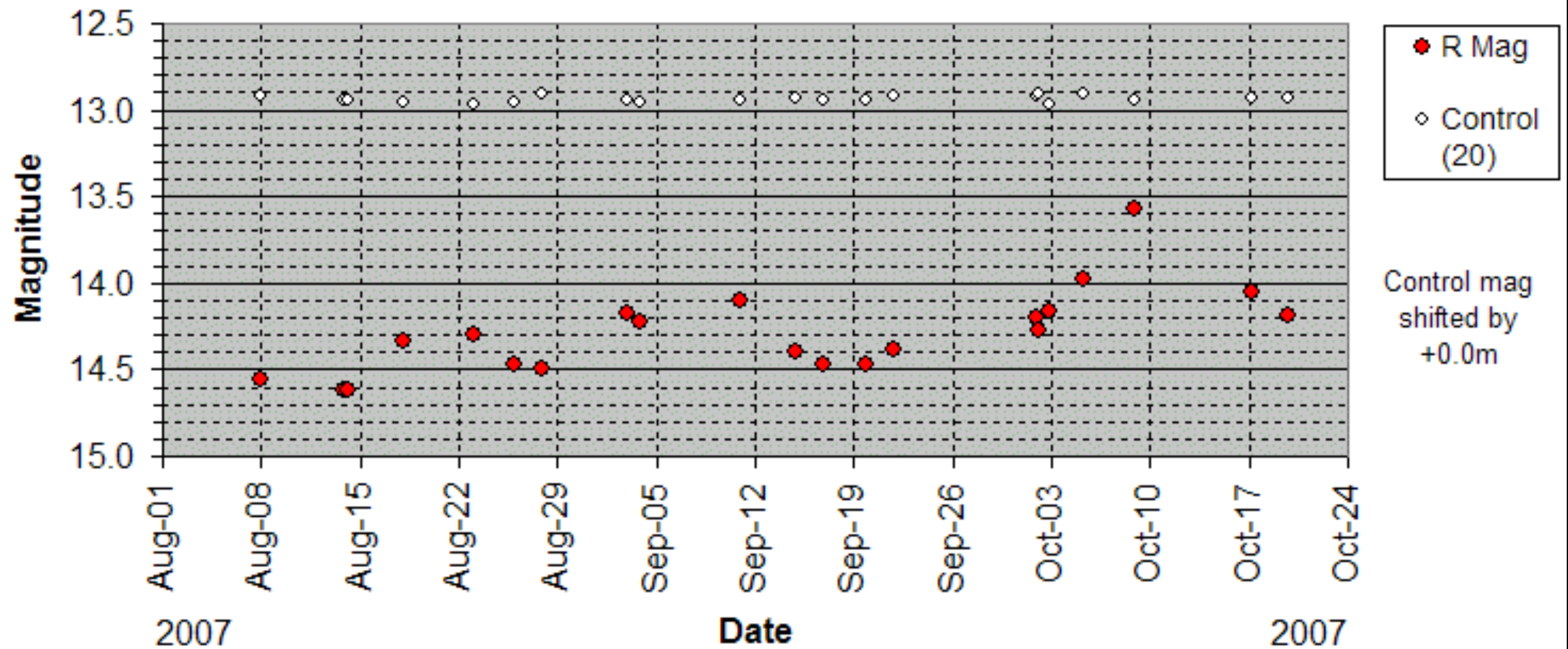
← 160,000 años-luz (!) →

BL Lacertae

- Descubierta como estrella variable (Hoffmeister 1929).
- Identificada con VRO 42.22.01 y evidencia de galaxia subyacente (McLeod et al. 1965; Schmitt 1968).
- Alta y rápidamente variable. Espectro continuo, no térmico, sin líneas, altamente polarizado.
- Galaxia elíptica anfitriona: $z=0.07$, obstruyendo la luz del núcleo (Oke & Gunn 1974).

Tritton & Brett (1970)
Howard et al (2004)

BL Lac - R Band Magnitude Variation



Oct 25, 2002
01:52:30 UTC

<http://www.calvin.edu/academic/phys/observatory/images/Astr212.Fall2002/BLLac/>

Cuasares y galaxias activas

- **Cuasares:** descubiertos como objetos aparentemente estelares por su intensa emisión en radio
- **QSOs** (Quasi-Stellar Objects): objetos extragalácticos con propiedades similares a los cuasares, sin tener necesariamente emisión en radio.
- **Galaxias Seyfert:** Seyfert (1943) identifica una serie de galaxias con núcleo particularmente brillante y exceso de emisión azul (Haro 1956, Markarian 1967)
- **Radio galaxias:** galaxias con intensa emisión de radio; mayormente elípticas.
- **Objetos BL Lac:** fuentes de radio quasi-estelares, sin líneas en el óptico; algunos identificados como núcleos de galaxias elípticas. Muchos emiten rayos X.

¿Naturaleza de los AGNs?

Una pista: la emisión de radio por sincrotrón de electrones relativistas en campos magnéticos (Shlovsky 1952)

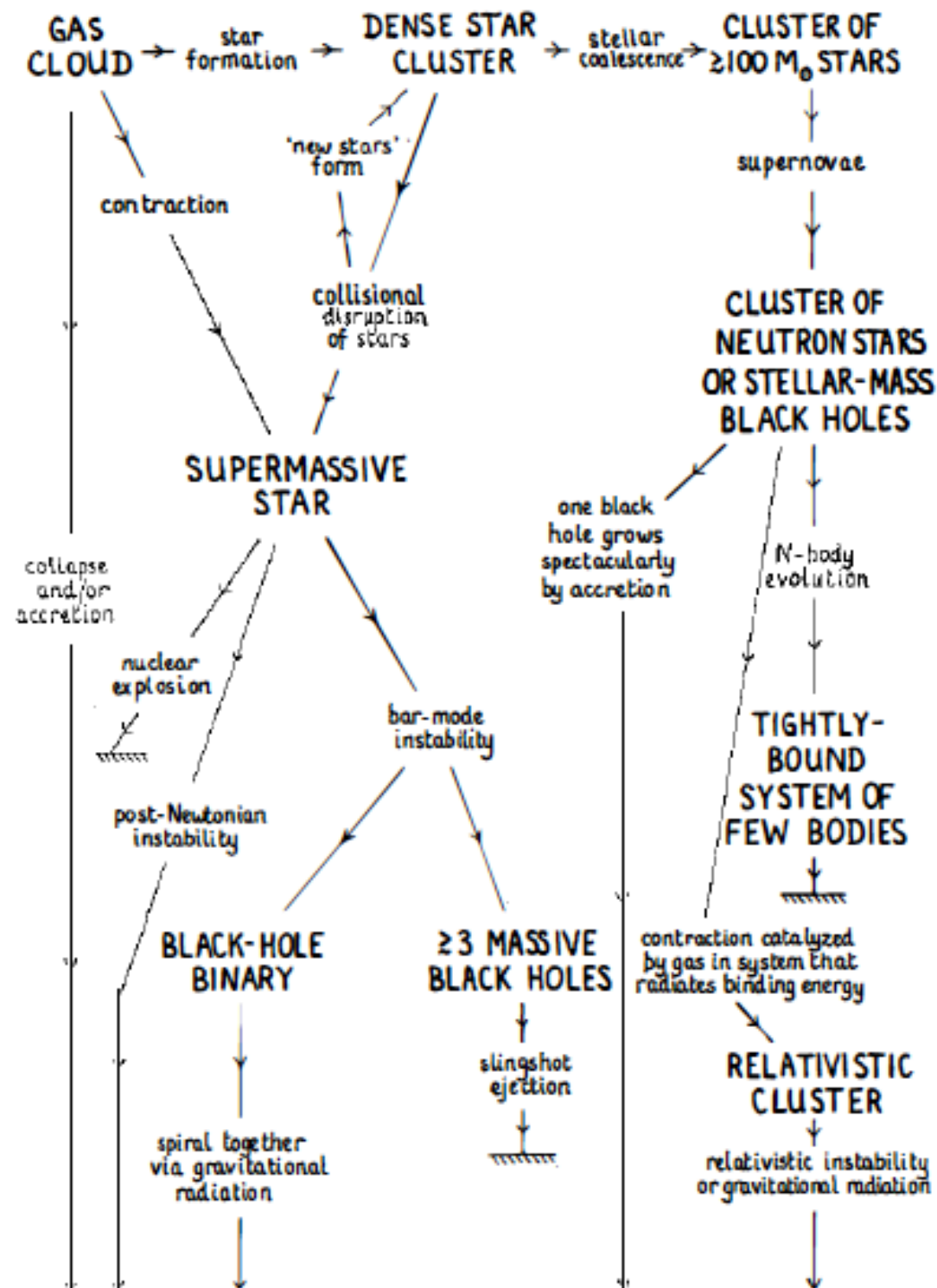
- ¿Colisión de nubes de gas durante colisiones entre galaxias?
- ¿Supernovas en cadena (Burbidge 1970s)? Modelo starburst (Terlevich & Melnick 1985).
- ¿Aniquilación de materia y antimateria?
- ¿Evolución explosiva de un objeto “estelar” de muy alta masa (Hoyle & Fowler 1962)?
- ¿Acreción en objetos supermasivos (Hoyle & Fowler 1963, Salpeter 1964)?

Hoyos negros

- ▶ Las estrellas negras de Michell (1783):

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{r} \Rightarrow r_s = \frac{2GM}{c^2} \approx 3 \text{ km } (M/M_{\odot}) .$$

- ▶ Solución a las ecuaciones de Einstein, describiendo la deformación del espacio-tiempo con simetría esférica alrededor de una masa M (Schwarzschild 1915): r_s define al horizonte de eventos.
- ▶ Oppenheimer & Snyder (1939) describen el colapso de una estrella a una “singularidad”.
- ▶ Kerr (1963) resuelve las ecuaciones de Einstein para una masa en rotación.



massive black hole

Figure 1 Schematic diagram [reproduced from Rees (106)] showing possible routes for runaway evolution in active galactic nuclei.

Hoyos negros Supermasivos

- Generación de energía ✓
- Variabilidad ✓
- Jets ✓
- Emisión de radio, rayos X, rayos γ ✓
- Formación de un SMBH?

Acreción en hoyos negros

- ▶ El traer una masa m de infinito a r_s puede liberar en teoría una energía,

$$\Delta E = -\frac{GMm}{r_s} = \eta mc^2 \quad \text{con } \eta = 1/2.$$

- ▶ Los procesos de acreción originan la formación de discos. Para discos alrededor de hoyos negros sin rotación, la última órbita estable queda en $r = 3r_s \rightarrow \eta = 1/6$.
- ▶ Los hoyos negros en rotación (ℓ : parámetro de rotación):
 - ▶ El horizonte de eventos es más pequeño: $r_+ = m + \sqrt{m^2 - \ell^2}$.
 - ▶ Las órbitas estables son más cercanas: $\eta \rightarrow 0.42$.
 - ▶ Tienen una "ergósfera": $r_+ = m + \sqrt{m^2 - \ell^2 \cos^2 \theta}$.
 - ▶ Es posible la extracción de energía entrando en la ergósfera (Penrose 1969; Blandford & Znajek 1977).

2. INFERENCES INSENSITIVE TO DETAILED MODEL

Rees (1984, ARA&A)

2.1 *Some Fiducial Numbers*

Before focusing on specific properties of black holes, it is interesting to consider some general features of compact ultraluminous sources. Certain order-of-magnitude quantities are involved in any model.

A central mass M has a gravitational radius

$$r_g = \frac{GM}{c^2} = 1.5 \times 10^{13} M_8 \text{ cm}, \quad 1.$$

where M_8 is the mass in units of $10^8 M_\odot$. The characteristic minimum time scale for variability is

$$r_g/c \simeq 500 M_8 \text{ s}. \quad 2.$$

A characteristic luminosity is the “Eddington limit,” at which radiation pressure on free electrons balances gravity:

$$L_E = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} \simeq 1.3 \times 10^{46} M_8 \text{ erg s}^{-1}. \quad 3.$$

Related to this is another time scale (112):

$$t_E = \frac{\sigma_T c}{4\pi G m_p} \simeq 4 \times 10^8 \text{ yr}. \quad 4.$$

Several inferences now follow about the radiation processes, given only the assumption that a primary flux with $L \simeq L_E$ is generated within radii a few times r_g :

1. Thermal radiation from *optically thick* material would be in the far-ultraviolet or soft X-ray region; if, however, thermal gas in the region were hot enough to emit X-rays, reabsorption would be unimportant.
2. If the bulk of the luminosity L were synchrotron radiation in a field $B \simeq B_E$ (Equation 6), then the self-absorption turnover would be (99)

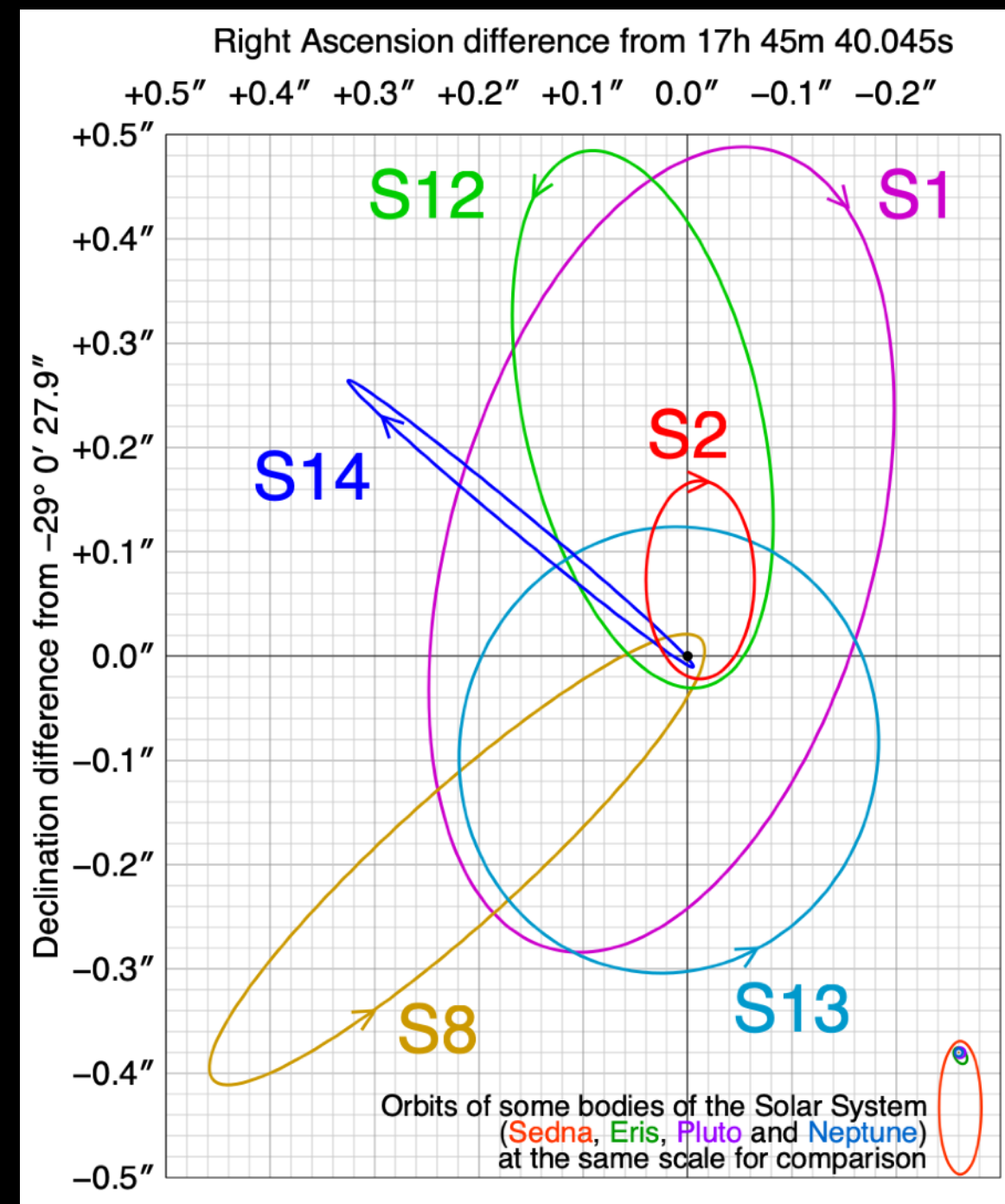
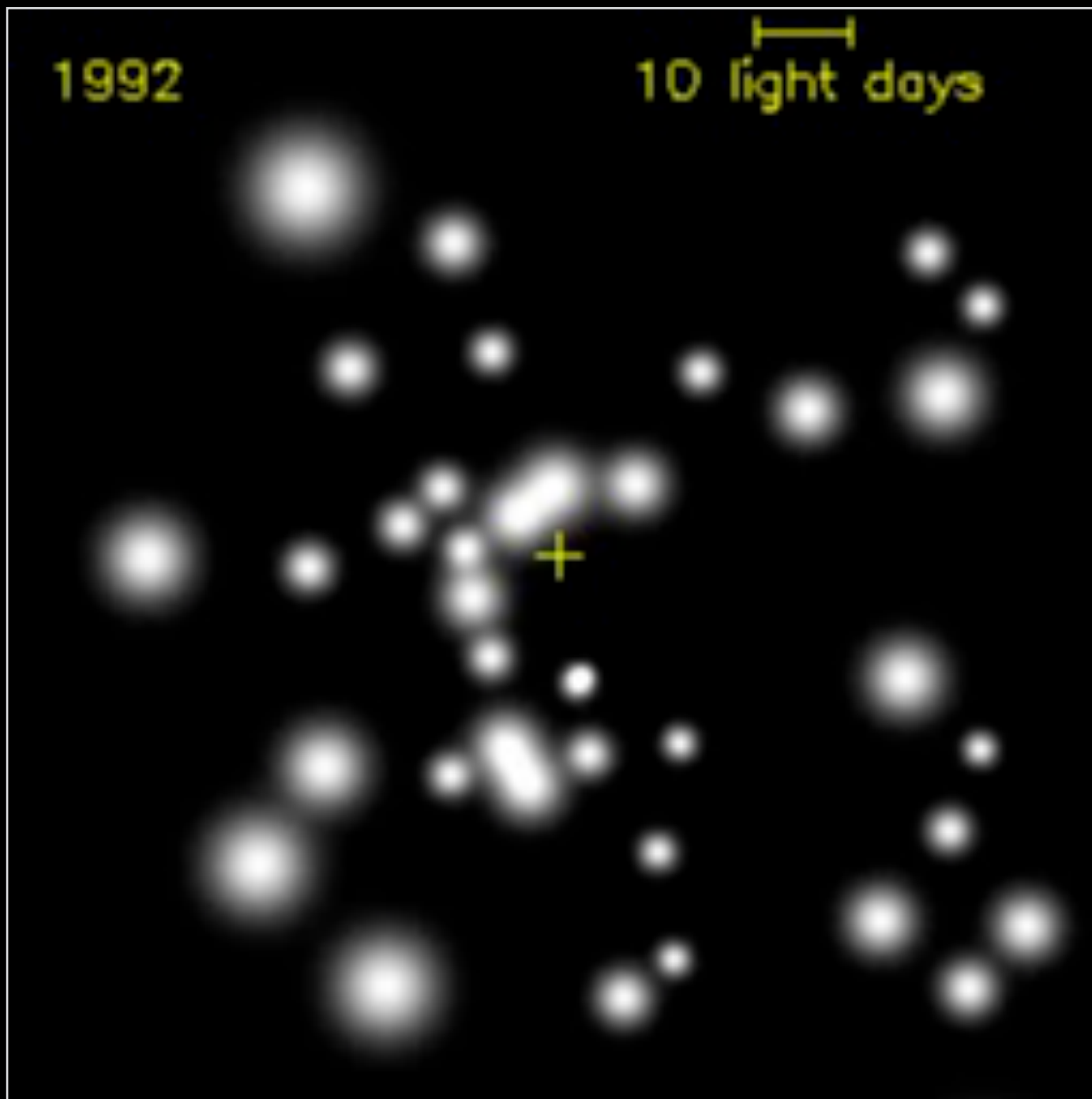
$$\nu_{sE} = 2 \times 10^{14} M_8^{-5/14} \quad 10.$$

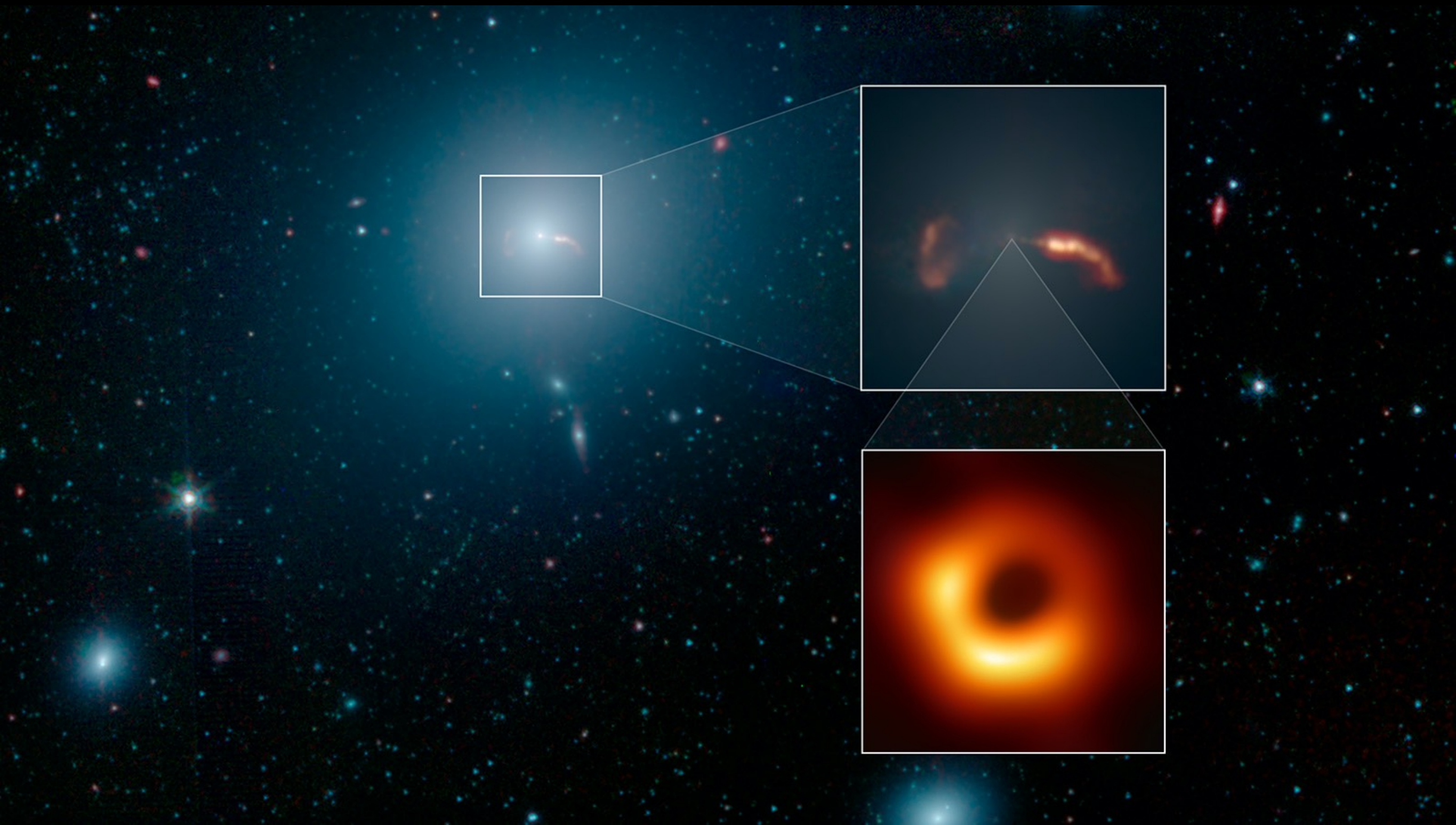
(i.e. typically in the infrared). No significant *radio* emission can come directly from $r \simeq r_g$ unless some coherent process operates at $\nu \simeq \nu_{cE}$. Synchrotron emission at $\sim \nu_{sE}$ would require electrons with $\gamma_e \simeq 40 M_8^{1/14}$.

3. The synchrotron or inverse Compton lifetimes of relativistic electrons is $\ll (r_g/c)$ under these conditions, so in any model involving such mechanisms, the radiating particles must be injected or repeatedly reaccelerated at many sites distributed through the source volume.
4. If a substantial fraction of the radiation were generated as gamma rays with energies $\gtrsim 1$ Mev, then electron-positron pairs would inevitably be produced.

Rees (1984, ARA&A)

Hoyo negro Galáctico



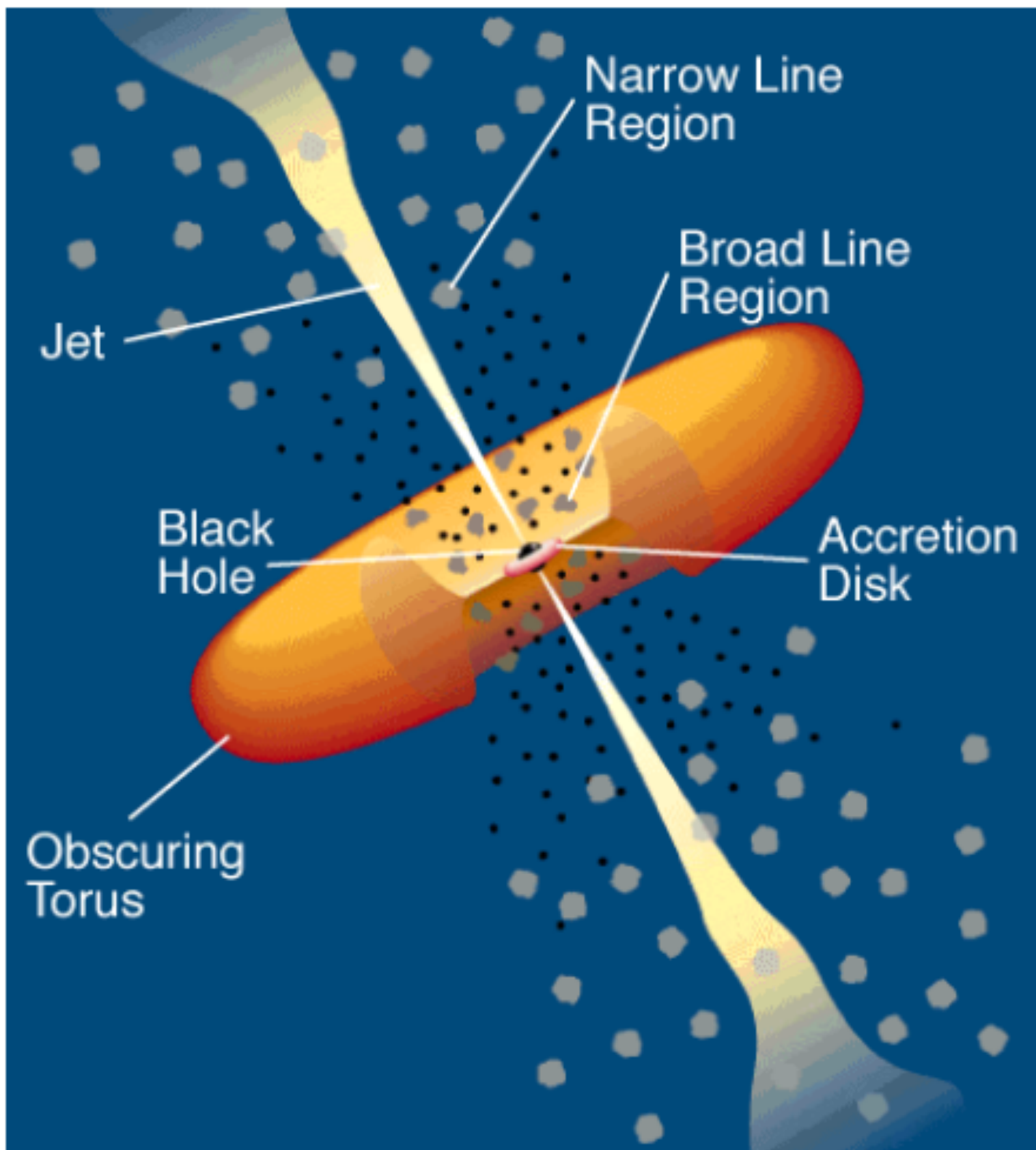


M 87 - apod.nasa.gov (27 abril 2019)



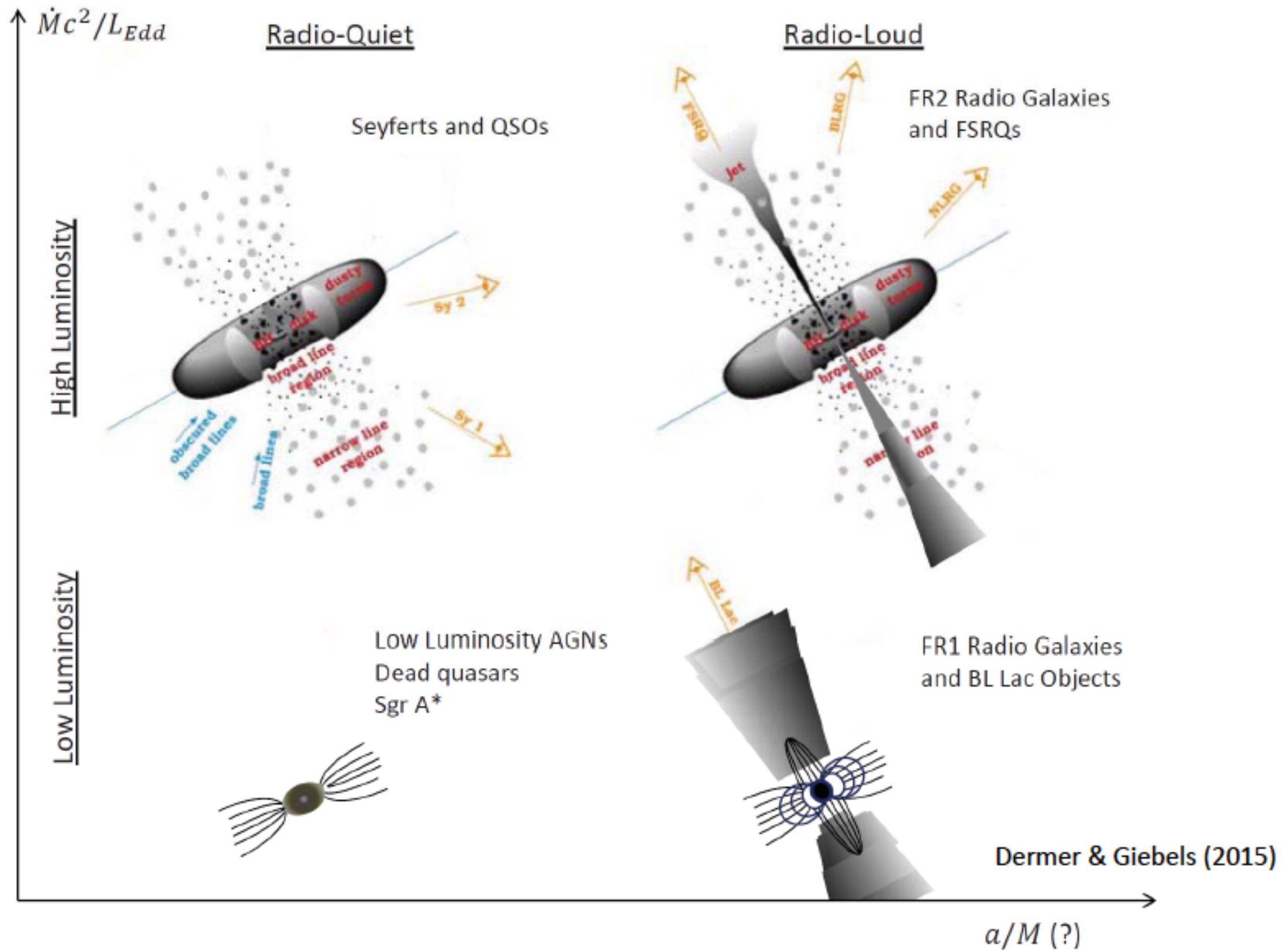
Modelos Unificados

- Incluye varias zonas para intentar explicar la diversidad de fenómenos observados.
- El tipo de núcleo activo que vemos depende de la orientación.



Urry & Padovani (1995)

Classes of AGN and Unification



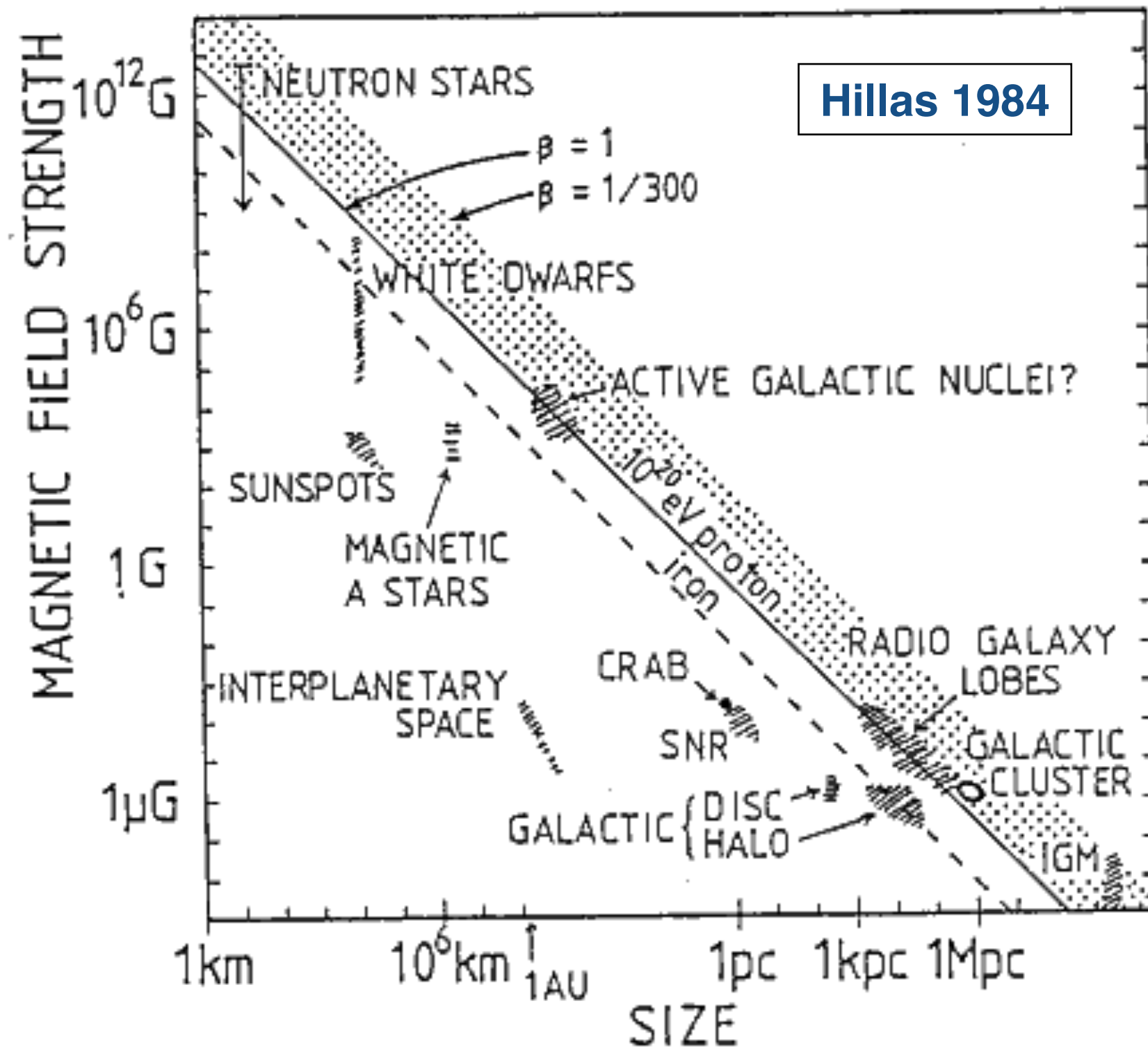
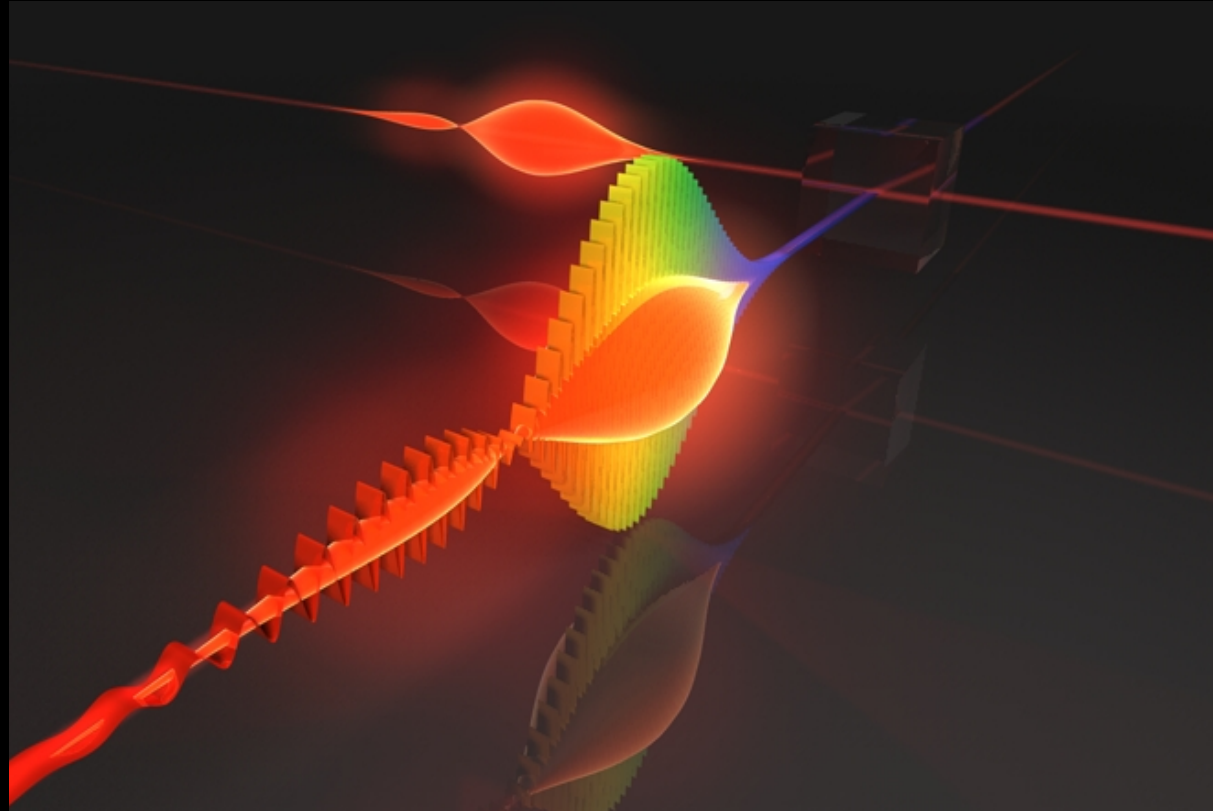


Figure 1. Size and magnetic field strength of possible sites of particle acceleration. Objects below the diagonal line cannot accelerate protons to 10^{20} eV.

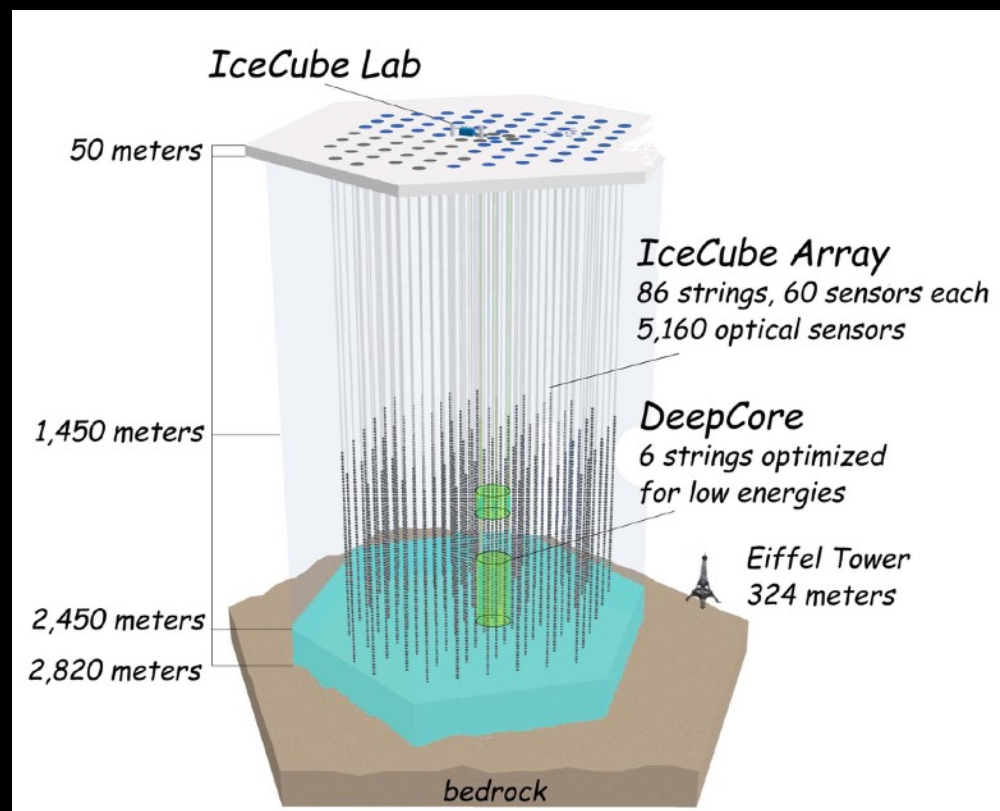
Luz y ondas electromagnéticas



Partículas cósmicas



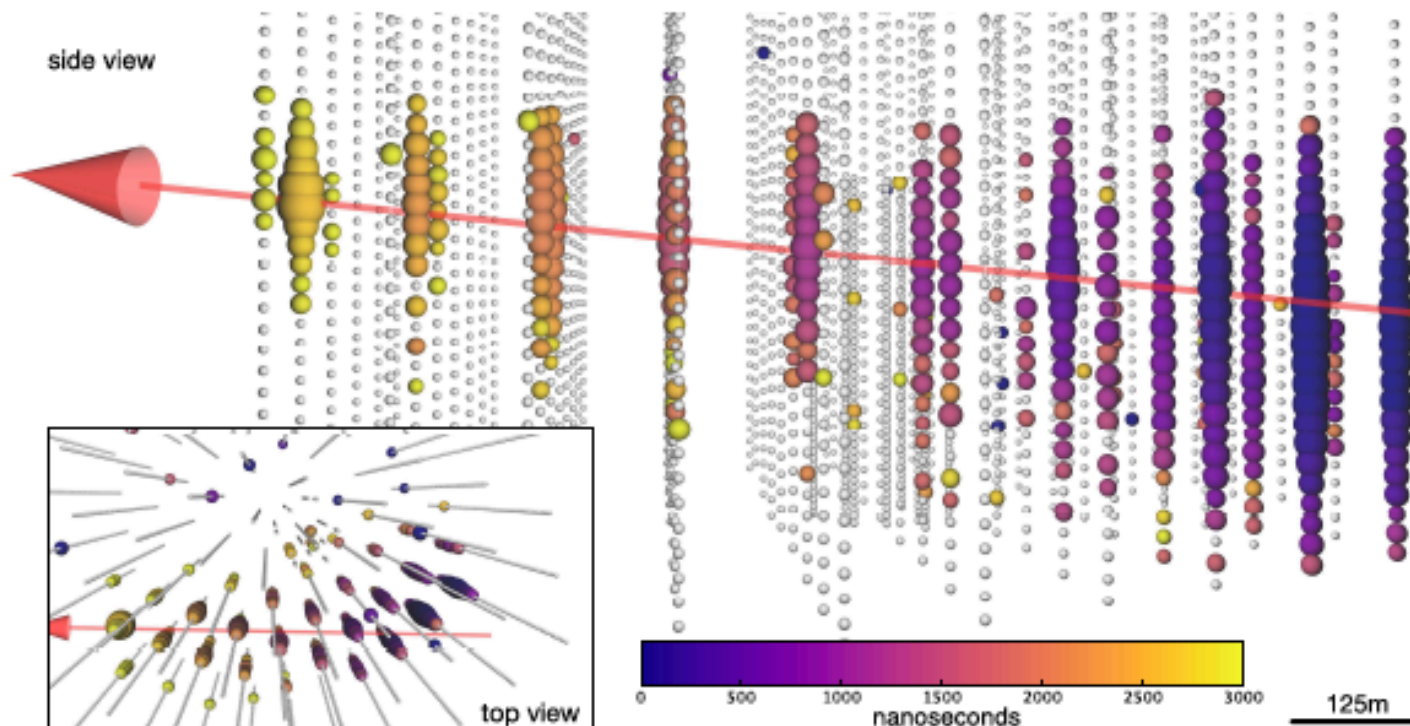
Neutrinos



Ondas gravitacionales



Fig. 1 Event display for neutrino event IceCube-170922A. The time at which a DOM observed a signal is reflected in the color of the hit, with dark blues for earliest hits and yellow for latest. Times shown are relative to the first DOM hit according to the track reconstruction, and earlier and later times are shown with the same colors as the first and last times, respectively. The total time the event took to cross the detector is ~3000 ns. The size of a colored sphere is proportional to the logarithm of the amount of light observed at the DOM, with larger spheres corresponding to larger signals. The total charge recorded is ~5800 photoelectrons. Inset is an overhead perspective view of the event. The best-fitting track direction is shown as an arrow, consistent with a zenith angle $5.7^{+0.50}_{-0.30}$ degrees below the horizon.



IceCube 170922A

Neutrino

$E_\nu = 290 \text{ TeV}$

$P(E_\nu > 183 \text{ TeV}) = 0.9$

TXS 0506+056

Activo en Fermi

Detectado MAGIC

$E > 90 \text{ GeV}$

$z = 0.3365$

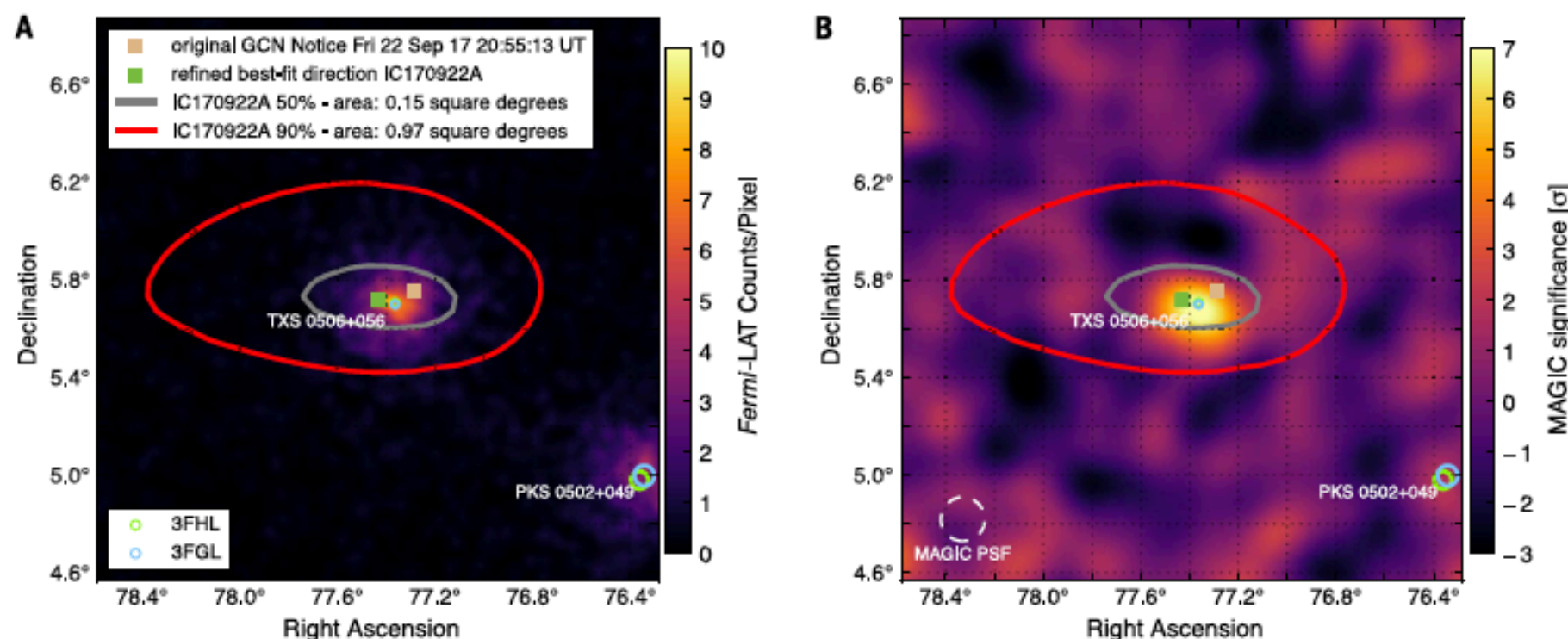
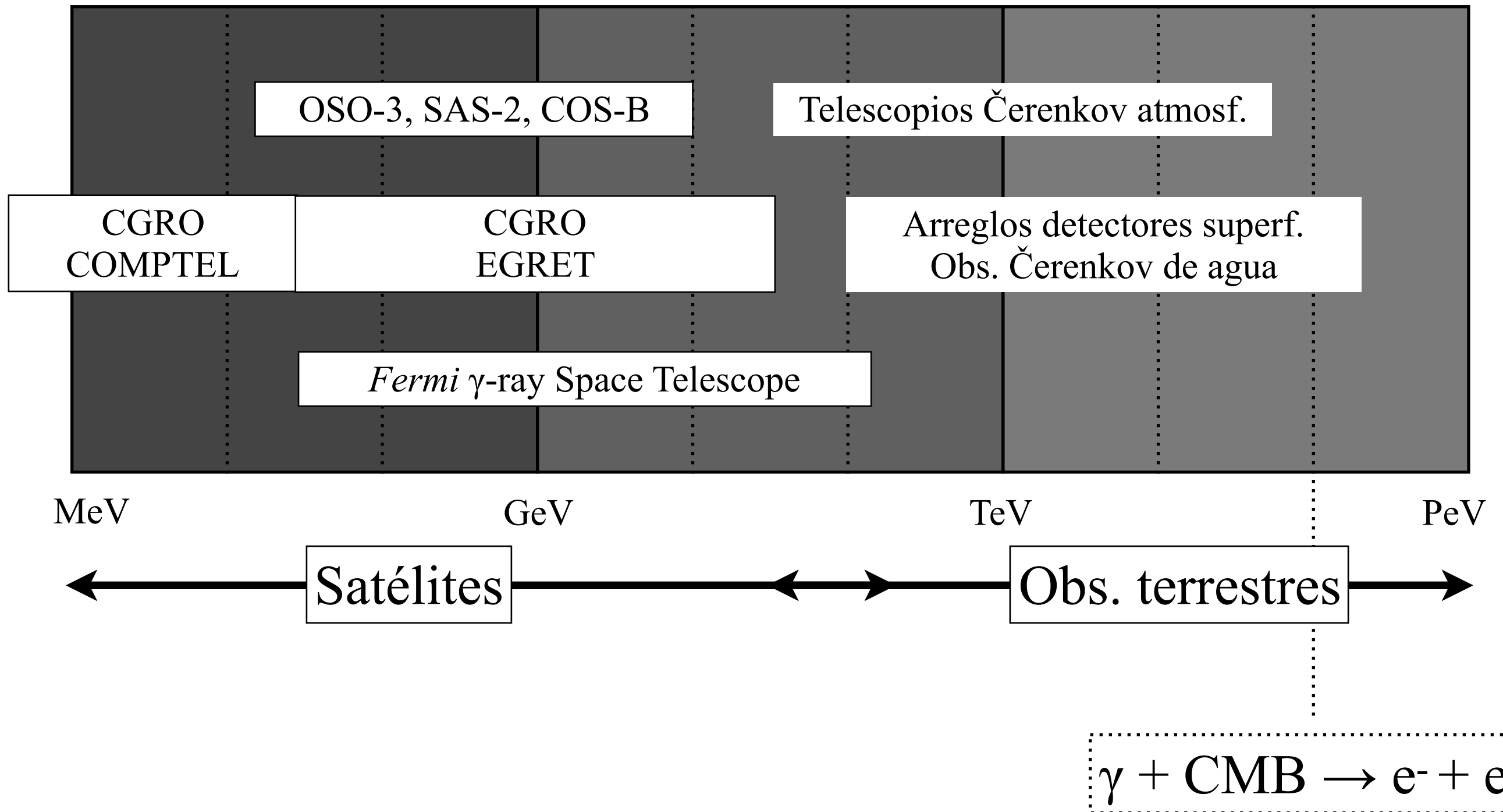


Fig. 2. Fermi-LAT and MAGIC observations of IceCube-170922A's location. Sky position of IceCube-170922A in J2000 equatorial coordinates overlaying the γ -ray counts from Fermi-LAT above 1 GeV (A) and the signal significance as observed by MAGIC (B) in this region. The tan square indicates the position reported in the initial alert, and the green square

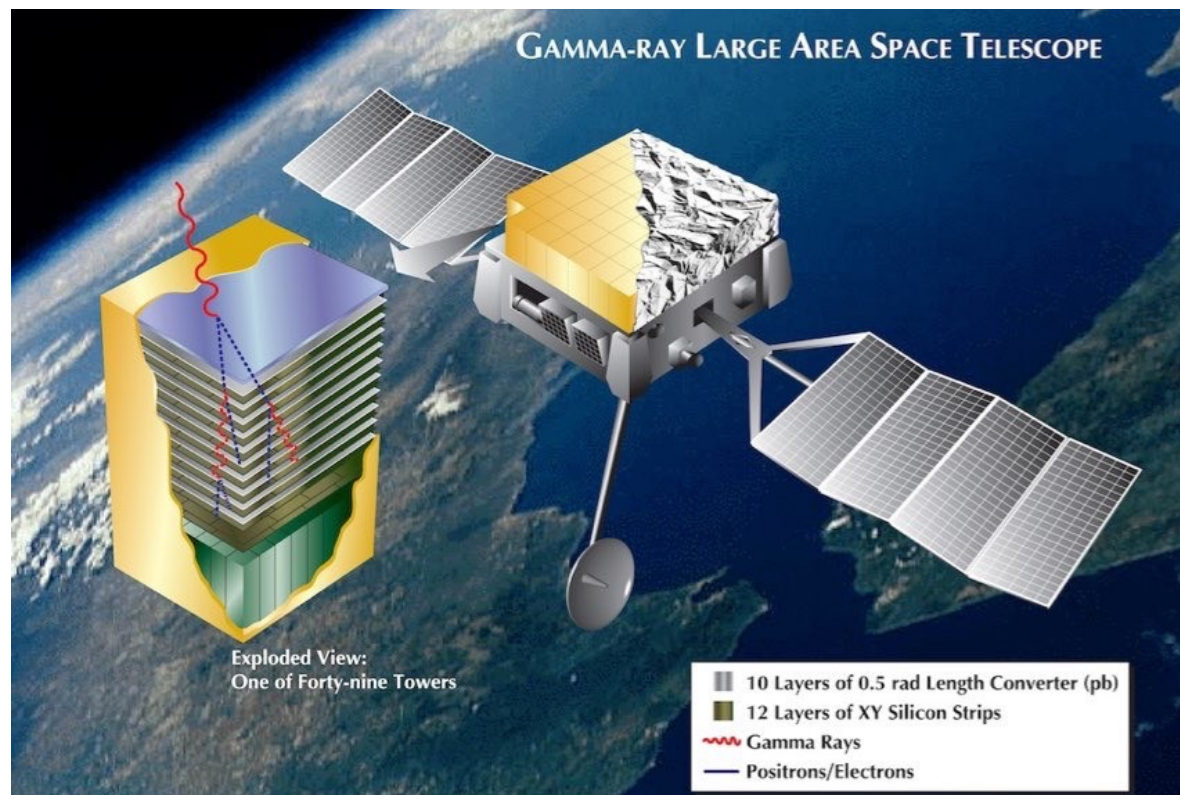
pixel, using detected photons with energy of 1 to 300 GeV in a 2° by 2° region around TXS0506+056. The color bar in (B) shows the signal significance for γ -rays. The dashed circle in (B) indicates the MAGIC PSF.

Aartsen et al. (2018) Science & 1807.08816

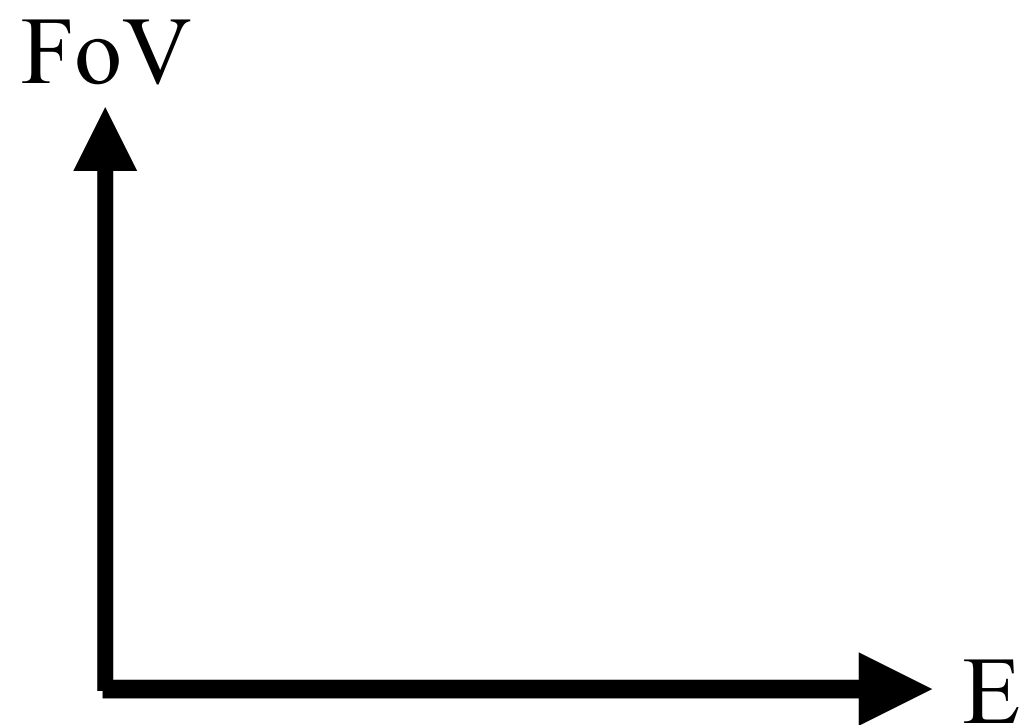
Astronomía de rayos γ



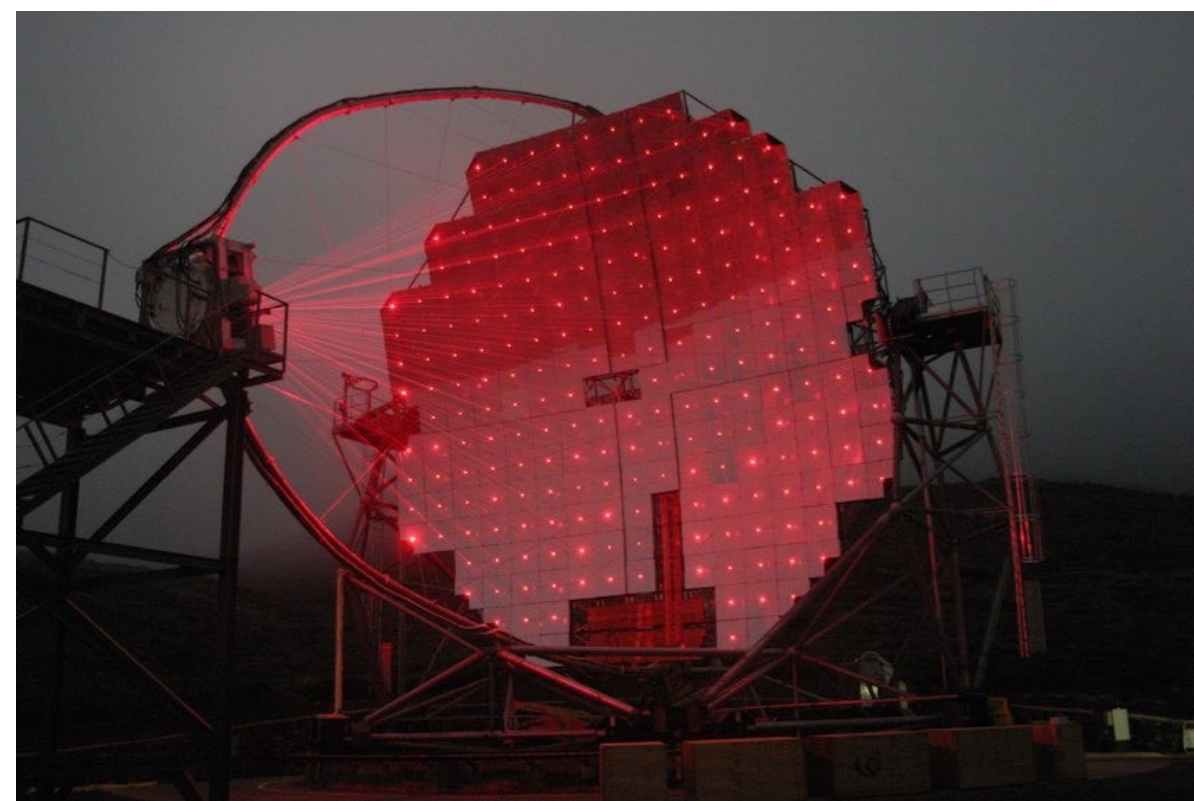
Sr



Deg



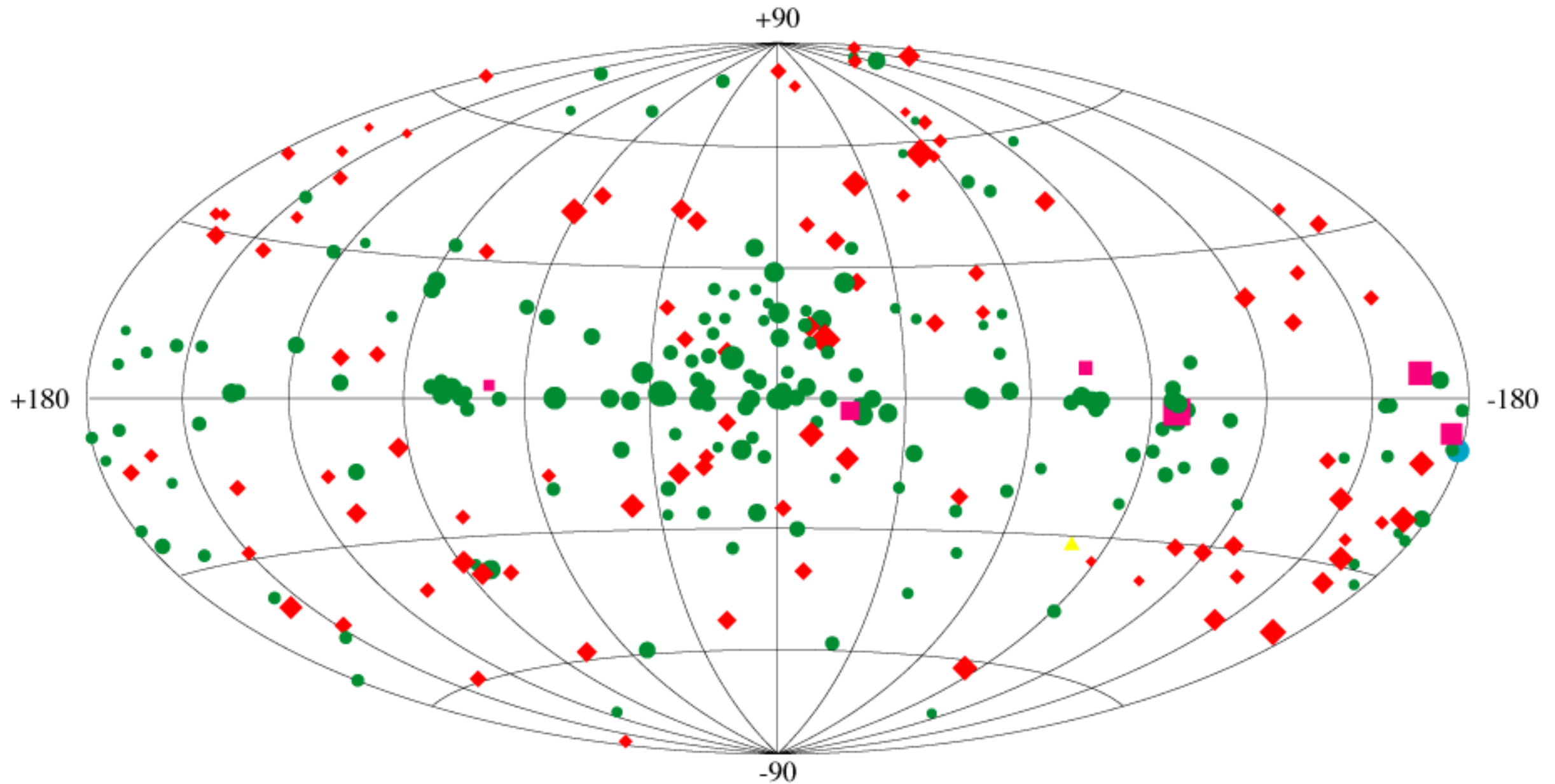
GeV



TeV

Third EGRET Catalog

$E > 100 \text{ MeV}$

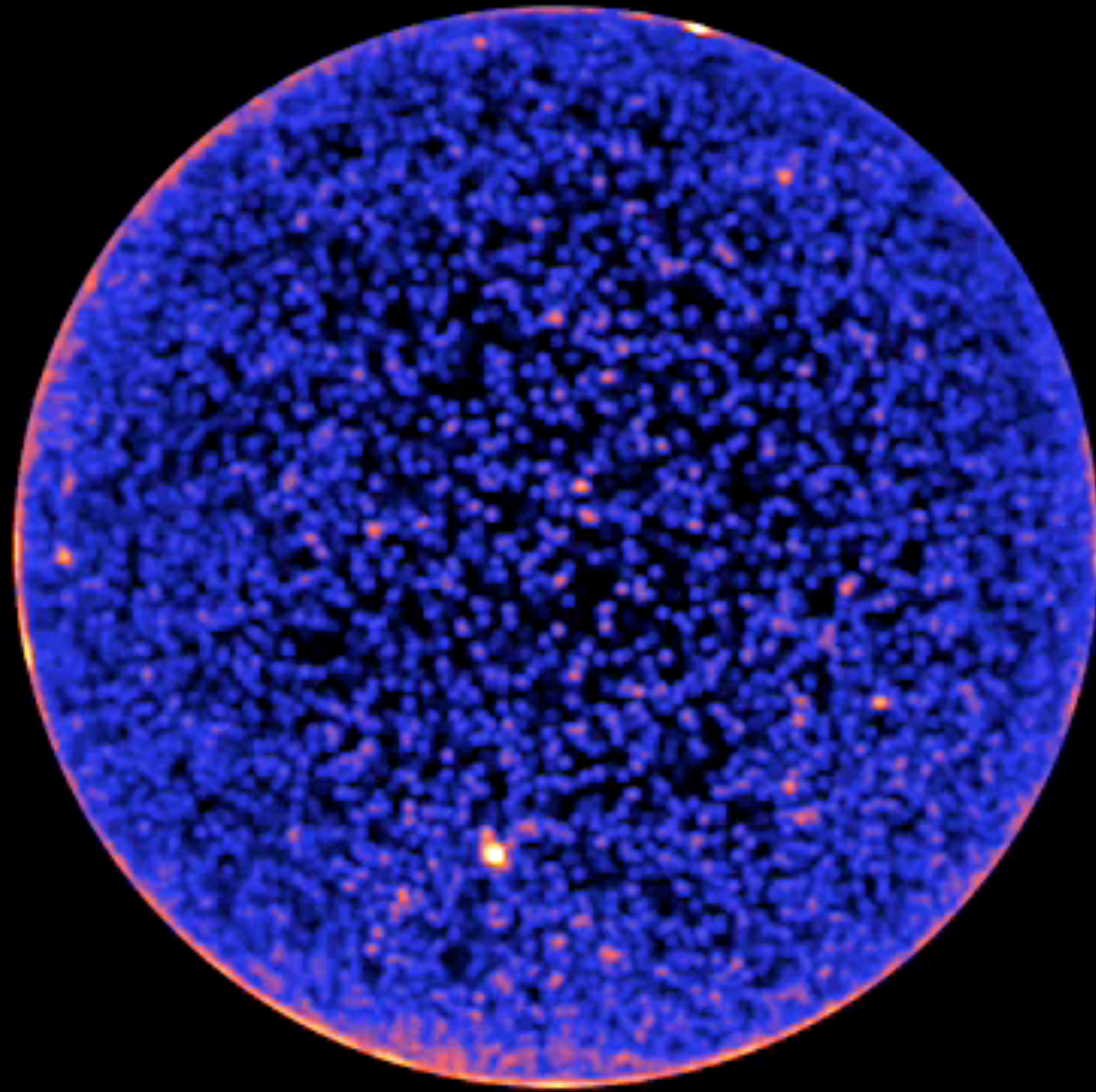


◆ Active Galactic Nuclei
● Unidentified EGRET Sources

■ Pulsars
▲ LMC
● Solar FLare

CGRO-EGRET (1991-2000)

Hartman et al. (1999)



Hemisferio Norte Galáctico - 11 meses con Fermi-LAT

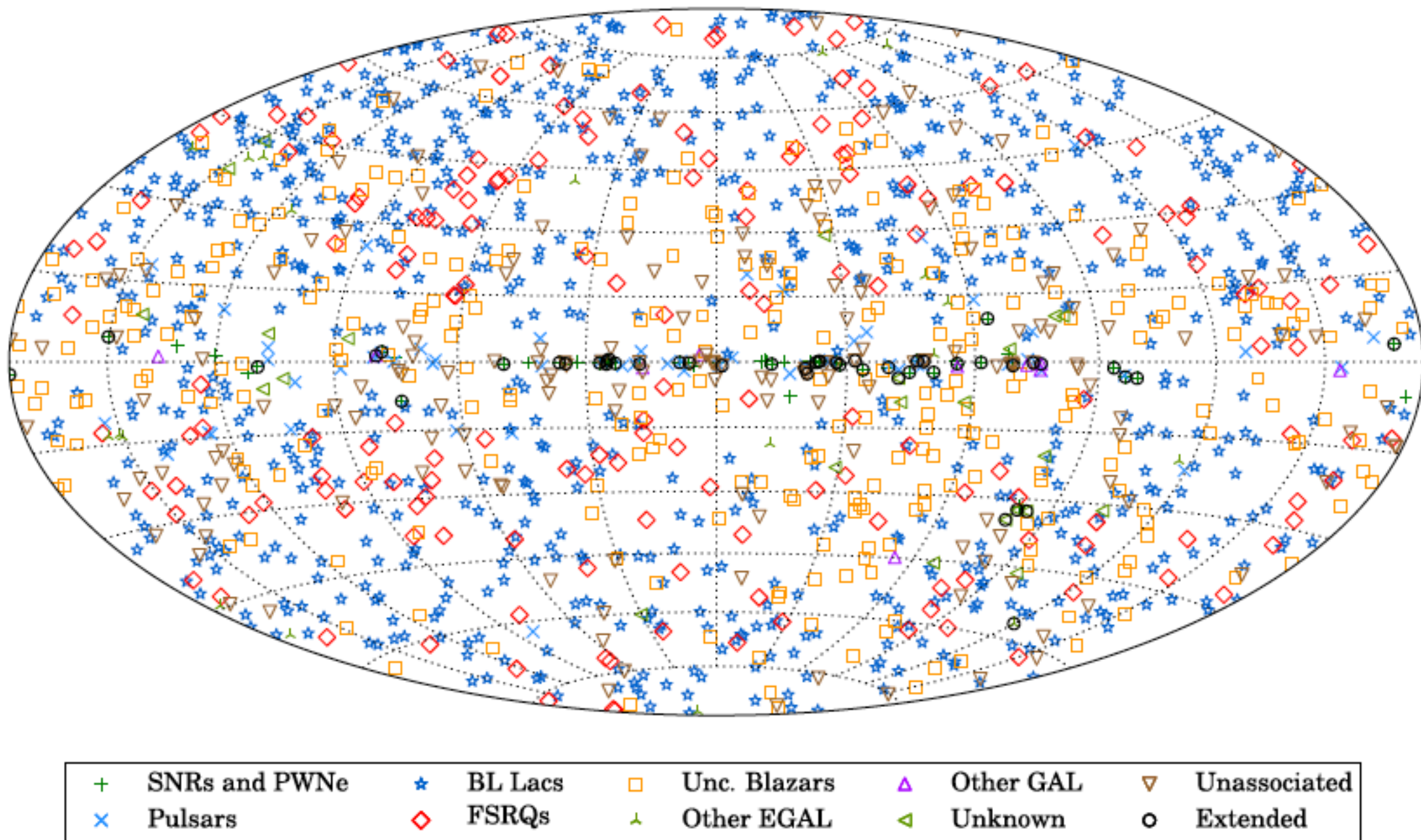


Figure 3. Sky map, in Galactic coordinates and Hammer-Aitoff projection, showing the objects in the 3FHL catalog classified by their most likely source classes.

Catálogo 3FHL de Fermi-LAT

Fuentes celestes de fotones con energía superior a 10 GeV
De 1556 fuentes, 1231 son AGNs

Welcome to TeVCat!

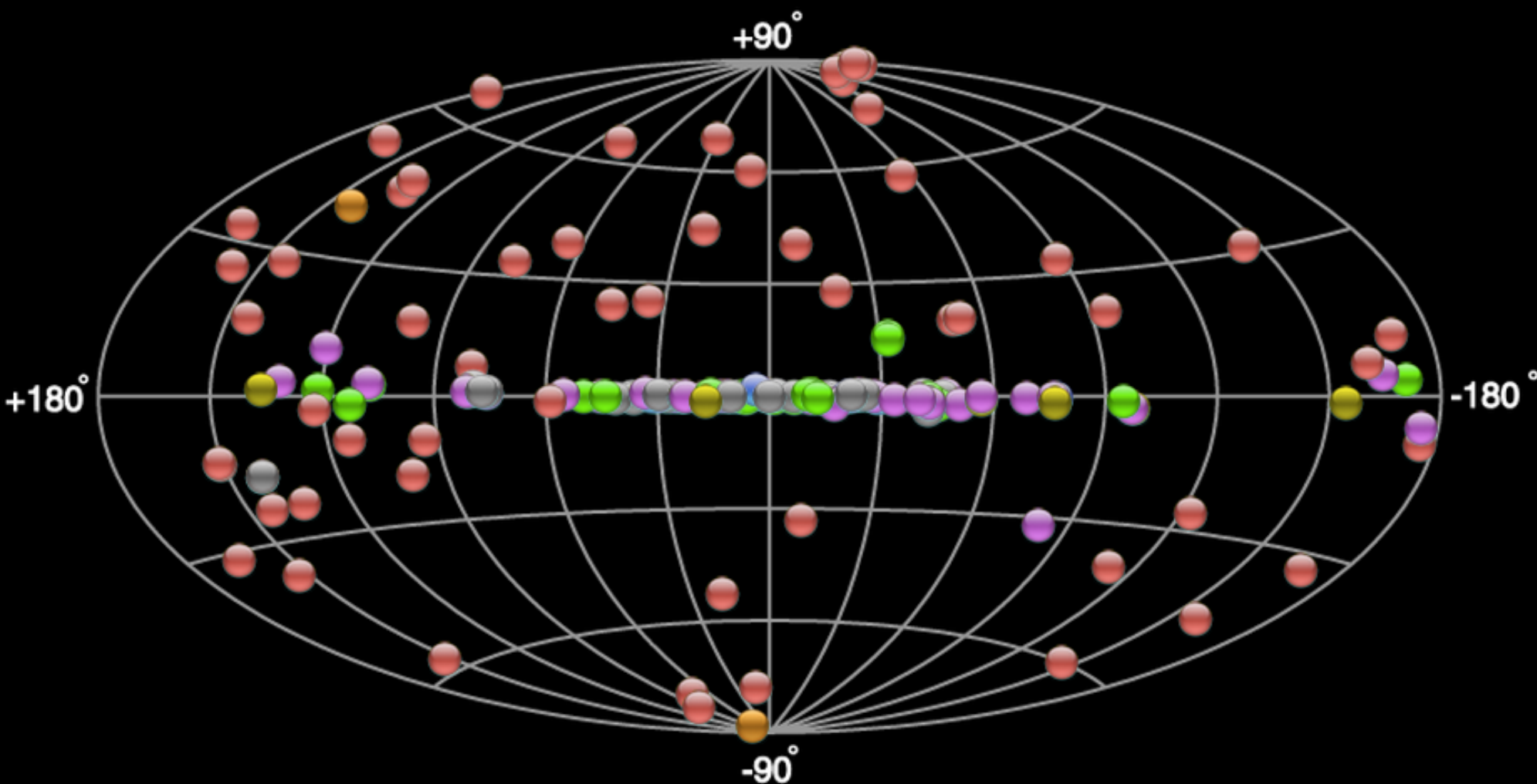


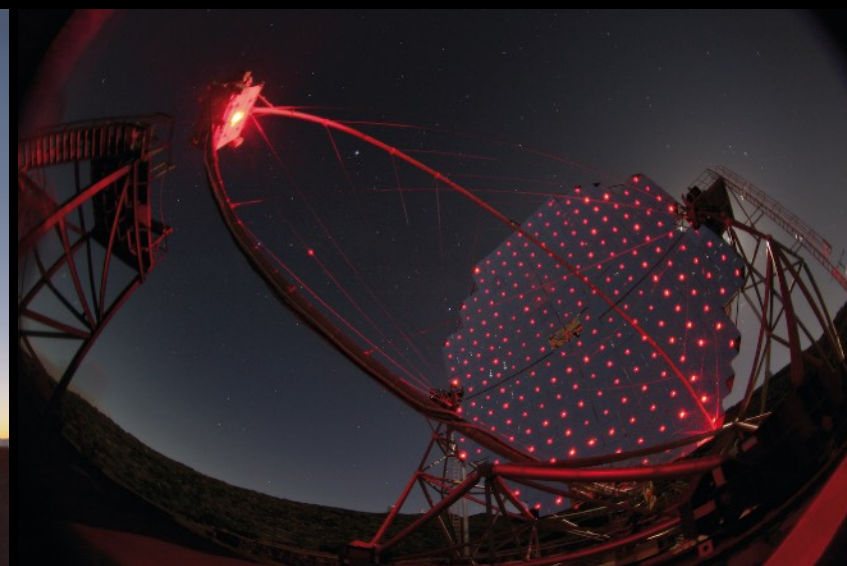
Table Cont... Map Cont... To... Lege...

- 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
- DARK, UNID, Other
- Binary, XRB, PSR, Gamma BIN

Export Black Export White



<http://tevcat.uchicago.edu/>



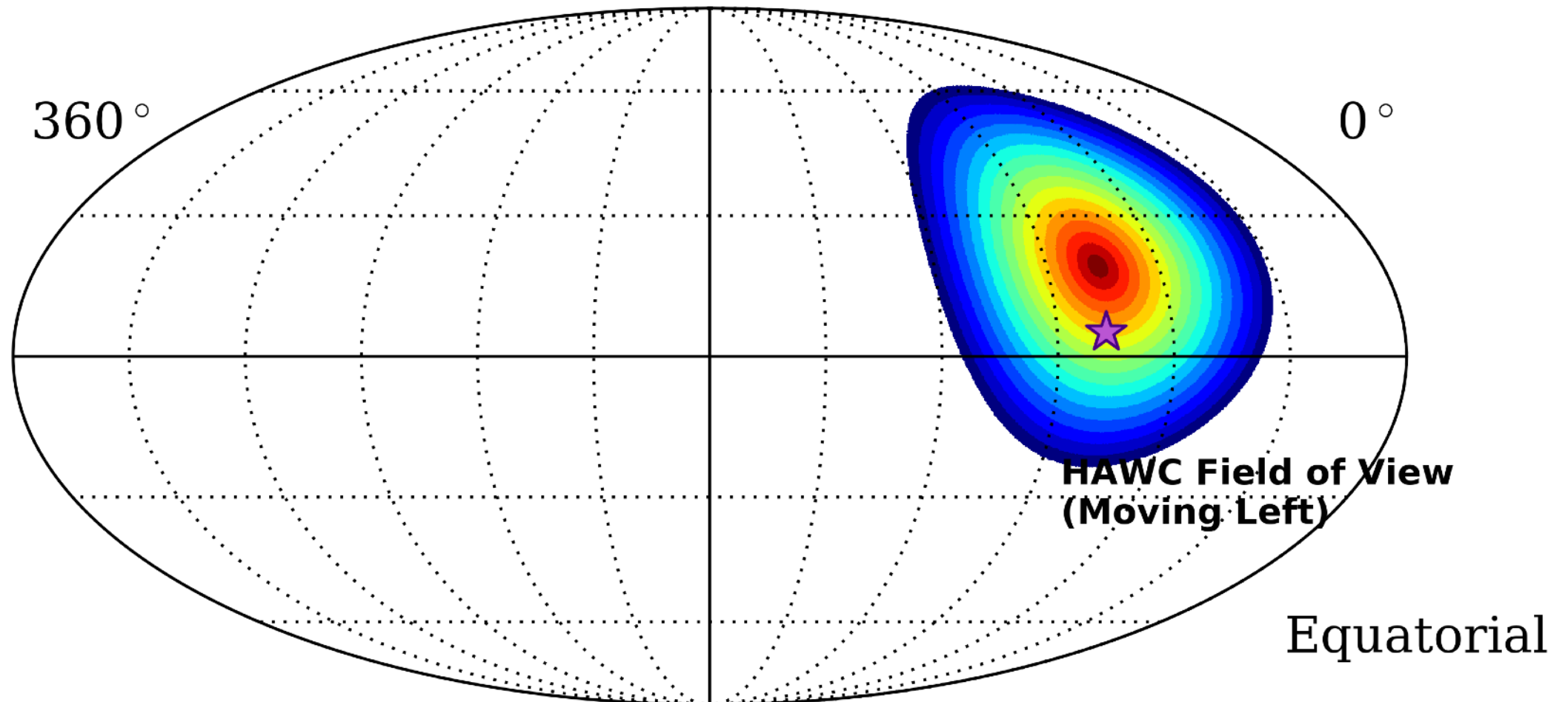




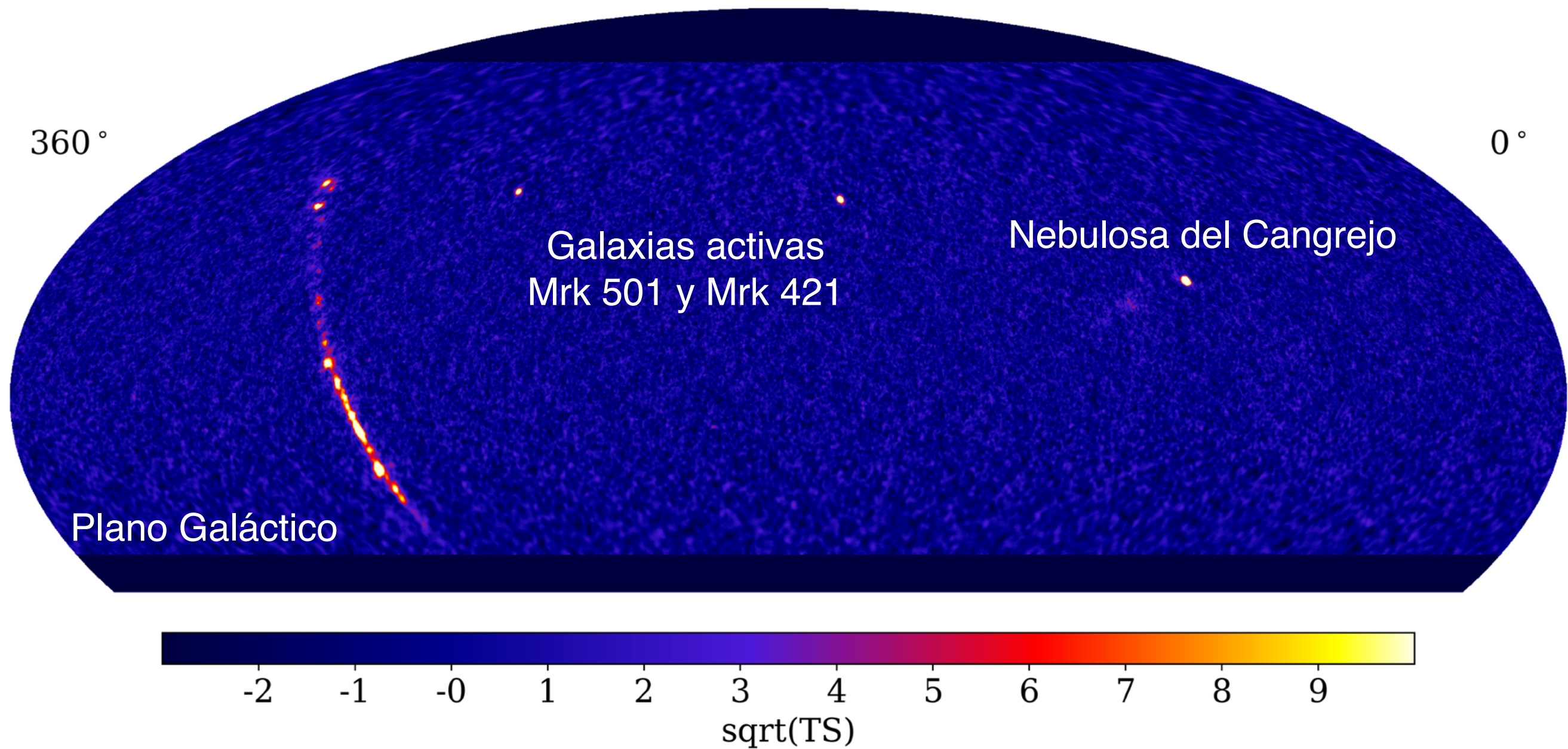
HAWC registra 20,000 rayos cósmicos por segundo;
genera 2 Terabytes de datos cada día - todos los días.

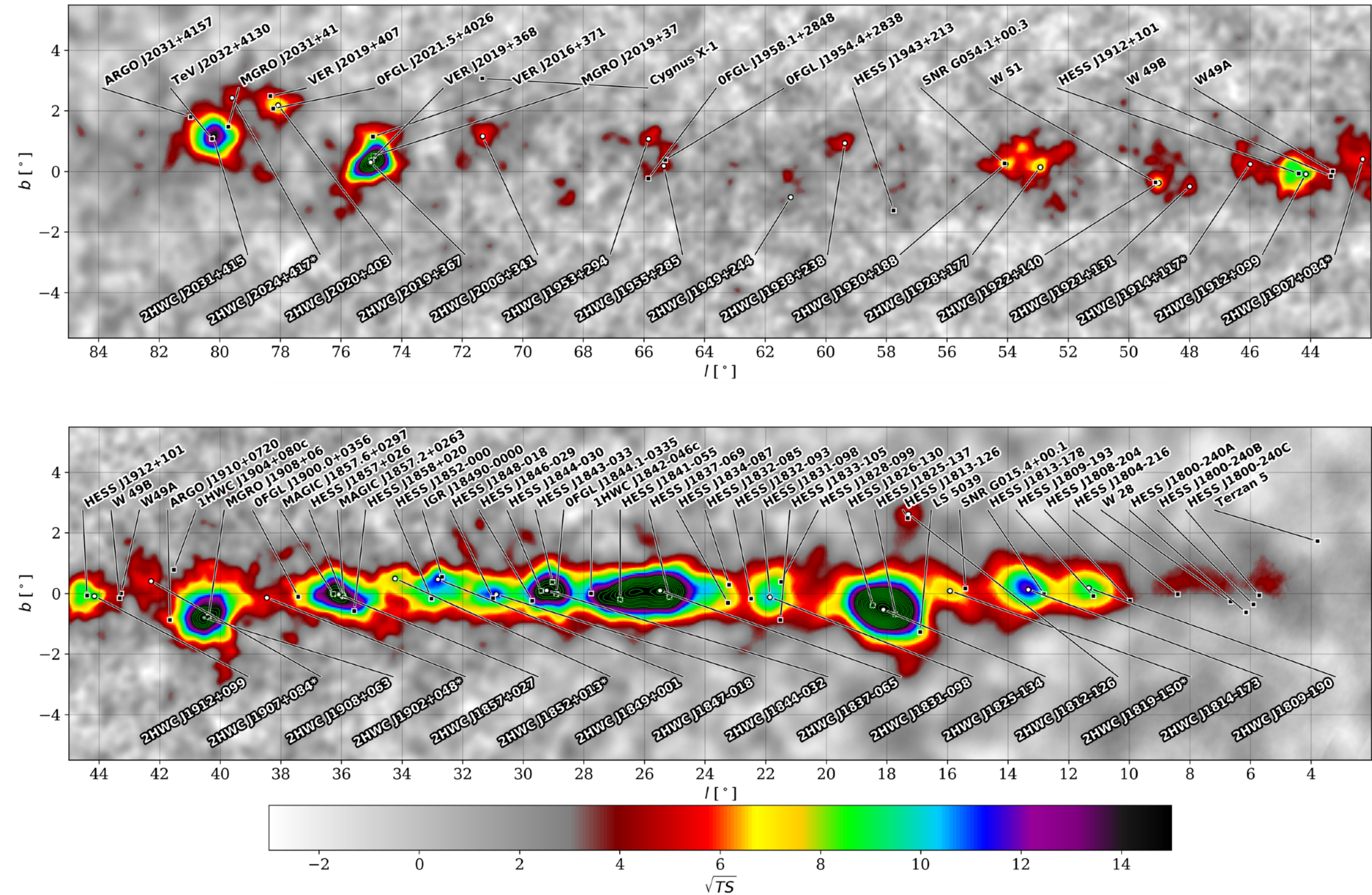
Modo de operación

2018-03-01 01:00:00 [UTC]

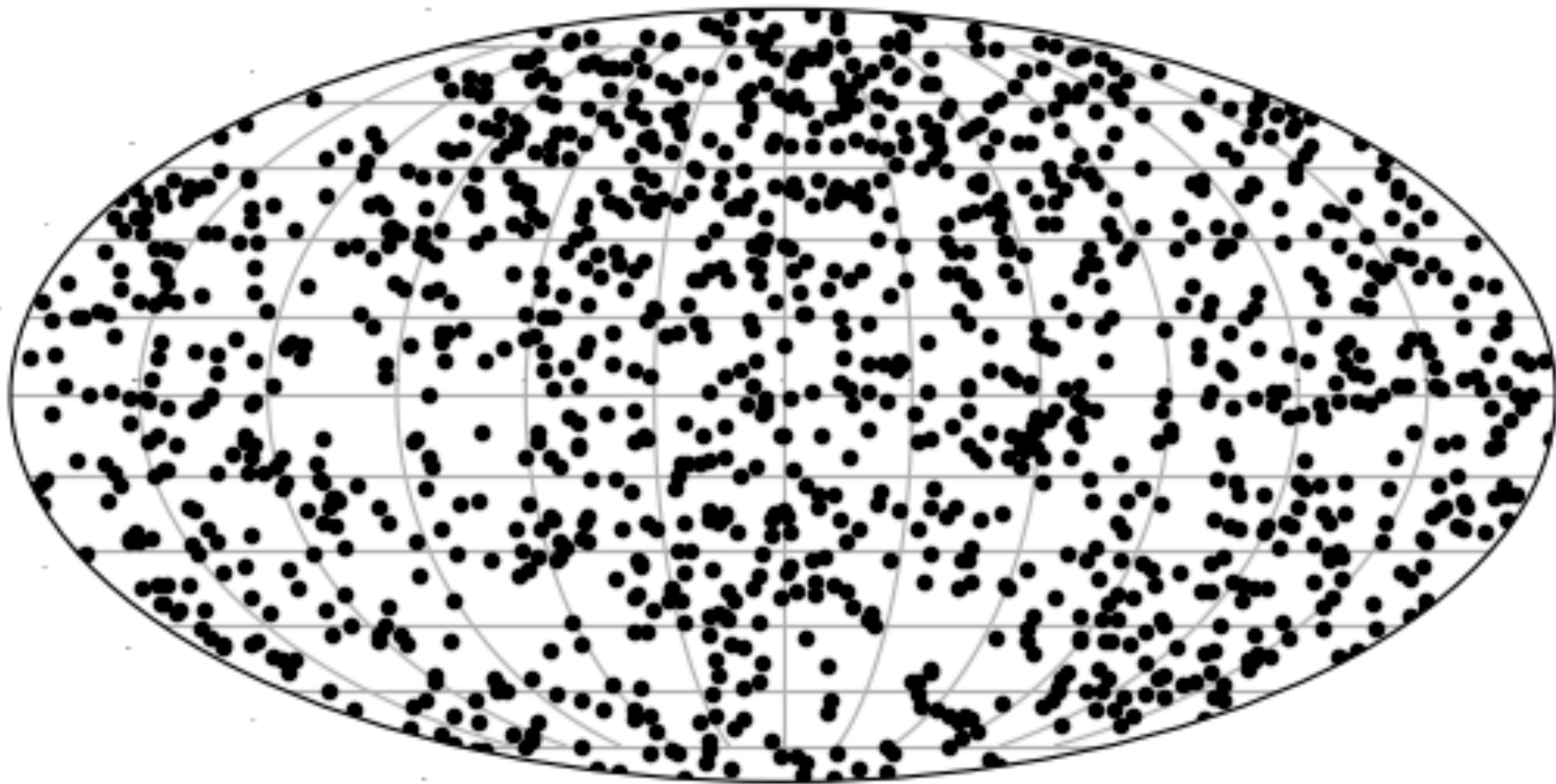


HAWC observa constantemente el cielo alrededor de su cenit, con una apertura angular de 45° . Operando de día y de noche, abarca $2/3$ partes de la bóveda celeste cada día sideral. Los datos se acumulan continuamente, resultando en una exposición cada vez mas profunda del cielo.



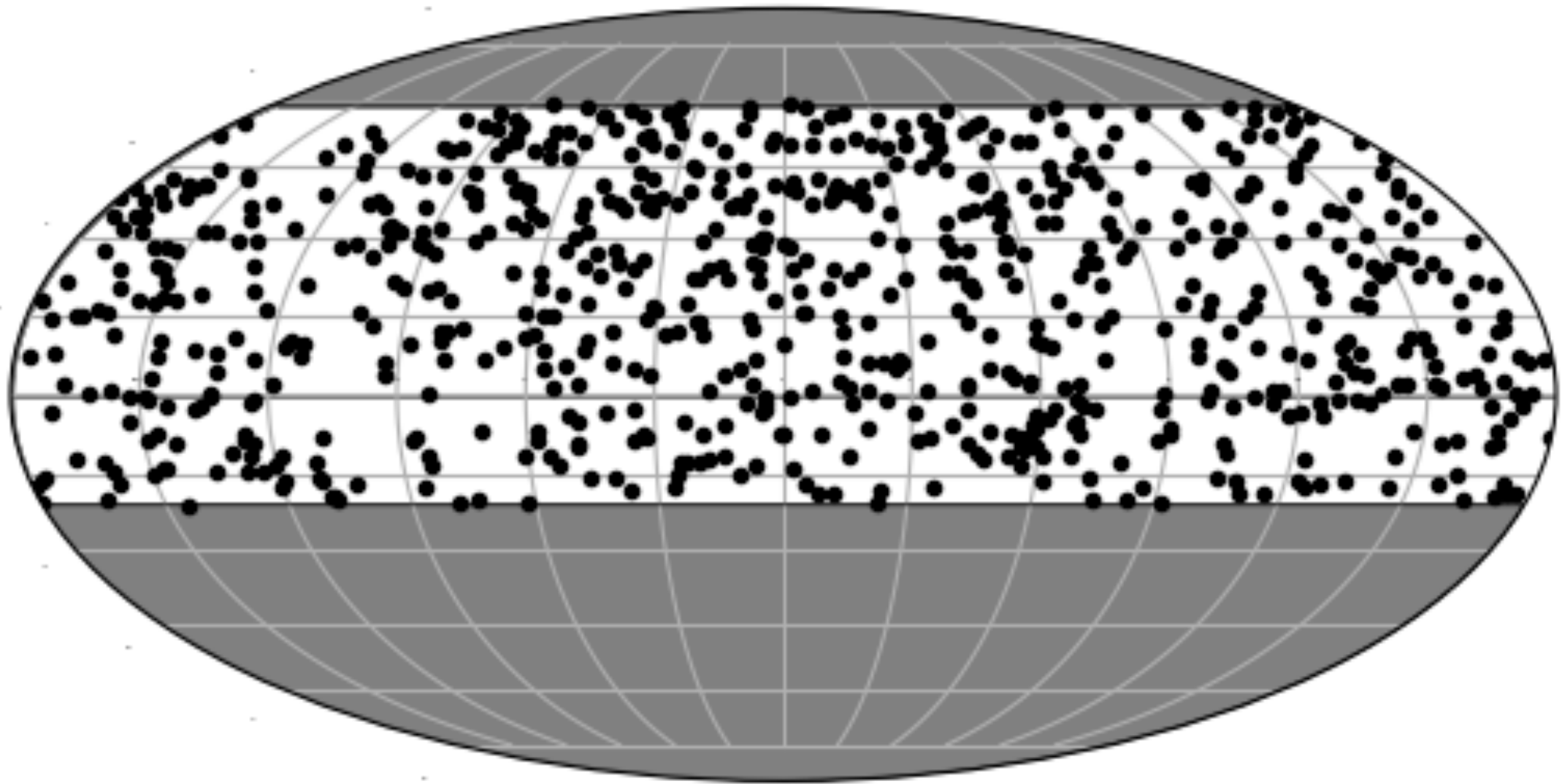


3FHL AGN: all



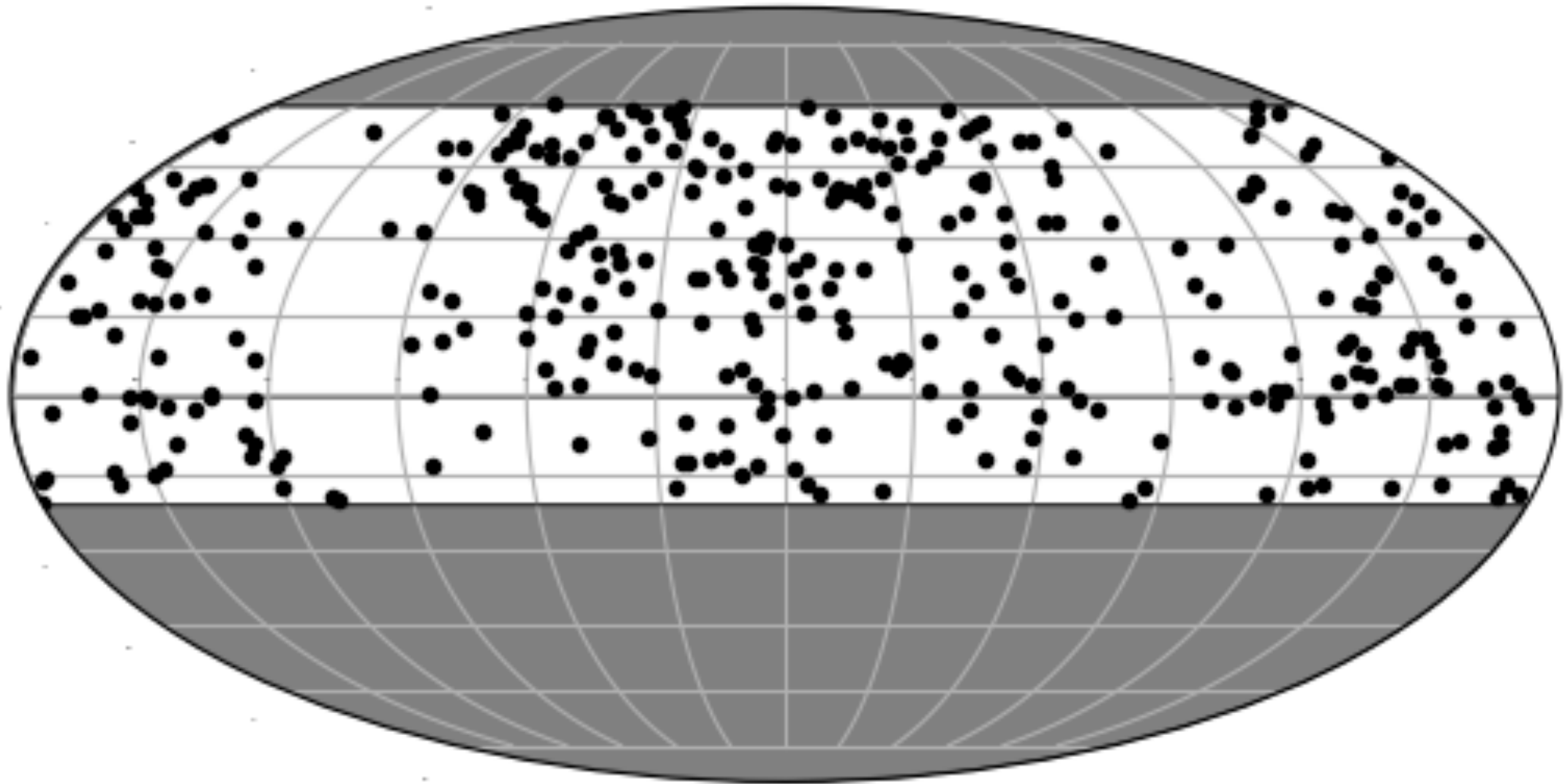
1231 AGN en 3FHL

3FHL AGN: $|\delta - 19^\circ| < 40^\circ$



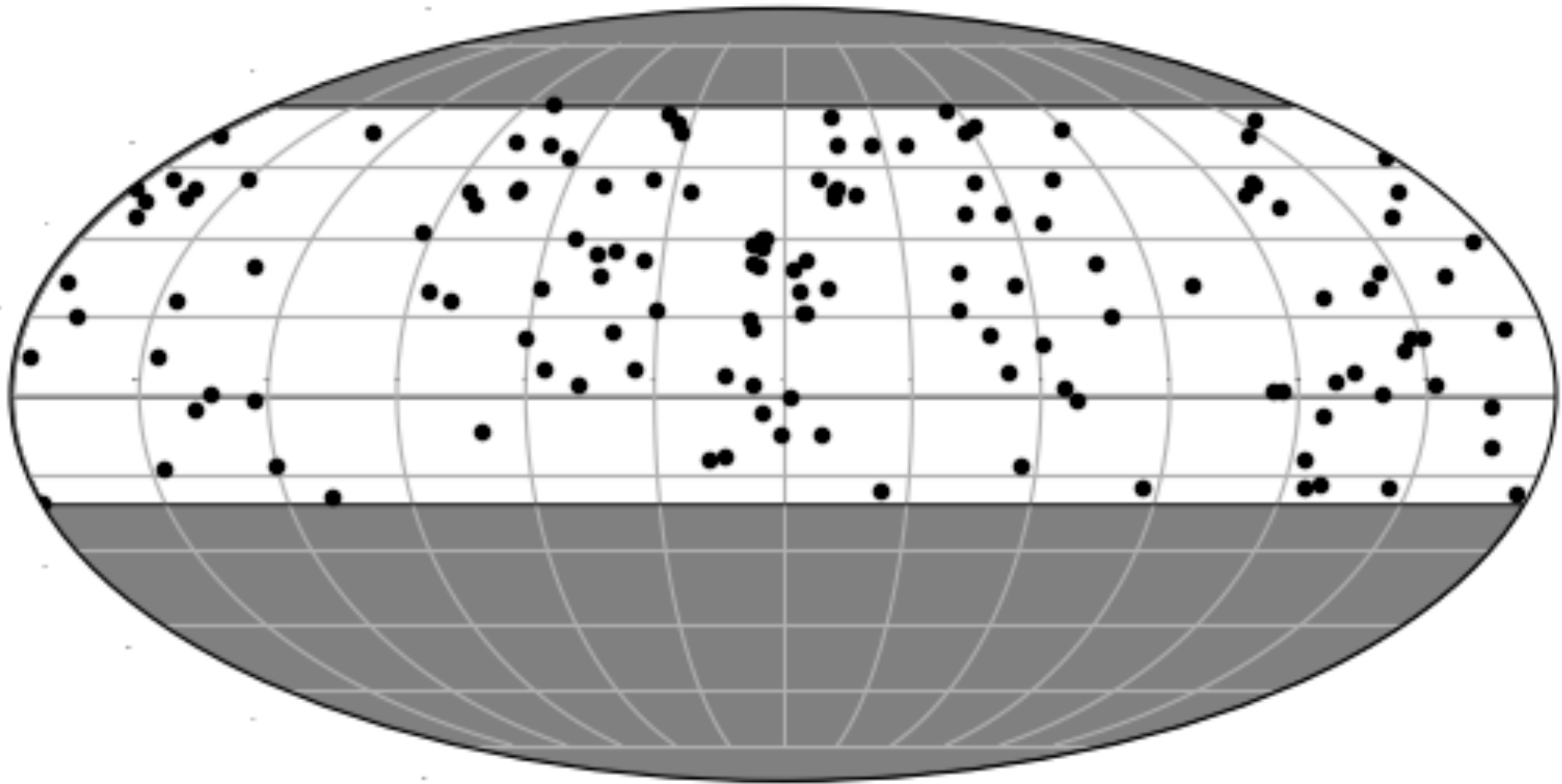
736 AGN en 3FHL y campo de visión de HAWC

3FHL AGN: $|\delta - 19^\circ| < 40^\circ$ & redshift

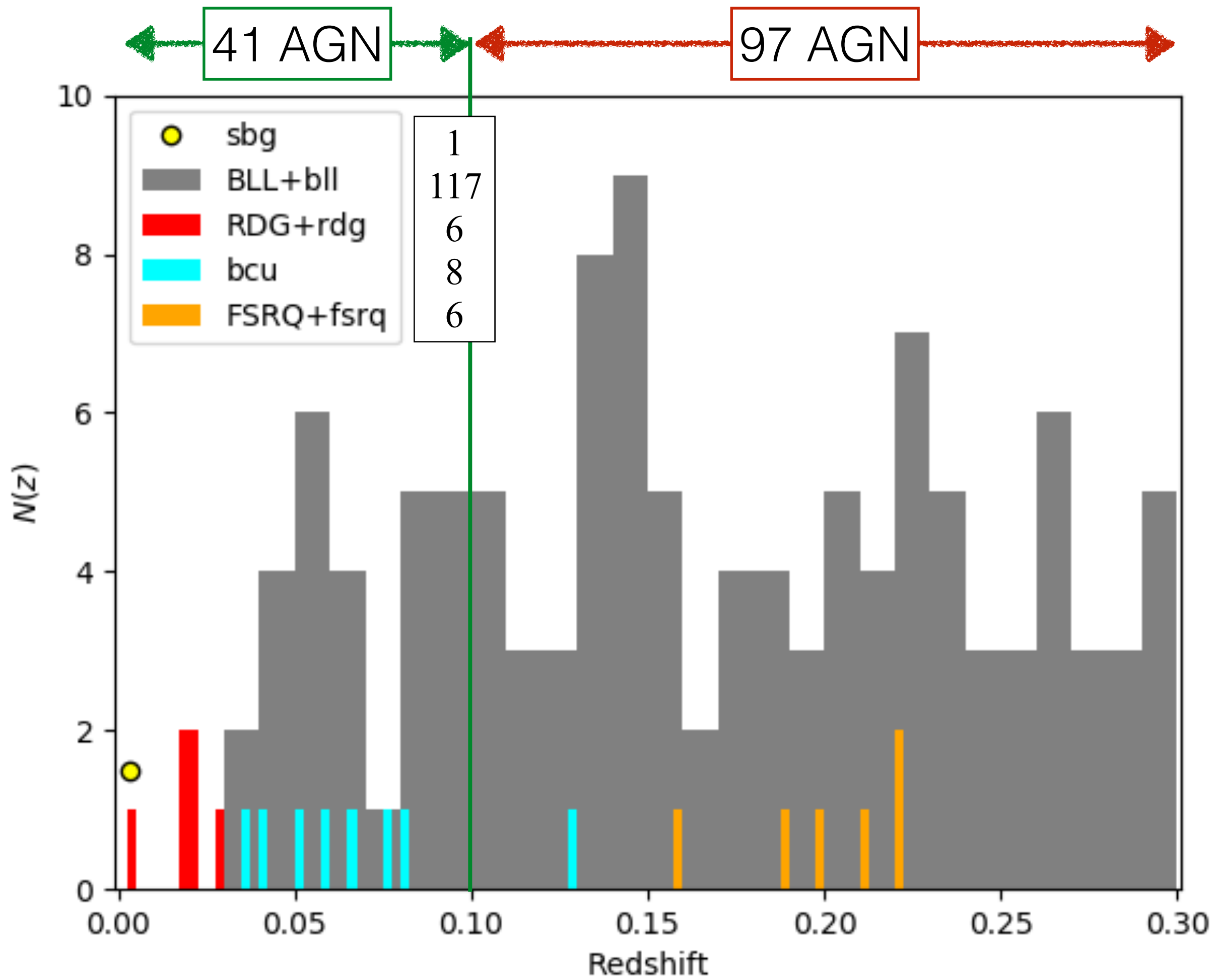


373 AGN en 3FHL y campo de visión de HAWC
con redshift estimado

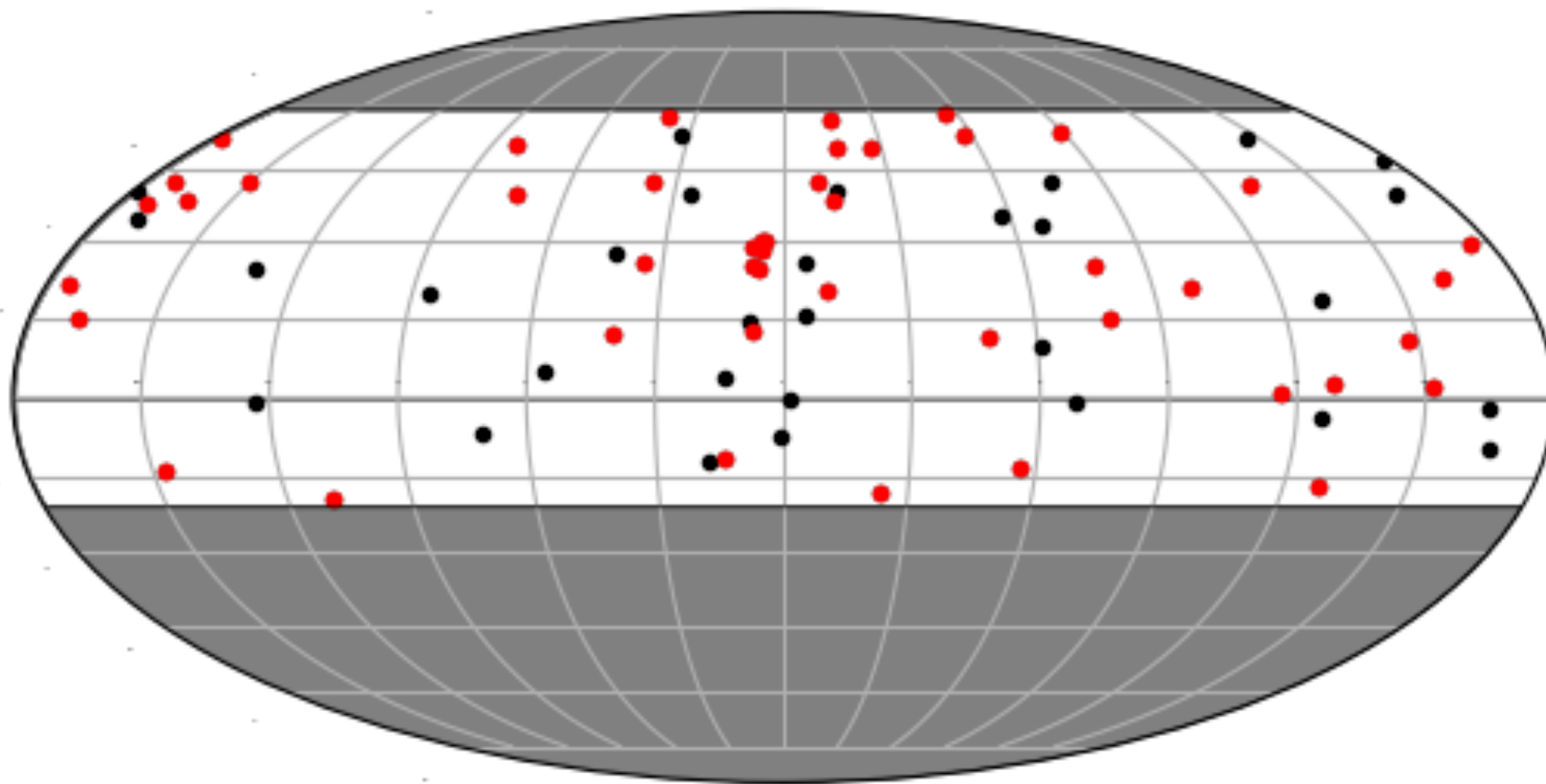
3FHL AGN: $|\delta - 19^\circ| < 40^\circ$ & $z < 0.3$



138 AGN en 3FHL, campo de visión de HAWC y $z < 0.3$
($z=0.1 \Rightarrow 400$ Mpc)

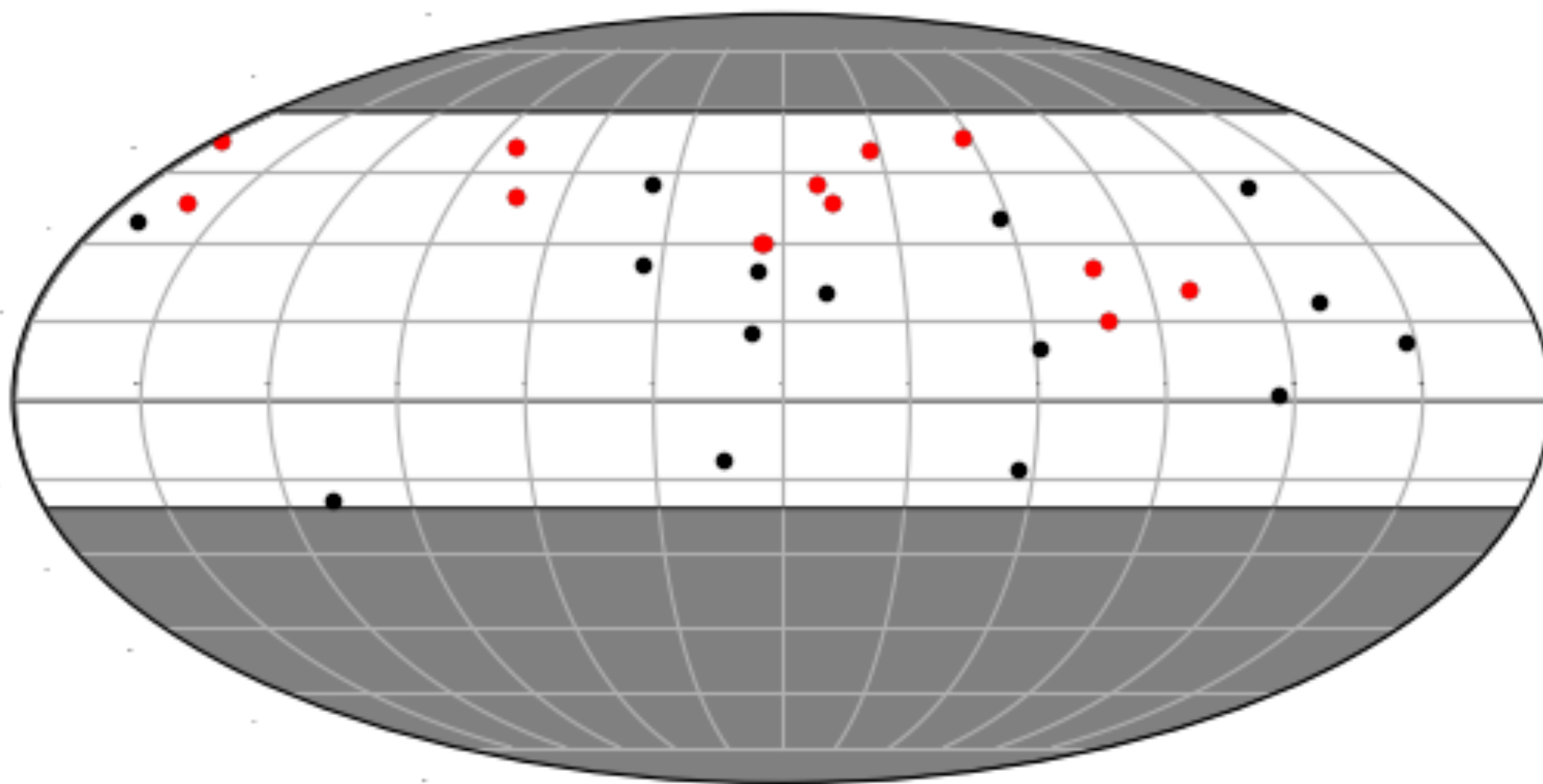


3FHL AGN sample: > 50 GeV



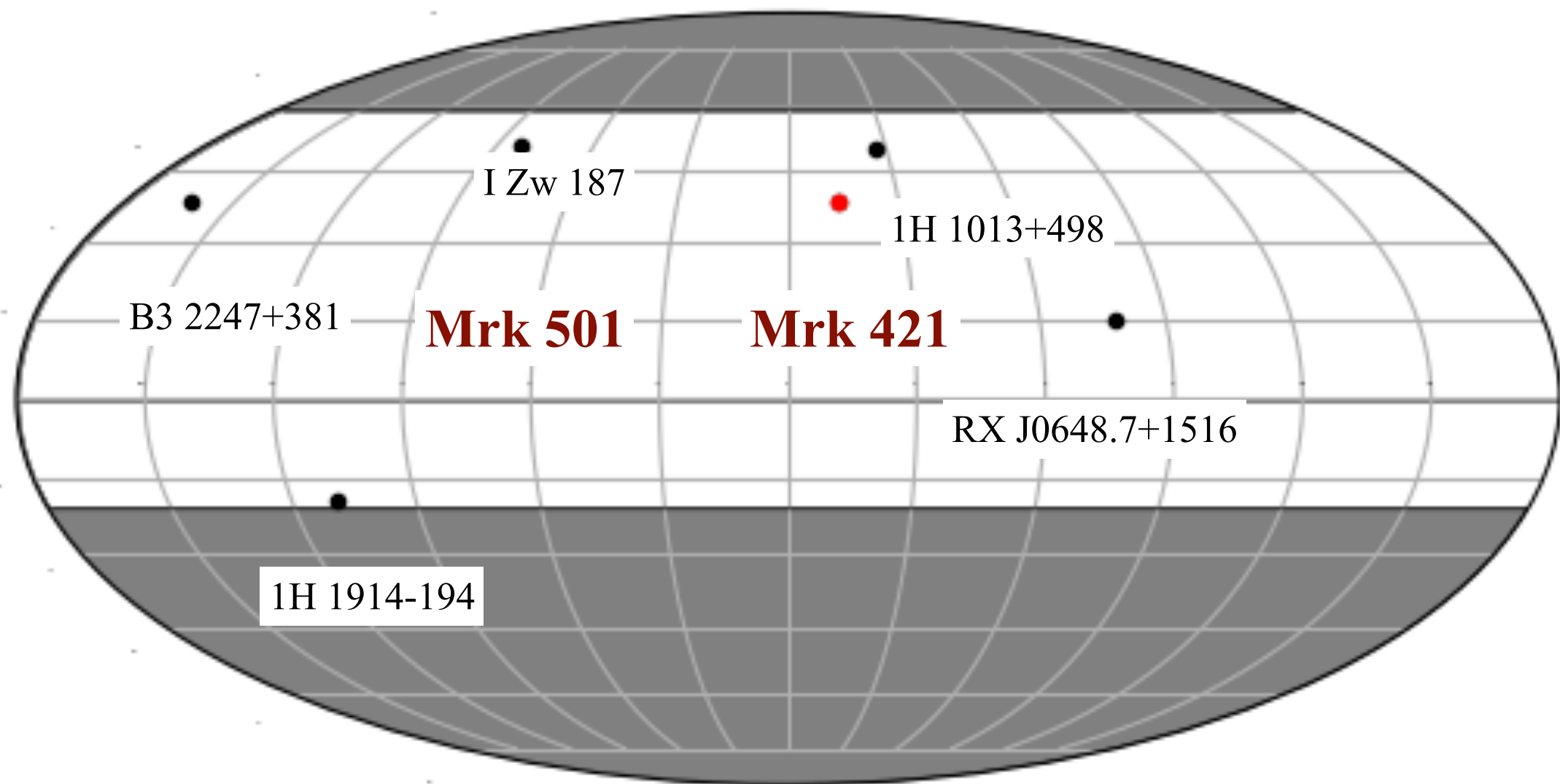
AGN seleccionados
50-150 GeV: **76 con $TS > 10$** y **43 con $TS > 25$**

3FHL AGN sample: > 150 GeV



AGN seleccionados
150-500 GeV: **28 con $TS > 10$** y **13 con $TS > 25$**

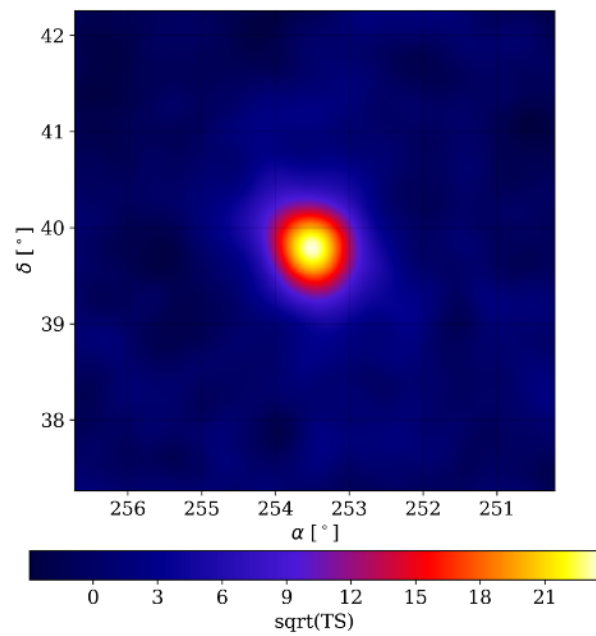
3FHL AGN sample: > 0.5 TeV



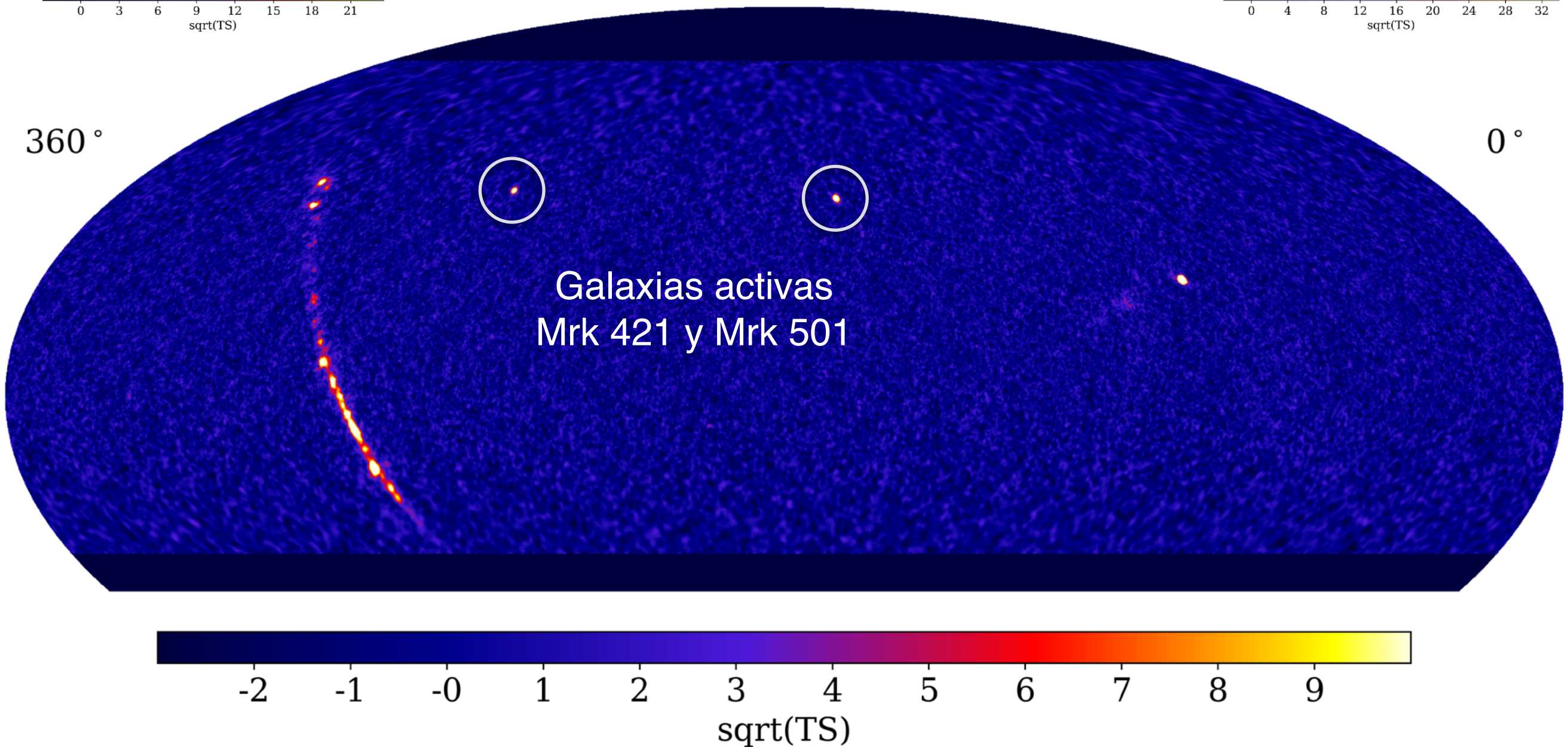
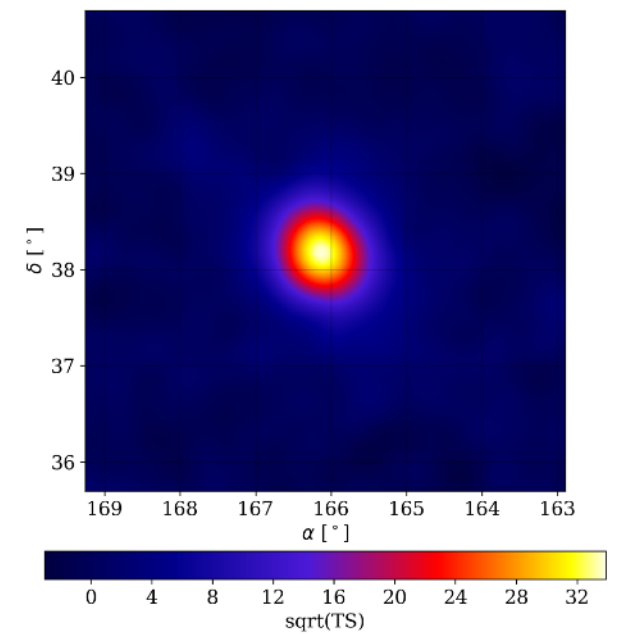
AGN seleccionados
0.5-2.0 TeV: **7 con $TS > 10$** y **2 con $TS > 25$**

Mejores candidatos

- De 1251 AGNs 138 cumplen los criterios de selección.
- Mejores candidatos:
 - (1) $TS > 10$ hasta (0.5-2 TeV) en 3FHL $\Rightarrow$ **{Mrk 421, Mrk 501}** + {I Zw 187 = 1ES 1727+502, 1H 1013+498, B3 2247+381, RX J0648.7+1516, 1H 1914-194}
 - (2) extrapolación con parámetros 3FHL a $N_{\text{obs}}(>0.5 \text{ TeV}) > 30 \text{ mCrab}$: {Mrk 421, Mrk 501, I Zw 187, B3 2247+381} + {M 87, IC 310, 1ES 2344+514, TXS 0210+515}
 - (3) extrapolados a $N_{\text{obs}}(>0.5 \text{ TeV}) > 30 \text{ mCrab}$ por datos de telescopios Cherenkov atmosféricos: + {H 1426+428}

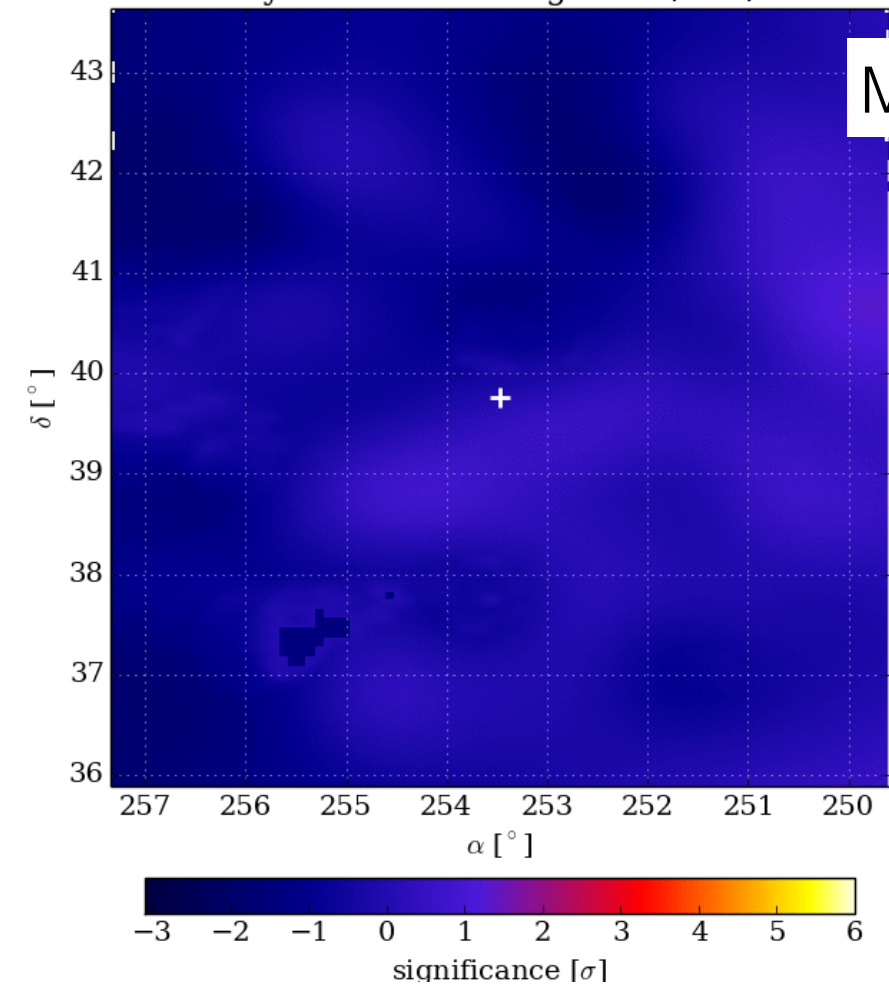
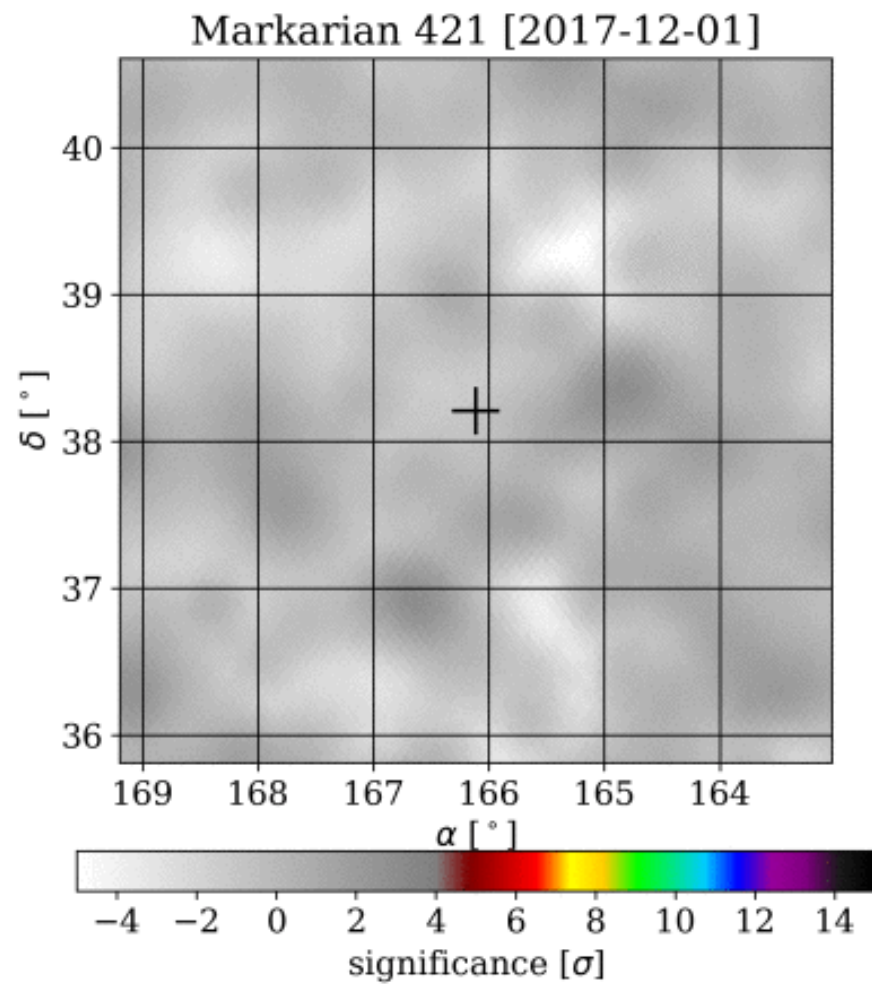


Son los dos objetos BL Lac
más cercanos que conocemos
 $z=0.031$ y $z=0.034$

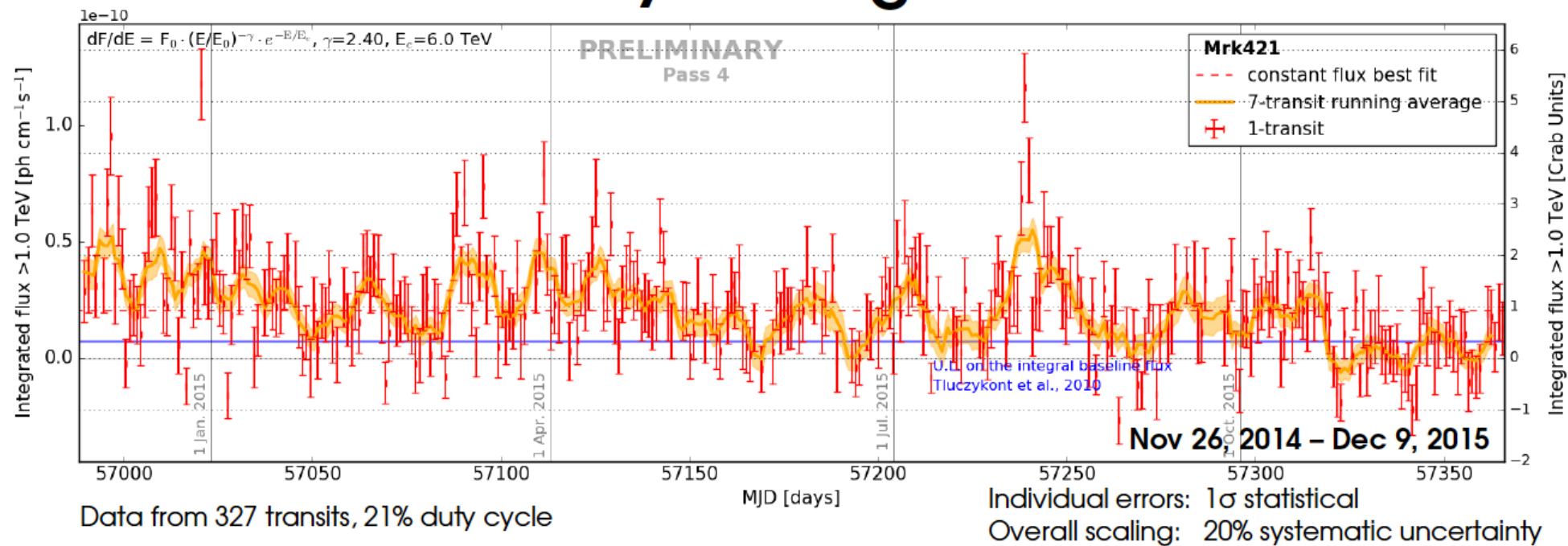


7-day interval starting 2013 / 06 / 13

Mrk 501



Markarian 421: Daily Flux Light Curve



Objeto	Tipo	z	ϕ_1 (*)	$N_{\text{obs}}(>0.5 \text{ TeV})$	sq(TS)
Mrk 421	BL Lac	0.031	30.5 ± 0.6	43.2 ± 0.9	+55.30
Mrk 501	BL Lac	0.033	10.4 ± 0.6	14.5 ± 0.8	+18.78
M 87	RDG	0.004	< 0.56	< 1.02	+1.91
IC 310	RDG	0.019	< 1.04	< 1.65	+0.47
1ES 2344+514	BL Lac	0.044	< 5.40	< 6.78	+1.40
TXS 0210+515	BL Lac	0.049	< 6.24	< 7.48	+2.10
1ES 1727+502	BL Lac	0.055	< 3.25	< 3.68	-0.07
B3 2247+381	BL Lac	0.119	< 2.73	< 1.71	-0.69
H 1426+428	BL Lac	0.129	< 9.59	< 5.48	+1.17
1H 1914-194	BL Lac	0.137	< 24.7	< 13.1	-0.48
RX J0648.7+1516	BL Lac	0.179	< 3.88	< 1.39	-0.33
1H 1013+498	BL Lac	0.212	< 31.1	< 8.24	+0.23

Cangrejo $N_{\text{obs}}=62.4$

Los dos BL Lac
más cercanos

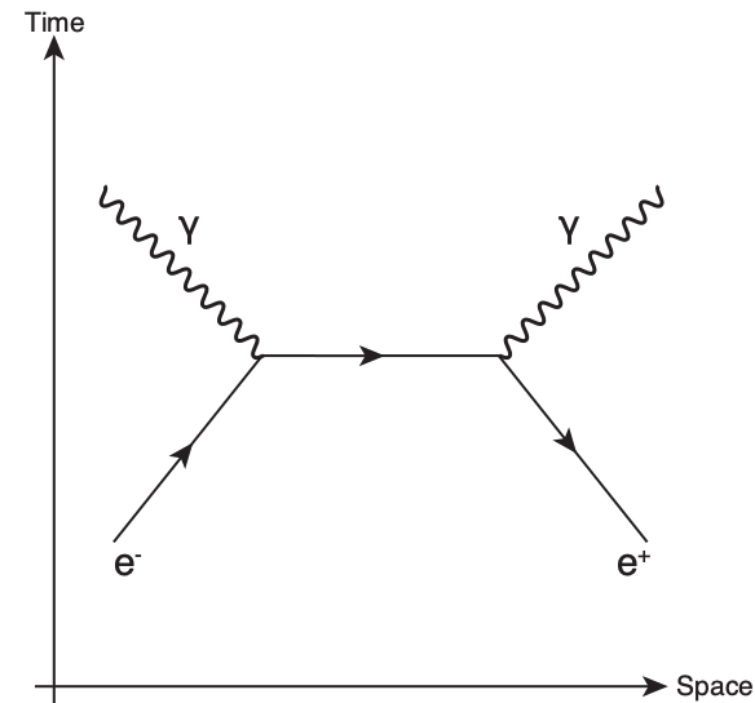
Límites fuertes en
dos radiogalaxias

Límites para los
siguientes BL Lac,
en su mayoría tipo
EHBL

(*) ϕ_1 en $10^{-12} \text{ TeV}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; N_{obs} en $10^{-12} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Producción de pares

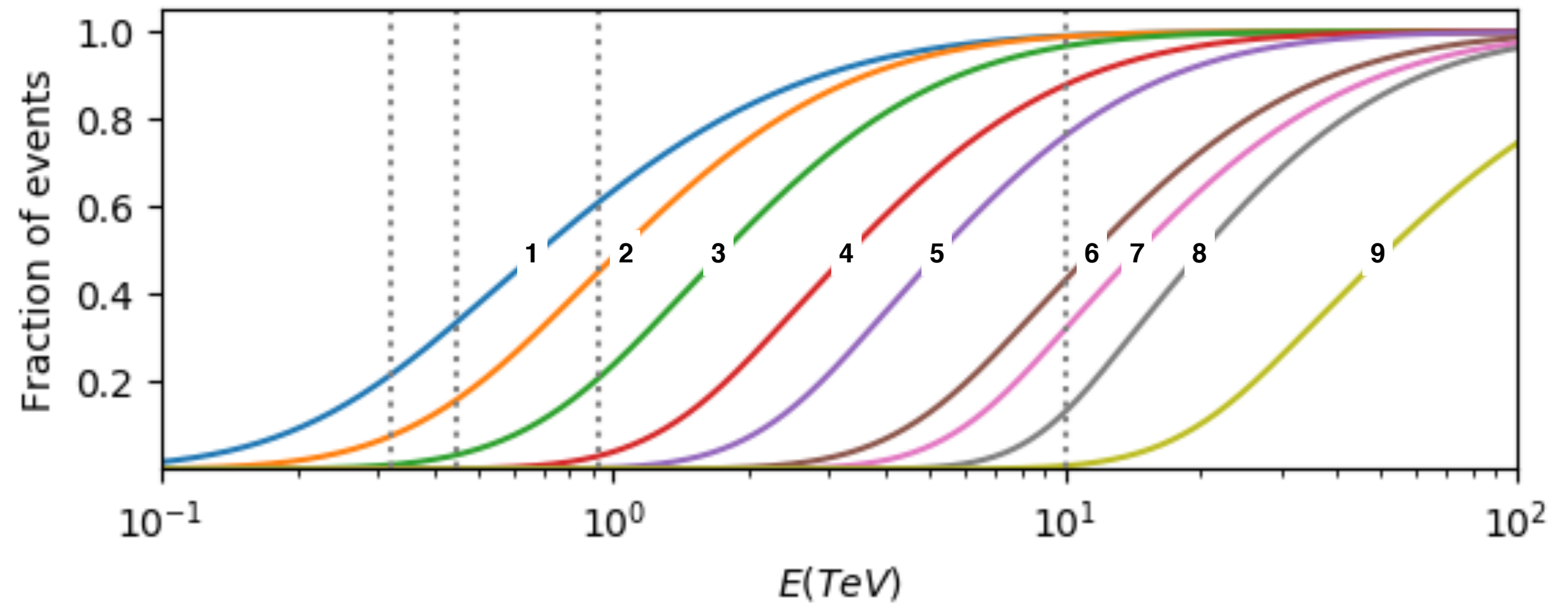
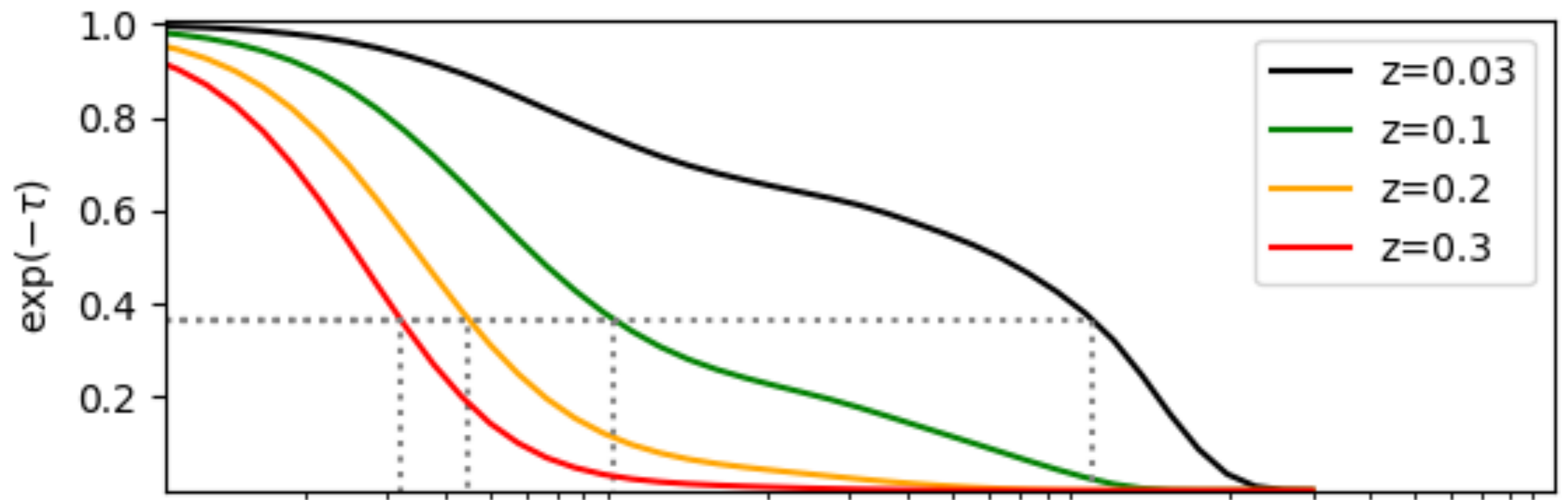
- Dos fotones pueden producir un par electrón-positrón si cumplen la condición:
$$E_1 E_2 > (mc^2)^2$$
 - Rayos gamma de 100 GeV interaccionan con luz ultravioleta.
 - Rayos gamma de 1 TeV con luz de infrarrojo cercano ($3.5 \mu\text{m}$)
 - Rayos gamma de 10 TeV con el infrarrojo medio ($35 \mu\text{m}$)
- A mayor energía recorren distancias menores

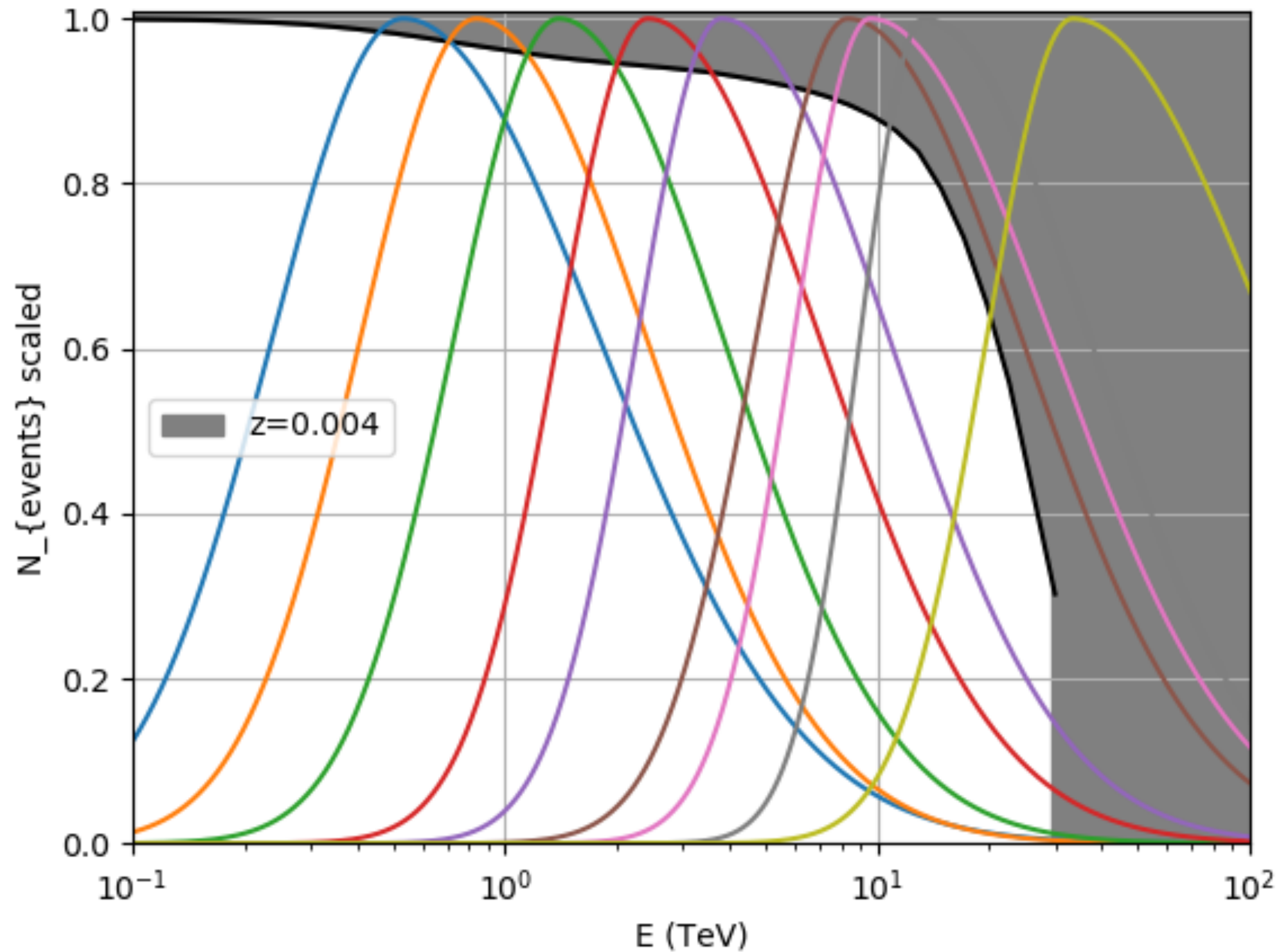


Absorción de rayos γ

- Fotones de alta energía interaccionan con cuantos de luz produciendo pares electrón - positrón.
- El proceso $\gamma\gamma \rightarrow e^-e^+$ es óptimo justo después de su umbral: $E_\gamma h\nu > 0.25 \text{ TeV} \cdot \text{eV} \implies \lambda < 4.8 \mu\text{m} (E_\gamma/\text{TeV})$.
- La opacidad del Universo a rayos γ , $\tau(E_\gamma, z)$, se calcula usando modelos de la densidad de radiación, $n_\nu(z)$, del fondo extragaláctico de luz, en particular entre el UV y lejano IR.

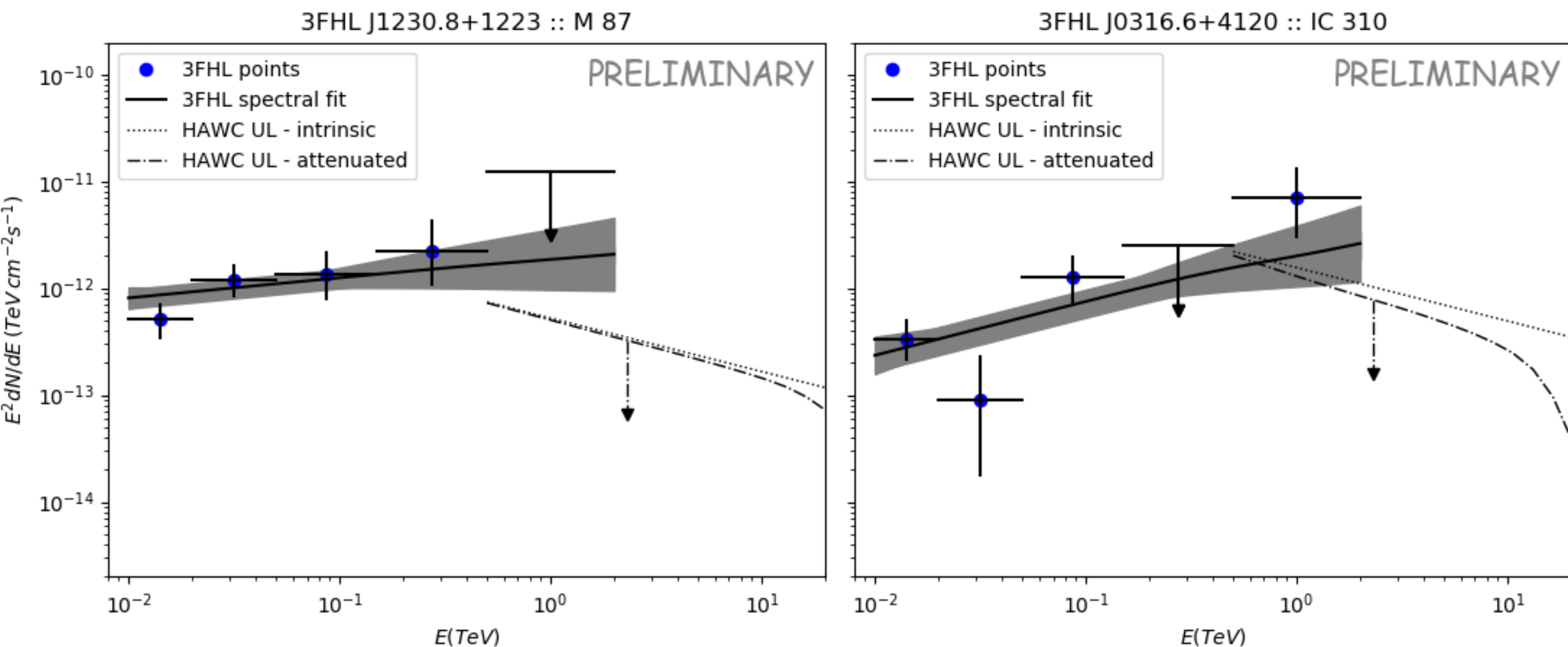
$$\tau(E_\gamma, z) = \int_0^{d(z)} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sigma_{\gamma\gamma}(\omega) n_\nu(\ell) \left(\frac{d\Omega}{4\pi} \right) d\nu d\ell,$$

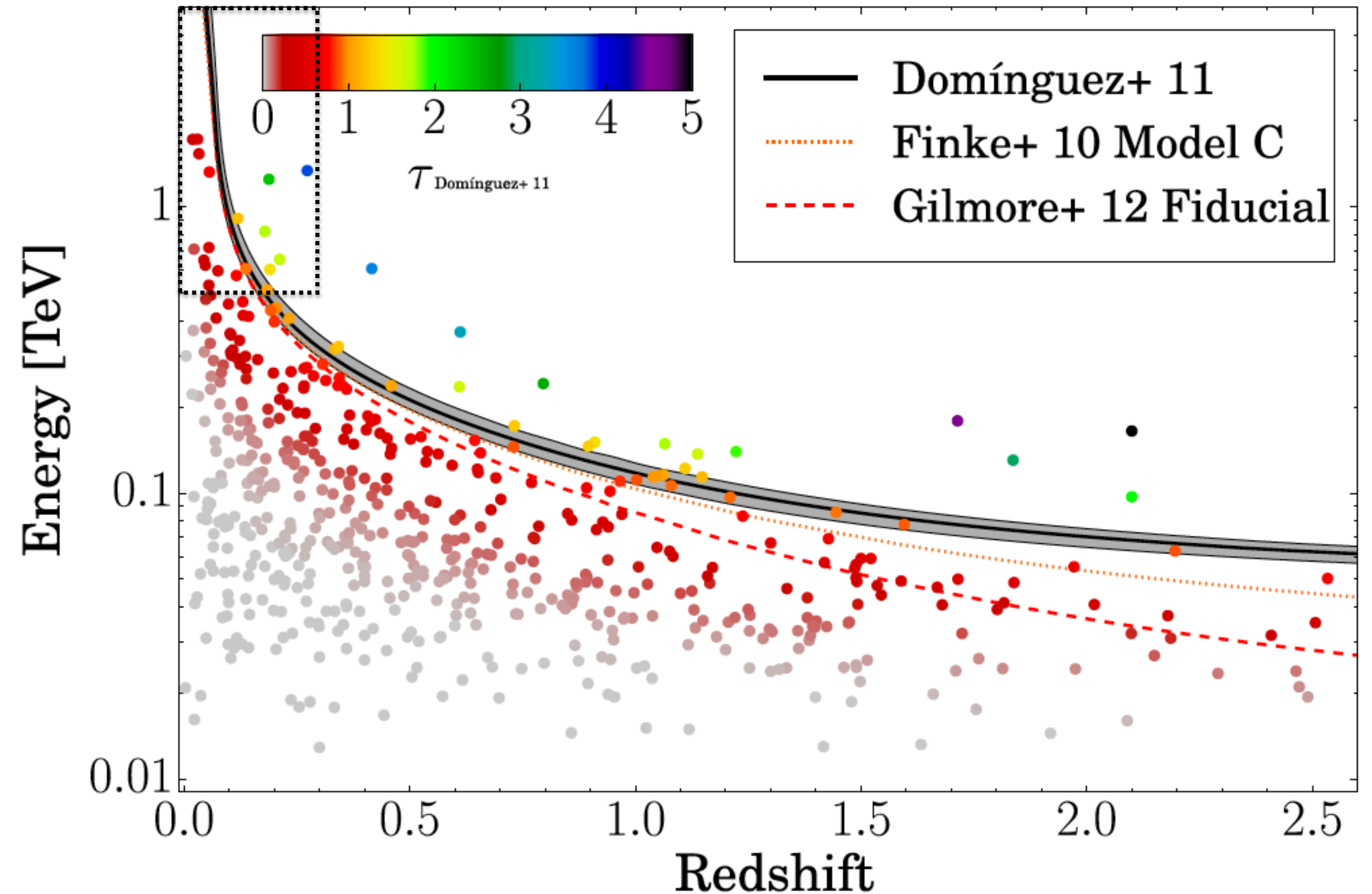




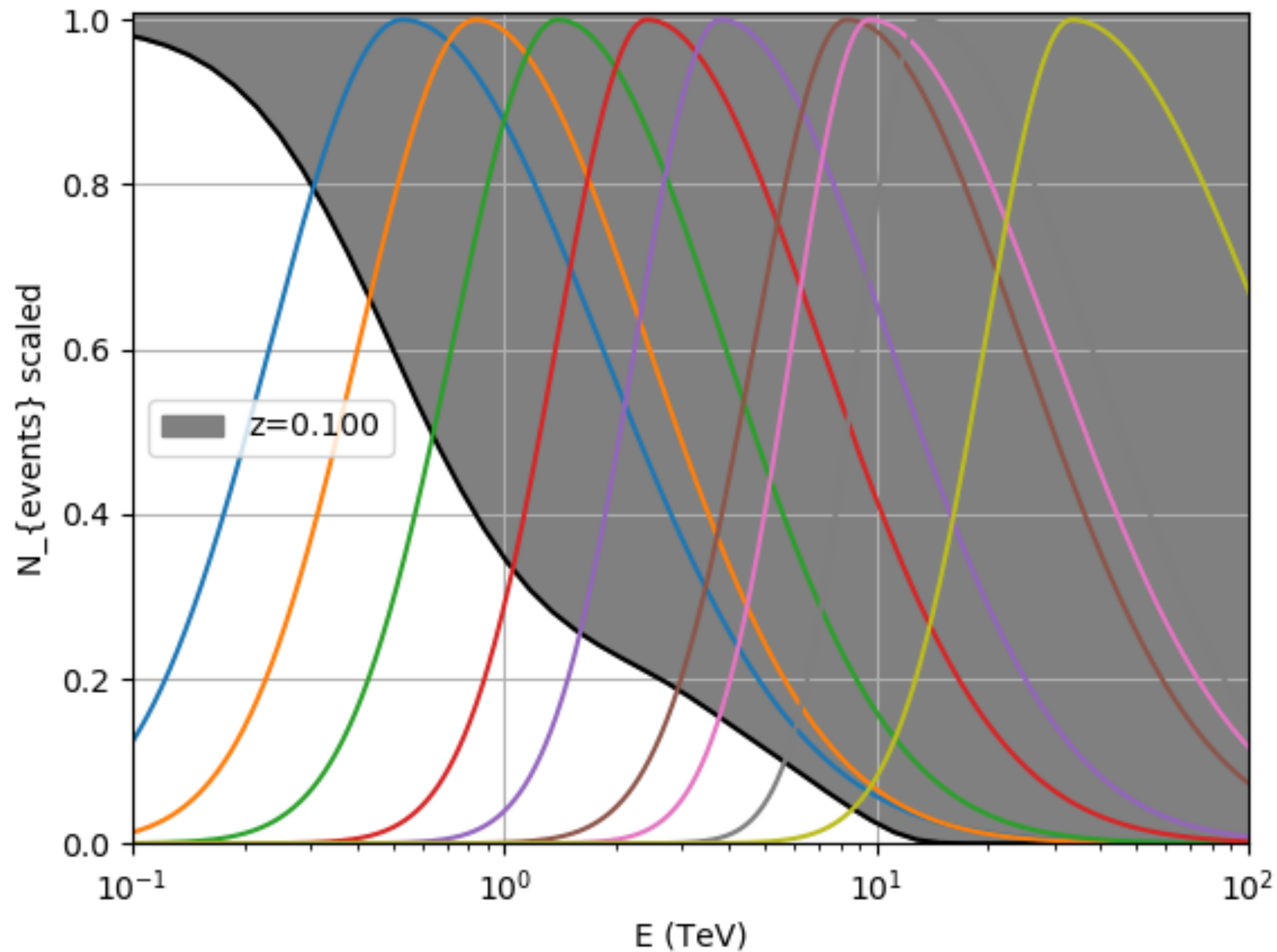
Radiogalaxias

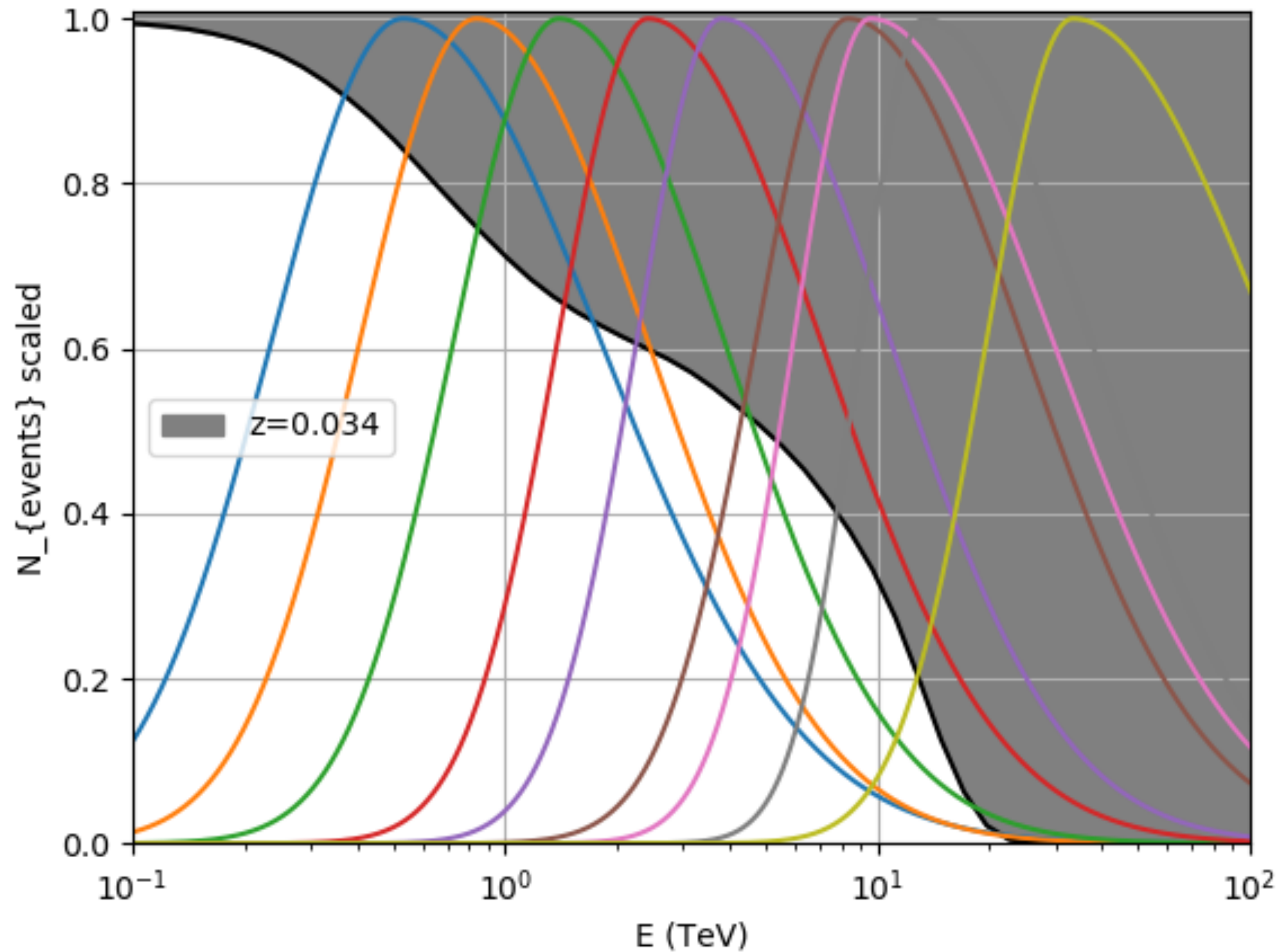
- Por su distancia son más accesibles a HAWC.











3. Absorción por EBL*

- La atenuación de una fuente lejana con espectro en ley de potencias, integrado desde E_0 da,

$$N_{\text{obs}}(>E_0) = N_{\text{intr}}(>E_0) \exp(-z/z_h),$$

- donde z_h depende fuertemente de E_0 y débilmente del índice espectral α .
- Para $E_0=0.5$ TeV (máxima respuesta del bin 1 de HAWC) y $\alpha=2.5$ se obtiene $z_h=0.108$.

* EBL = extragalactic background light

