HAWC
High Altitude Water Cherenkov
Gamma-Ray Observatory

Pulsares

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

INAOE

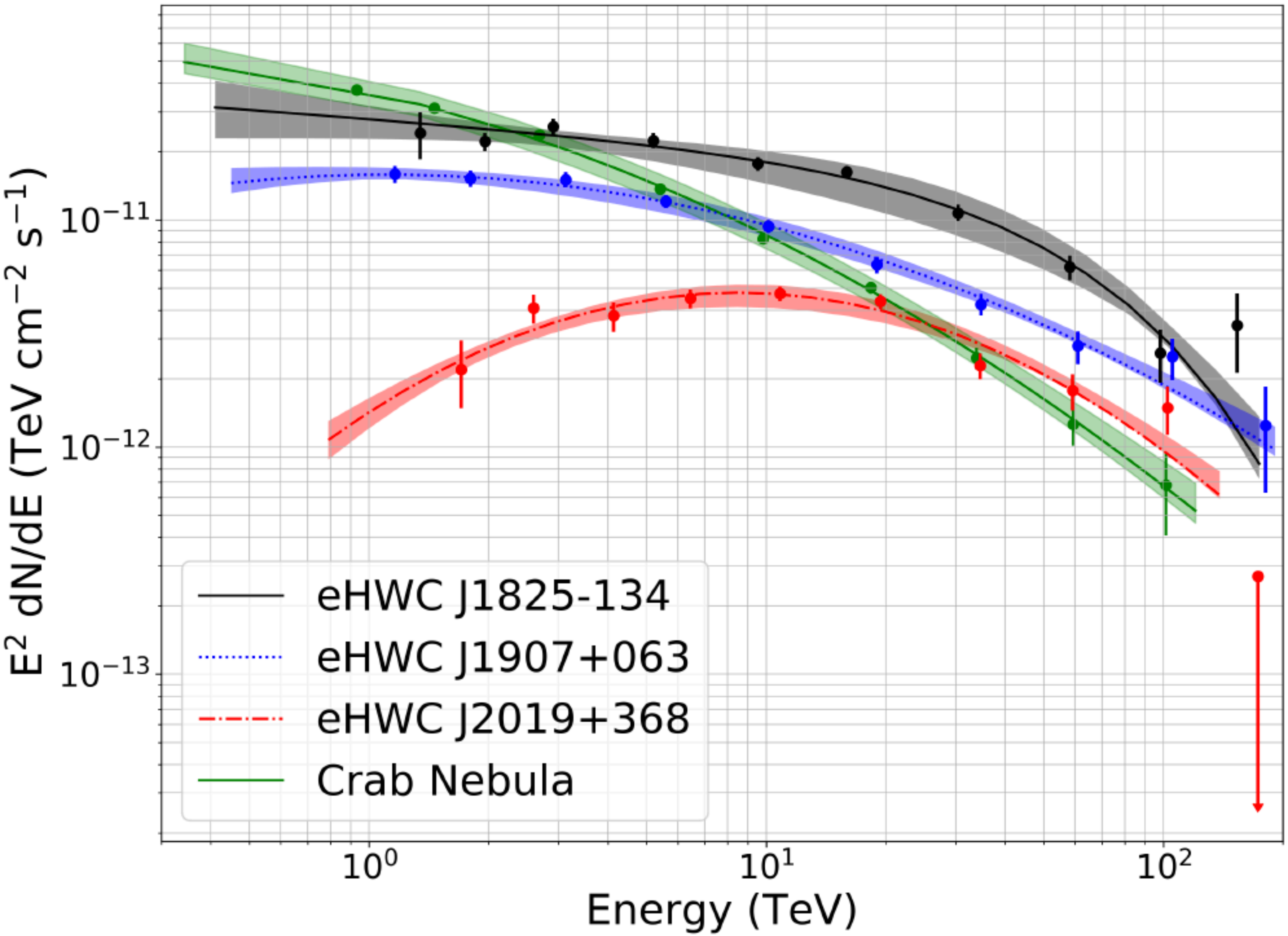
Ciencia y Tecnología
Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación

INAOE - Tonantzintla
19 febrero 2026

4FGL: Fuentes Galácticas

Pulsares (PSR)	241	Cotejo con catálogo ATNF. Identificados por pulsaciones.
Supernova remnants (SNR)	39	24 identificadas por emisión extendida.
Pulsar wind nebulae (PWN)	18	15 tienen emisión extendida.
SNR or PWN (SPP)	92	Naturaleza indefinida al coincidir la fuente con un SNR y PWN.
Globular clusters (GLC)	30	Emisión atribuible a pulsares dentro del cúmulo
High-mass X-ray binaries (HMB)	8	LS I+61 303, LS 5039. 4FGL incluye Cygnus X-1
Star-forming regions (SFR)	3	Cygnus OB. 4FGL incluye ρ Ophiuchi
Low-mass X-ray binaries (LMB)	2	Nuevas
Binary star (BIN)	1	η Carinae
Nova (NOV)	1	V5668 Sagittarii - La señal de las novas (como V 407 Cygni) se diluyen por debajo del umbral de detección


PRELIMINARY
PRELIMINARY
b [°]
l [°]
eHWC J2030+412
eHWC J2019+368
eHWC J1907+063
eHWC J1850+001
eHWC J1842-035
eHWC J1839-057
eHWC J1825-134
HAWC J1813-176
eHWC J1809-193
E > 56 TeV
E > 100 TeV
E > 177 TeV
$\sqrt{TS}$
−1 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11

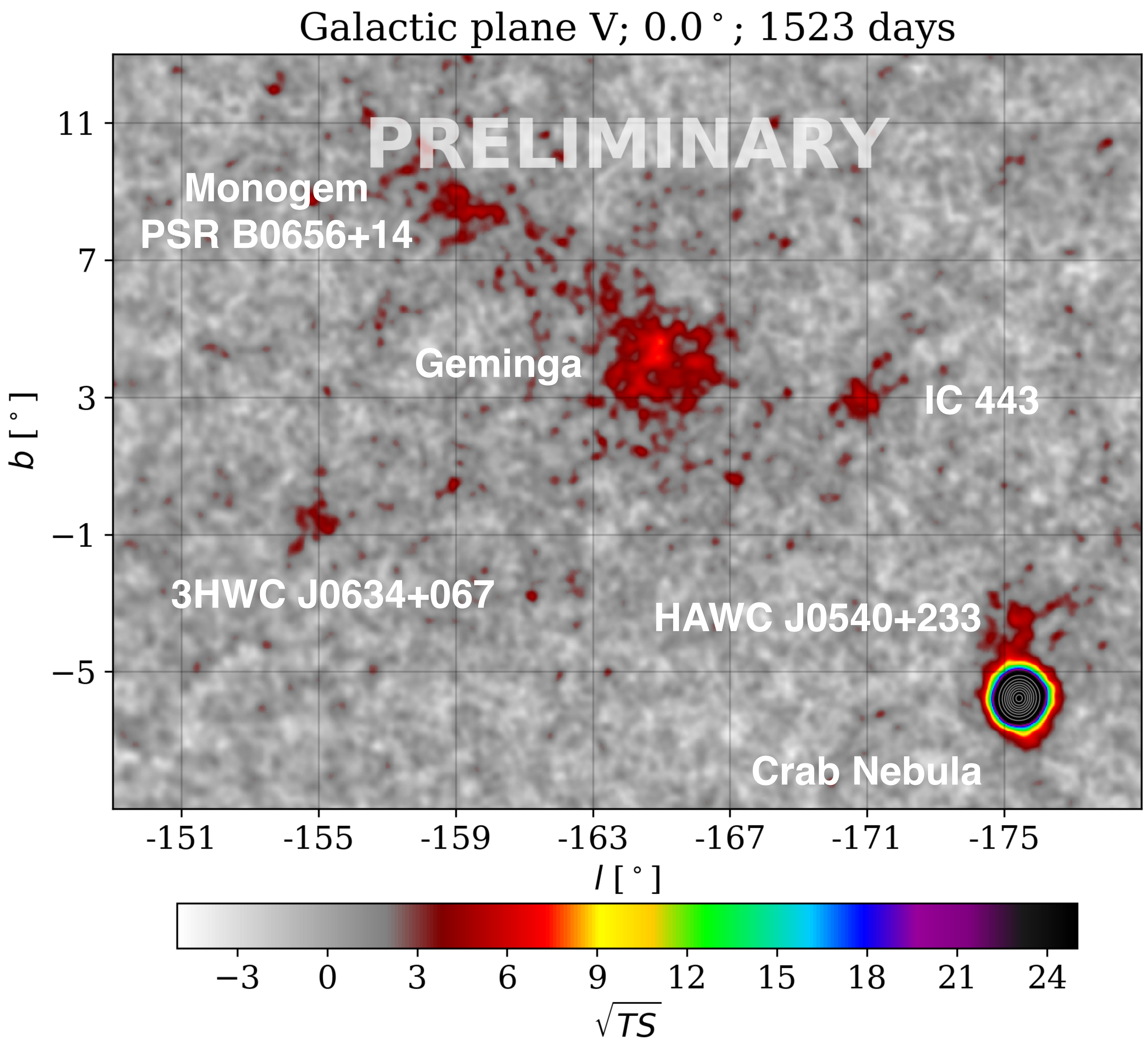


Abeysekara et al. (PRL 2020)

TABLE I. Sources exhibiting $\hat{E} > 56$ TeV emission. A Gaussian morphology is assumed for a simultaneous fit to the source location and extension (68% Gaussian containment) for $\hat{E} > 56$ TeV. The integral flux F above 56 TeV is then fitted; $\sqrt{\mathrm{TS}}$ is the square root of the test statistic for the integral flux fit. The nearest source from the 2HWC catalog and the angular distance to it are also provided. In addition, the $\sqrt{\mathrm{TS}}$ of the same integral flux fit but above $\hat{E} > 100$ TeV is provided. All uncertainties are statistical only. The point spread function of HAWC for $\hat{E} > 56$ TeV is ~0.2° at the Crab declination [19], but is declination dependent and increases to 0.35° and 0.45° for eHWC J1825 – 134 and eHWC J1809 – 193, respectively. The overall pointing error is 0.1° [22].

Source name	RA (°)	Dec (°)	Extension > 56 TeV (°)	F (10^{-14} ph cm^{-2} s^{-1})	$\sqrt{\mathrm{TS}}$ > 56 TeV	Nearest 2HWC source	Distance to 2HWC source(°)	$\sqrt{\mathrm{TS}}$ > 100 TeV
eHWC J0534 + 220	83.61 ± 0.02	22.00 ± 0.03	PS	1.2 ± 0.2	12.0	J0534 + 220	0.02	4.44
eHWC J1809 – 193	272.46 ± 0.13	-19.34 ± 0.14	0.34 ± 0.13	$2.4^{+0.6}_{-0.5}$	6.97	J1809 – 190	0.30	4.82
eHWC J1825 – 134	276.40 ± 0.06	-13.37 ± 0.06	0.36 ± 0.05	4.6 ± 0.5	14.5	J1825 – 134	0.07	7.33
eHWC J1839 – 057	279.77 ± 0.12	-5.71 ± 0.10	0.34 ± 0.08	1.5 ± 0.3	7.03	J1837 – 065	0.96	3.06
eHWC J1842 – 035	280.72 ± 0.15	-3.51 ± 0.11	0.39 ± 0.09	1.5 ± 0.3	6.63	J1844 – 032	0.44	2.70
eHWC J1850 + 001	282.59 ± 0.21	0.14 ± 0.12	0.37 ± 0.16	$1.1^{+0.3}_{-0.2}$	5.31	J1849 + 001	0.20	3.04
eHWC J1907 + 063	286.91 ± 0.10	6.32 ± 0.09	0.52 ± 0.09	2.8 ± 0.4	10.4	J1908 + 063	0.16	7.30
eHWC J2019 + 368	304.95 ± 0.07	36.78 ± 0.04	0.20 ± 0.05	$1.6^{+0.3}_{-0.2}$	10.2	J2019 + 367	0.02	4.85
eHWC J2030 + 412	307.74 ± 0.09	41.23 ± 0.07	0.18 ± 0.06	0.9 ± 0.2	6.43	J2031 + 415	0.34	3.07

Abeysekara et al. (PRL 2020)



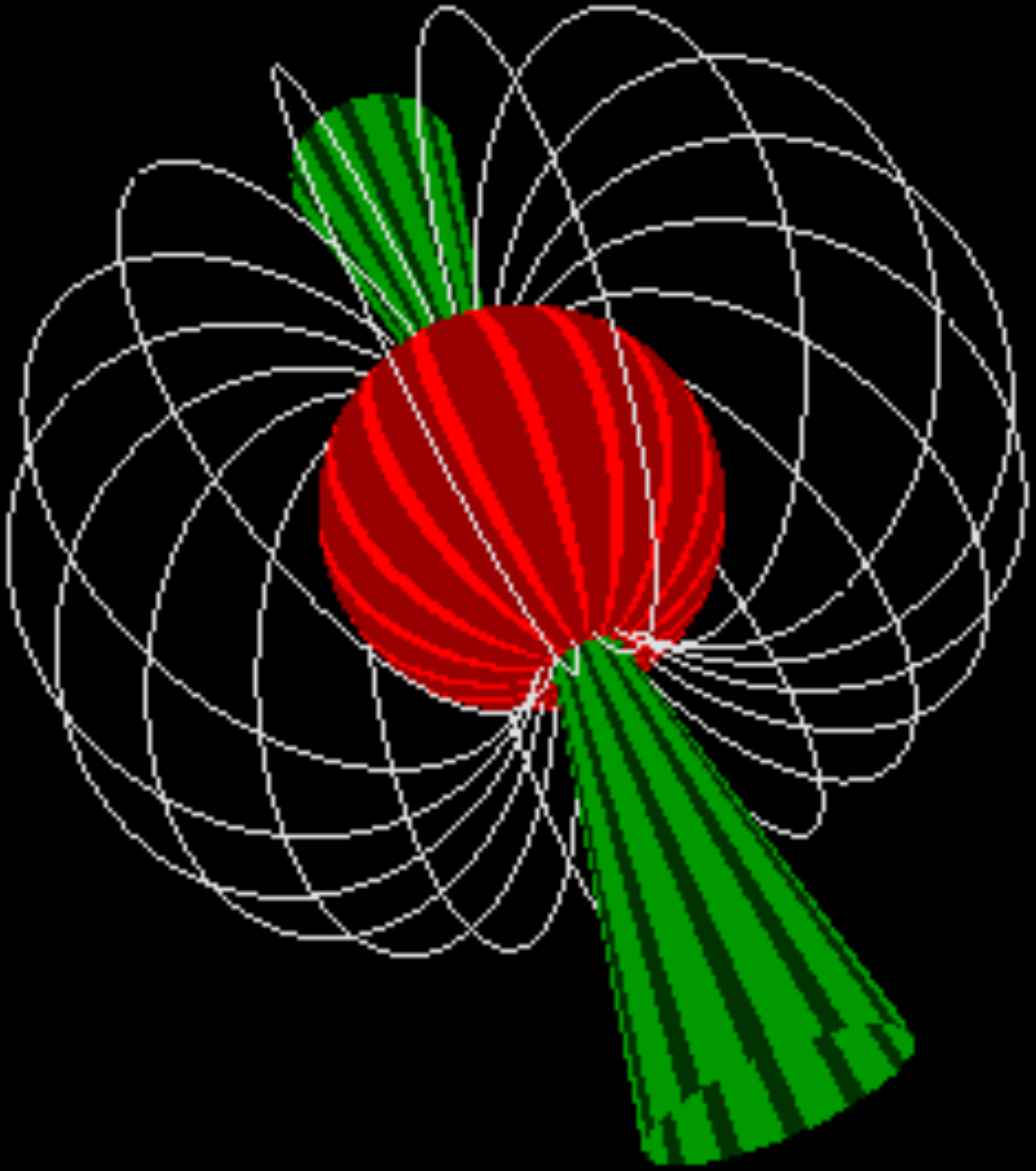
Anticentro Galáctico

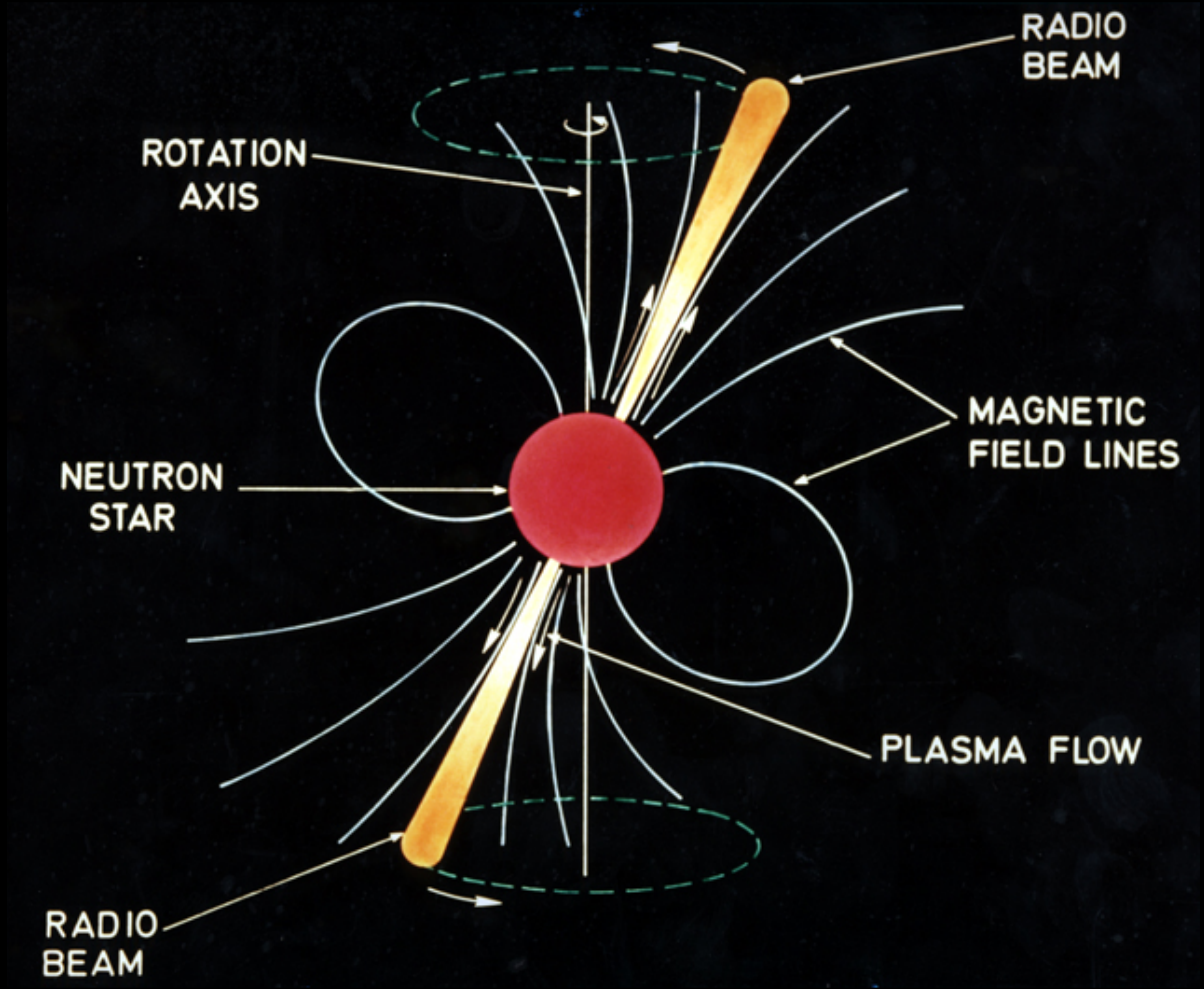
Fuentes energizadas por pulsares:

- Nebulosa del Cangrejo: Pulsar Wind Nebula (PWN).
- Geminga & Monogem (PSR B0656+14): TeV halos!
- HAWC J0540+233 (PSR B0540+23) y 3HWC J0634+067 (PSR J0633+0632): TeV halos?

IC 443: remanente (clásico) de supernova.

Pulsares y PWNe





Rayos cósmicos y SNR

El requerimiento energético de los rayos cósmicos en la Galaxia es,

$$L_{RC} \simeq \frac{u_{rc} V_{gal}}{t_{esc}} \approx \left(\frac{1\,\mathrm{eV/cm^3}}{t_{esc}} \right) V_{gal} \approx 10^{40}\,\mathrm{erg/s}$$

donde $t_{esc} \approx 2 \times 10^7$ años estimado por abundancias de isótopos radioactivos (^{10}Be con $\tau \approx 2 \times 10^6$ años), y

$$V_{gal} \approx \pi (200\,\mathrm{pc})(15\,\mathrm{kpc})^2 \simeq 4 \times 10^{66}\,\mathrm{cm^3}\,.$$

Una supernova cada 30 años $\Rightarrow 10^{51}\,\mathrm{erg}/10^9\,\mathrm{s} = 10^{42}\,\mathrm{erg/s}$.

Otras fuentes potenciales: pulsares, estrellas masivas jóvenes, novas...

Estrellas de neutrones

- Oppenheimer & Volkoff (1939) hacen el primer cálculo de la estructura de una estrella de neutrones, dando lugar a la estimación $R_\star \simeq 10\,\mathrm{km}$, $M_\star \simeq 1.4\ \mathrm{M}_\odot$.
- En un gas degenerado de neutrones el número de partículas, $N = nV$, se relaciona con el momento de Fermi, p_f de acuerdo a

$$N = 2\int \frac{d^3r\, d^3p}{h^3} \Rightarrow p_f = h\left(\frac{3n}{8\pi}\right)^{1/3},$$

- La densidad de materia se estima de $p_f = mc$, con m la masa del neutrón,

$$\rho_c = \frac{8\pi m^4 c^3}{3h^3} \simeq 6\times 10^{15}\,\mathrm{g/cm^3}\,.$$

- Balanceando energía interna $u \propto \rho^\gamma/(\gamma-1)$ con gravedad, se obtiene, para una estrella de densidad constante,

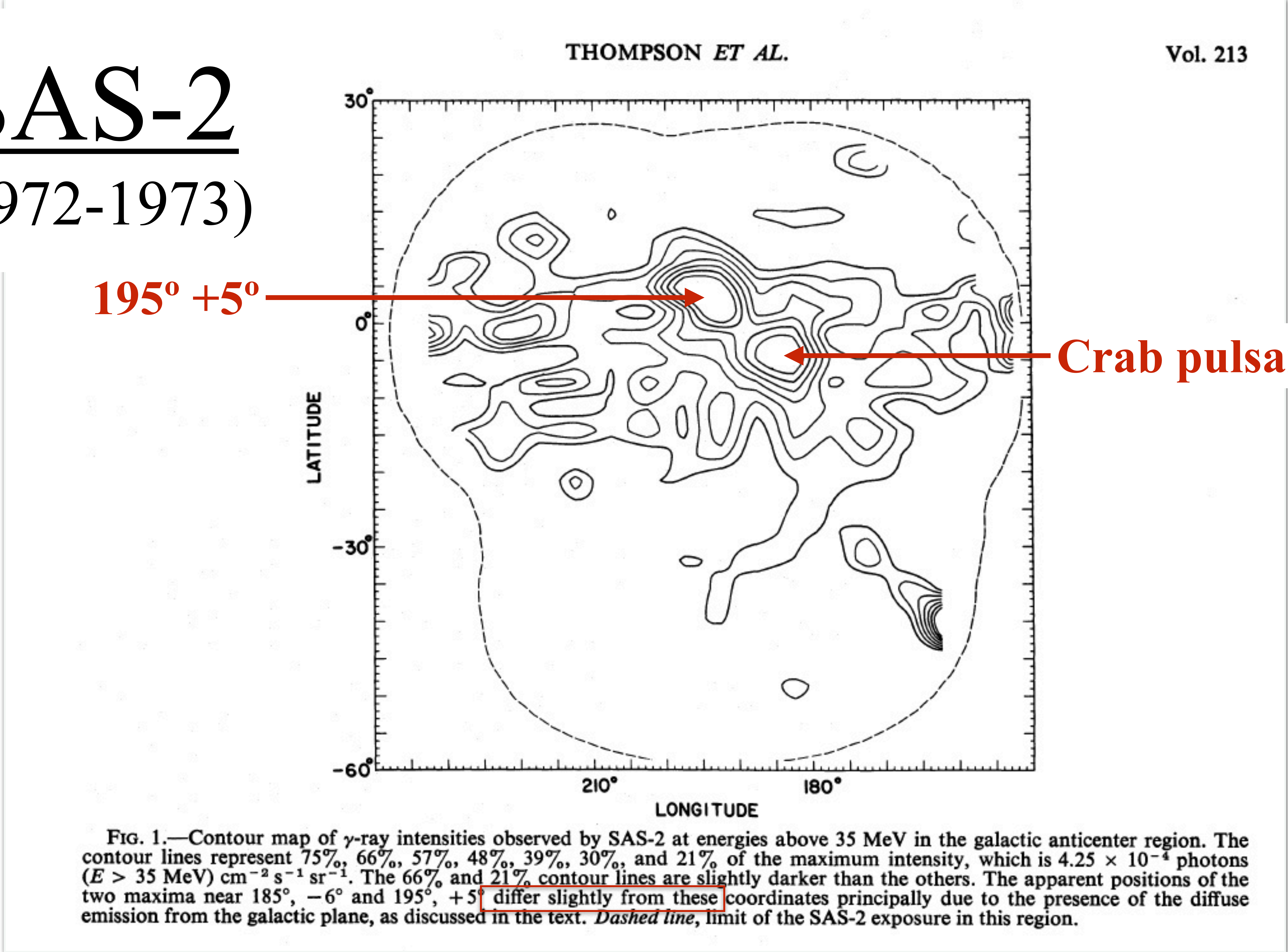
$$R = \left(\frac{3}{2\pi}\right)^{4/3} \frac{h^2 M^{-1/3}}{4Gm_N^{8/3}} \simeq 5\,\mathrm{km}\left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{-1/3}.$$

Pulsares

- PSR 1919+21 descubierto en ondas de radio por Hewish & Bell (1968), con P=1.337s. Siguieron Vela (89 ms), Cangrejo (33 ms) y cientos más.
- Pulsar binario PSR B1913+16 (Taylor & Hulse 1974).
- Pulsar milisegundos PSR B1937+21 con P=1.6 ms (Backer et al. 1982).
- Detectados en radio, óptico, rayos X, rayos gamma:
  - XRPs, Soft Gamma-ray Repeaters → magnetars.
- Mas de 3000 pulsares en la versión 2021 de psrcat (ATNF pulsar catalog).

SAS-2

(1972-1973)

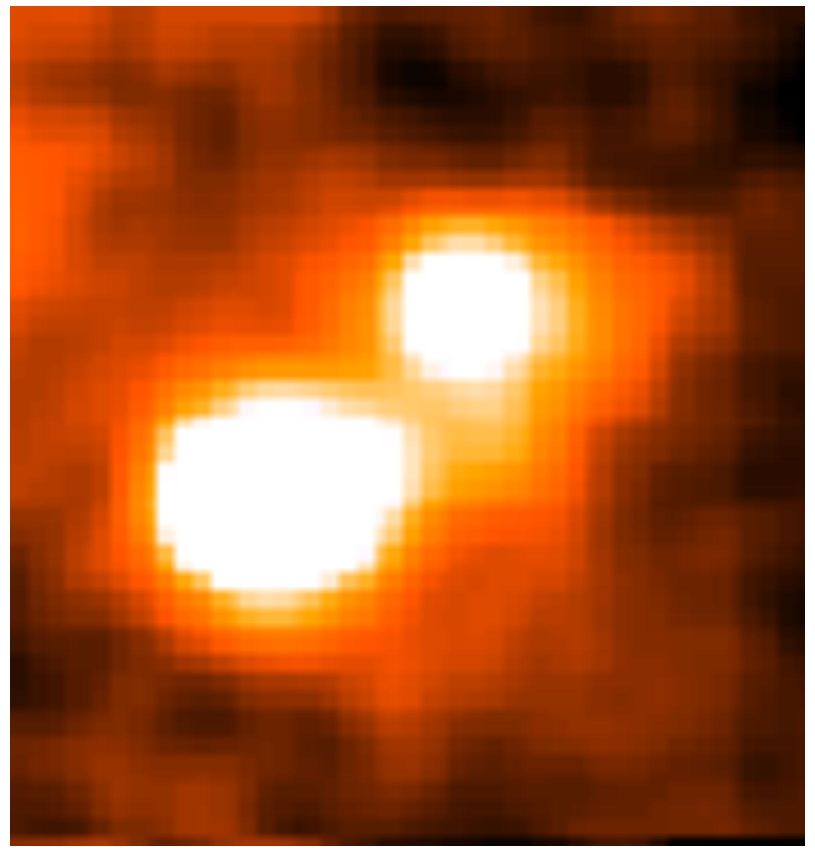


THOMPSON *ET AL.* Vol. 213

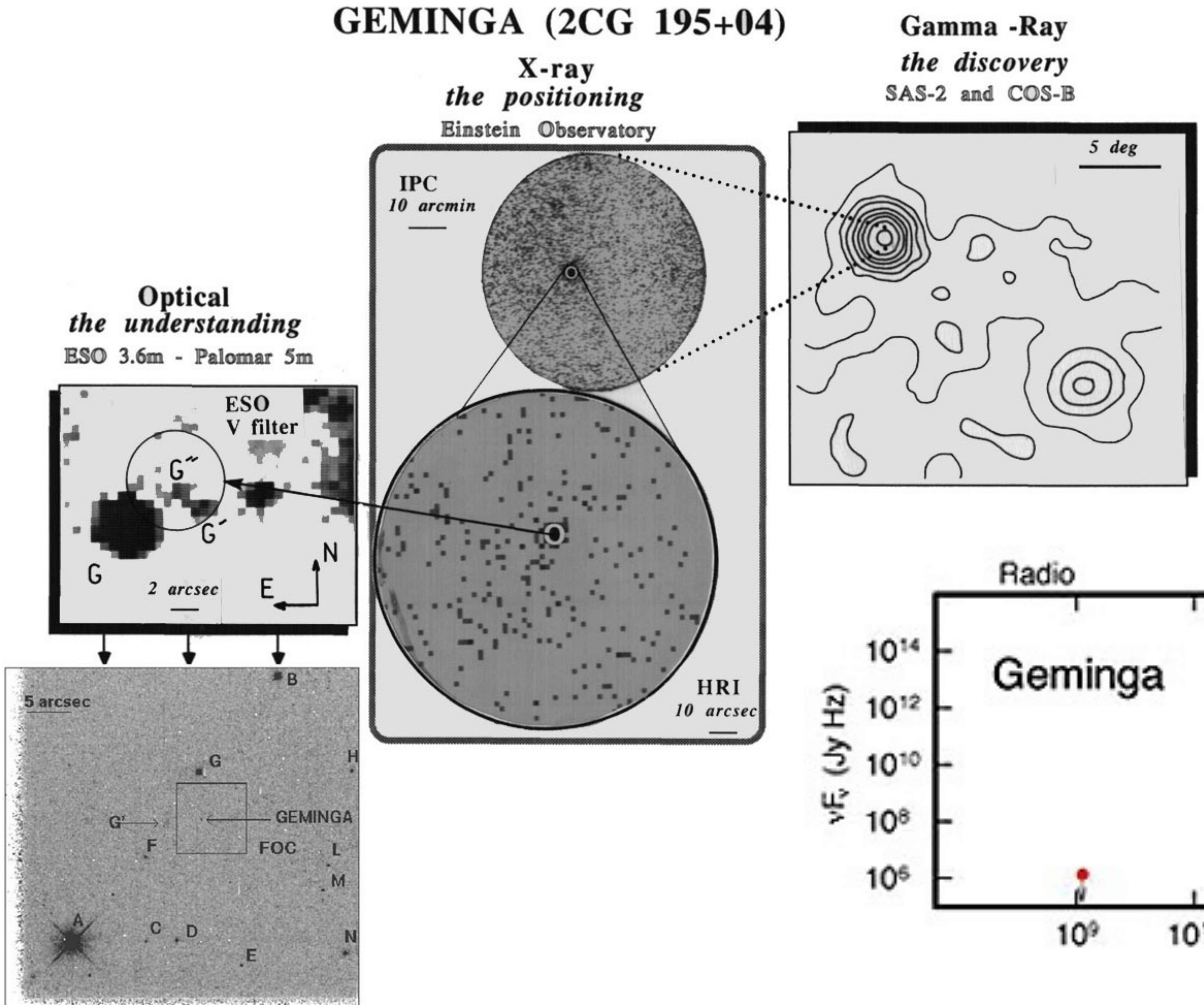
195º +5º

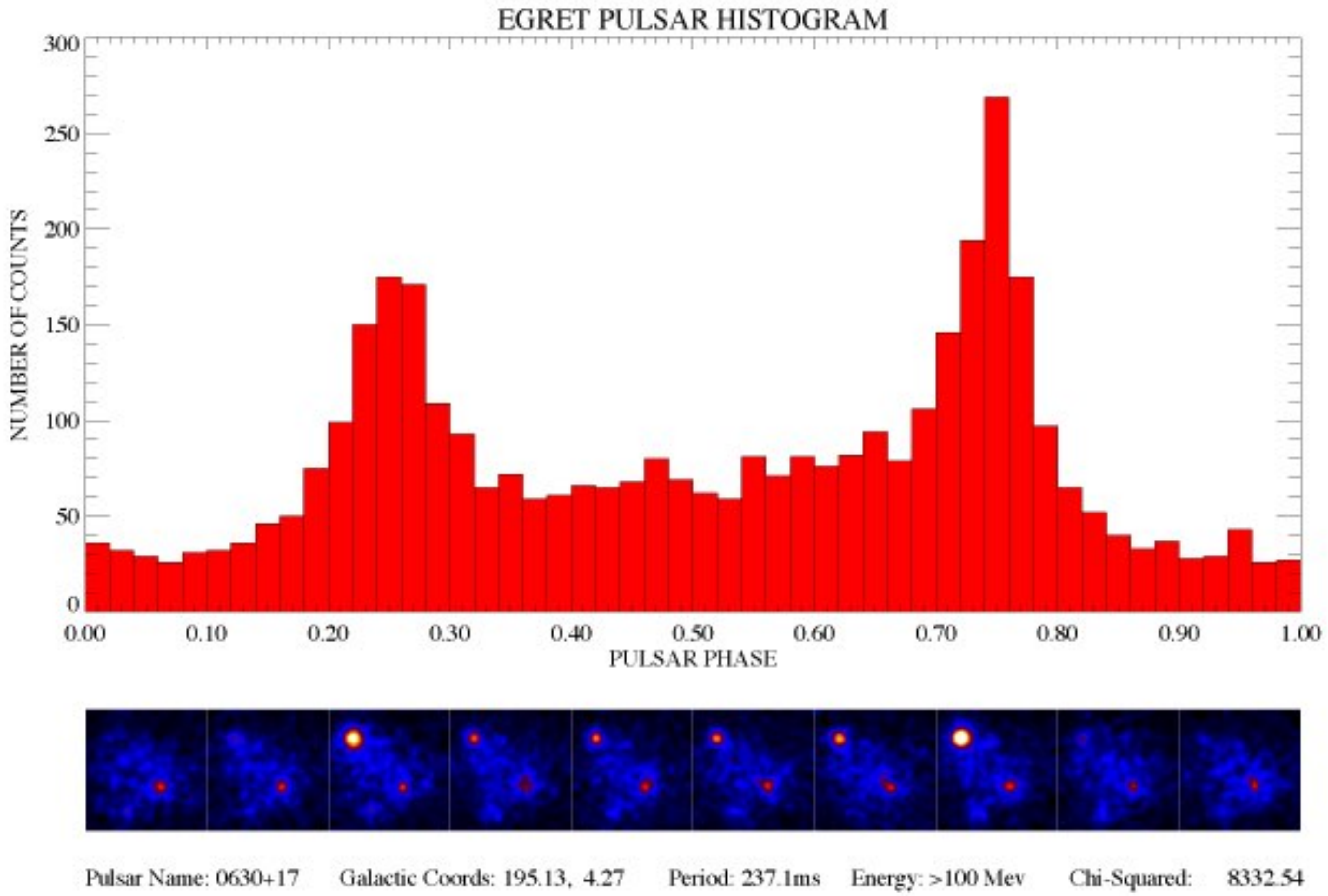
Crab pulsar

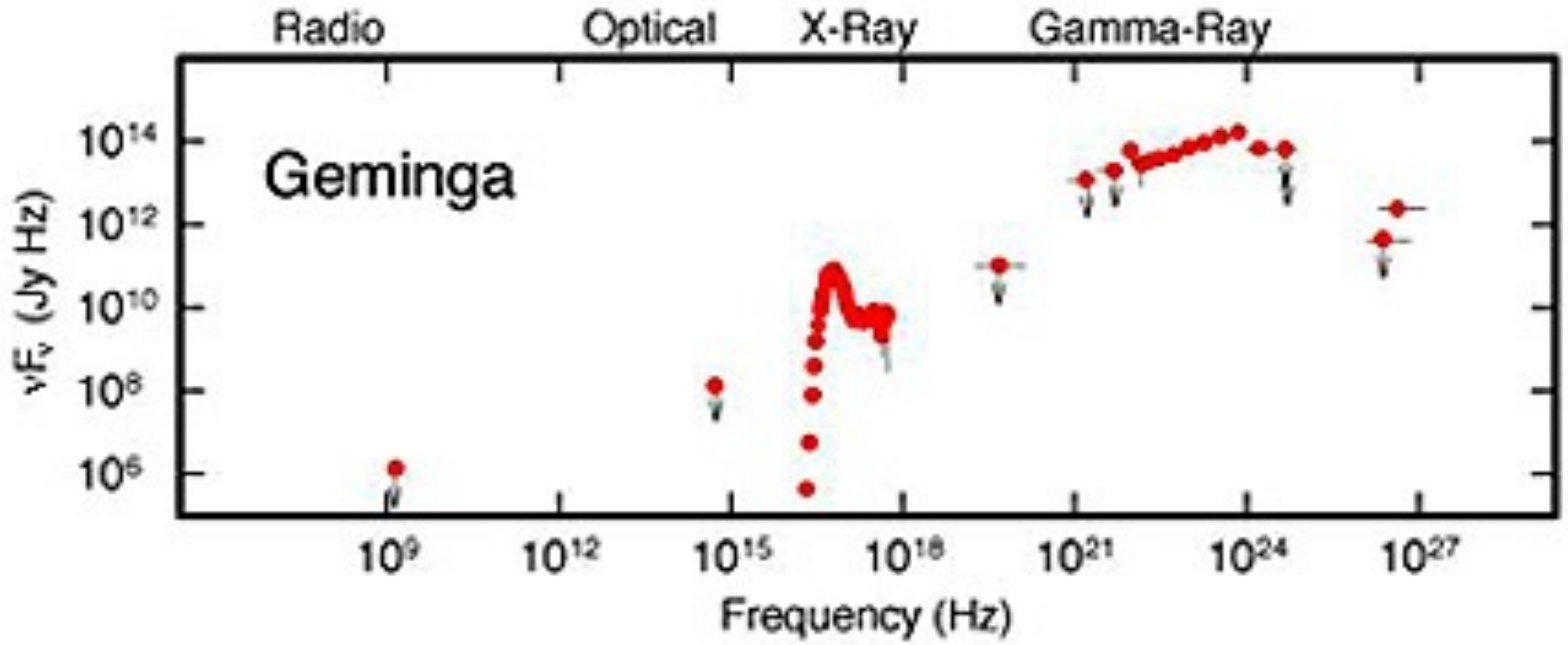
FIG. 1.—Contour map of γ-ray intensities observed by SAS-2 at energies above 35 MeV in the galactic anticenter region. The contour lines represent 75%, 66%, 57%, 48%, 39%, 30%, and 21% of the maximum intensity, which is 4.25×10^{-4} photons ($E > 35$ MeV) $cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$. The 66% and 21% contour lines are slightly darker than the others. The apparent positions of the two maxima near 185°, −6° and 195°, +5° differ slightly from these coordinates principally due to the presence of the diffuse emission from the galactic plane, as discussed in the text. *Dashed line*, limit of the SAS-2 exposure in this region.

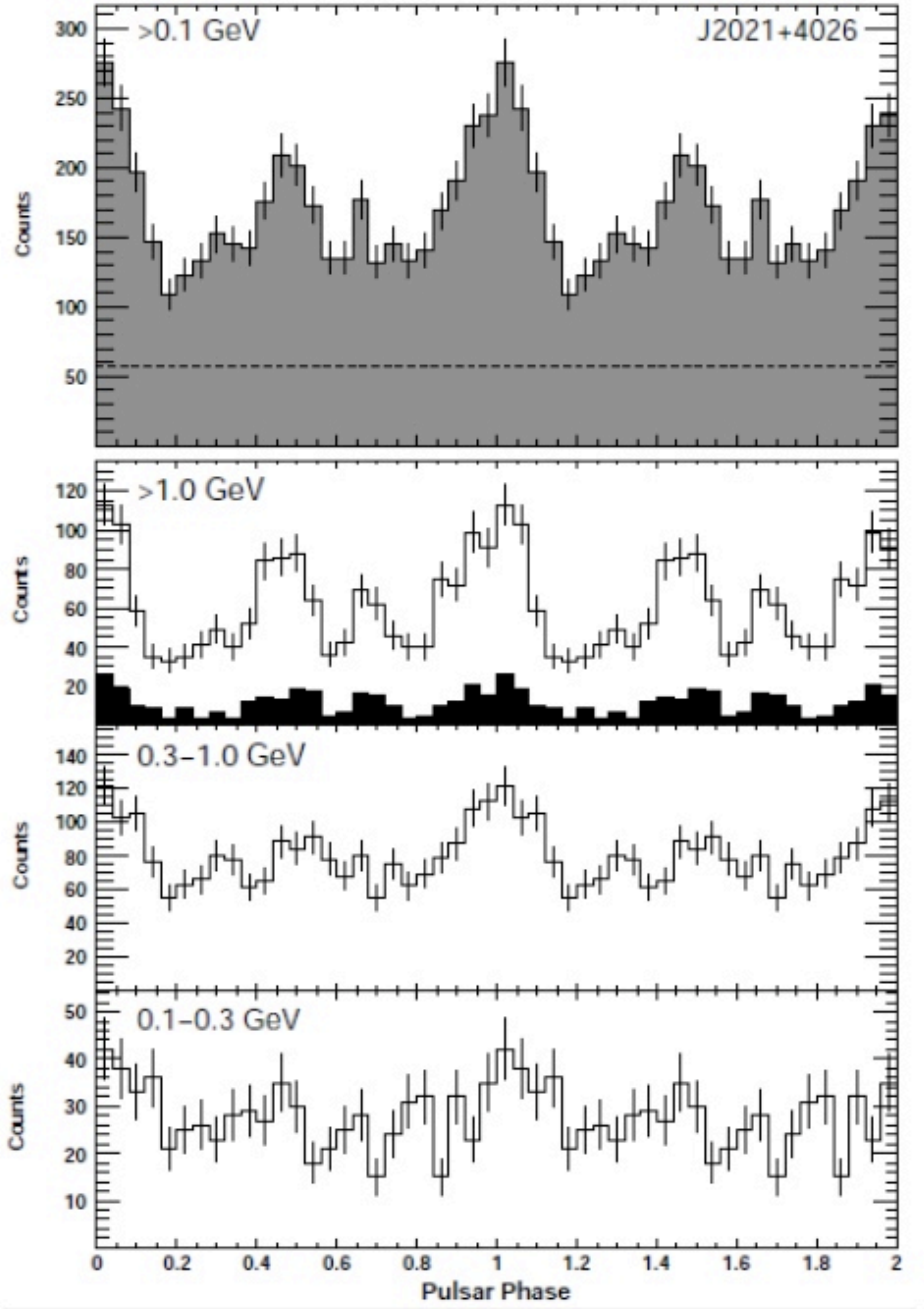


Crab OAGH


GEMINGA (2CG 195+04)
X-ray
the positioning
Einstein Observatory
Gamma -Ray
the discovery
SAS-2 and COS-B
5 deg
IPC
10 arcmin
HRI
10 arcsec
Optical
the understanding
ESO 3.6m - Palomar 5m
ESO
V filter
G''
G'
G
2 arcsec
N
E
5 arcsec
B
G
H
G'
GEMINGA
F
FOC
L
M
A
C
D
E
N


EGRET PULSAR HISTOGRAM
NUMBER OF COUNTS
300
250
200
150
100
50
0
0.00
0.10
0.20
0.30
0.40
0.50
0.60
0.70
0.80
0.90
1.00
PULSAR PHASE
Pulsar Name: 0630+17
Galactic Coords: 195.13, 4.27
Period: 237.1ms
Energy: >100 Mev
Chi-Squared: 8332.54


Radio
Optical
X-Ray
Gamma-Ray
Geminga
νF_ν (Jy Hz)
10^{14}
10^{12}
10^{10}
10^{8}
10^{6}
10^{9}
10^{12}
10^{15}
10^{18}
10^{21}
10^{24}
10^{27}
Frequency (Hz)



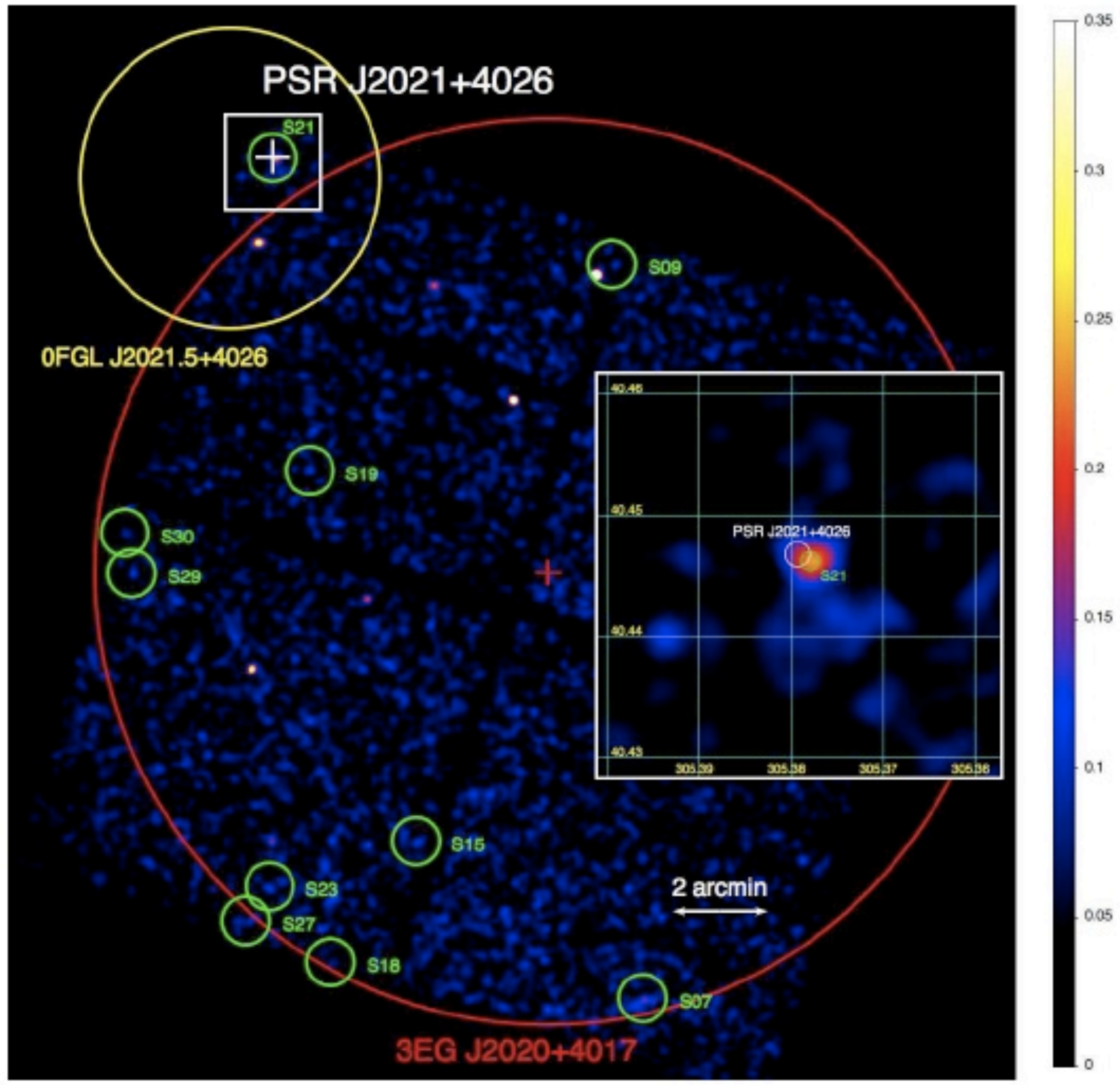
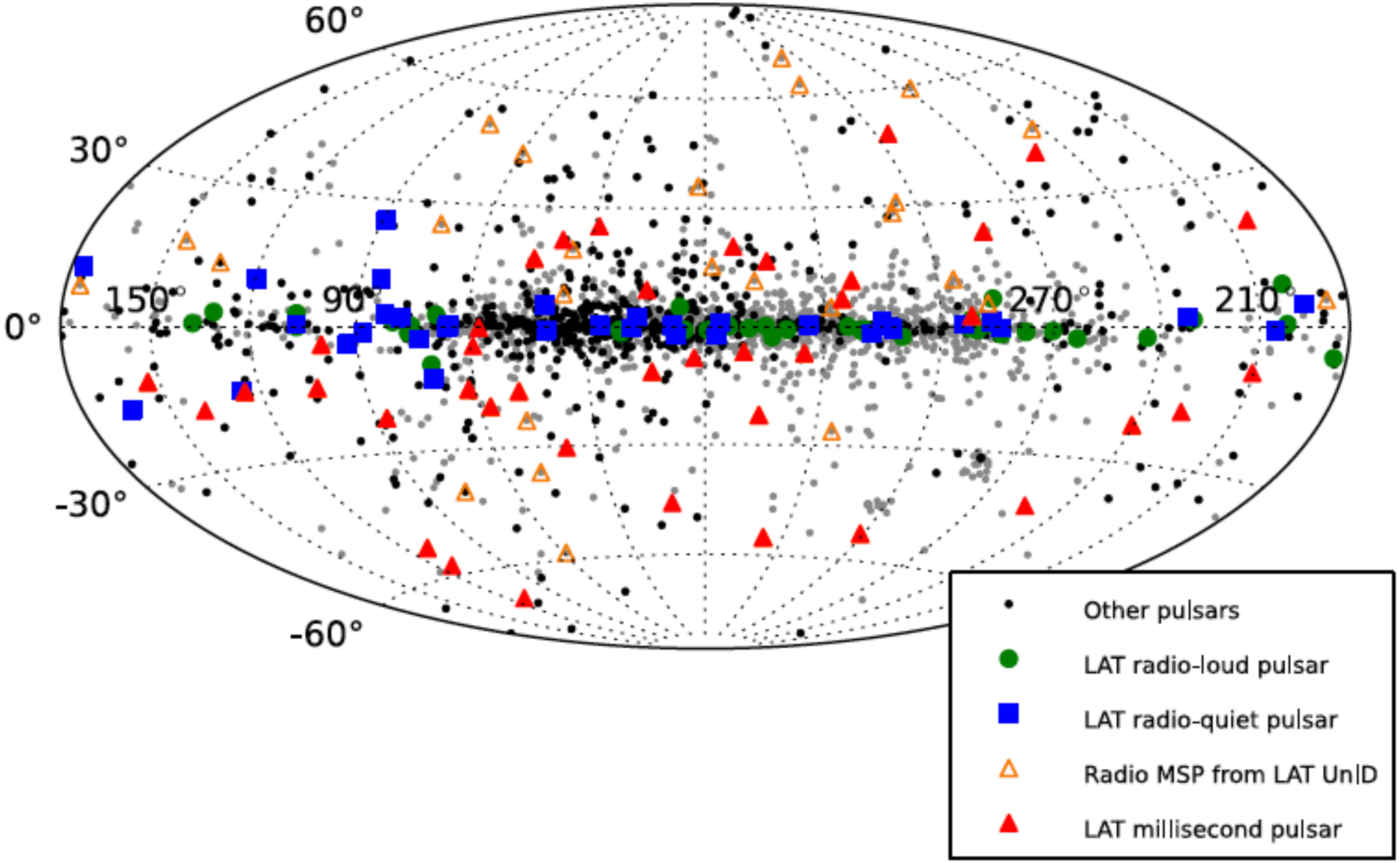


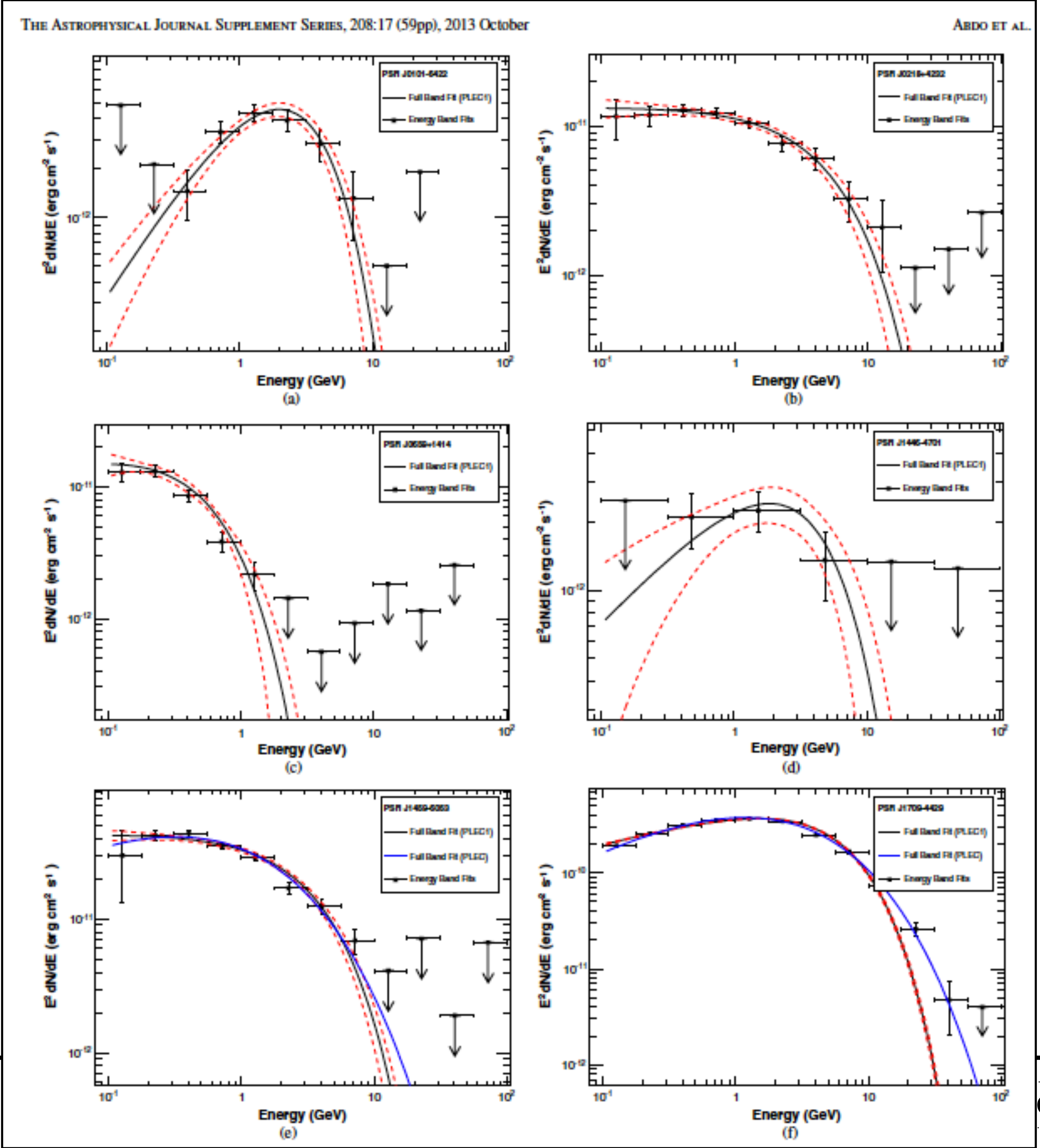
FIGURE 1: *Chandra* 14.3 ks ACIS-I (0.1–10 keV) X-ray observation (ObsID 5533, 2005 February 6) centered on the EGRET γ-ray source 3EG J2020+4017. The color scale is in counts per square arcsecond. Prior to *Fermi*, this was the brightest EGRET unidentified source, and it is tl
source in the *Fermi* LAT Bright Source List [Abd0
95% (stat.) error circle. The 10 green circles indica
as possible counterparts to 3EG J2020+4017 in [W
pulsations from these positions resulted in the disc
(marked with a white cross), the young energetic
pernova remnant (SNR 78.2+2.1). Note that only
error circle of the γ-ray source reported in the
List [Abd09b] (shown in yellow). The white box (2'
on the right. **Inset** – Close-up view of the region
The white ellipse is the 95% (stat.) error ellipse
ported in the *Fermi* LAT First Pulsar Catalog [Ab
the *Chandra* 99% (stat. + syst.) error circle [Wei06]. A ~ 60 ks *Chandra*
ACIS-S observation (PI: Weisskopf) centered at the position of the pulsar has
been appr

Radio silent pulsar in γ Cygni

Saz Parkinson et al. HEAD-AAS 2010

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL SUPPLEMENT SERIES, 208:17 (59pp), 2013 Octo





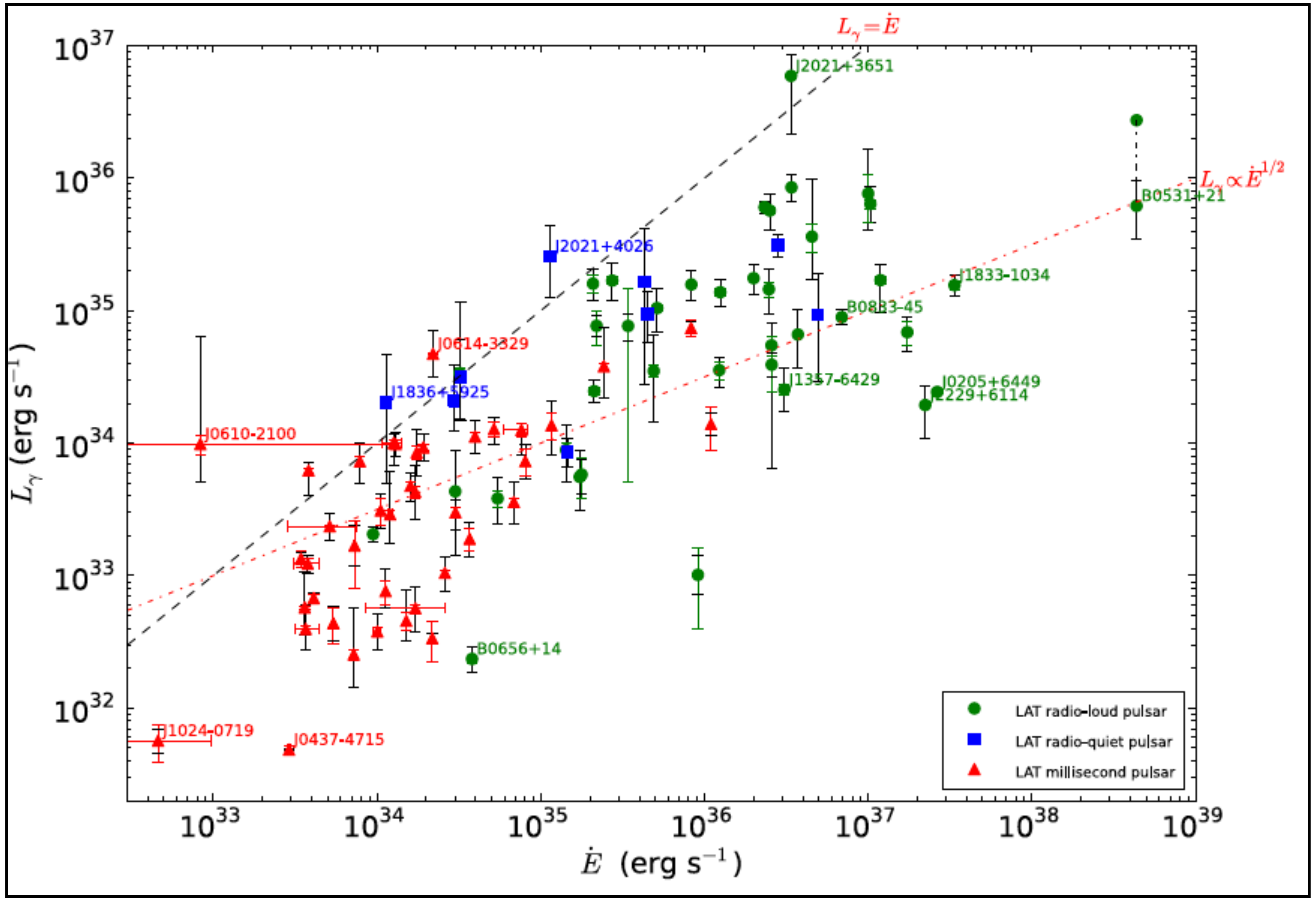
The Astrophysical Journal Supplement Series, 208:17 (59pp), 2013 October

Abdo et al.

(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)



HAWC
High Altitude Water Cherenkov
Gamma-Ray Observatory

Pulsares

Desde su descubrimiento los pulsares fueron interpretados como estrellas de neutrones en rotación[1]. A partir de estimaciones para el campo magnético de una estrella de neutrones, $B_\star \sim 10^{12}\,\mathrm{G}$, Pacini (1967) propuso un modelo de dipolo magnético rotante para la fuente de energía en M1:

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I \Omega^2 = 2 \times 10^{46}\,\mathrm{erg}\, P_{\mathrm{s}}^{-2} = 1.8 \times 10^{49}\,\mathrm{erg} \left(\frac{P}{33\mathrm{ms}} \right)^{-2} ,$$

$$\frac{dE_{rot}}{dt} = I \Omega \dot{\Omega} \quad = \quad \frac{dE_{rad}}{dt} = -\frac{2|\ddot{\mu}|^2}{3c^3} = -\frac{2B_\perp^2 R^6 \Omega^4}{3c^3} .$$

Esta aproximación permite calcular $B_\perp$, componente perpendicular a $\vec{\Omega}$, y modelar de manera simplificada las estrellas de neutrones.

Pulsares

De los parámetros rotacionales ($I = 2M_\star R_\star^2/5$, $M_\star = 1.4M_\odot$):
- la pérdida de energía rotacional,

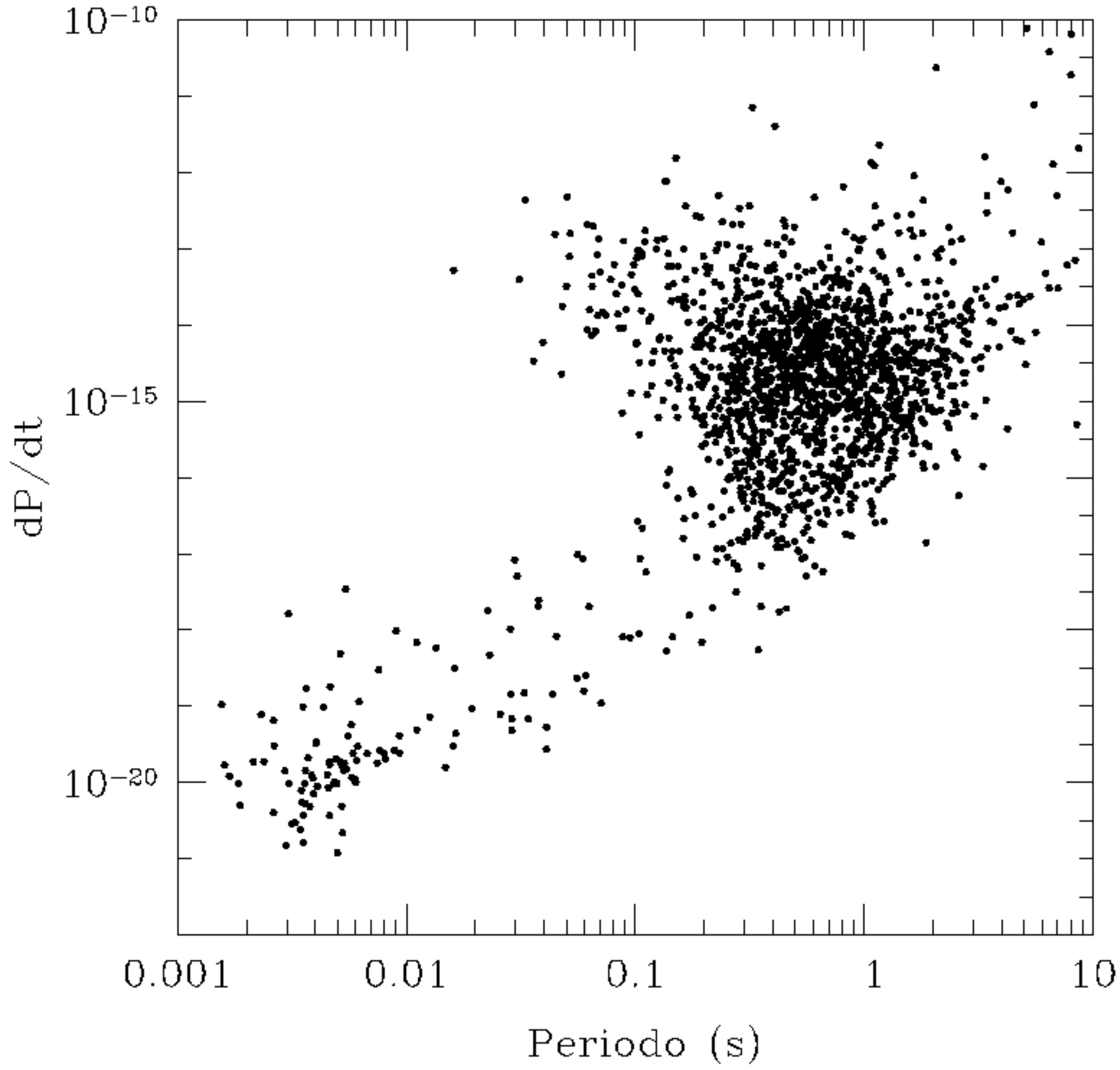
$$\frac{dE_{rot}}{dt} = 4\pi^2 I \left(\frac{\dot{P}}{P^3}\right) = 2.58\times10^{38}\mathrm{erg/s}\left(\frac{\dot{P}}{4.2\times10^{-13}}\right)\left(\frac{P}{33\,\mathrm{ms}}\right)^{-3},$$

- el campo magnético,

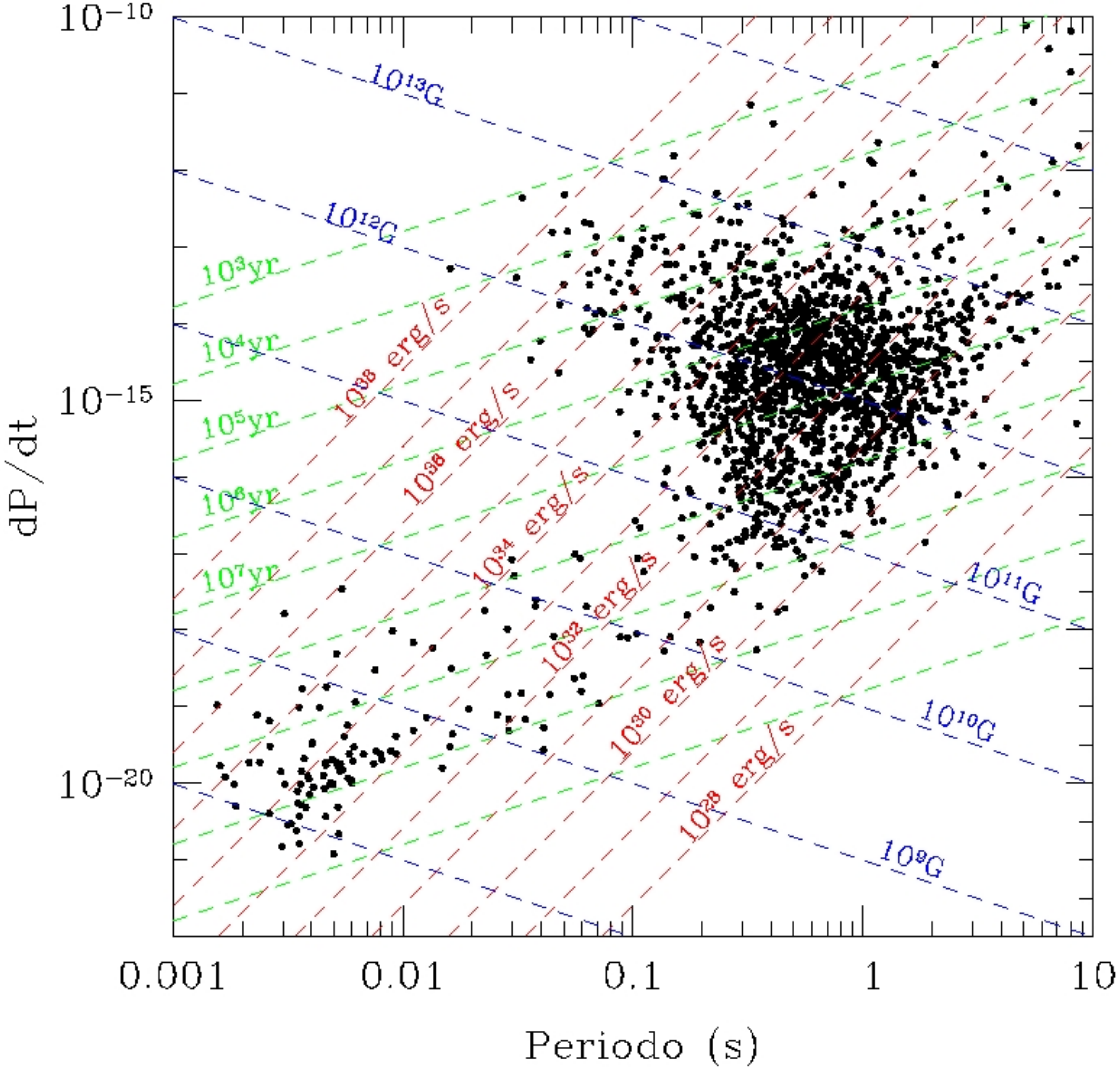
$$B = 2.38\times10^{19}\ \mathrm{G}\left(P\dot{P}\right)^{1/2} = 2.80\times10^{12}\ \mathrm{G}\left(\frac{P\dot{P}}{33\,\mathrm{ms}\cdot4.2\times10^{-13}}\right)^{1/2}.$$

- la *edad dinámica*,

$$t_d = \frac{P}{2\dot{P}} = 1273\,\text{años}\left(\frac{P/33\,\mathrm{ms}}{\dot{P}/4.2\times10^{-13}}\right).$$

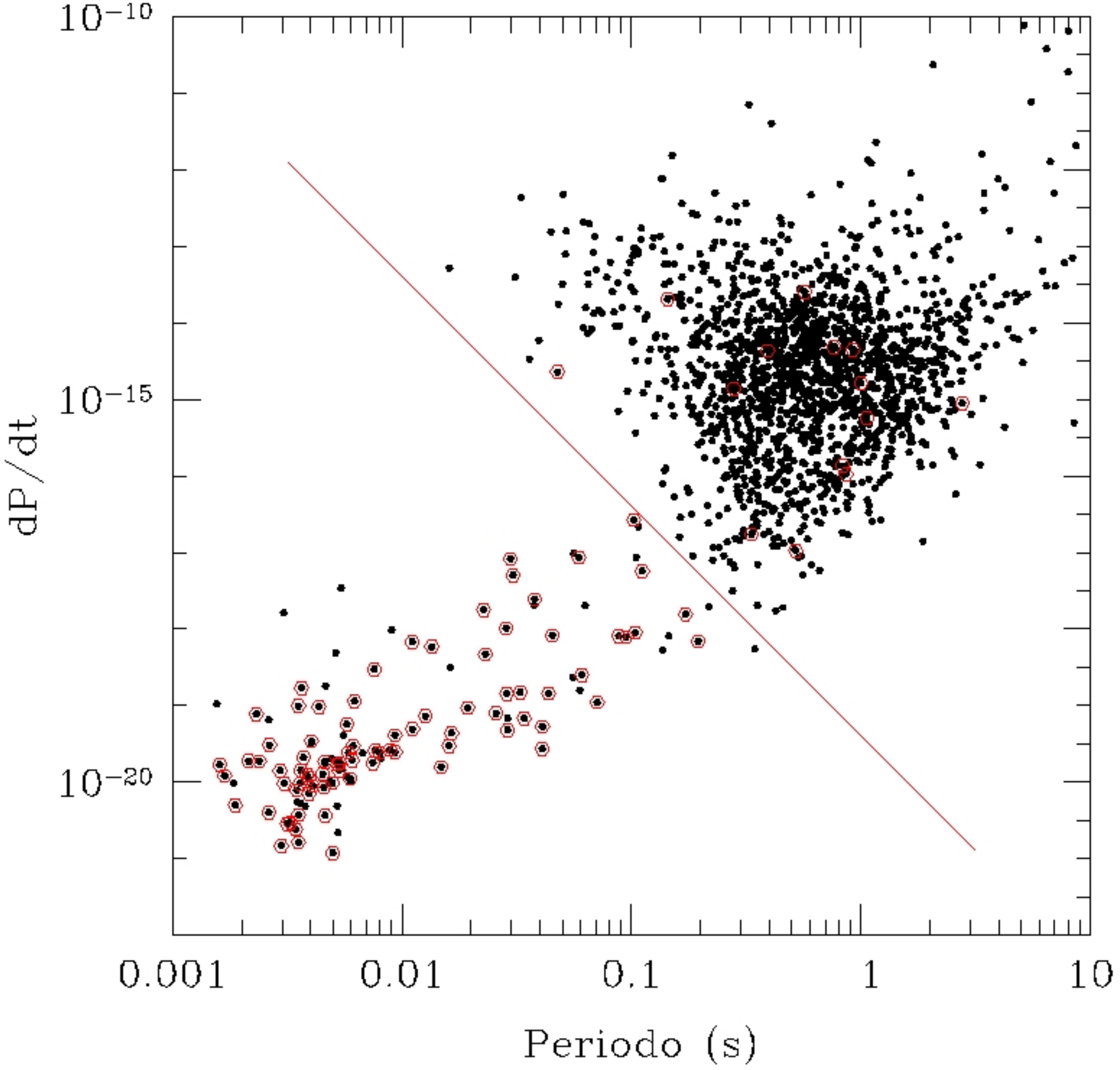


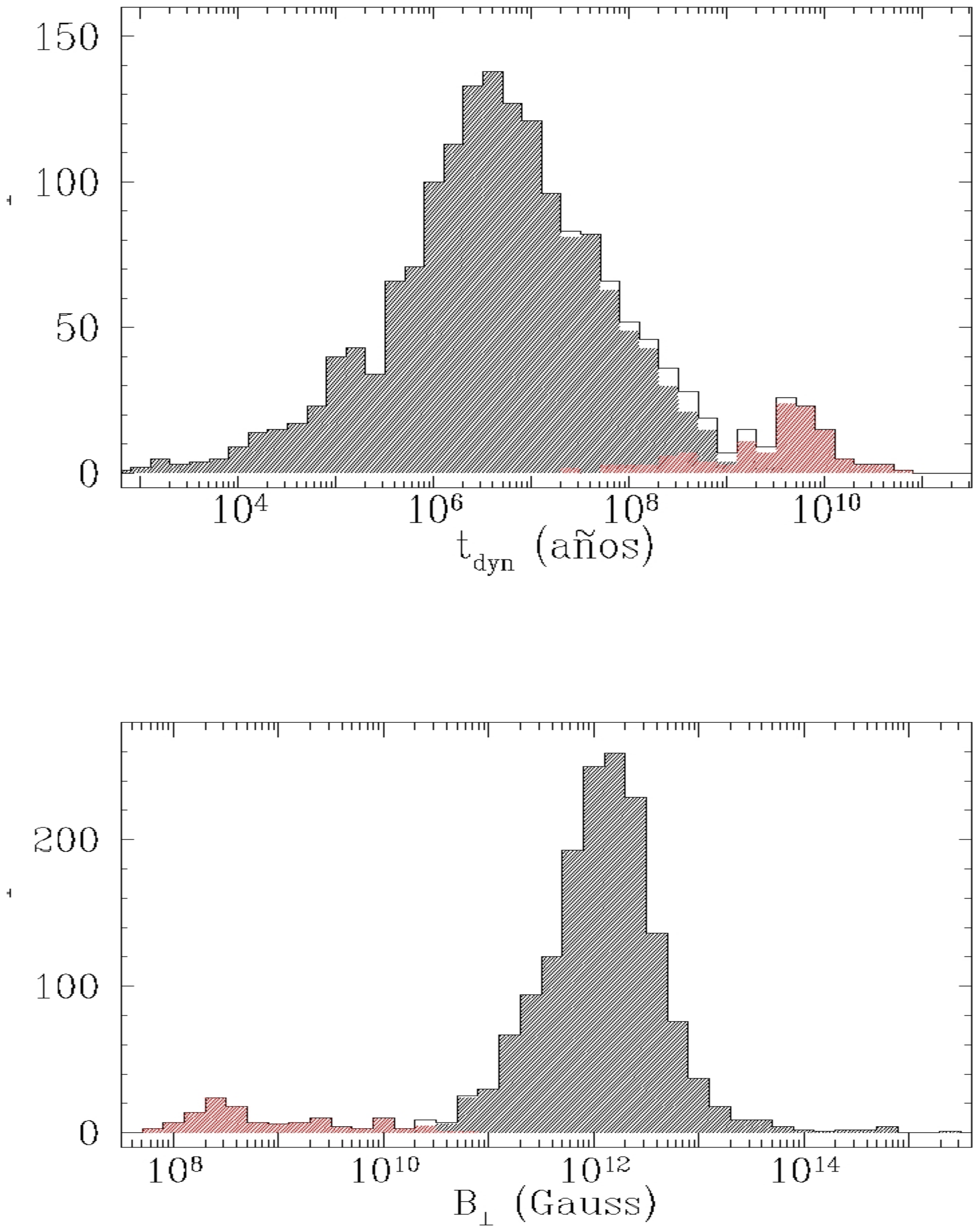
El diagrama P - Pdot permite el estudio de poblaciones de pulsares, estudiados tradicionalmente en ondas de radio



El diagrama P - Pdot permite el estudio de poblaciones de pulsares

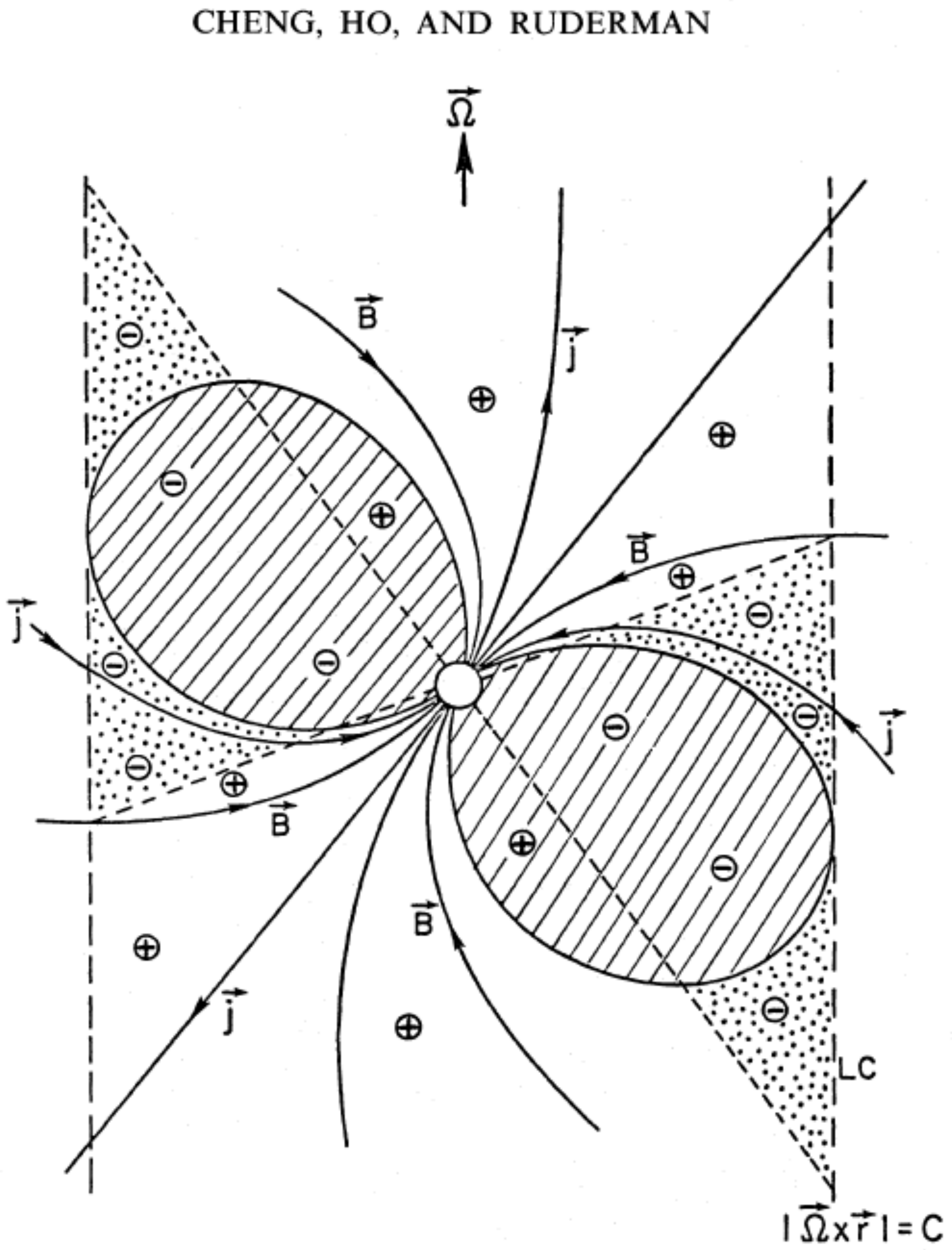
En términos de parámetros físicos





- pulsares jóvenes
- pulsares reciclados en sistemas binarios

Pulsares: magnetósfera



- En el vacío la rotación de la estrella induce un campo eléctrico

$$\vec{E} = -\frac{1}{c}\left(\vec{\Omega}\times\vec{r}\right)\times\vec{B}.$$

- Este campo $\vec{E}$ puede acelerar cargas hasta

$$\Delta\Phi \approx \frac{\Omega^2 B_\star R_\star^3}{2c^2} \simeq 1.14\times 10^{16}\,\mathrm{V}\left(\frac{P}{33\,\mathrm{ms}}\right)^{-3/2}\left(\frac{\dot{P}}{4.2\times 10^{-13}}\right)^{1/2}.$$

- Pero, el campo es neutralizado por una densidad de carga (Goldreich-Julian),

$$\rho = \frac{\nabla\cdot\vec{E}}{4\pi c} = \frac{\vec{\Omega}\cdot\vec{B}}{2\pi c},$$

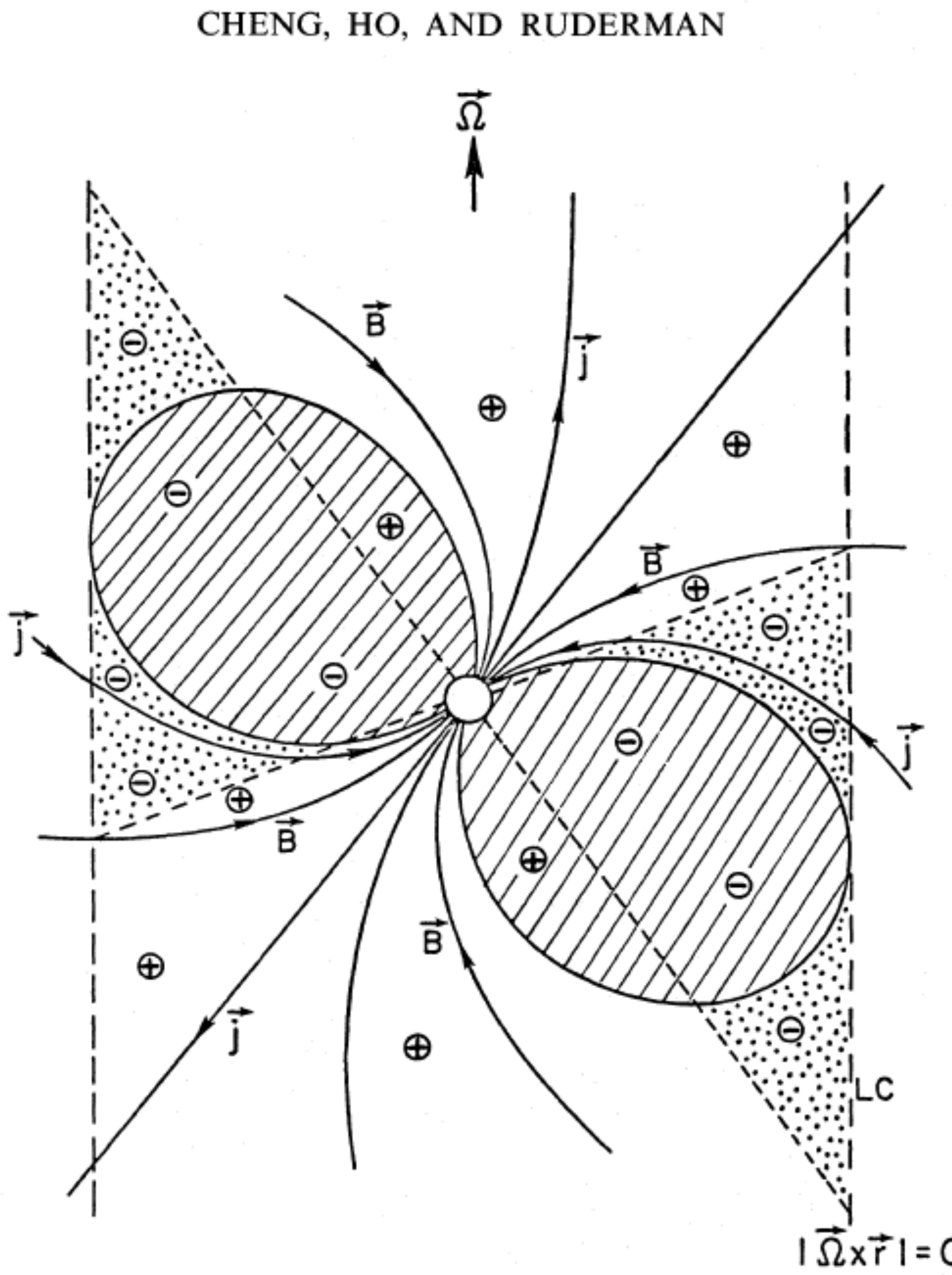
formando una magnetósfera cargada ($\pm$) que corrota con la estrella dentro del cilindro de luz, $r_\ell = c/\Omega$.

Pulsares: modelos outer gap

- Los modelos “outer gap” (Cheng, Ho & Ruderman 1986) suponen regiones de aceleración en la vecindad de regiones de carga nula ($\Omega \cdot \vec{B} = 0$).
- Las partículas aceleradas radian mediante *emisión de curvatura*, donde el radio de giro es de dimensiones del mismo orden que la magnetósfera,

$$\frac{dI_\omega}{d\omega} = \sqrt{3}\,\frac{e^2}{c}\gamma\, f(\omega/\omega_c),$$

  con la frecuencia de corte $\omega_c = 3\gamma^3 c/2r_c$, siendo r_c el radio de curvatura.
- Los fotones emitidos alcanzan energías de GeV, suficientes para producir pares en el entorno, limitando su energía.
- Estos modelos predicen emisión en GeV por curvatura y en TeV por Compton inverso de fotones del entorno. La evidencia observacional de esta última es limitada.



Pulsares: modelos polar cap

- La magnetósfera permite definir el casquete polar ("polar cap"), de radio R_p, a través del ángulo de la última línea cerrada,

$$R_p = R_\star \sin\theta_p = R_\star\,(\Omega R_\star/c)^{1/2}$$

dada la forma de las líneas de campo de un dipolo, $\sin^2\theta/r = \mathrm{cte}$.

- Los modelos de "polar cap" (desde Sturrok 1971) postulan una región de aceleración de partículas de altura $h \sim R_p$ sobre el casquete polar, con un potencial

$$\Delta\Phi \sim \frac{\Omega B_\star}{2c} h^2 \sim \Omega^2 R_\star^3 B_\star/2c^2 \sim 6\times 10^{12}\,\mathrm{Volts}\, B_{12} P^{-2}\,.$$

- Estas partículas radían fotones de alta energía los cuales, dado un campo $B \sim B_{cr}$, producen pares y desencadenan cascadas EM.
- Los modelos "polar cap" tienen dificultades para reproducir la variedad de curvas de luz observadas en pulsares.

F. Curtis Michel: Theor

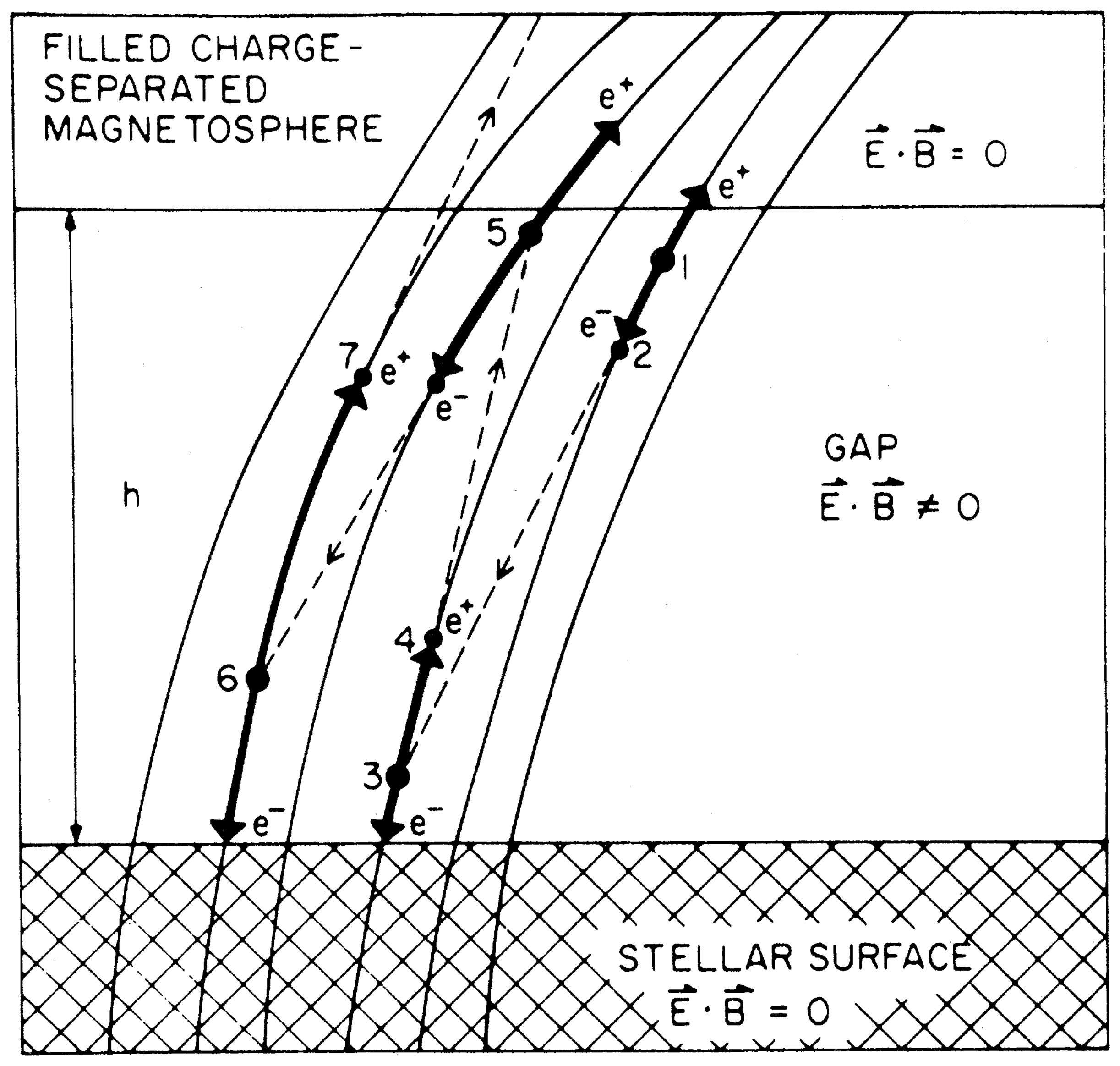
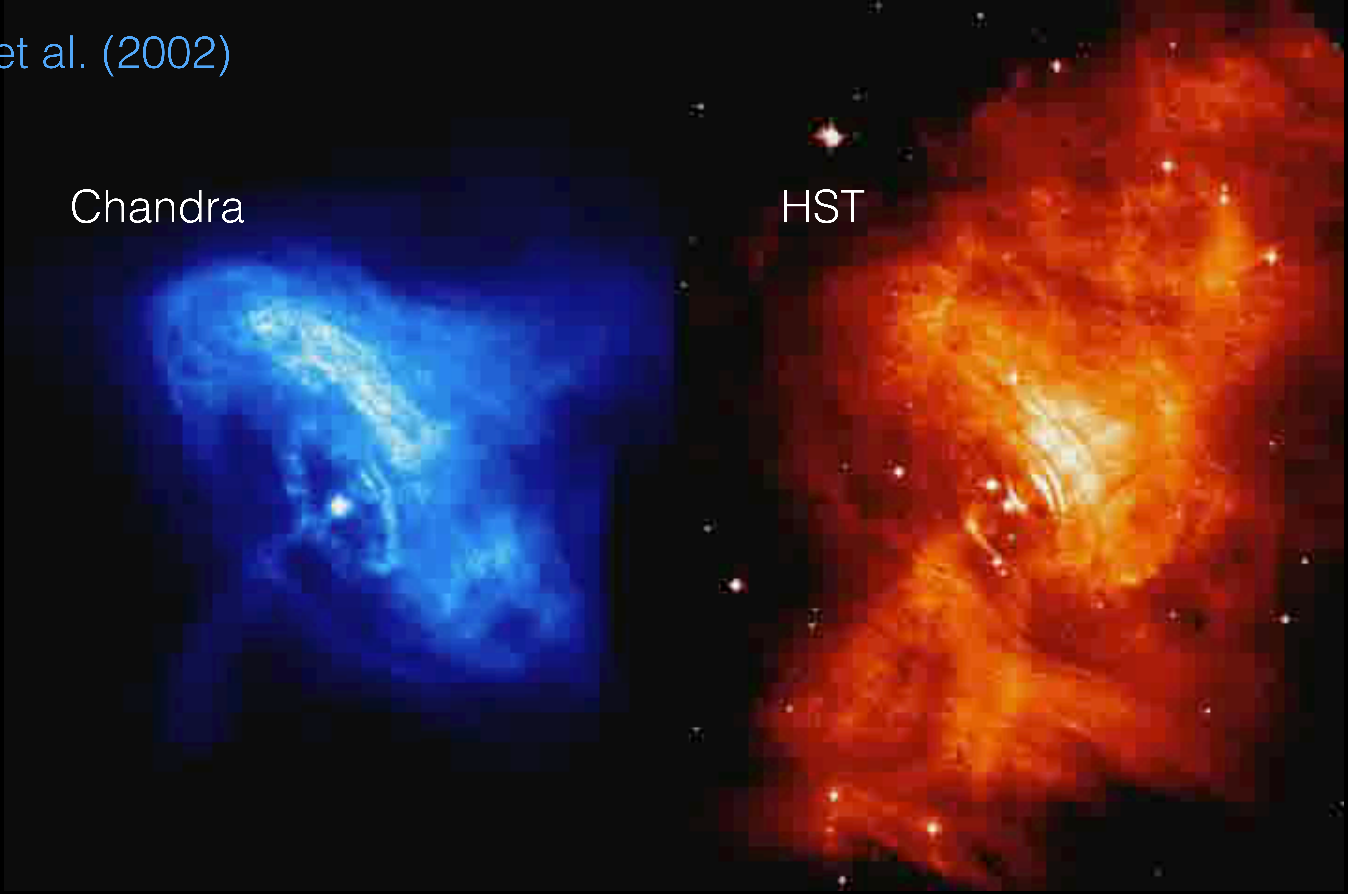


FIG. 19. Nature of a pair-production discharge. All the potential drop must appear in the gap (h), otherwise the system would be flooded by downward-accelerated electrons. Above

Hester et al. (2002)



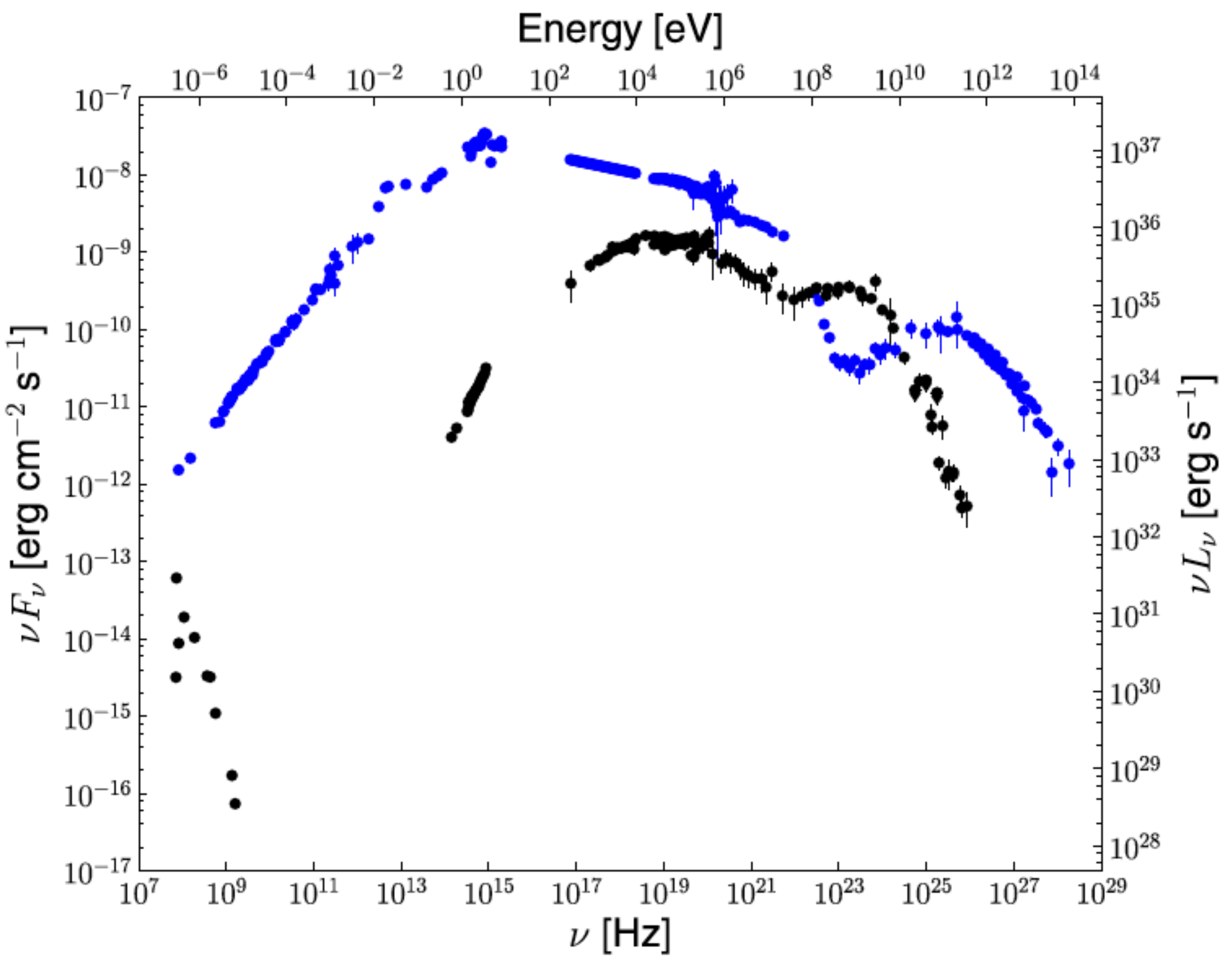
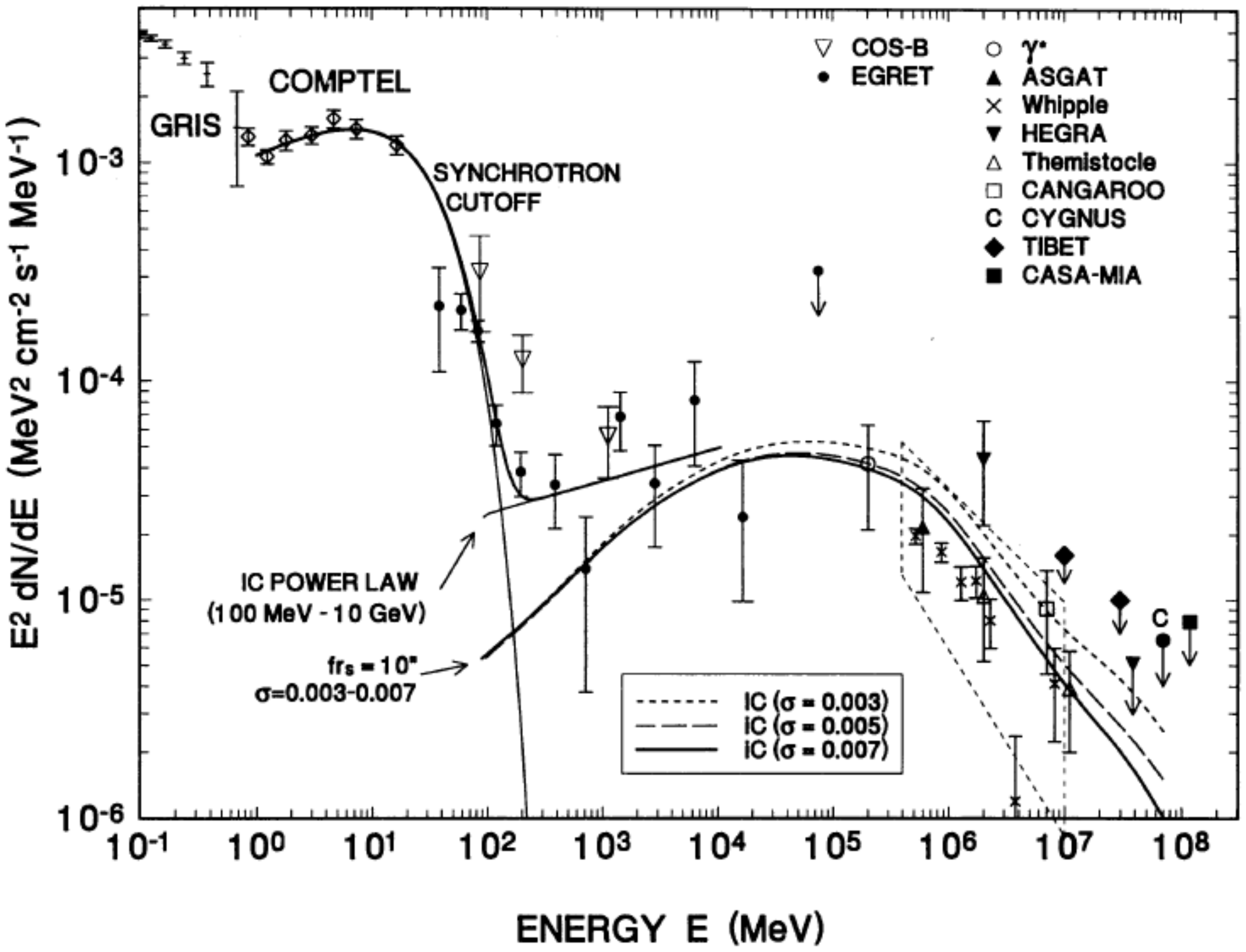


Figure 2. SED of the average emission of the Crab nebula (blue) and the phase averaged emission of the Crab pulsar (black). The

DE JAGER ET AL.



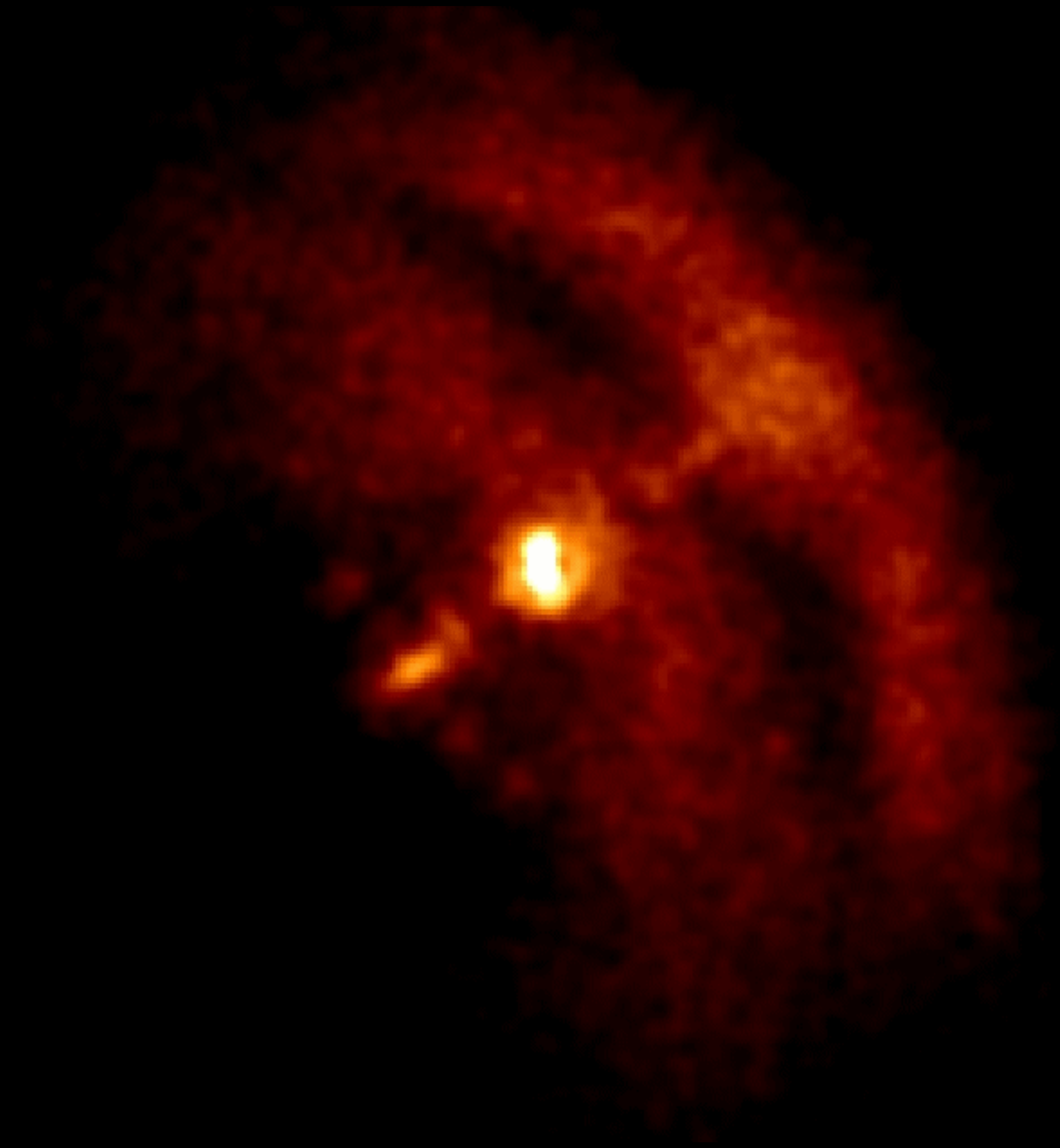
De Jager & Harding (1992), De Jager et al. (1996)

Modelo SSC con B=0.3 mGauss y

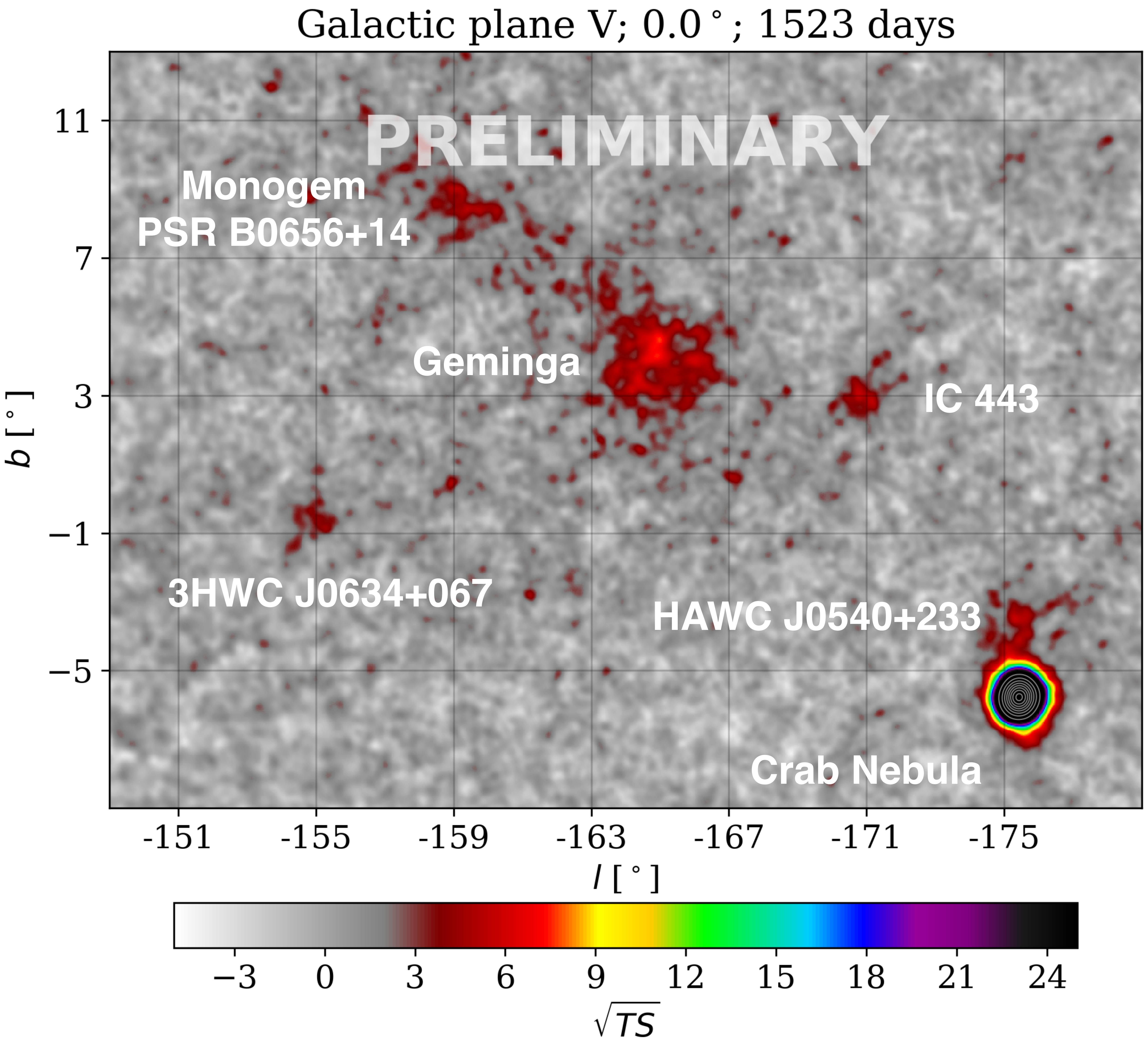
σ = densidad energía magnética / partículas, parámetro de ajuste.

Vientos de pulsar

- Los pulsares aceleran leptones provenientes de la superficie de la estrella o producidos en la magnetósfera.
- En el escenario estándar, pares acelerados en la magnetósfera empujan un viento a lo largo de las líneas abiertas.
- El remanente se va expandiendo hasta que el movimiento de $e^{\pm}$ es difusivo, dando lugar a TeV halos en escalas de tiempo de 10^5 años (Linden et al. arXiv 1703.09704).



Anticentro Galáctico



Fuentes energizadas por pulsares:

- Nebulosa del Cangrejo: Pulsar Wind Nebula (PWN).
- Geminga & Monogem (PSR B0656+14): TeV halos!
- HAWC J0540+233 (PSR B0540+23) y 3HWC J0634+067 (PSR J0633+0632): TeV halos?

IC 443: remanente (clásico) de supernova.

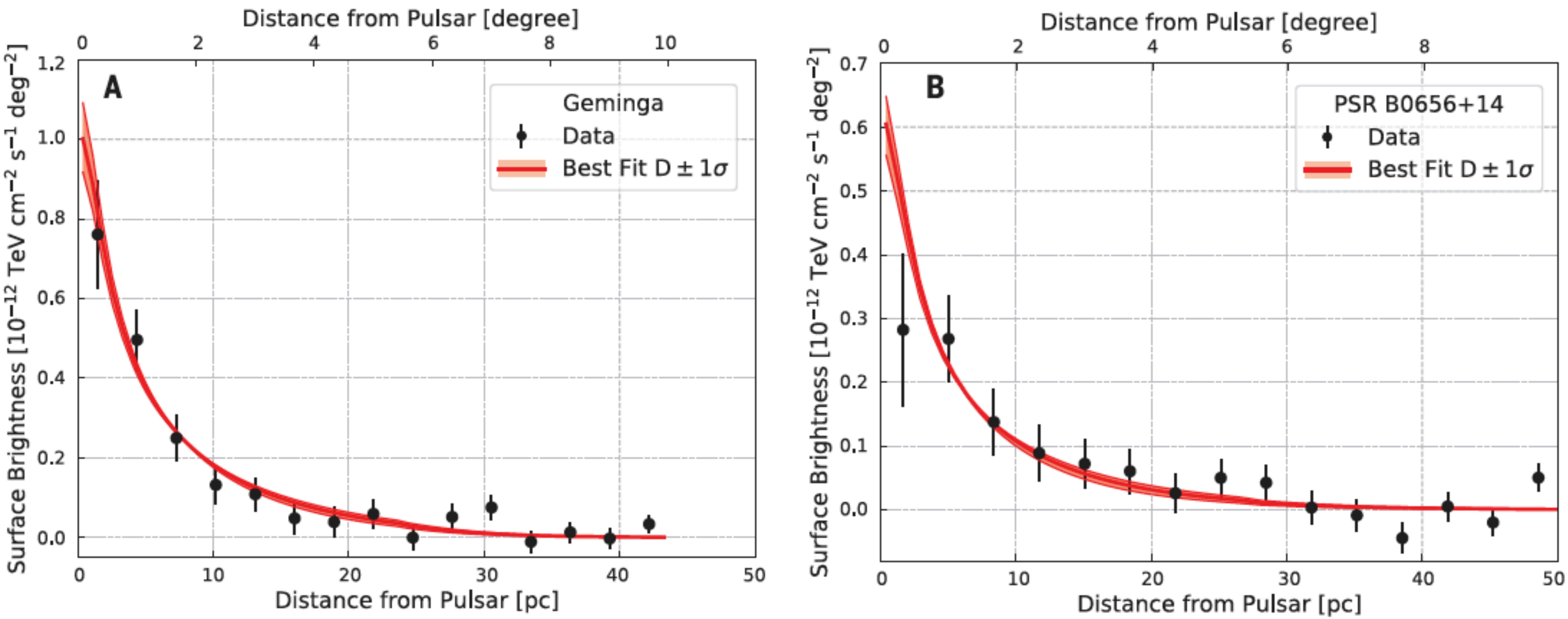
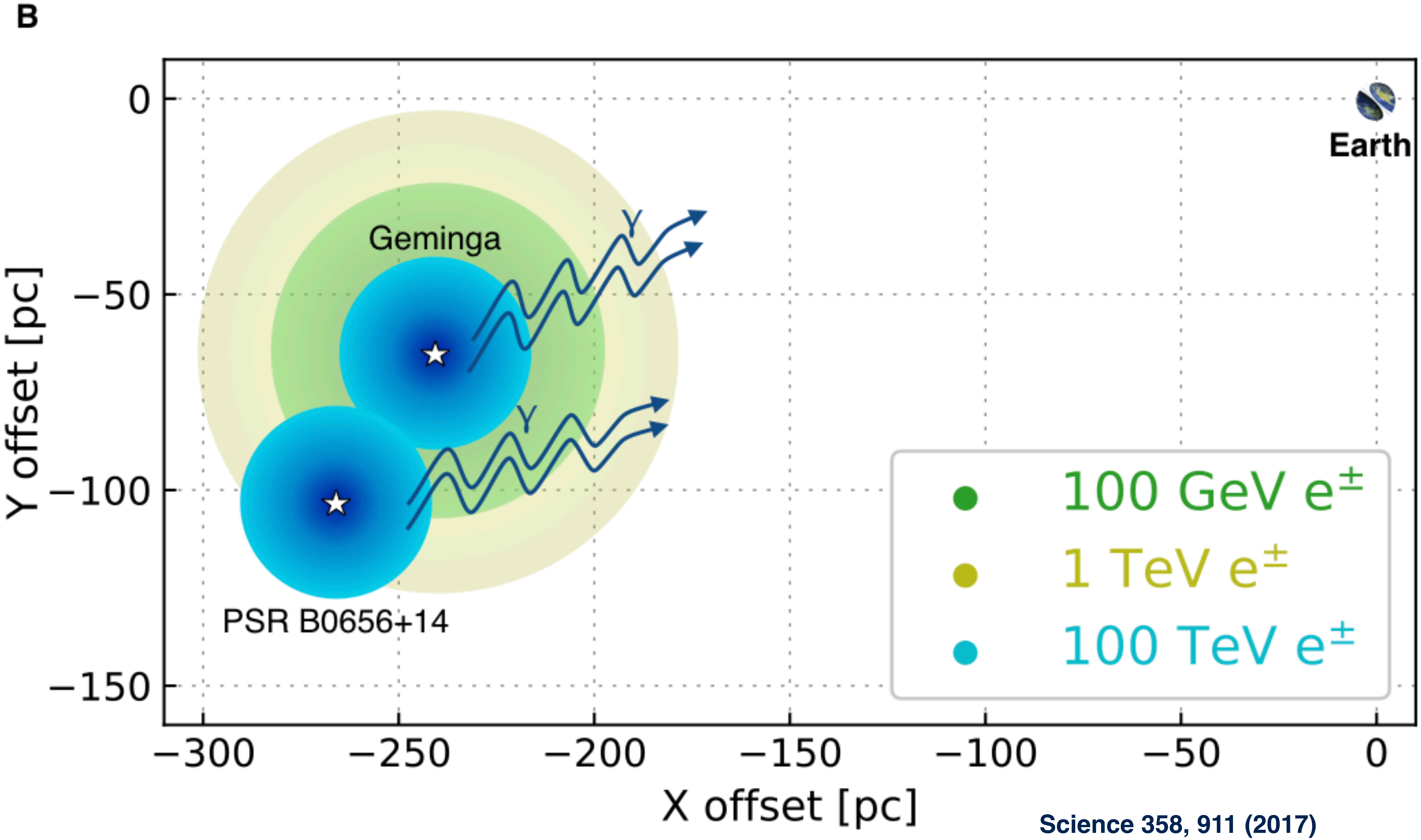


Fig. 2. Surface brightness of the tera–electron volt gamma-ray emission. Surface brightness is shown as a function of distance from the Geminga (**A**) and PSR B0656+14 (**B**) pulsars. The solid line represents the best-fitting model with a common diffusion coefficient, and the shaded band is the ±1σ statistical uncertainty. Error bars are statistical errors. The distance from each pulsar in parsecs is calculated based on nominal distances of 250 and 288 pc for Geminga and PSR B0656+14, respectively (*14*).

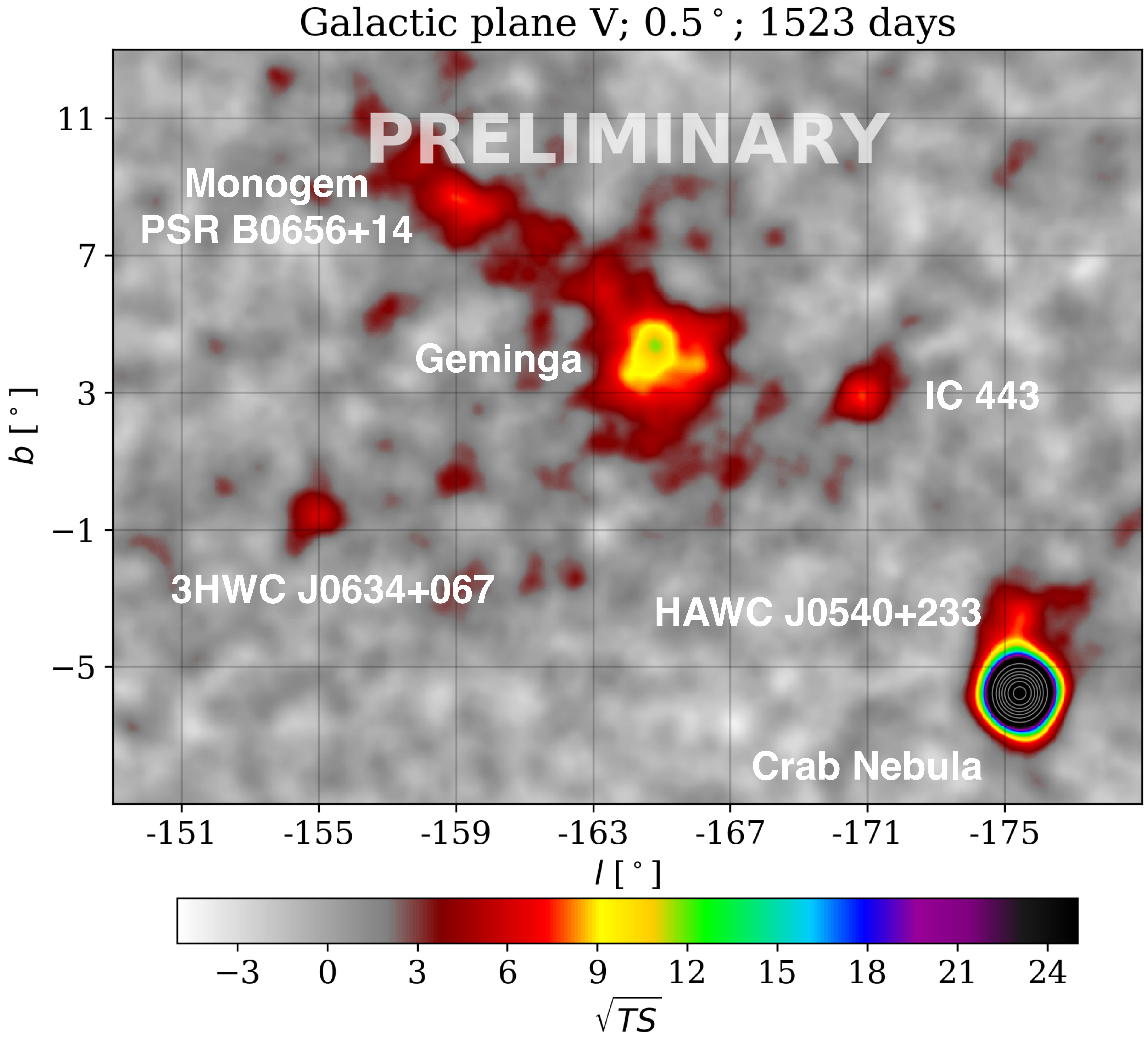
Abeysekara *et al.*, *Science* **358**, 911–914 (2017) 17 November 2017

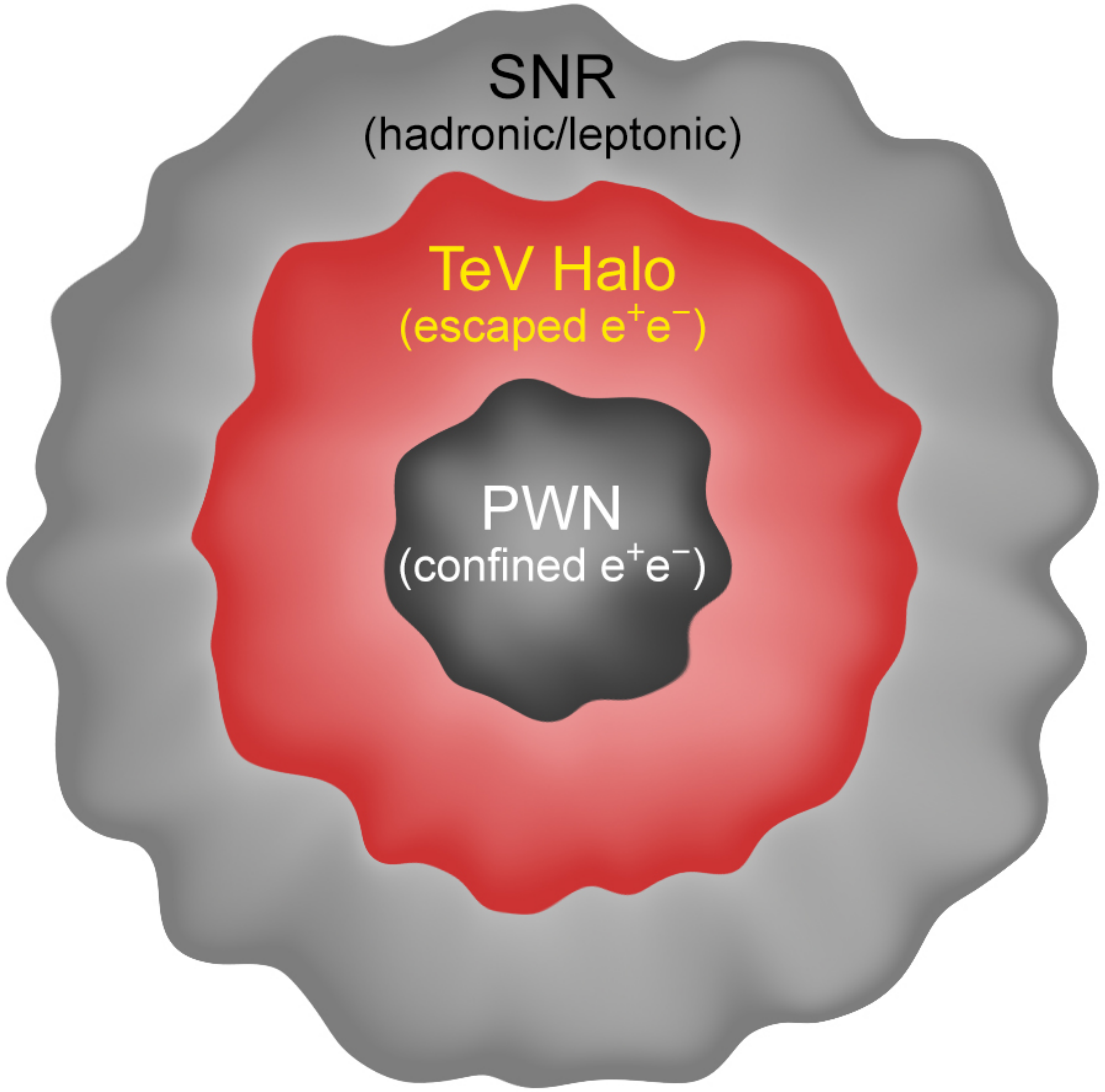
Los coeficientes de difusión estimados en TeV halos son mucho mayores que los típicos del ISM.



Science 358, 911 (2017)

Sudoh, Linden & Beacom: “TeV halos are everywhere”
Phys Rew D, 100, 043016 - arxiv 1902.08203





Electrones ultrarelativistas pueden producir rayos γ con energías de 100 TeV sólo por Compton scattering de fotones del CMB.