

Halos de TeV

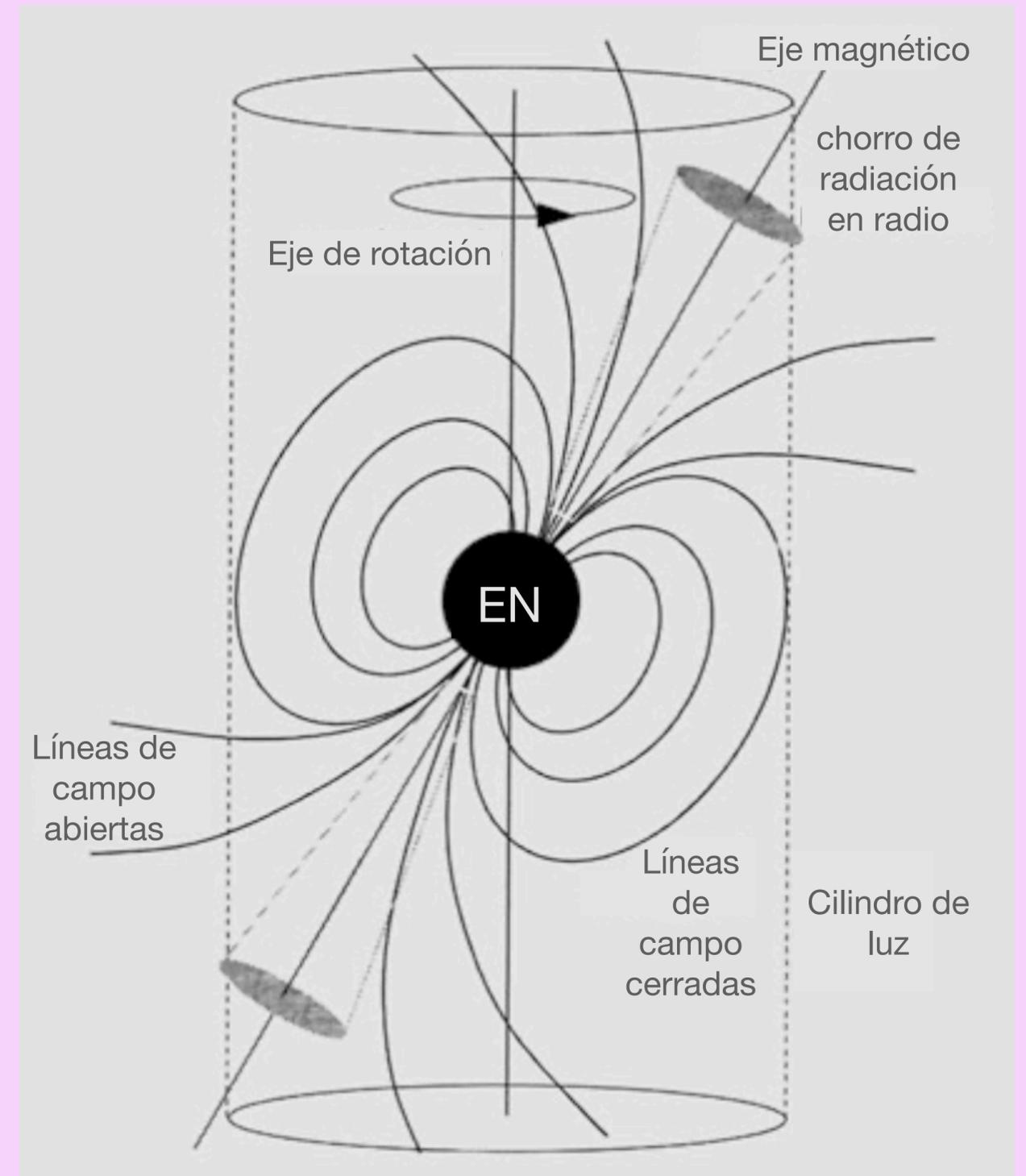
Un nuevo tipo de fuente de rayos gamma

M. Fernanda Carreón G.

Antecedentes

Pulsares

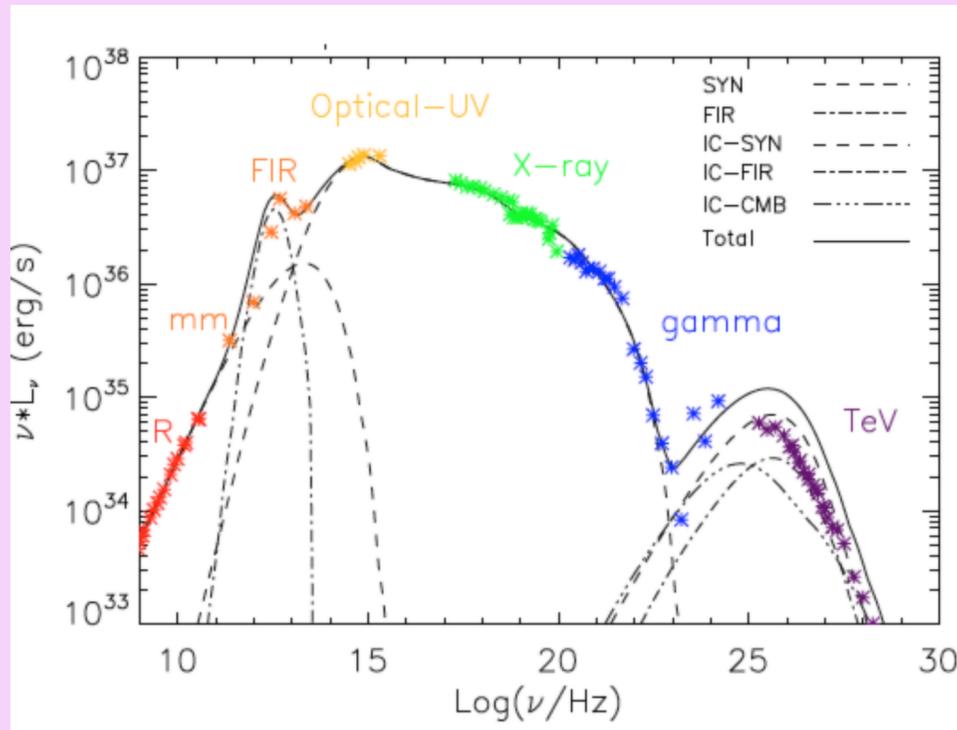
- Remanentes estrellas masivas ($8 - 30 M_{\odot}$): estrellas de neutrones
- Campos magnéticos $\sim 10^{12}$ G
- Masas: $1.4 - 2 M_{\odot}$
- Radios: ~ 10 km
- “Pulsaciones” en radio, rayos X y gamma (GeV).
- Eje magnético desalineado.
- $P : \sim 1.5$ ms a decenas de minutos
- Sistemas binarios.
- Modelo spin-down
 - \dot{E}
 - Edad característica



(Karttunen, Kröger, Oja, Poutanen, & Donner, 2017)

Antecedentes

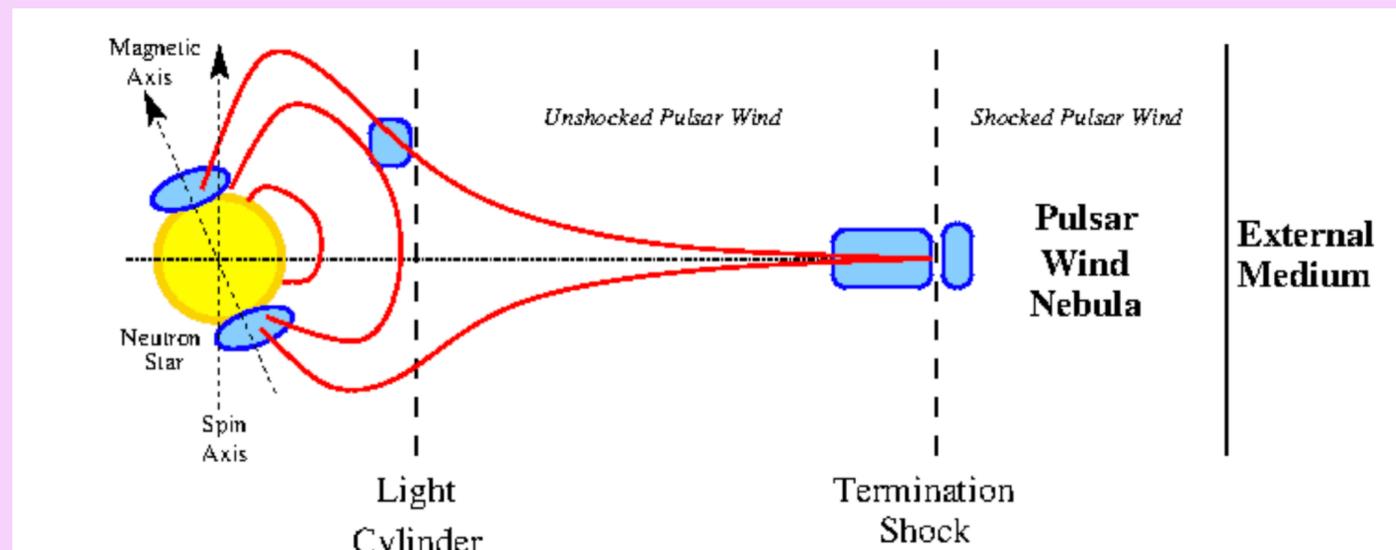
Nebulosas de viento de pulsar (PWN)



D. Volpi, L. et al. (2008).

- Viento magnetizado de pulsar
- Morfología toroidal con dos jets dipolares
- Tamaño: unidad de pc
- Radiación a altas energías: sincrotrón y IC

Gelfand, J., et. al. Astro2020 Science White Paper. <https://bit.ly/2NNq6WN>



Observatorios de altas energías

- Regimen energético para rayos gamma ultra-energéticos

Actuales



H.E.S.S

Evidencia de emisión al rededor de pulsares de milisegundos.
Estudio de población de PWN de TeV en plano galáctico.



HAWC

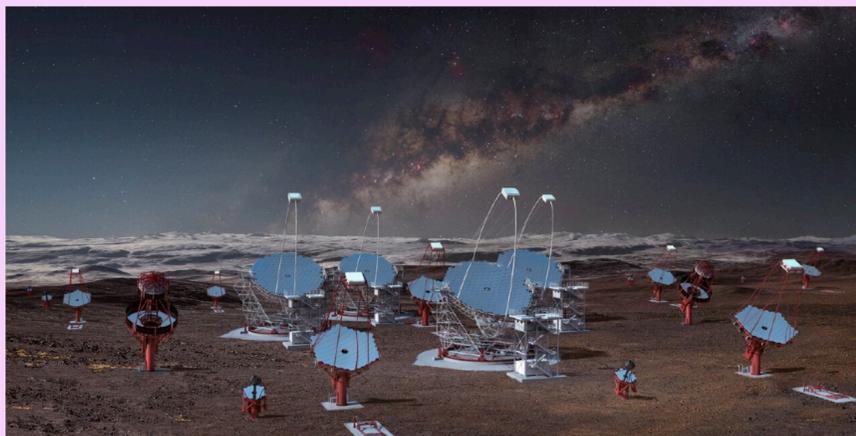
Detección de 2 Halos



LHAASO

Detección de 1 Halo

Futuros



CTA

Emisión del exceso del centrogaláctico por PSRs MS

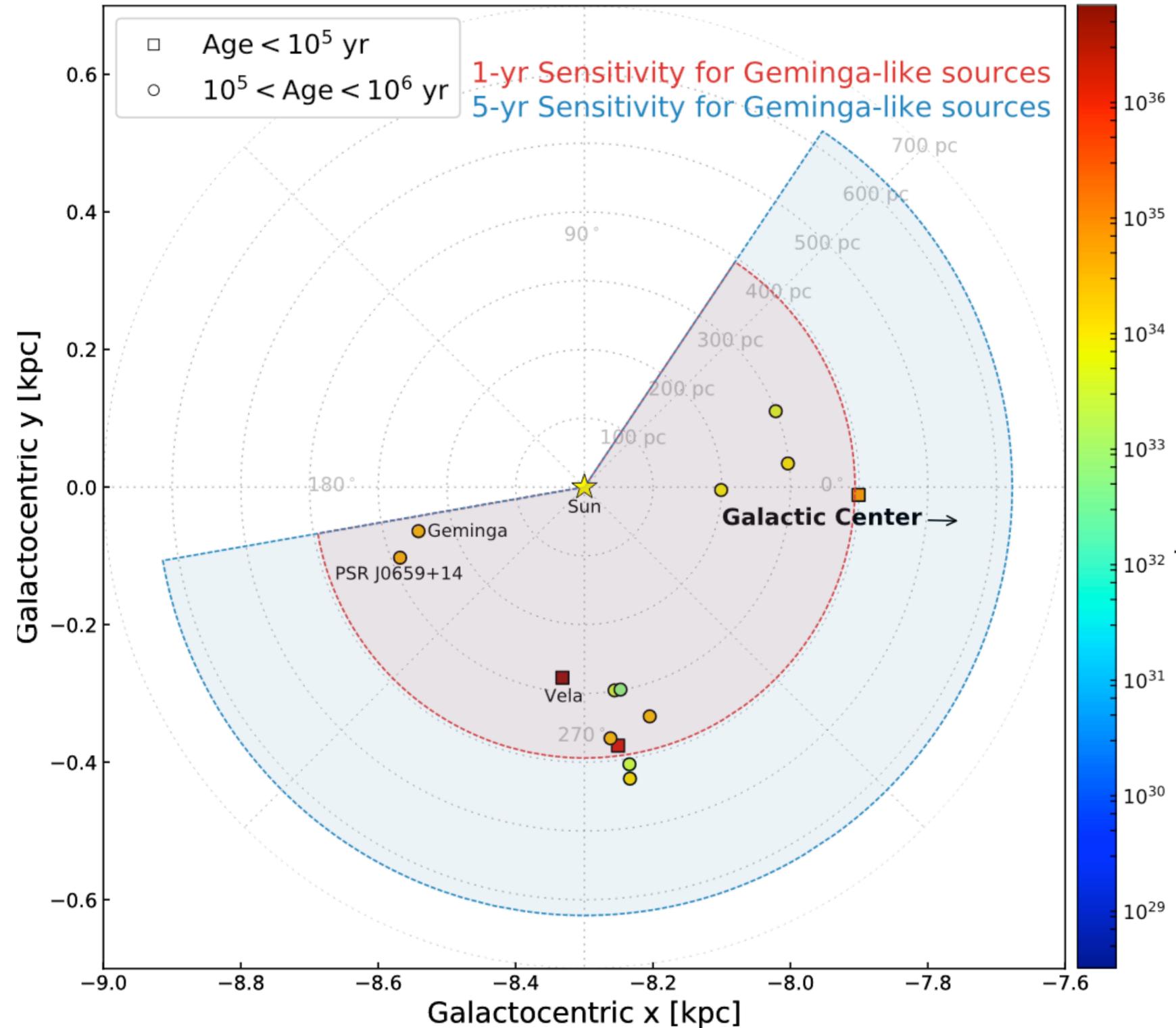
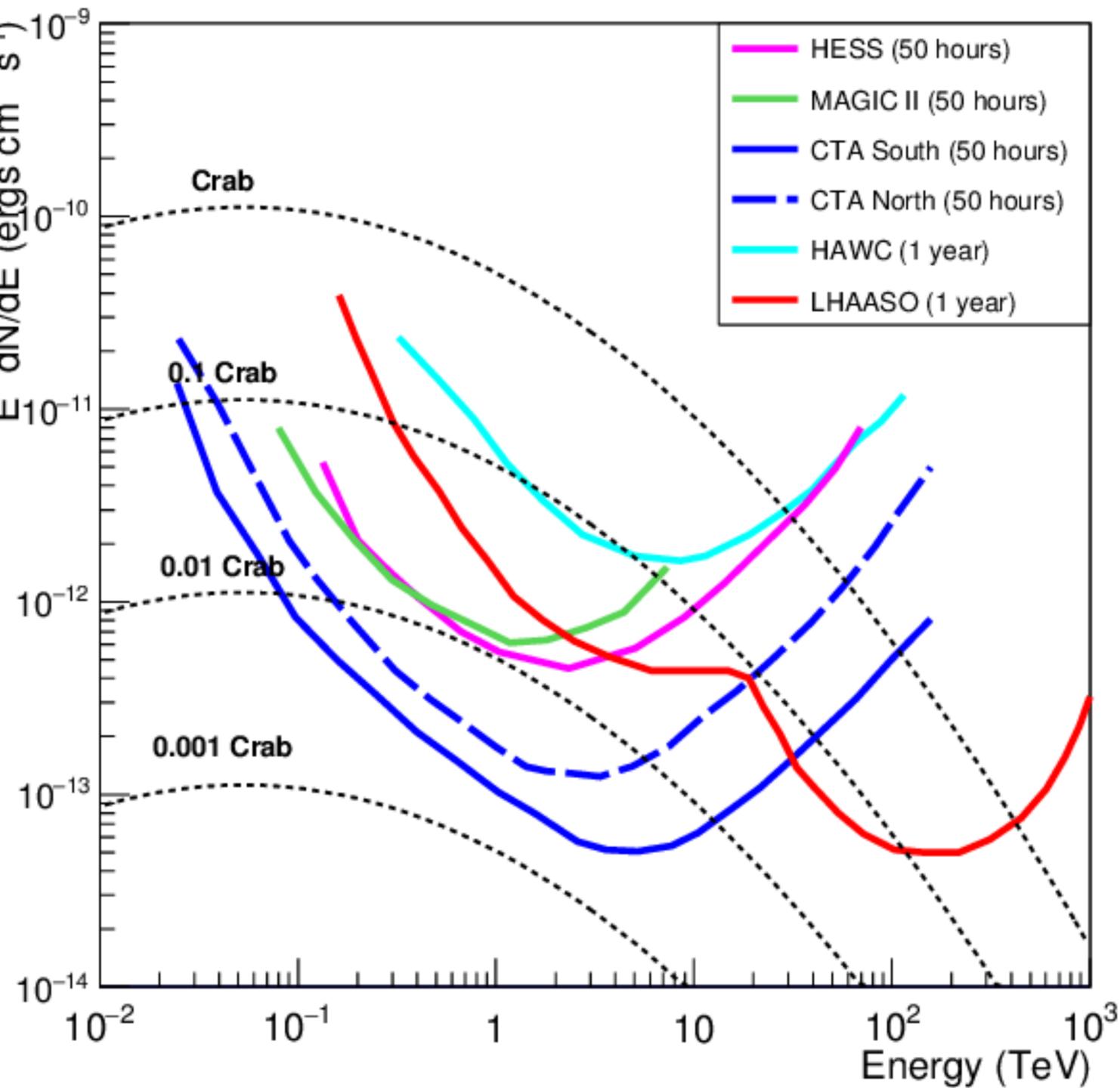


SWGO

10 detecciones futuras

Observatorios de altas energías

- Regimen energético para rayos gamma ultra-energéticos



Observatorios de altas energías

- Regimen energético para rayos gamma ultra-energéticos

Actuales



H.E.S.S

Evidencia de emisión al rededor de pulsares de milisegundos.
Estudio de población de PWN de TeV en plano galáctico.



HAWC

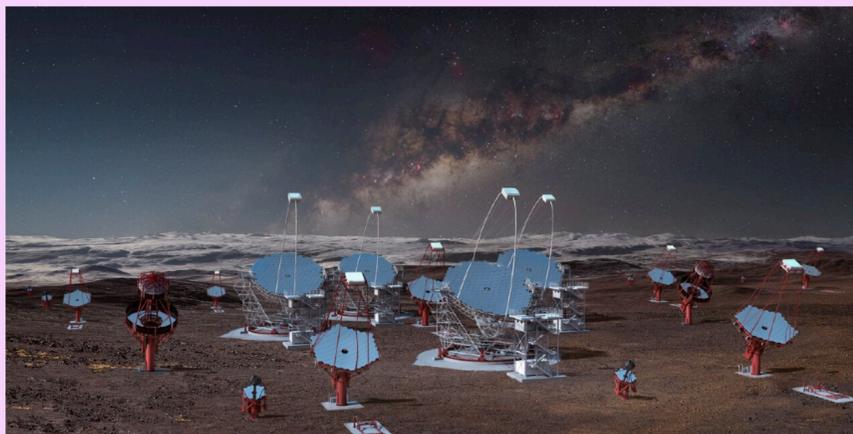
Detección de 2 Halos



LHAASO

Detección de 1 Halo

Futuros



CTA

Emisión del exceso del centrogaláctico por PSRs MS

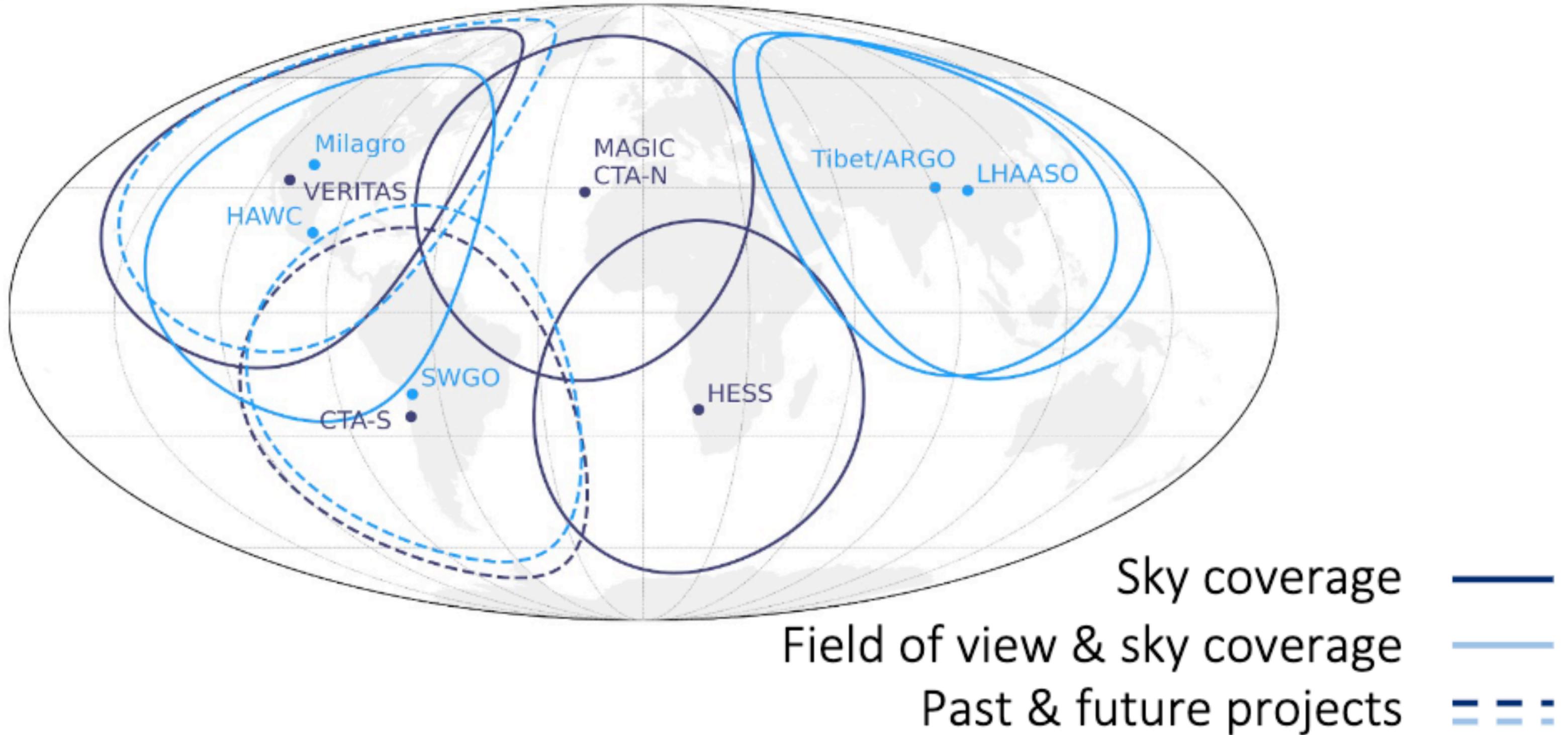


SWGO

10 detecciones futuras

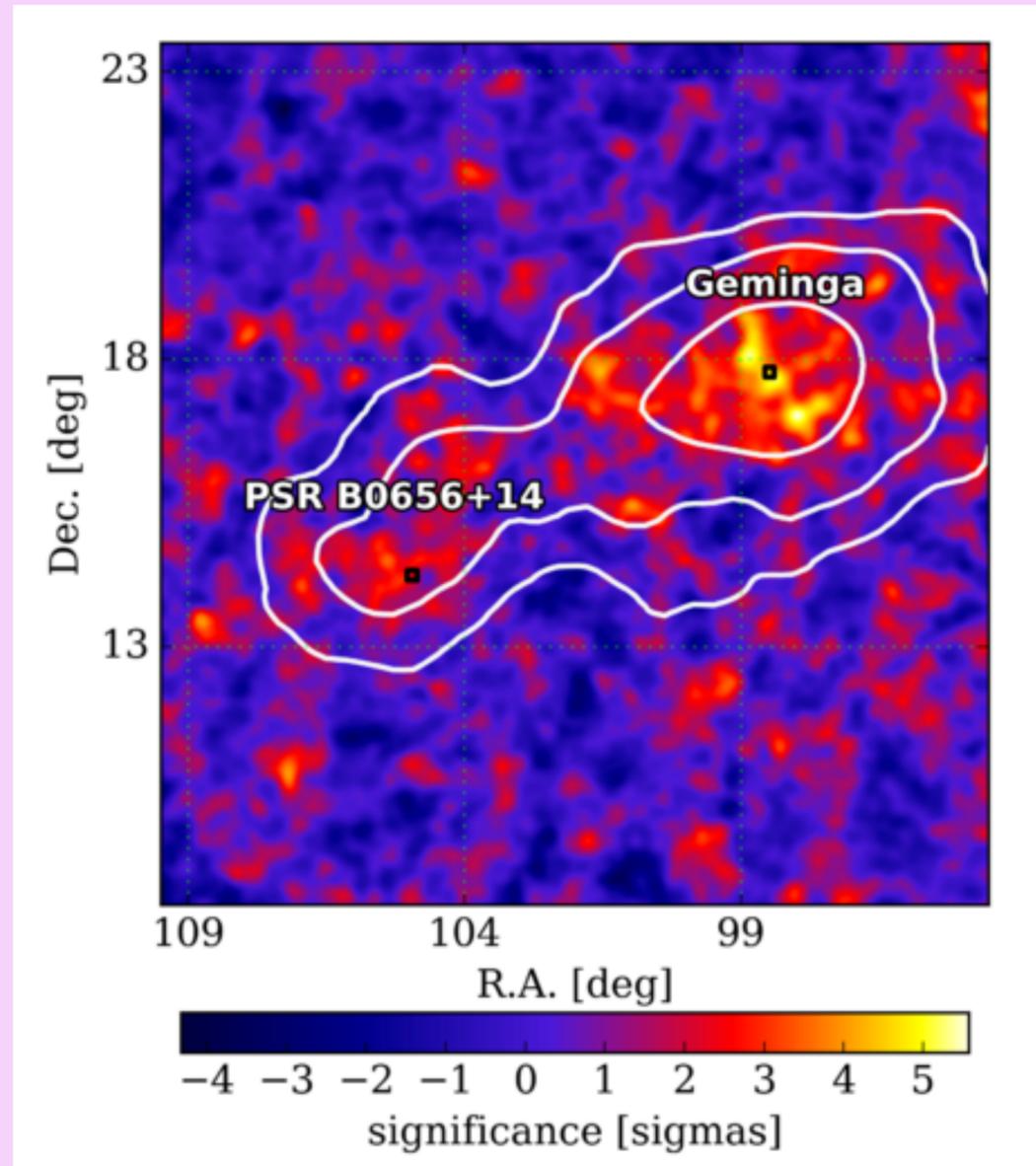
Observatorios de altas energías

- Regimen energético para rayos gamma ultra-energéticos



Halos de TeV

Geminga y Monogem



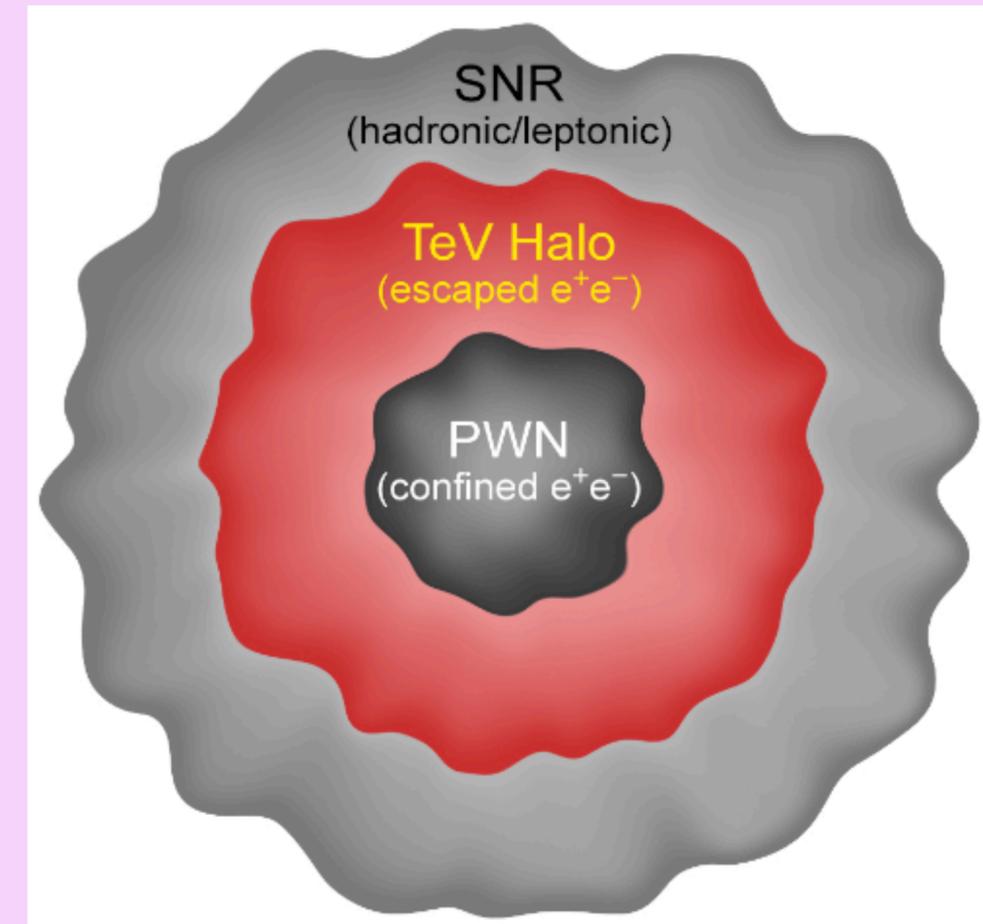
Mapa de significancia de Geminga y Monogem como se reportaron en 2017 (HAWC,2017)

- Geminga: Milagro, 2009
- Geminga y Monogem: HAWC, 2017
- PSR: J0659+1414 (111 kyr) y J0633+1746 (343 kyr)
- Regiones de emisión extensa: decenas pc
- Emisión de 8 a 40 TeV
- No congruentes con extensión de PWN y SNR.
- ¡Nueva tipo de fuentes de rayos gamma!

Halos de TeV

Características observacionales

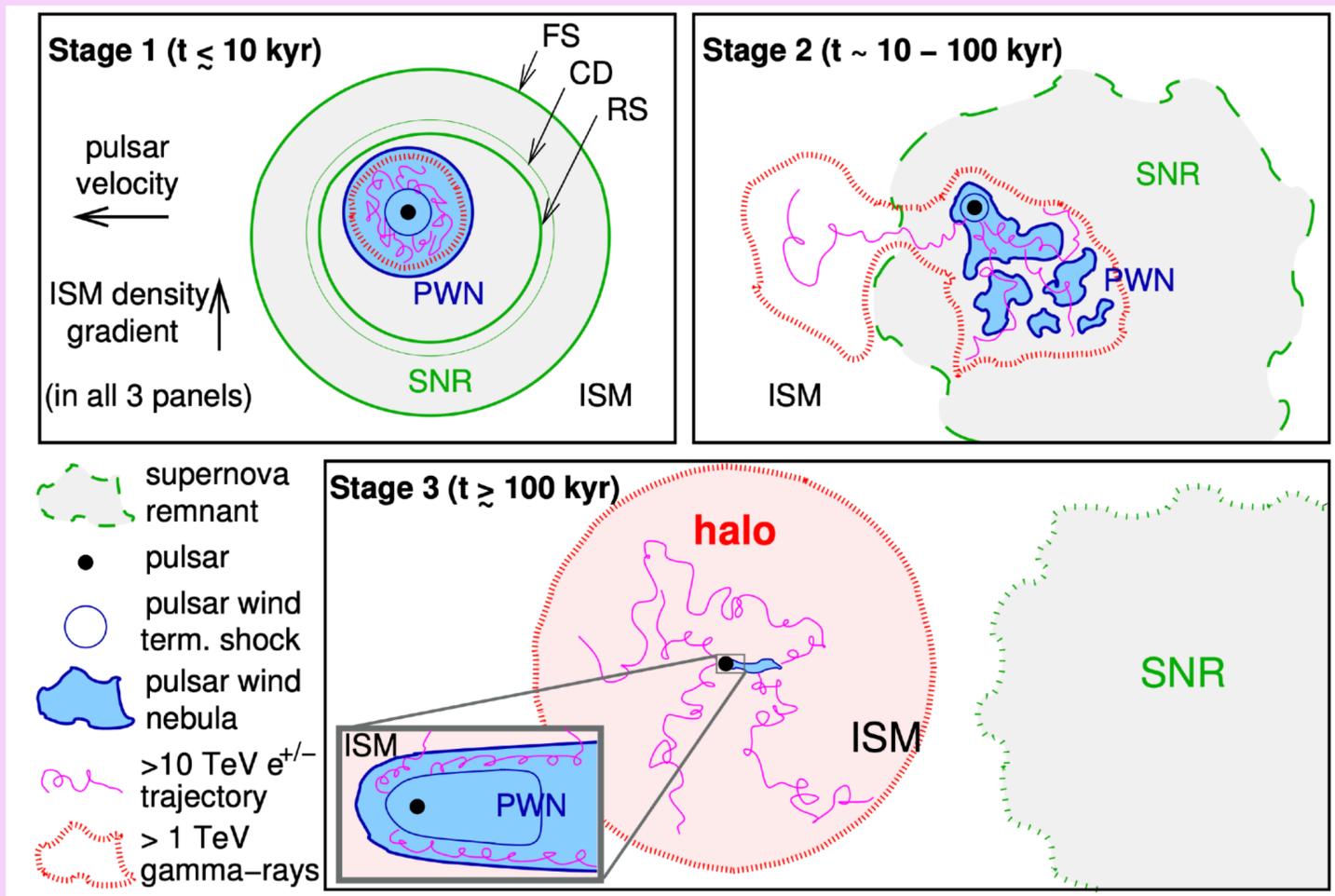
- Emisión leptónica de altas energías: Compton inverso
 - e^{\mp} interactúan con fotones de baja energía
- Extensiones 1 ord. de mag. mayor a PWN y 1 ord. de mag menor a SNR
- Observados alrededor de PSRs no confinados



Esquema ilustrativo de comparación de tamaños entre la PWN, el Halo de TeV y la SNR (Sudoh et al, 2019).

Halos de TeV

Modelo difusivo

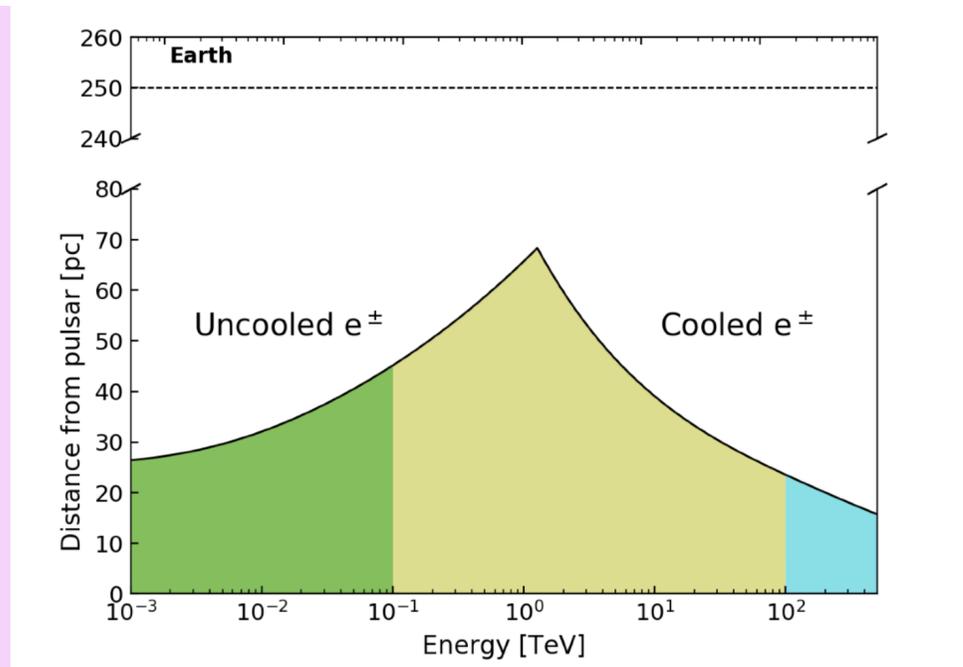
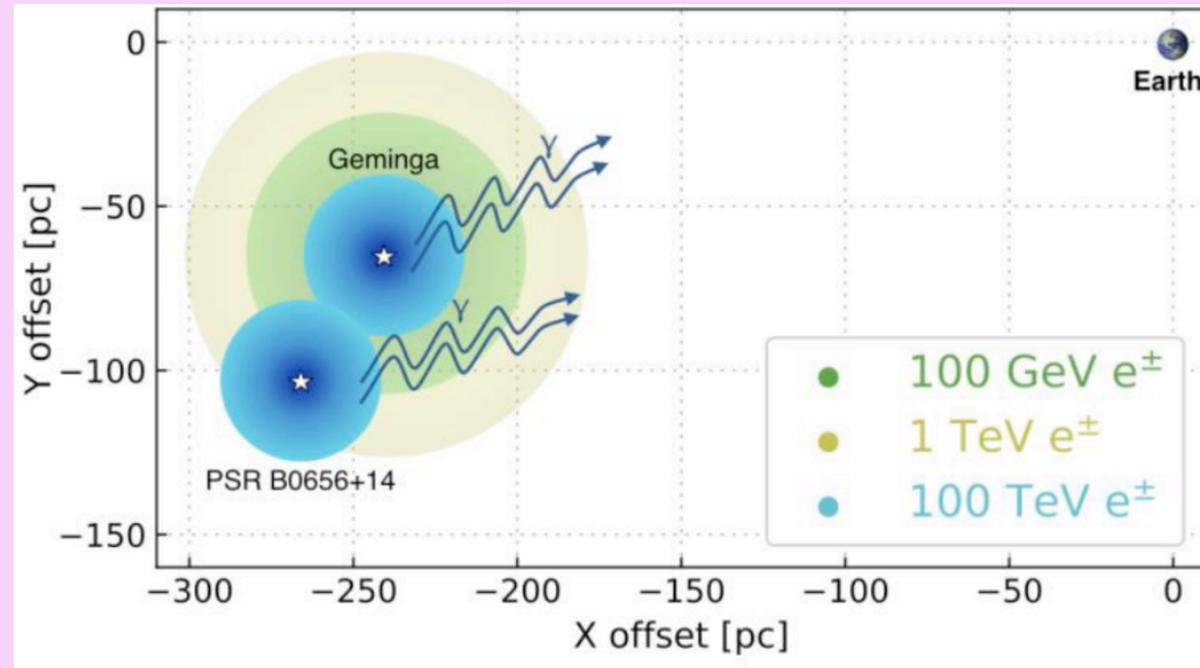


Esquema de tres etapas evolutivas de las PWN y la formación de Halo. (Giacinti et al, 2020)

- Halos en PSRs confinados no descartados
- Emisión similar a SNR y PWN
- Región no dominada por dinámica del pulsar
- $\sim 10\%$ de \dot{E}
- Emisión isotrópica
- Característica común de PSRs no confinados

Halos de TeV

Modelo difusivo



Radio de difusión de electrones en función de su energía para Geminga (HAWC, 2017).

- Medición indirecta de coeficiente de difusión.
- Difusión lenta:
 $4.15 \times 10^{27} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Geminga)
 vs.
 $10^{28-29} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Galáctico)

$$\frac{d^2N}{dEd\Omega} = N_0 \left(\frac{E}{20 \text{ TeV}} \right) \frac{1.22}{\pi^{3/2} \theta_d(E) (\theta + 0.6 \theta_d(E))} e^{-\frac{\theta^2}{\theta_d(E)^2}}$$

$$r_d = 2\sqrt{D(E)t}$$

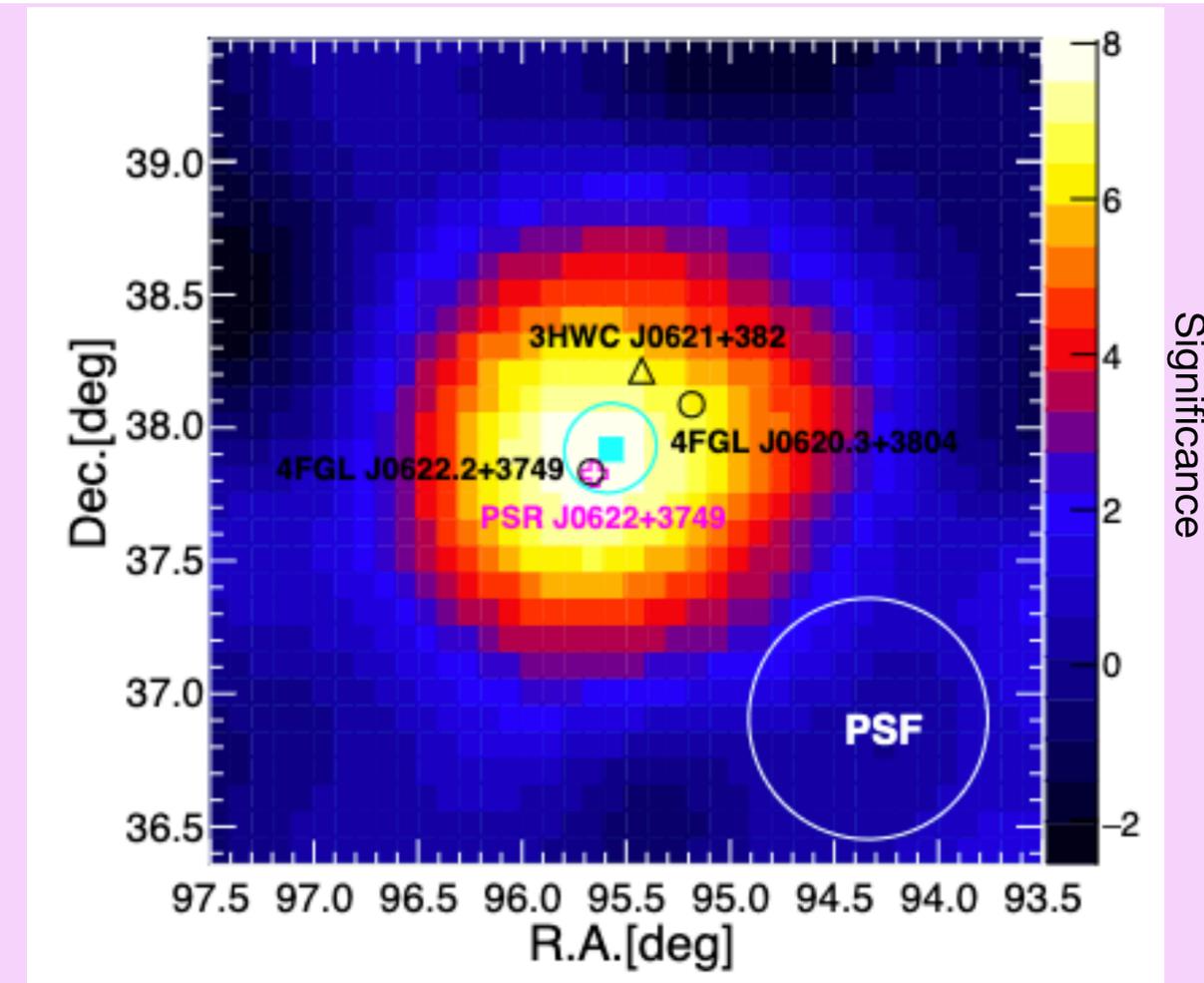
$$\theta_d = \frac{180^\circ}{\pi} \frac{r_d}{d_{psr}}$$

Halos de TeV

Extended Very-High-Energy Gamma-ray Emission Surrounding PSR J0622 + 3749 Observed by LHAASO-KM2A

Observaciones recientes

- PSR J0622+3749: LHAASO J0621+3755 (2021)
 - congruente con obs. de HAWC de Gem y Mon
- TeVCat: cuatro Halos de TeV
- 3HWC: cinco candidatos, 2 en TeVCat



Mapa de significancias de LHAASO J0621+3755

Vela X	08 35 00	-45 36 00	PWN/TeV Halo	2006.03	0.29 kpc	Default Catalog
LHAASO J0621+3755	06 21 52.8	+37 55 12	PWN/TeV Halo	2021.06		Default Catalog
Geminga	06 32 28	+17 22 00	PWN/TeV Halo	2009.04	0.25 kpc	Default Catalog
HESS J1825-137	18 25 49	-13 46 35	PWN/TeV Halo	2005.03	3.9 kpc	Default Catalog
HAWC J0635+070	06 34 50.4	+07 00 00	TeV Halo	2018.09		Default Catalog
HAWC J0543+233 ★	05 43 07.2	+23 24 00	TeV Halo	2017.11		Newly Announced
2HWC J0700+143	07 00 28.8	+14 19 12	TeV Halo	2017.02		Default Catalog

TeVCat. Ver: 3.4

Halos de TeV

Retos

- Modelo incompleto
- PSR Cat: distancias y \dot{P} reportados
- Análisis morfológico
- Halos de PSRs jóvenes: observación
- Halos de ms PSRs: teóricos
 - curvas de luz: producción eficiente de partículas de alta energía

Halos de TeV

¿Por qué estudiarlos?

- Difusión lenta
 - ¿por qué?
- Formación del Halo: mecanismo, modelo evolutivo de PSRs
- Emisión isotrópica: búsquedas a ciegas de PSRs ‘invisibles’
 - Estudios poblacionales
- Características comunes de PSRs: aportación a la emisión difusa de rayos gamma de MW y galaxias similares

Resumen

- Los TeV Halos son un nuevo tipo de fuente extensa de rayos gamma ultra-energéticos.
- Existen tres TeV Halos bien estudiados.
- Se originan alrededor de pulsares.
 - Procesos difusivos y radiación de Compton Inverso.
- Nuevos instrumentos: detección de decenas de estos.
 - ~50–240 detecciones (Sudo et al, 2019)
- Abren la puerta a estudios evolutivos de pulsares.

Láminas de respaldo

Modelo Spin-down de pulsares

$$\dot{E} = 4\pi I \frac{\dot{P}}{P^3}$$

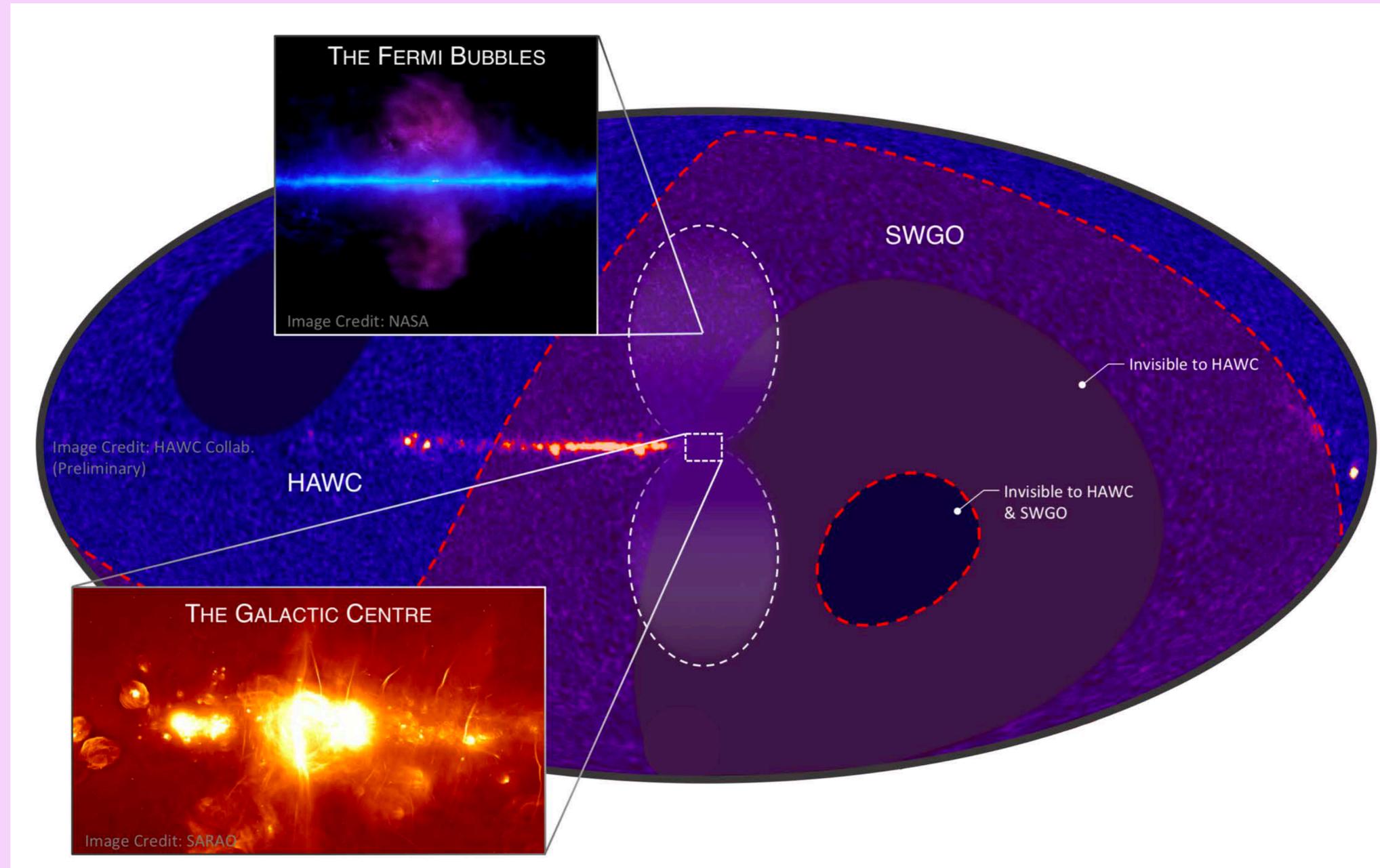
$$B_s = \sqrt{\frac{3c^3}{8\pi^2} \frac{I}{R^6 \sin^2 \alpha} P \dot{P}}$$

$$\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}}$$

Observatorios de Alta Energía

	Rango de energía	Ciclo de trabajo	Ubicación	Región del cielo que observan	Tipo de observatorio
Fermi-LAT	20 MeV - 300 GeV	100%	FGST	1/5	Espacial
H.E.S.S.	100 GeV - 100 TeV	10-15%	Gambsger, Namibia	5°	Atmosférico
HAWC	300 GeV - > 100 TeV	>95%	Sierra Negra, Puebla	2/3	Arreglo extendido
LHAASO	300 GeV - > 1 PeV	~100%	Sichuan, China	~1/2	Arreglo extendido
CTA	20 GeV - 100 TeV	10-15%	—	5°	Atmosférico
SWGGO	100 GeV - PeV	~100%	Hemisferio sur	~1/3	Arreglo extendido

Cielo HAWC + SWGO



Difusión

Transporte de rayos cósmicos en la Galaxia

- Ecuación de transporte
- Difusión promedio a escalas de 100s de pc: isotrópica.
- Núcleos secundarios (B, Be):
 - coeficientes de difusión, vientos convectivos, reaceleración de ISM
 - Escape rápido de núcleos primarios resultan en menor cantidad de núcleos secundarios

$$D(\rho) \propto \beta \rho^\delta$$

Pulsares de MS

Curvas de Luz

Curvas de luz de tres pulsares de milisegundo. La línea azul representa la curva de rayo gamma y la roja la curva de radio. (Ransom et al. 2011)

