

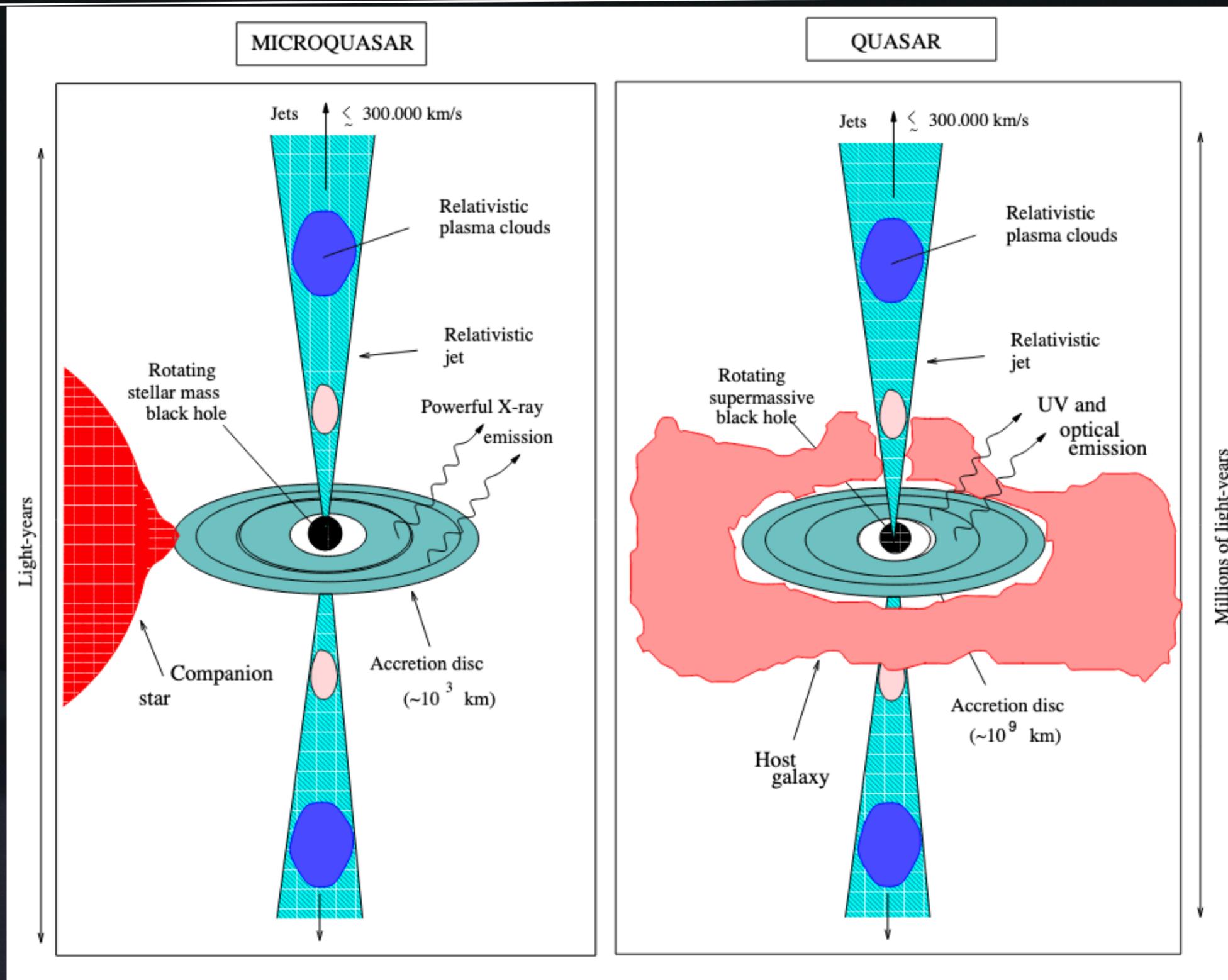


Microcuásares

Instituto de Astronomía, UNAM

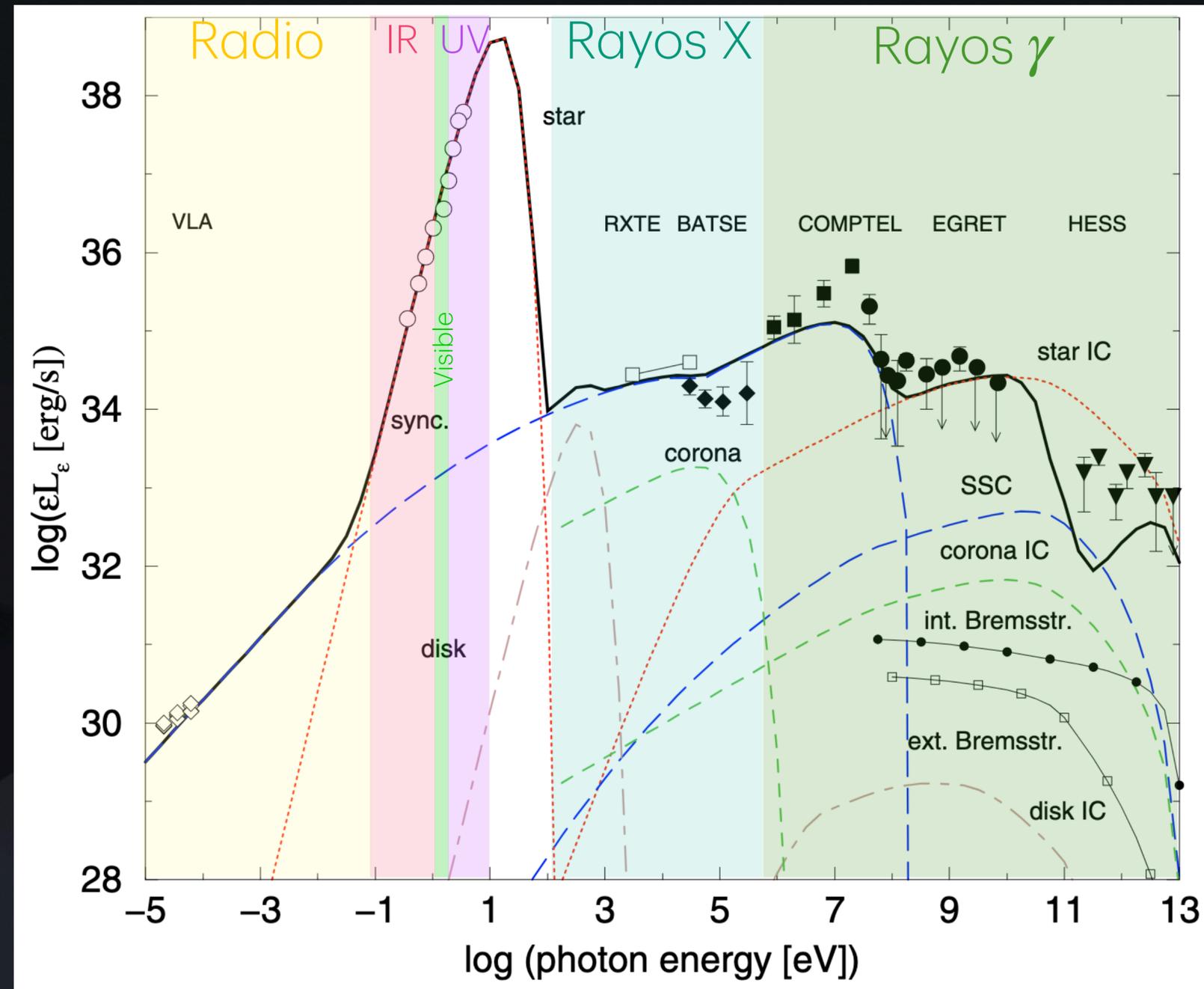
Erick Alejandro Rangel

Microcuásares



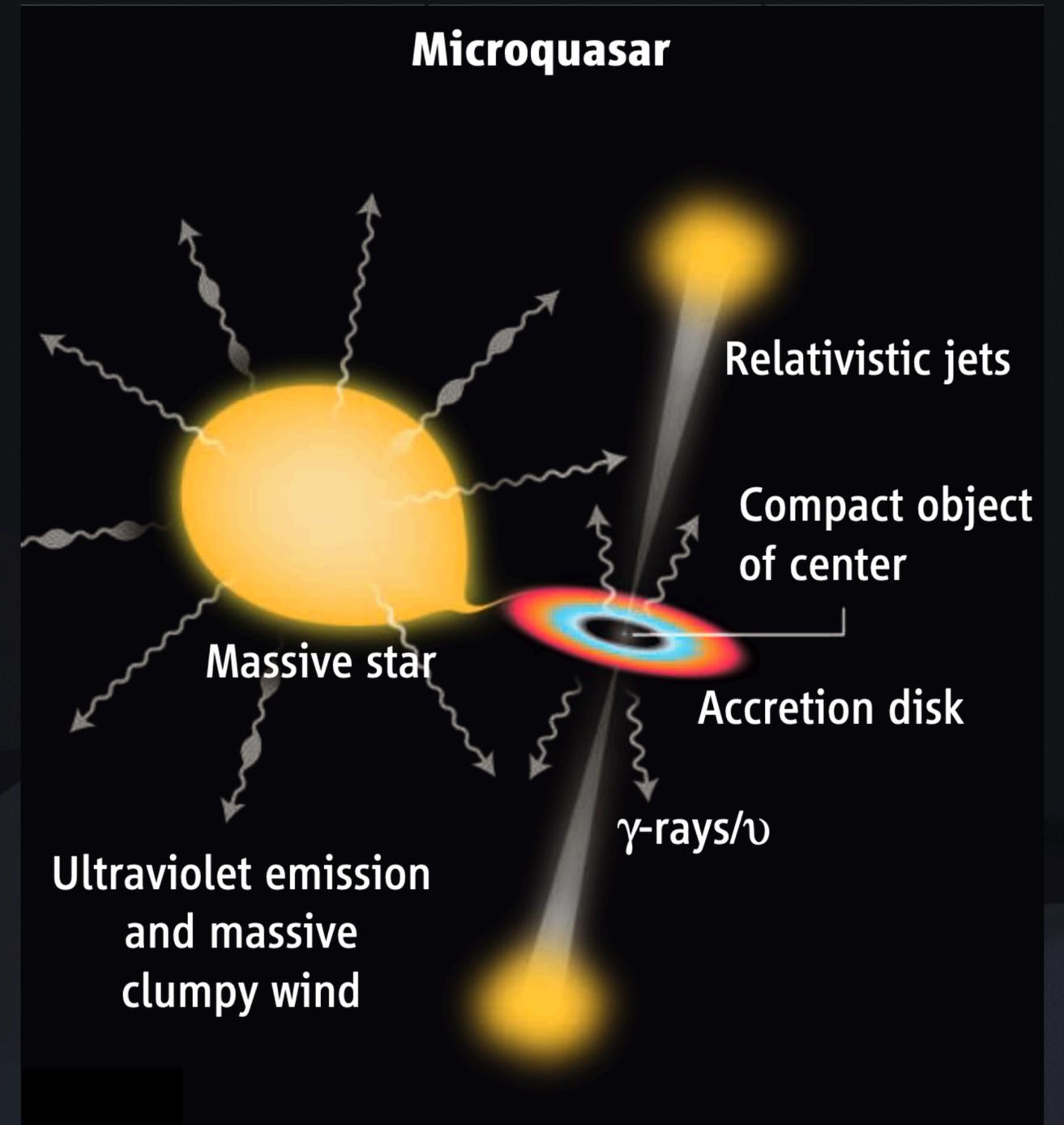
Microcuásares

- **SS 433** fue el primer micro-QSO en ser descubierto (1977)
- Actualmente se conocen más de 40 micro-QSO en la Galaxia.
- Los micro-QSO tienen emisión en diferentes bandas de energía.
- Emisión térmica:
 - Óptico → Rayos X
- Emisión no térmica:
 - Radio → Rayos gamma



Microcuásares

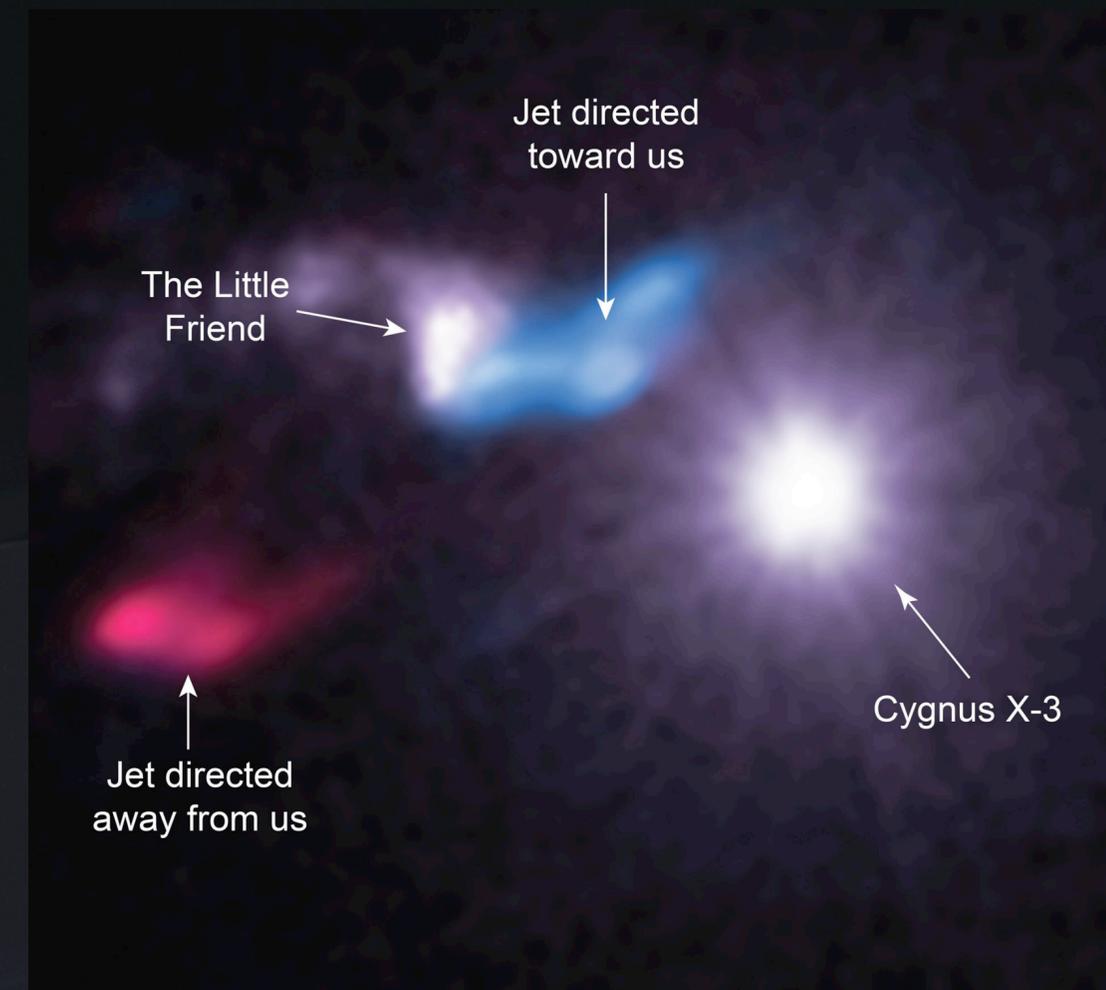
- Solo hay cuatro micro-QSO con emisión en rayos gamma:
 - SS 433
 - Cyg X-1
 - V4641 Srg
 - Cyg X-3
- Los mecanismos de aceleración de partículas que generan fotones son inciertos:
 - HE (> 100 MeV)
 - VHE (> 100 GeV)
 - UHE (> 100 TeV) son inciertos.



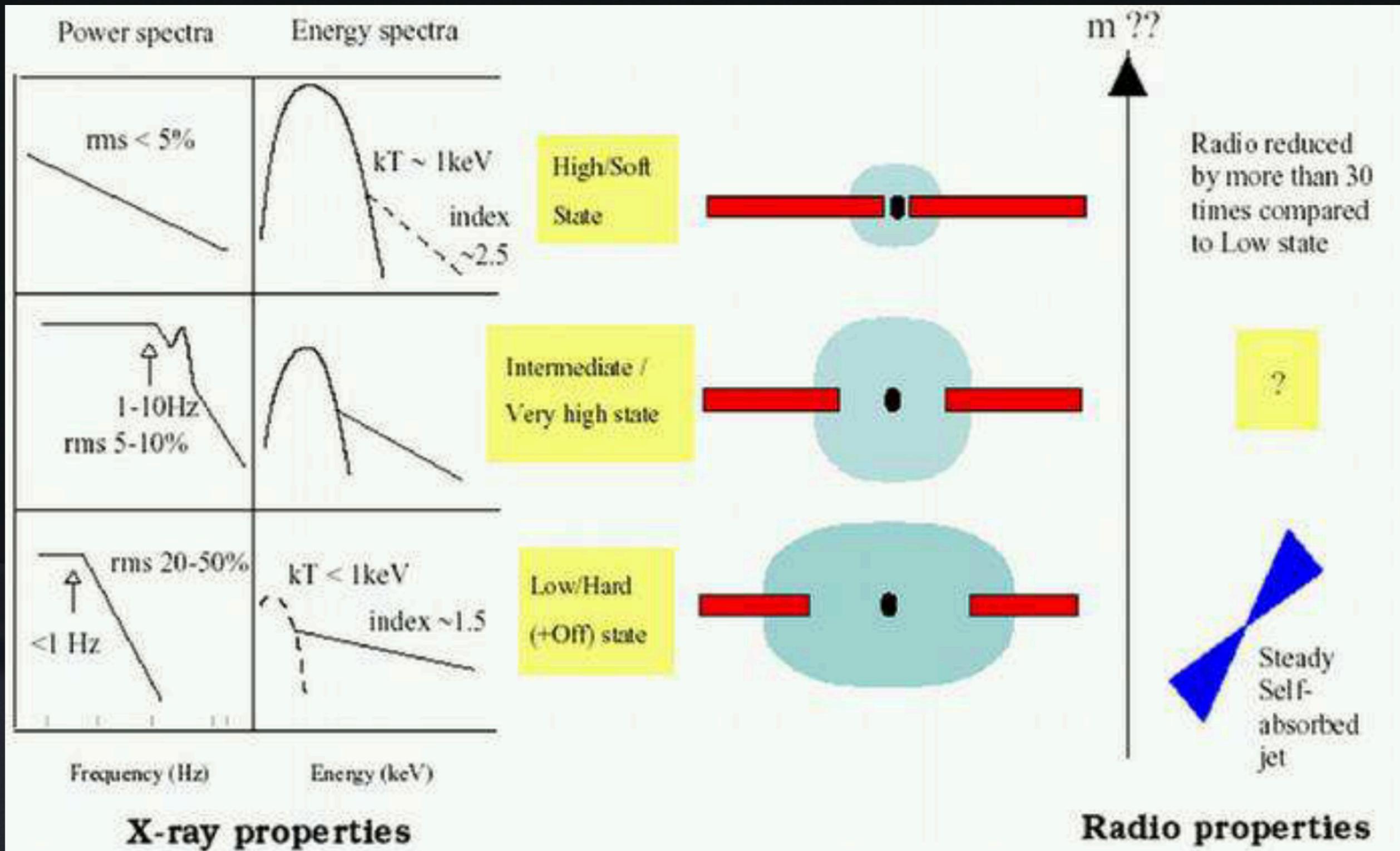
Cygnus X-3 (HMXB)

Microcuáasar

- Ubicado a 9.7 kpc en la constelación Cygnus (3ra más brillante)
- De las fuentes más luminosas en rayos X.
- Fuente invisible en el óptico.
- La naturaleza del objeto compacto es incierta.
- La estrella compañera es una WR.
- Periodo orbital: 4.8 horas
- Se caracteriza por tener gigantescas erupciones en radio.
- Detección de un jet relativista orientado casi en la línea de visión.

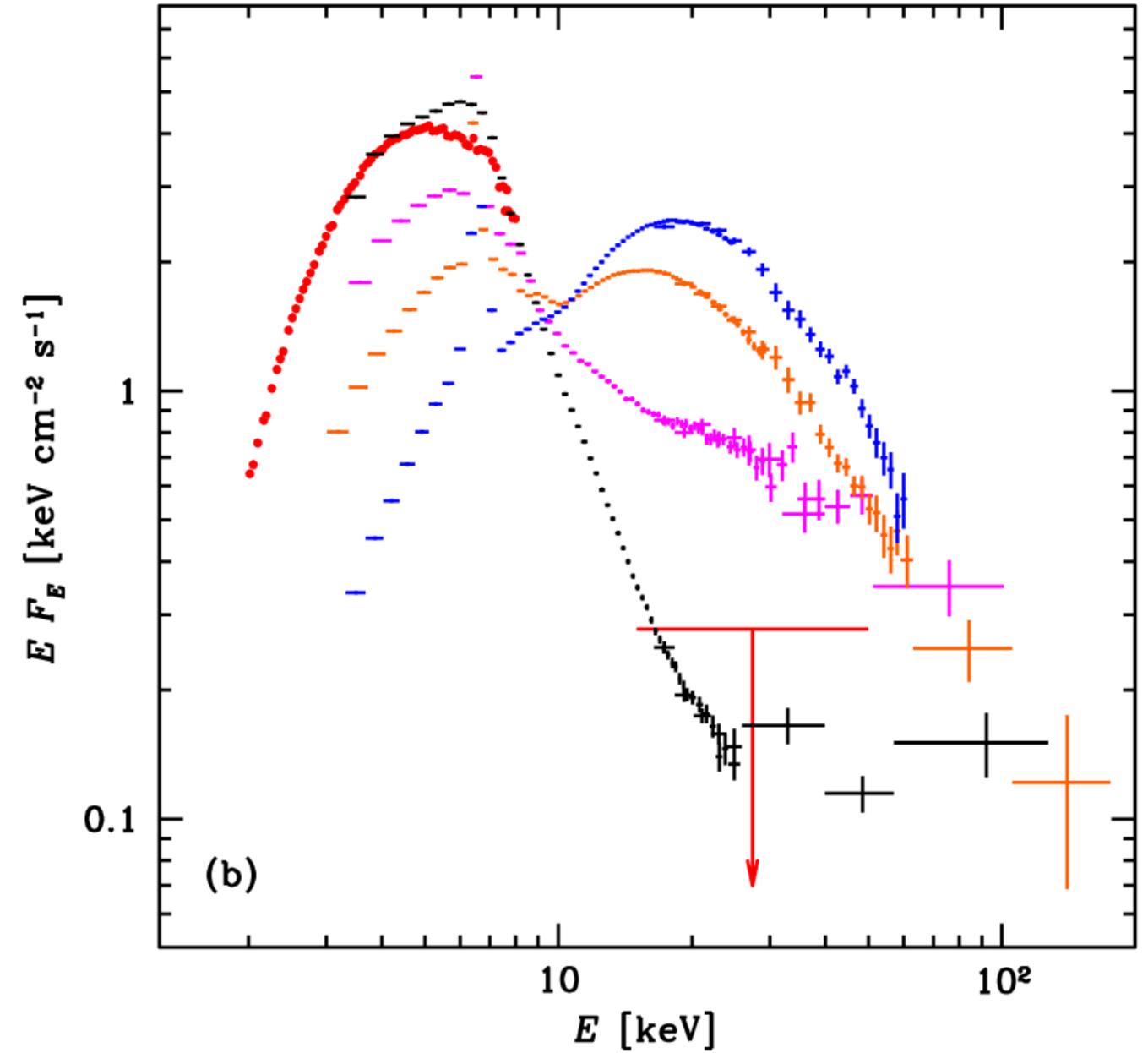
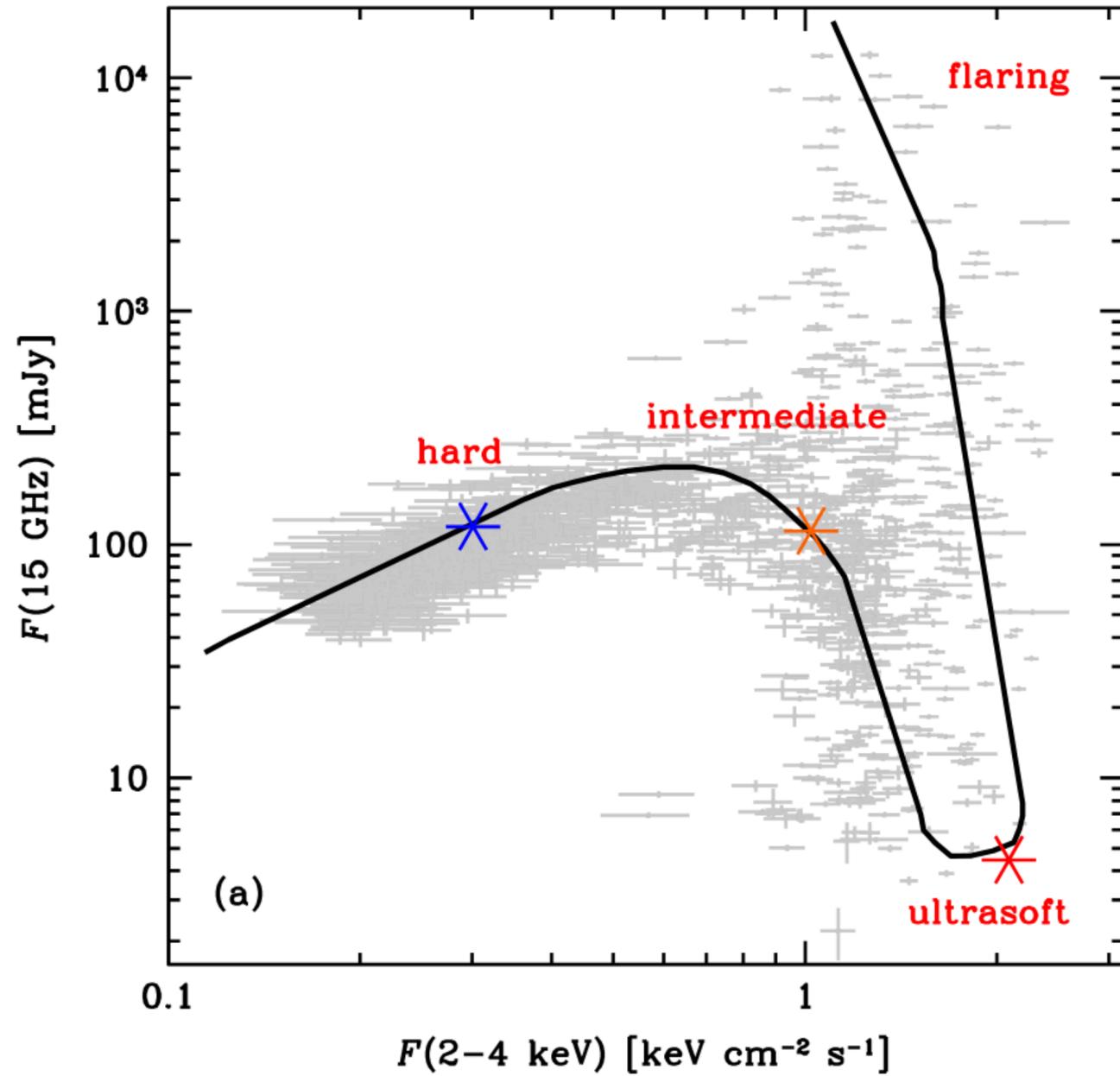


Microcuásares



Cygnus X-3 (HMXB)

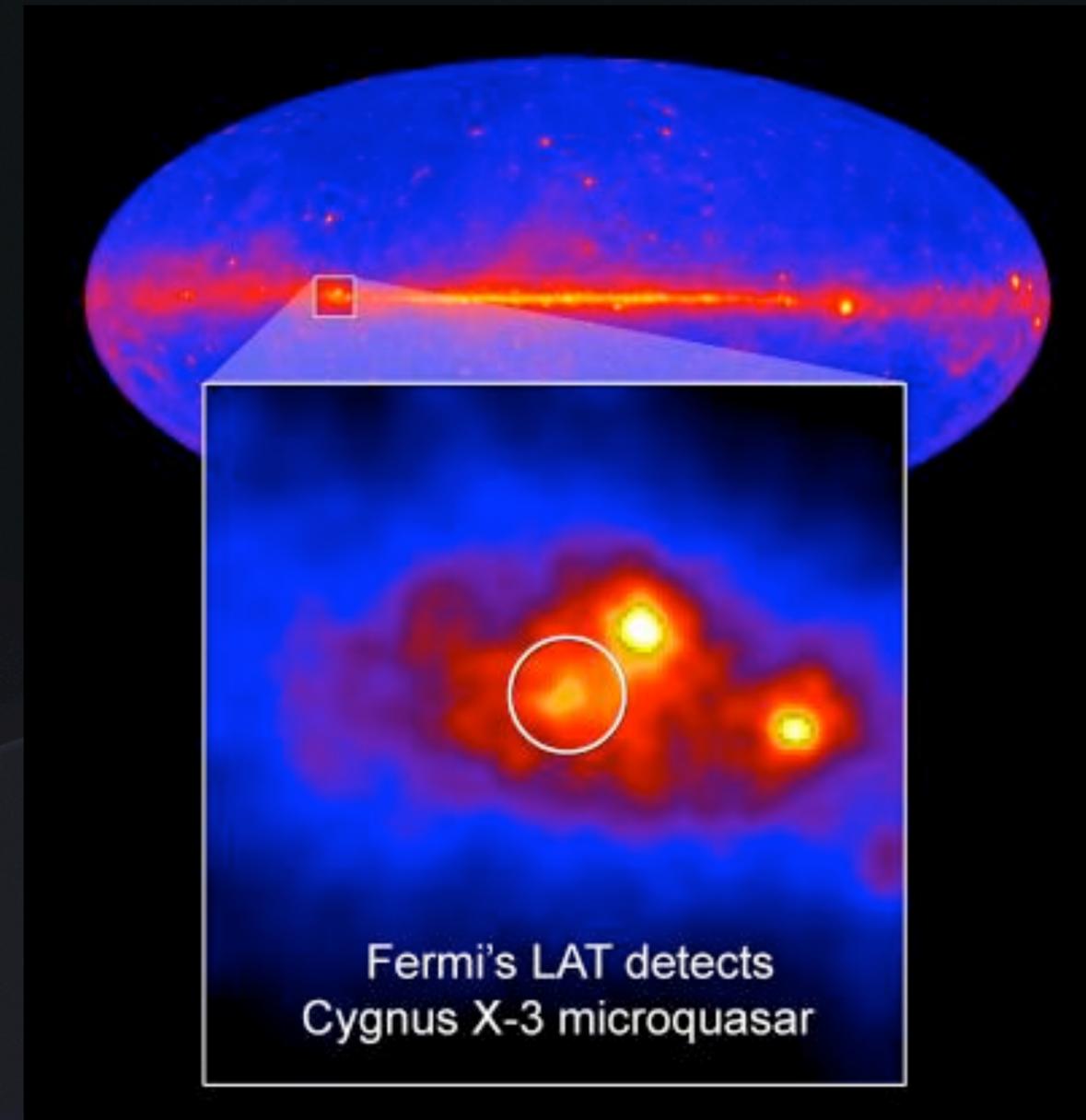
Microcuáasar



Cygnus X-3 (HMXB)

Microcuáasar

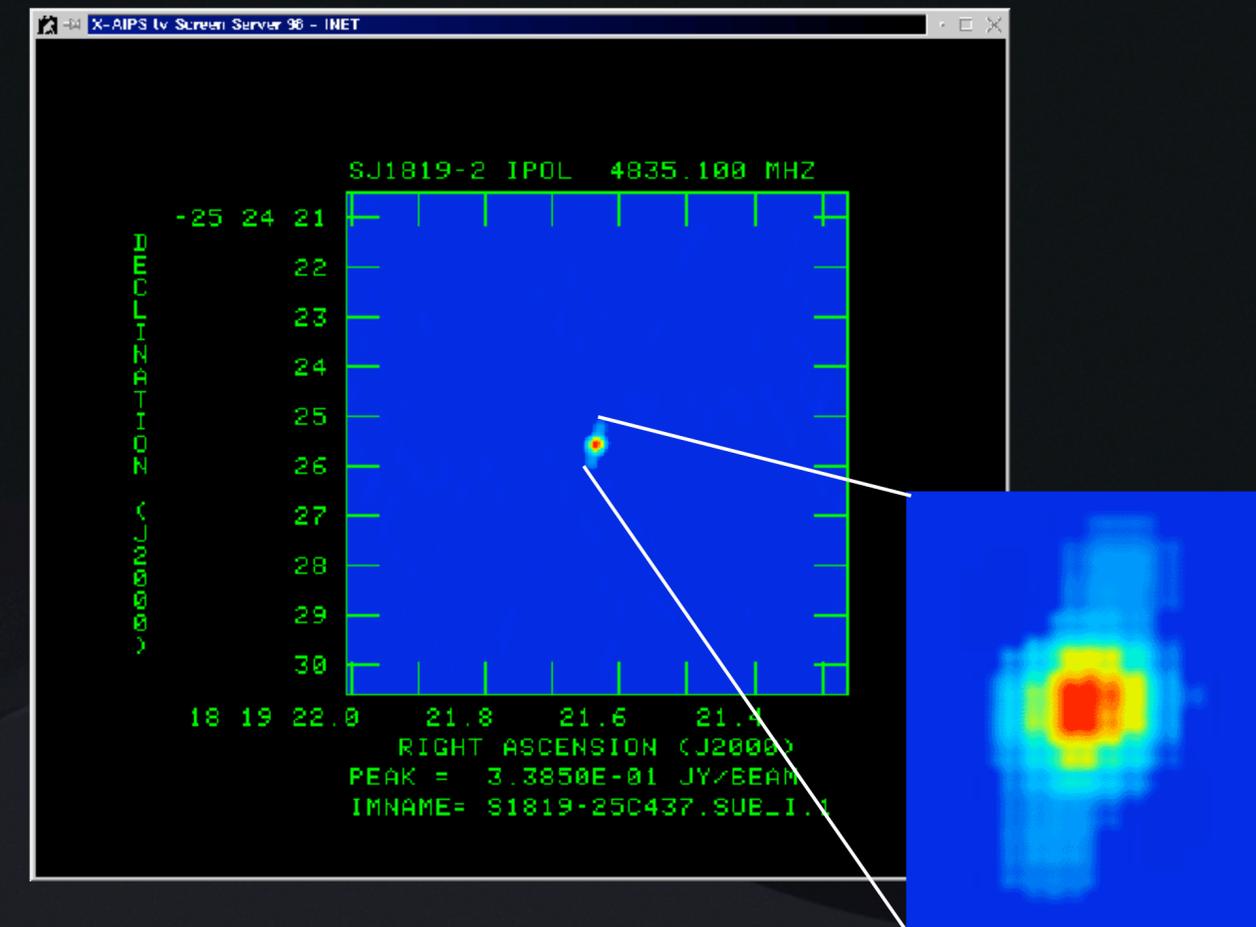
- Primer microcuáasar detectado por Fermi-LAT.
- Se encontró un estado de alto flujo en rayos gamma en el 2020
 - Durante un estado suave en rayos X
 - Se encontró periodicidad en rayos gamma de 4.79 hrs, coincidente con el periodo orbital.
- No se ha encontrado emisión en el rango VHE y UHE.



V4641 Srg (HMXB)

Microcuáasar

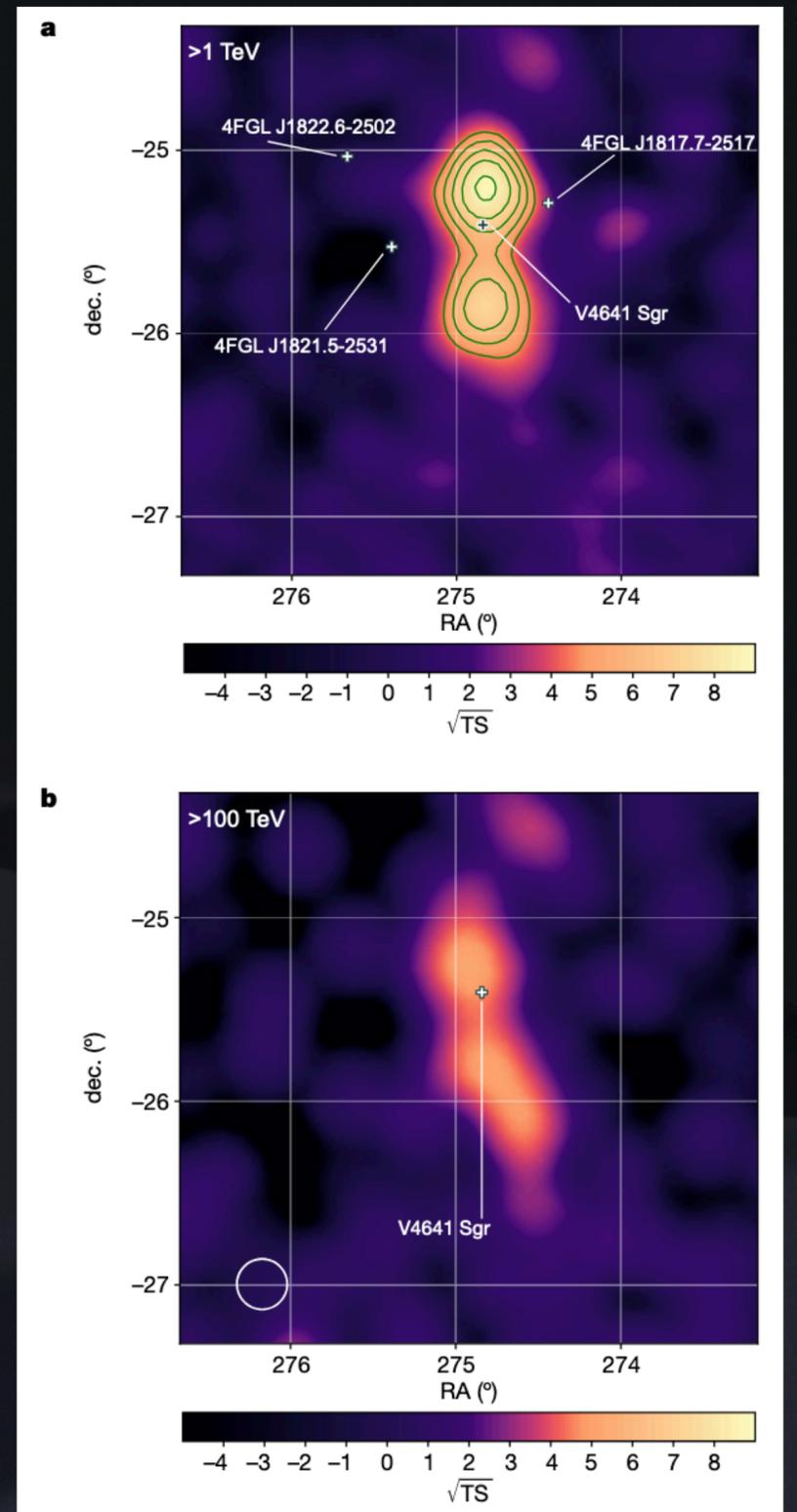
- Ubicado a 6.6 kpc en la constelación de Sagitario.
- Agujero negro + estrella tipo B ($M \sim 2.9M_{\odot}$)
- Periodo orbital: 2.8 días
- Estructura de jet visto por VLA (0.25")
- Jets con aparente movimiento superlumínico (9.5 c)
- Tiene una acreción super-Eddington
- Jet alineado casi en la línea de visión



V4641 Srg (HMXB)

Microcuáasar

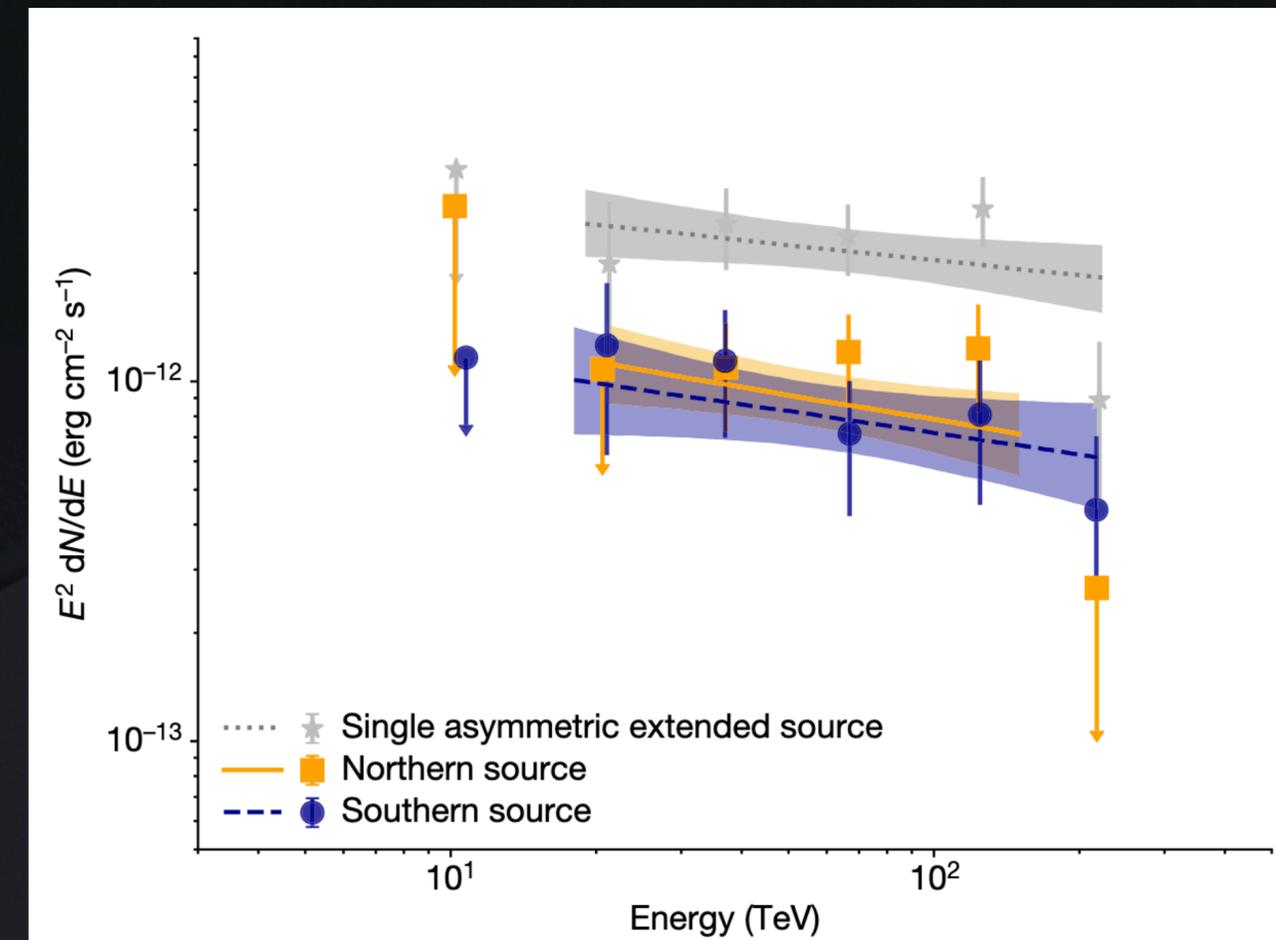
- Ha sido observado en el rango de VHE por observatorios como HAWC y LHAASO
- Emisión de rayos gamma por aceleración de partículas a distancias lejanas del sistema binario.
- Se detectó emisión en el rango UHE ($\geq 200\text{TeV}$)
- Posibles procesos de emisión:
 - Dispersión IC de electrones.
 - Sincrotrón de protones.
- Candidato a fuentes de rayos cósmicos galácticos.



V4641 Srg (HMXB)

Microcuáasar

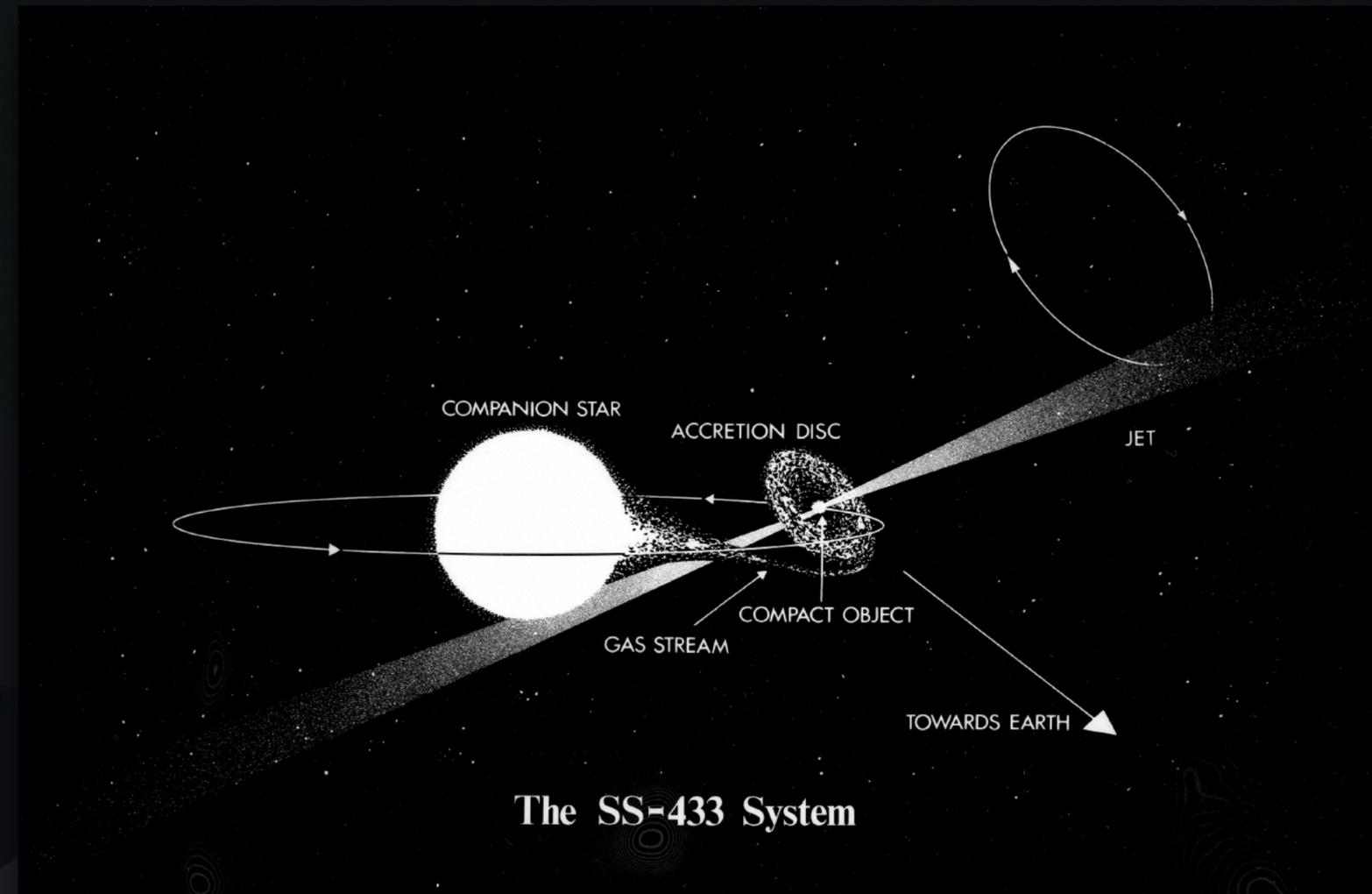
- Ha sido observado en el rango de VHE por observatorios como HAWC y LHAASO
- Emisión de rayos gamma por aceleración de partículas a distancias lejanas del sistema binario.
- Se detectó emisión en el rango UHE ($\geq 200\text{TeV}$)
- De los espectros más duros en fuentes de rayos gamma.
- Posibles procesos de emisión:
 - Dispersión IC de electrones.
 - Sincrotrón de protones.
- Candidato a fuentes de rayos cósmicos galácticos.



SS 433

Microcuáasar

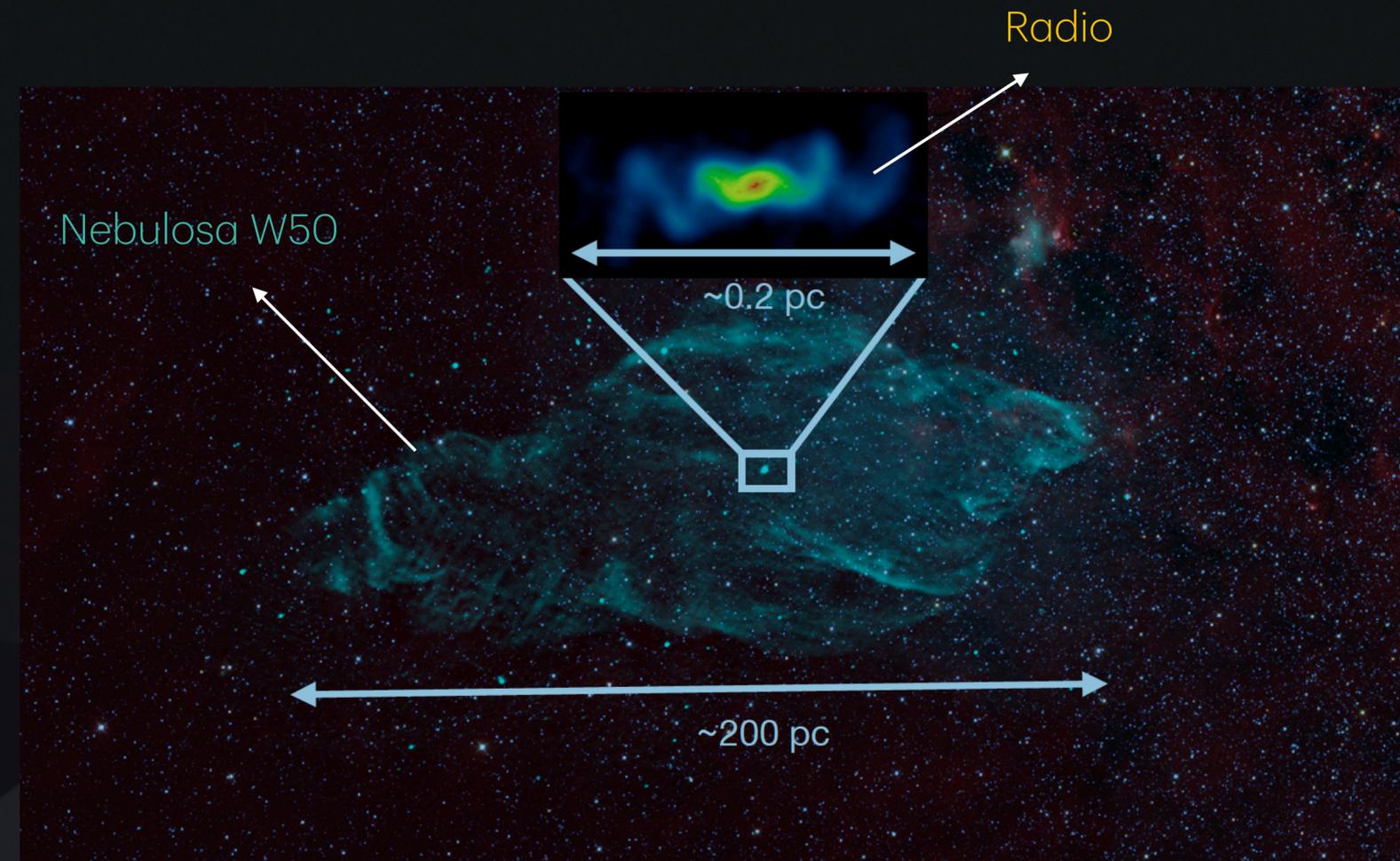
- Observaciones en:
 - Radio
 - Rayos X
 - Optico
 - Rayos gamma de HE, VHE y UHE
- Ubicado a 4.5 – 5.5kpc
- Agujero Negro ($\sim 10 - 20M_{\odot}$) + Estrella supergigante tipo A7
- Periodo orbital 13 días
- Edad estimada del sistema binario: $\sim 10^4 - 10^5$ años



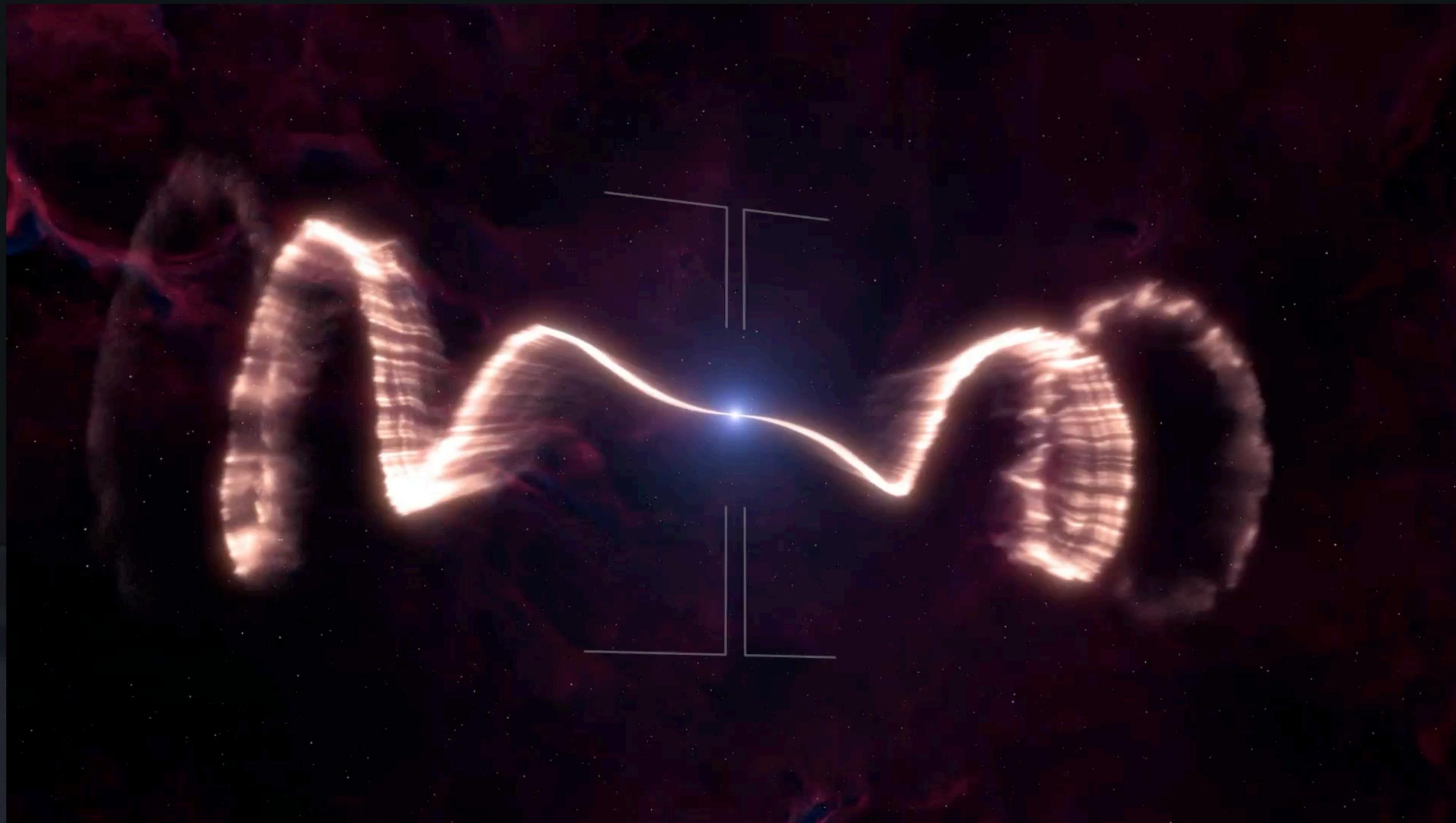
SS 433

Radio

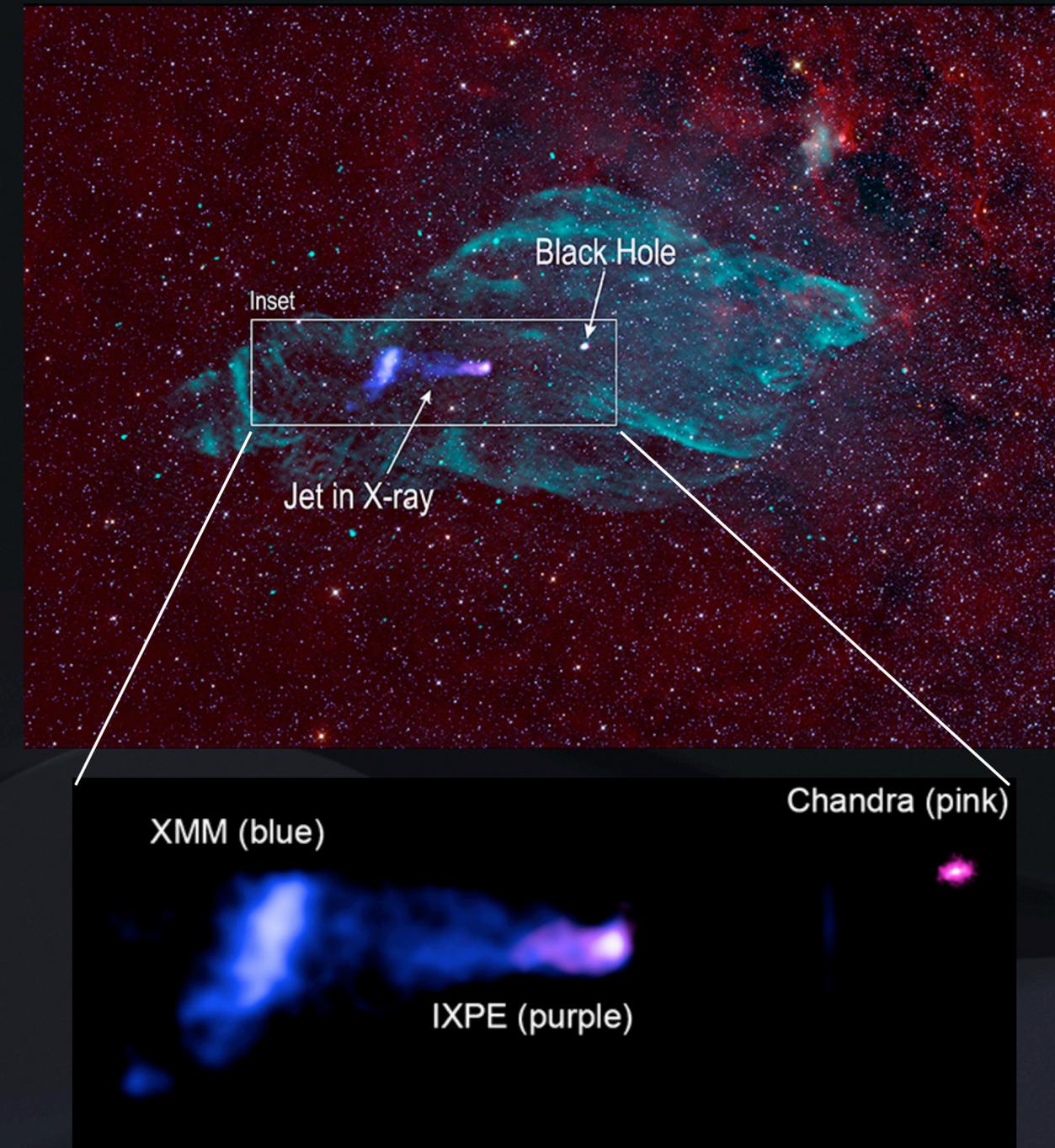
- Disco de acreción supercrítico alimentado por la estrella tipo A7
 - $L_{Bol} \sim 10^{40} \text{ erg} \cdot \text{s}^{-1}$
 - Flujo de masa ($\sim 10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$)
 - Acreción Super-Eddington
 - $T \sim 10^5 K$
- Jets de materia ionizada ($\sim 0.26c$ | $\Gamma \approx 1.04$), terminan dentro de W50.
- Los jets precesan con un ángulo de ($\sim 20^\circ$) y periodo de 162 días.
 - Extensión (radio) $\sim 0.2 \text{ pc}$
- Se piensa que W50 es la SN asociada al objeto compacto.



Créditos: (Blundell and Bowler 2004) y (NRAO/AUI/NSF, K. Golap, M. Goss; NASA's Wide Field Survey Explorer (WISE). n.d.)

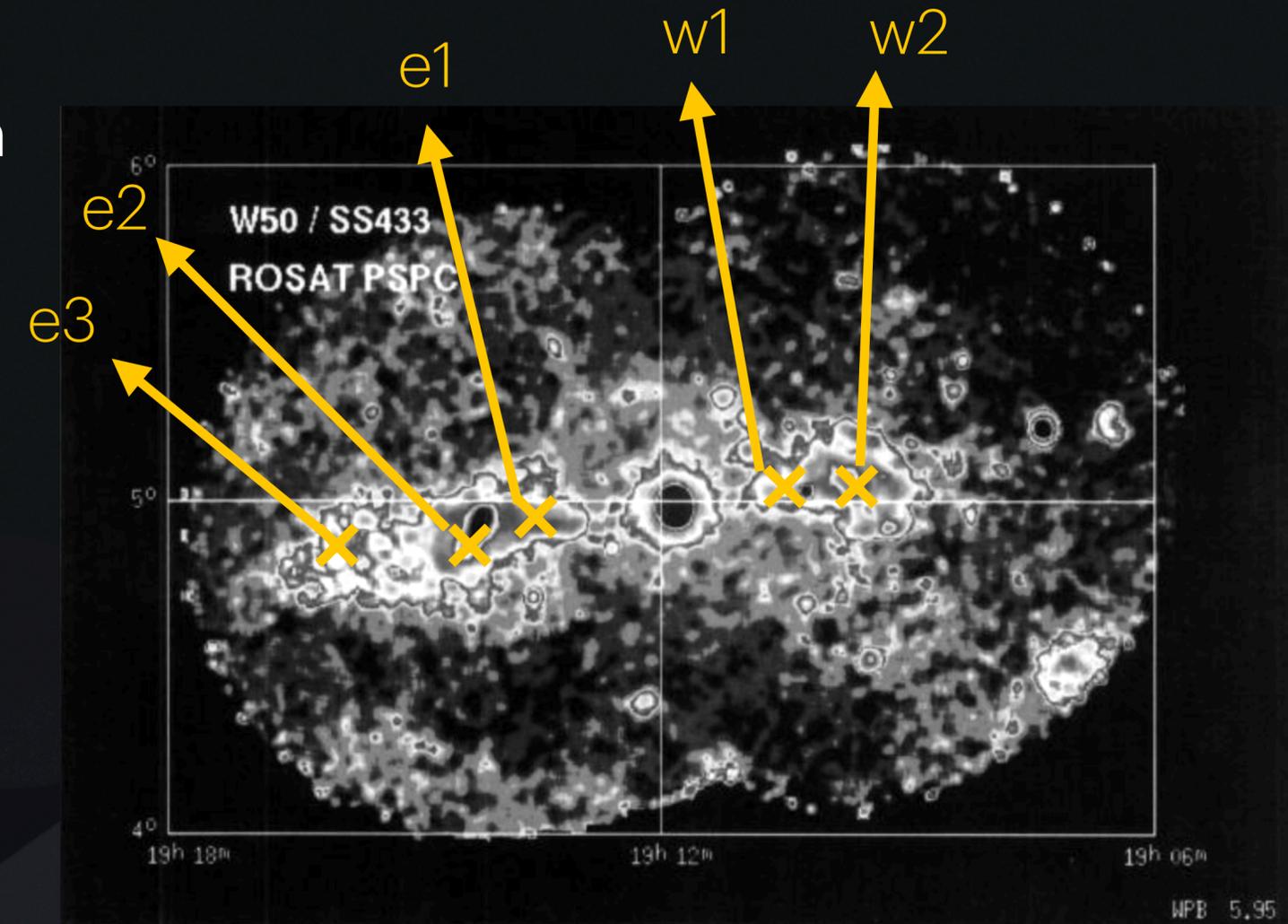


- Los jets en rayos X reaparecen a 25 pc del objeto central y terminan ~ 100 pc.
- Varias regiones emisoras de rayos X en el sistema:
 - Región central.
 - Region oeste: (w1 y w2)
 - Region este: (e1, e2 y e3)



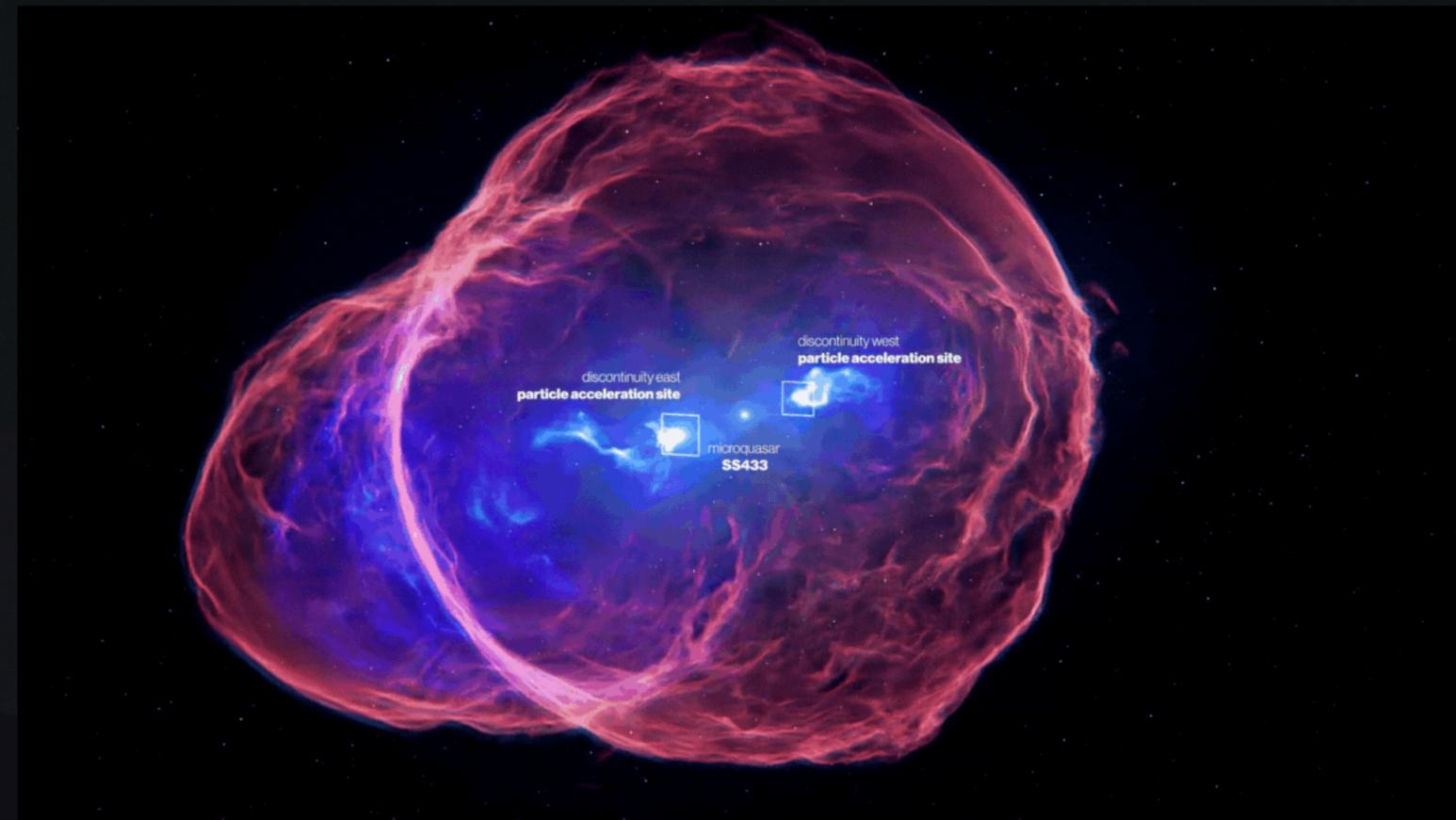


- Los jets reaparecen a 25 pc del objeto central y terminan ~ 100 pc.
- Varias regiones emisoras de rayos X en el sistema:
 - Región central.
 - Region oeste: (nudos w1 y w2)
 - Region este: (nudos e1, e2 y e3)



Créditos: Brinkmann, W (1996)

- Nodos brillantes de rayos X que emiten sincrotrón
- No se ha determinado la velocidad de estos jets exteriores.
- Los jets muestran fuertes asimetrías producto de la interacción con el MI.
- Los jets parecen colisionar con la cascara de W50
- Preguntas abiertas: dinámica y proceso de terminación.

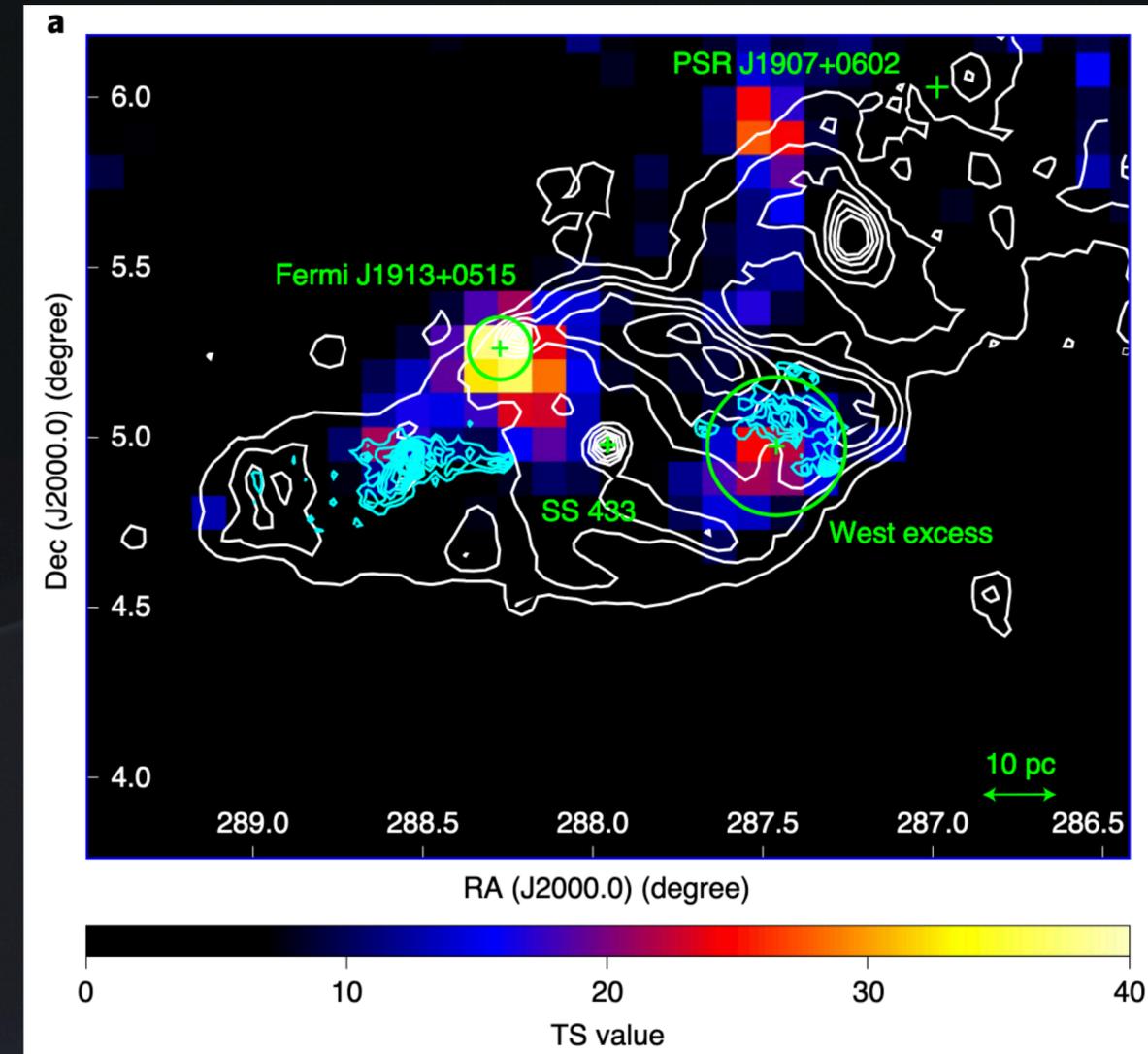


Créditos: Science Communication Lab for MPIK/H.E.S.S.

SS 433

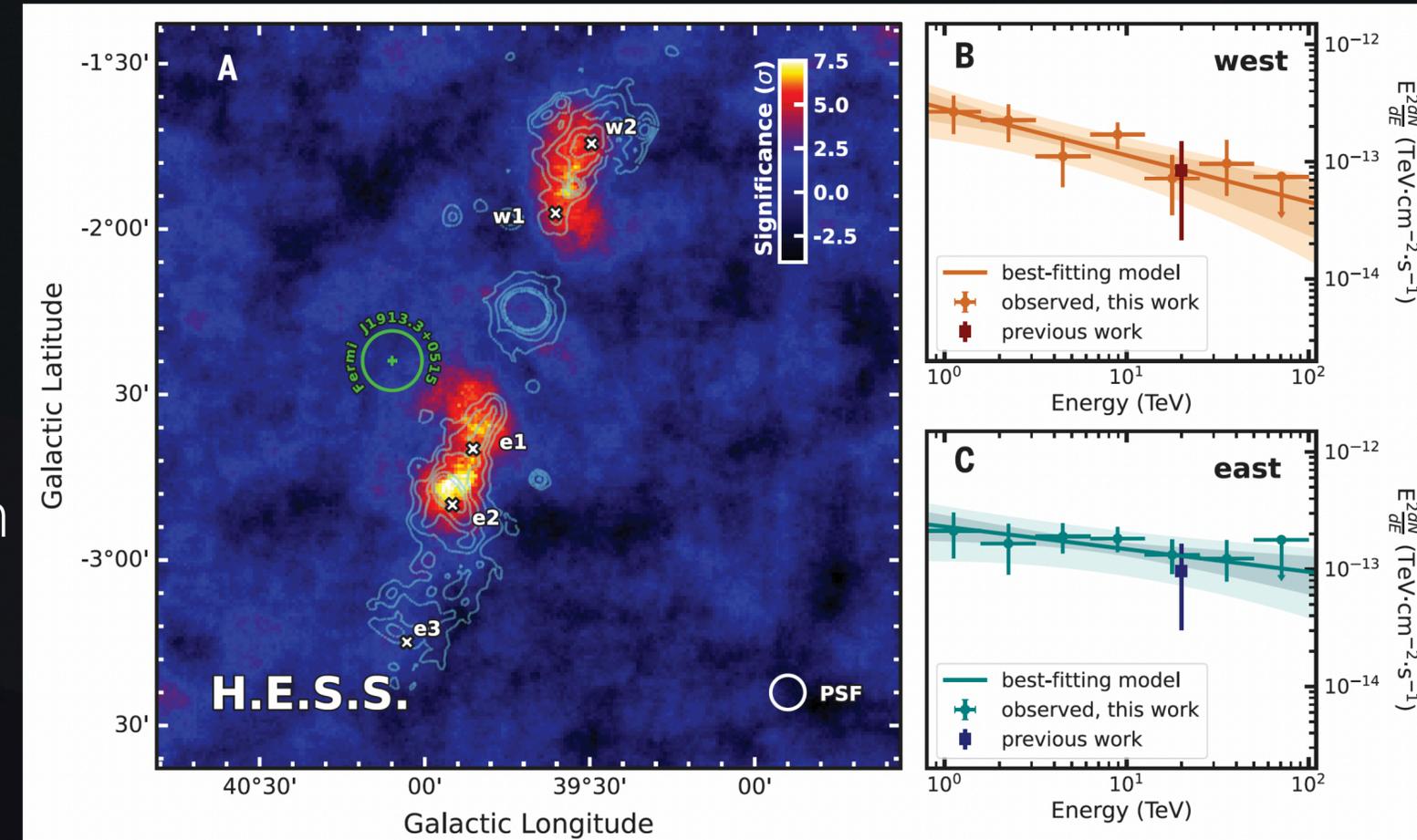
Rayos Gamma HE

- En el rango HE (10.5 años de datos Fermi-LAT) en el rango de 100 MeV a 300 GeV
- Dos excesos de emisión:
 - Fermi J1913+0515
 - Cerca del lobulo "west"
- Variabilidad periódica consistente con el periodo de precesión de los jets internos en la fuente Fermi J1913+0515, posible asociación con el sistema.



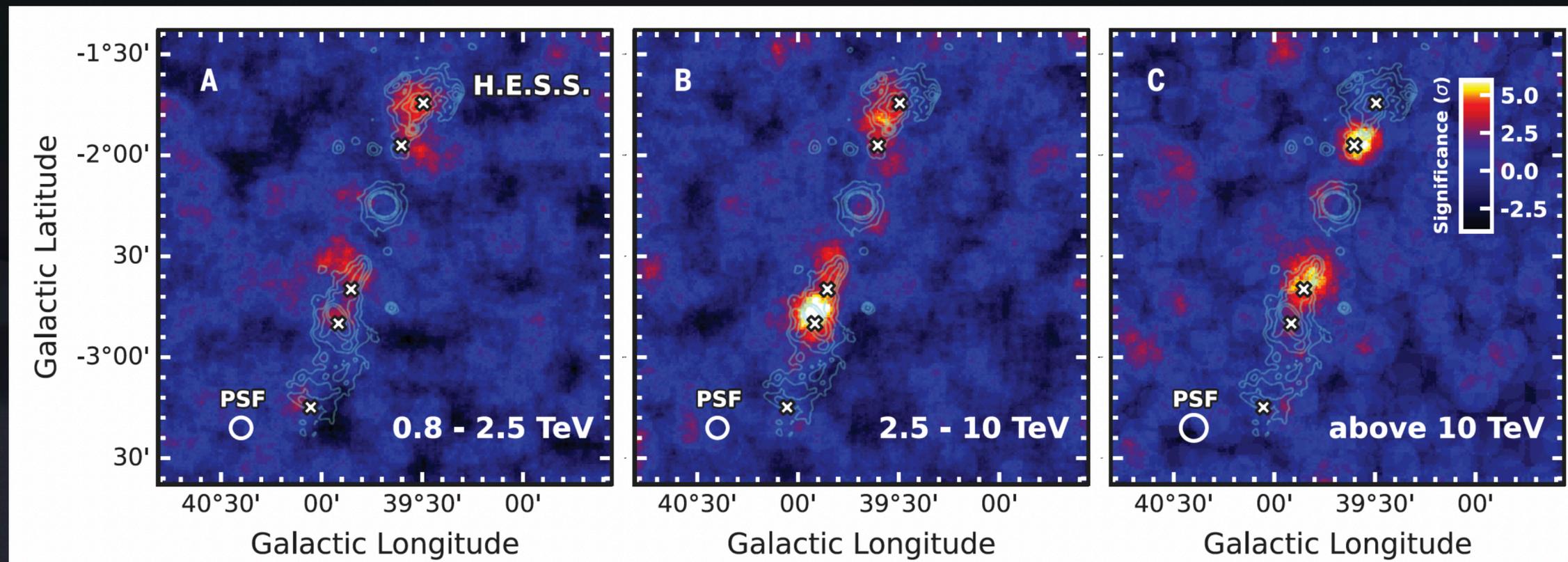
Créditos: Jian Li (2020)

- En el rango VHE (+200 hrs de observación con H.E.S.S.) a energías > 0.8 TeV:
 - Sin emisión significativa desde el sistema binario central.
 - Sin emisión significativa en la región de terminación este.
 - Se encontró emisión en dos regiones de rayos X este y oeste de los jets (7.8σ y 6.8σ)

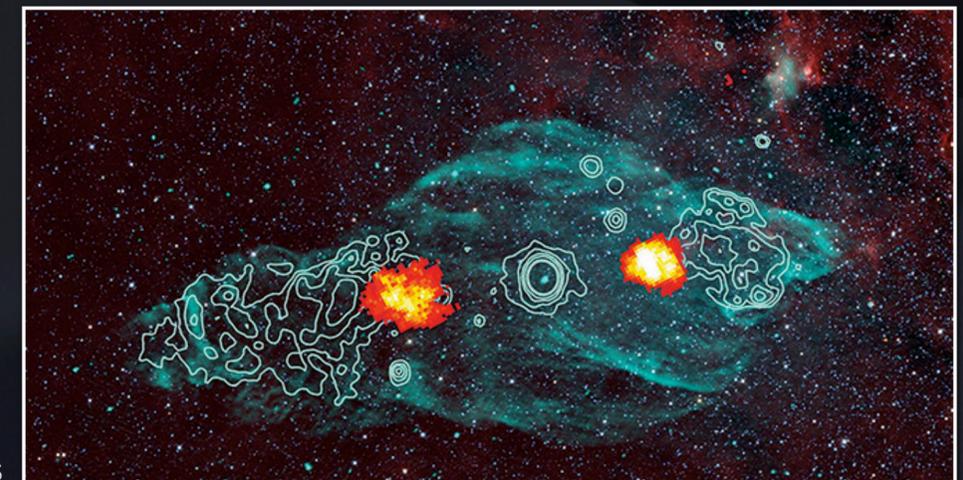
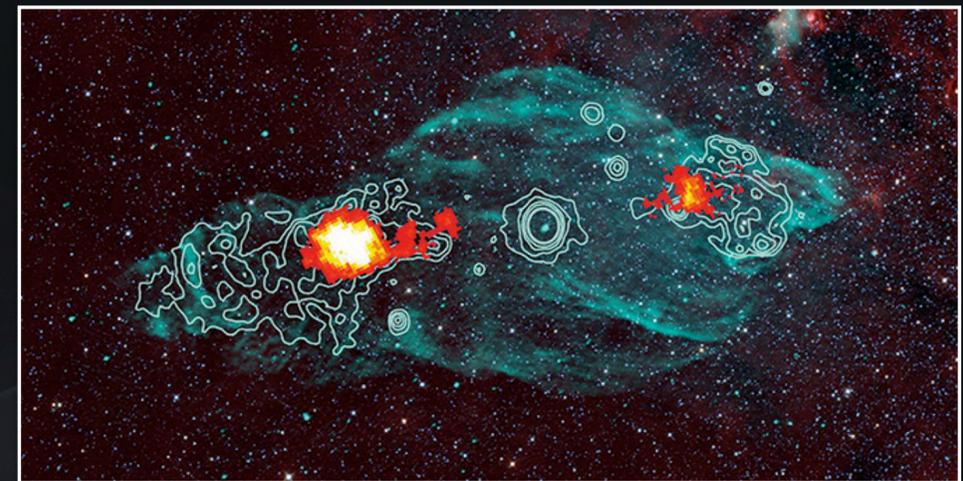
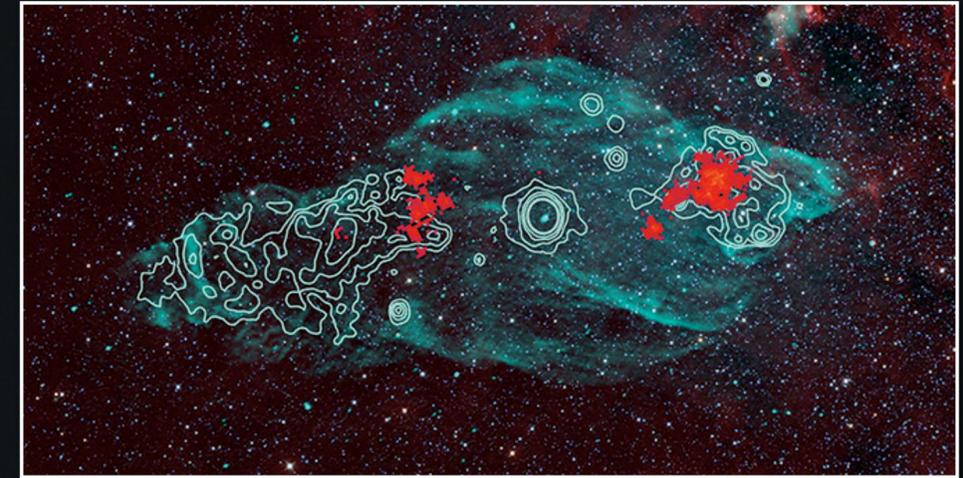


Créditos: H.E.S.S. Collaboration (2024)

- Análisis morfológico dependiente de la energía:
- Emisión menos significativa a bajas energías.
- Máximas intensidades superficiales en ubicaciones más alejadas a lo largo del jet (2.5-10 TeV).
- Emisión solo en la base de los jets exteriores (>10TeV).



- Transporte de partículas dentro del jet dominado por advección y no por difusión.
- Zonas de aceleración en la base de los jets externos.
- Se infiere que la emisión proviene por dispersión IC de e^- , no de hadrones (fotones VHE)
- Sincrotrón mecanismo dominante en la pérdida de energía.
- Posible emisión por núcleos de metales acelerados en los jets.



Potencia de Procesos Radiativos:

- Potencia de Radiación Sincrotrón:

$$P_{\text{Sinc}} = \frac{4}{3} \sigma_T c \beta^2 \gamma^2 U_B$$

- Potencia de Radiación dispersión IC:

$$P_{\text{IC}} = \frac{4}{3} \sigma_T c \beta^2 \gamma^2 U_{\text{rad}}$$

- Tiempo de enfriamiento Sincrotrón:

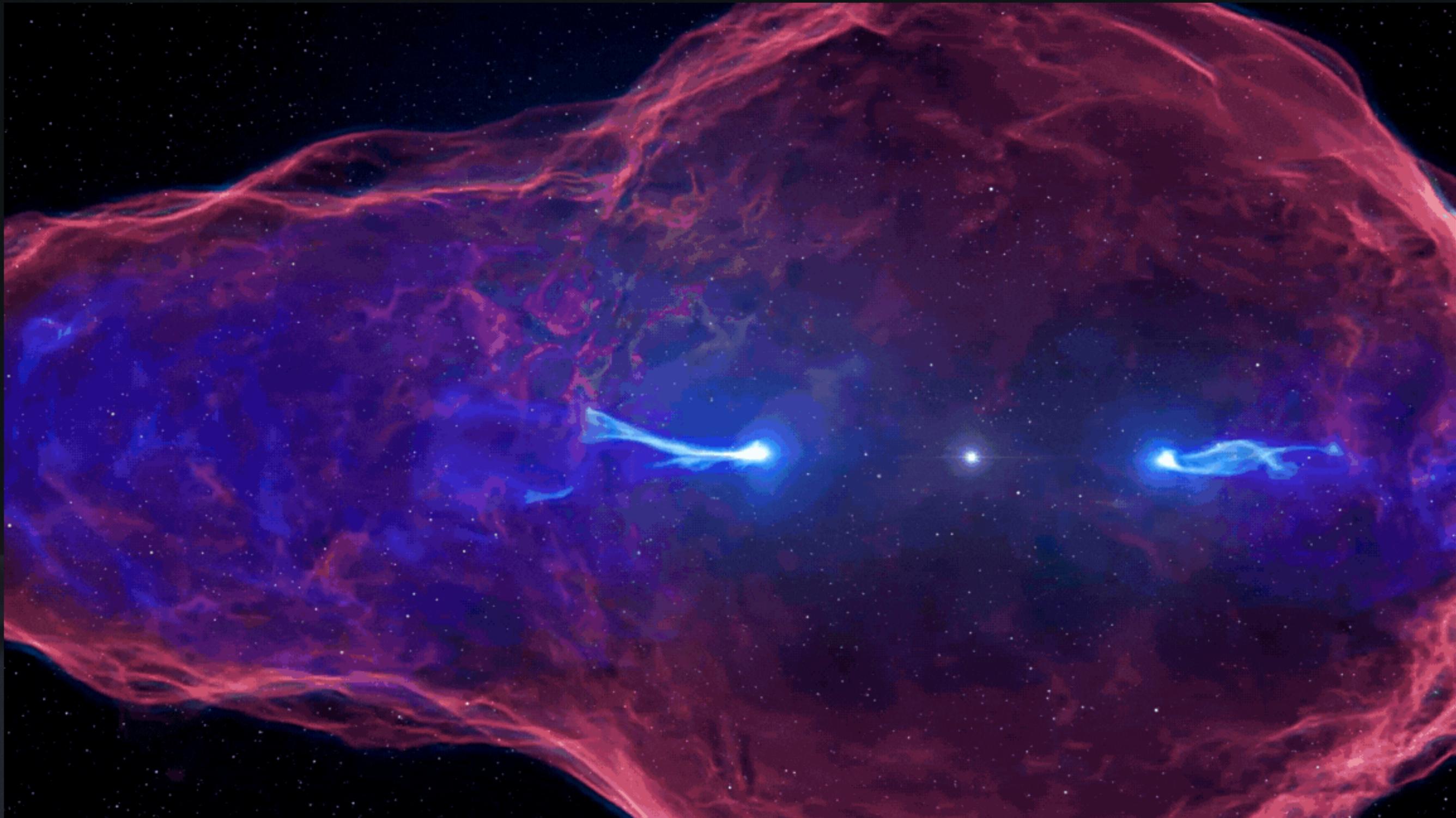
$$t_{\text{cool}} \approx \frac{6\pi m_e c}{\sigma_T B^2 \gamma}$$

- Tiempo de enfriamiento IC:

$$t_{\text{cool}} \approx \frac{3m_e c}{4\sigma_T \gamma U_{\text{rad}}}$$

Ondas de Choque

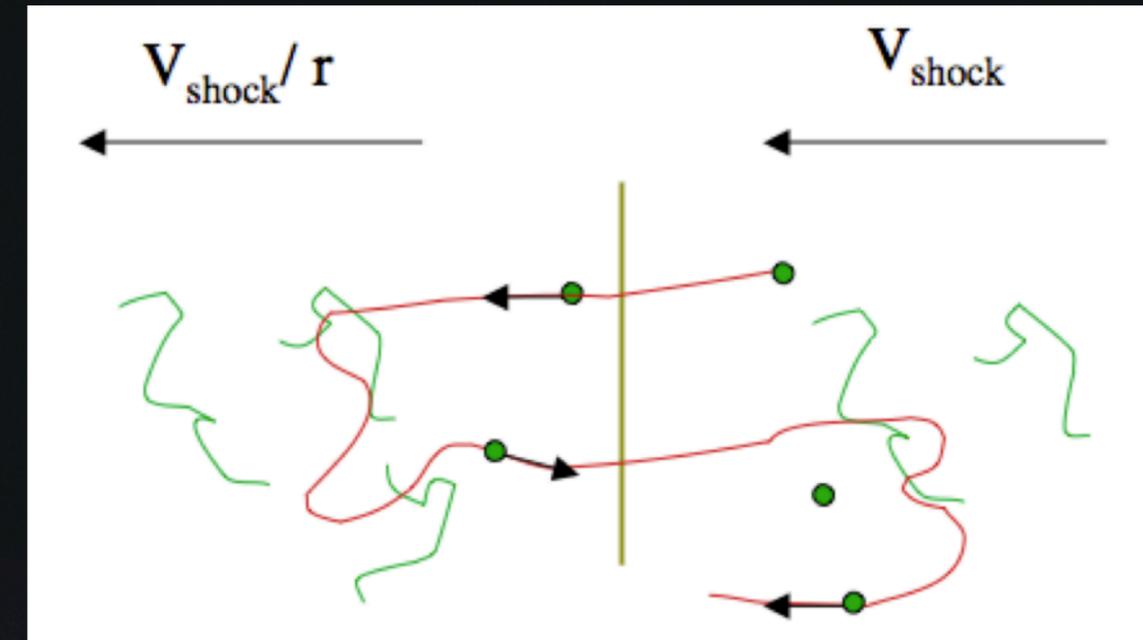
Microcuásar



Ondas de choque

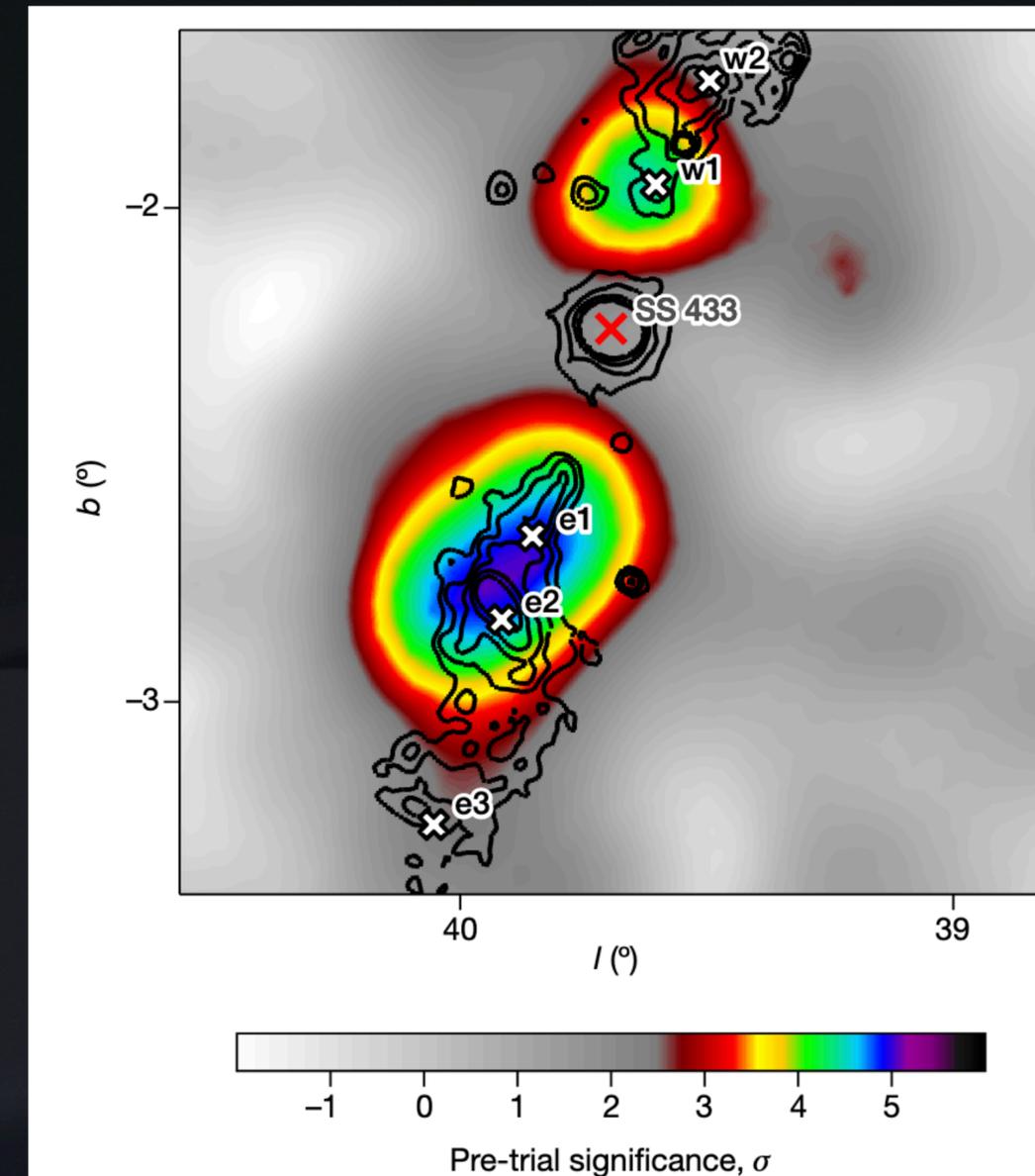
- Proceso de Aceleración de Fermi de Primer Orden:
 - Una onda de choque crea una región donde el plasma está muy comprimido y turbulento, tanto delante como detrás del frente de choque.
 - El frente de choque actúa como una barrera que las partículas cargadas pueden atravesar en ambas direcciones.
 - Las partículas relativistas son dispersadas repetidamente al interactuar con irregularidades en el campo magnético presente en el plasma.
 - Las partículas se mueven hacia adelante y hacia atrás a través del frente de choque, ganando energía en cada cruce.
 - energía acumulada después de N cruces se incrementa exponencialmente:

$$E_F \approx E_0 \left(1 + \frac{v}{c} \right)^N$$

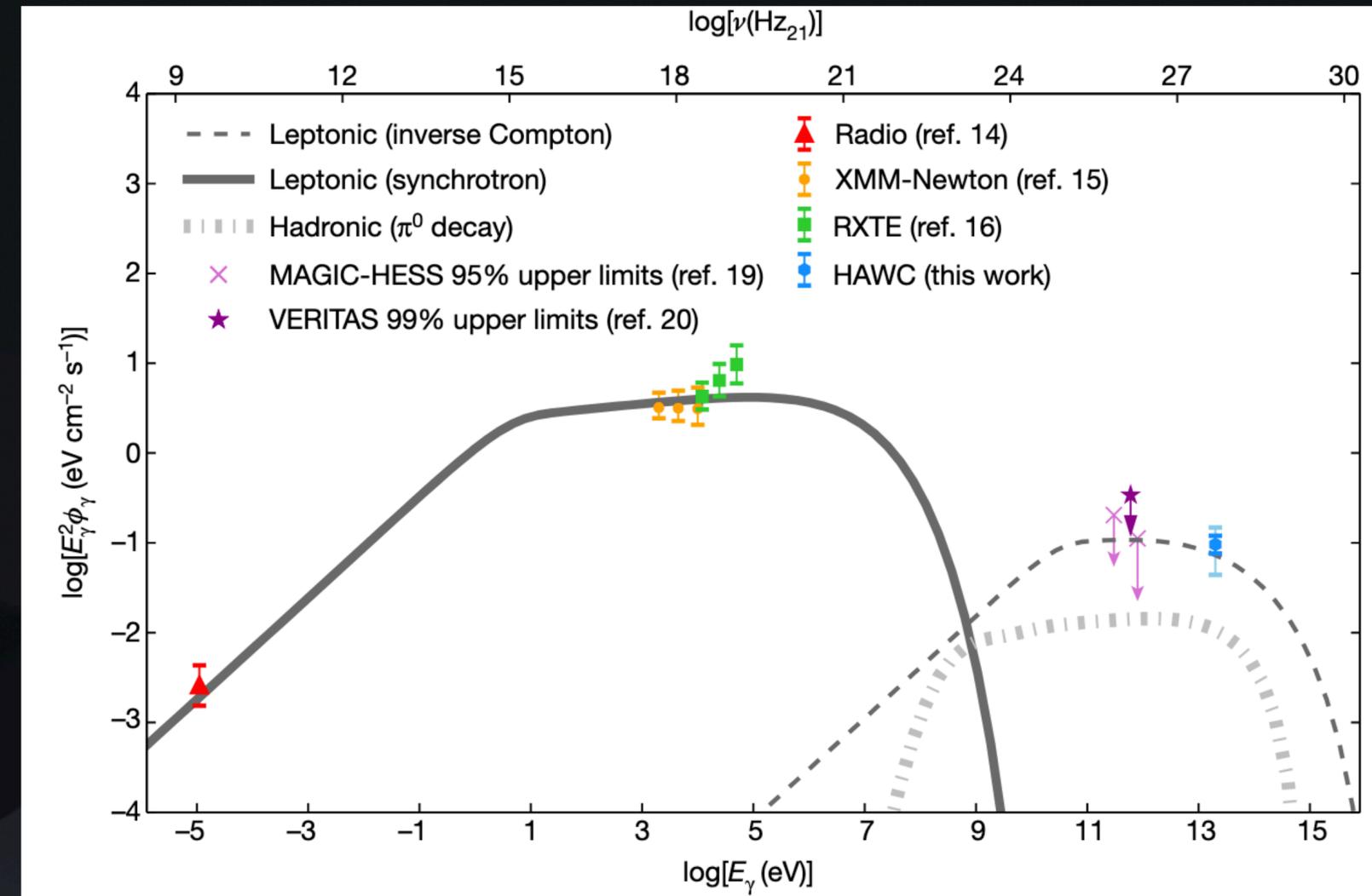


Creditos: Acceleration of cosmic-rays (2016)

- En 2018 HAWC reportó un exceso de fotones con $E > 25$ TeV en los lóbulos este y oeste de los jets.
- Análisis en recientes (2024) de la colaboración HAWC indican detección de fotones por encima de 100 TeV en el lóbulo este.
- En el primer catalogo de LHAASO se detecto un flujo a $E \approx 50$ TeV asociado a la región e1.
- Desafiando los modelos de aceleración de e^- por jets astrofísicos.



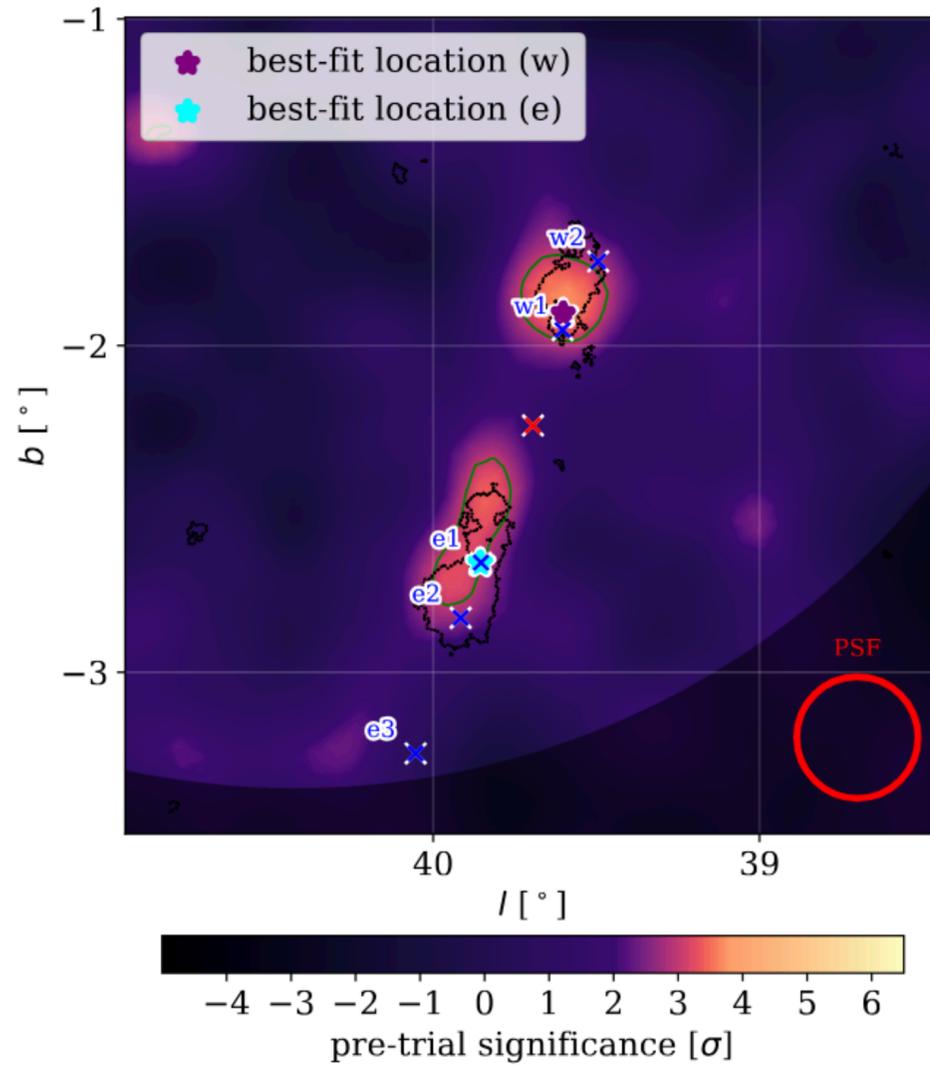
- Modelo Hadrónico: Colisión de protones con el gas ambiente produciendo π^0 y posteriormente rayos gamma.
- Modelo Leptónico: e^- acelerados en los jets y mediante dispersión IC con fotones del CMB se generan rayos gamma.



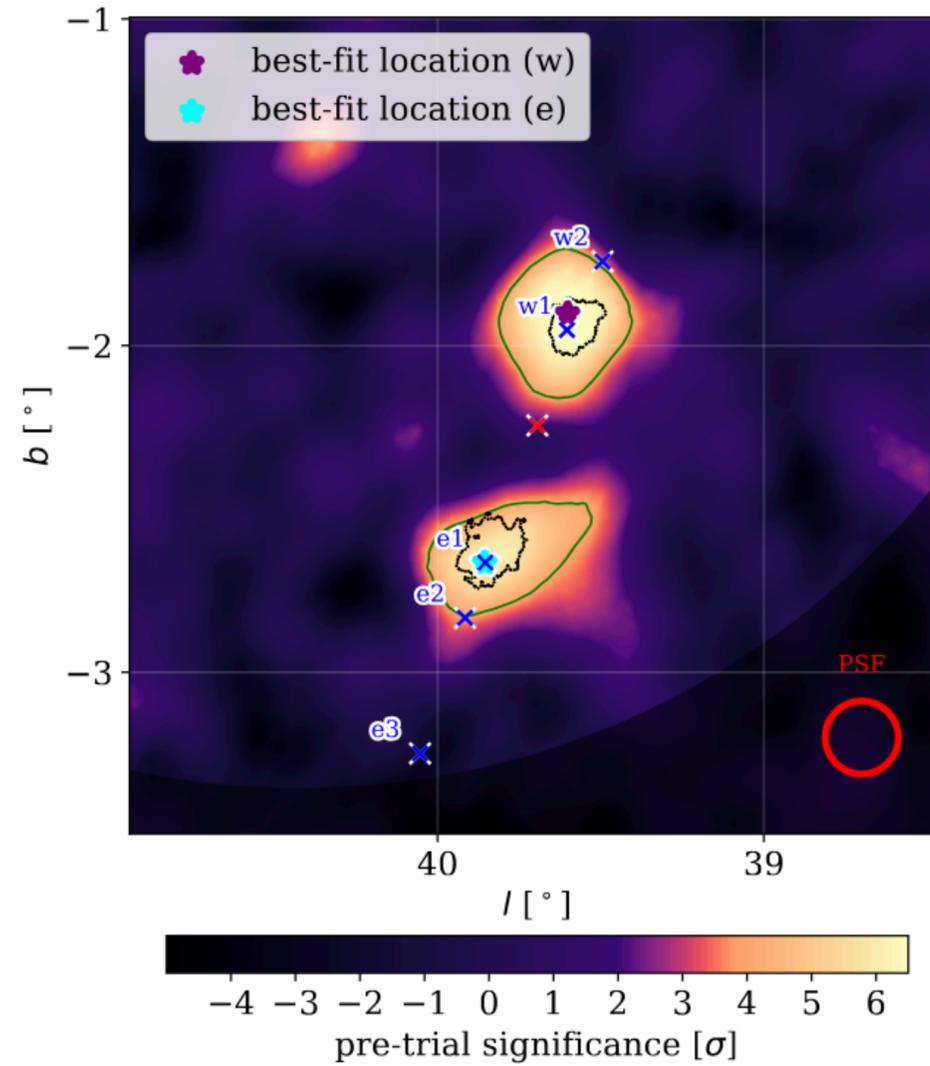
Créditos: A. U. Abeysekara (2018)

Observaciones recientes de HAWC (UHE)

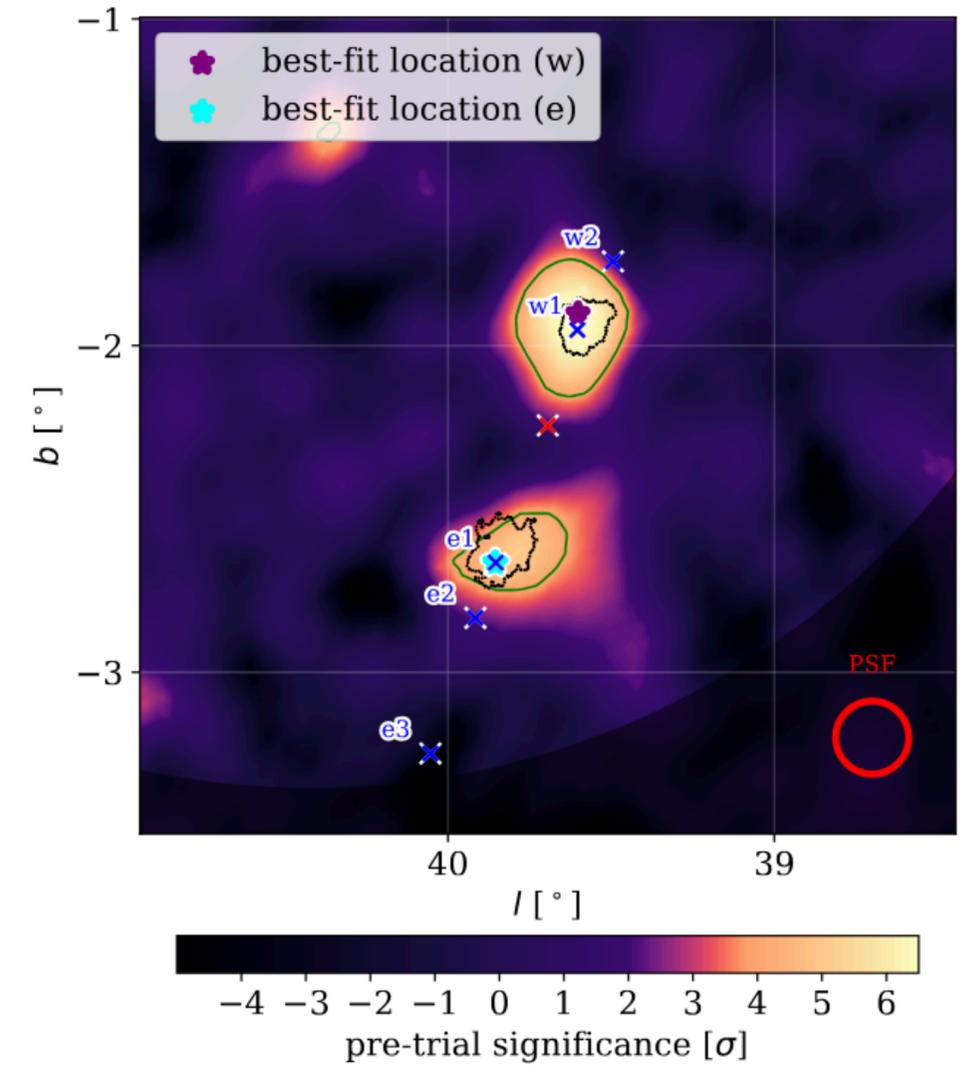
Microcuáasar



(a) 1 – 10 TeV



(b) > 10 TeV



(c) > 18 TeV

Observaciones recientes de HAWC (UHE)

Microcuásar

