

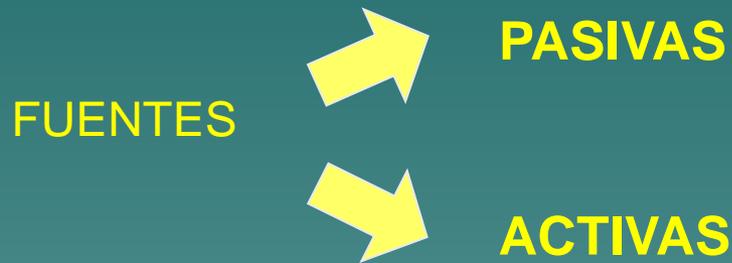
# FUENTES DE RAYOS GAMMA



# FUENTES DE RAYOS GAMMA

Llamamos fuente de rayos  $\gamma$  a un sistema astrofísico que emite una fracción significativa de su *luminosidad electromagnética* a **energías mayores que 0.5 MeV**.

Las fuentes de rayos  $\gamma$  pueden clasificarse en 2 grandes grupos:



- ❖ Las fuentes pasivas son simplemente “blancos” para flujos de partículas relativistas originadas en una región diferente.
- ❖ Las fuentes activas, por el contrario, aceleran partículas hasta *velocidades relativistas* y la interacción de estas partículas con los diferentes campos (materiales o electromagnéticos) locales da lugar a la radiación  $\gamma$ .

# FUENTES PASIVAS

Las fuentes pasivas pueden ser, a su vez de dos tipos:

FUENTES  
PASIVAS



**DIFUSAS**



**DISCRETAS**

# FUENTES PASIVAS: *DIFUSAS*

Las fuentes difusas están formadas por un *medio extendido y de baja densidad* que es atravesado por rayos cósmicos.

Observacionalmente, la fuente difusa más importante es el *medio interestelar acumulado sobre el plano de la Galaxia*.

La irradiación de este material

(básicamente **H**, más trazos de elementos más pesados como **He**, y **material molecular como CO y polvo**)

**produce emisión hadrónica a través de interacciones p-p.**

La existencia de esta emisión fue predicha por Hayakawa a principios de los años 1950, poco tiempo después del descubrimiento del pión.

La intensidad de esta emisión dependerá de

- la **densidad del medio** y
- la **densidad local de los rayos cósmicos**.

# FUENTES PASIVAS: *DIFUSAS* (cont.)

La emisión del medio interestelar acumulado sobre el plano de la Galaxia muestra un fuerte gradiente de intensidad hacia bajas latitudes galácticas, donde se concentra la mayoría del gas.

Esta emisión es la contribución más importante al **fondo difuso** detectado por varios instrumentos, incluido EGRET, y que debe sustraerse a fin de *detectar las fuentes galácticas discretas*.

Si escribimos 
$$\varepsilon_\gamma = \frac{q_\gamma(\vec{r})}{n(\vec{r})}$$

Donde  $n(\vec{r})$  es la densidad del medio,  
 $q_\gamma(\vec{r})$  es la emisividad por decaimientos de  $\pi_0$  en  $\vec{r}$

➔ el **flujo total recibido** a una distancia  $d$  será:

$$F_\gamma = \frac{1}{4\pi d^2} \int n(\vec{r}) \varepsilon_\gamma(\vec{r}) d^3r$$

La integral se extiende sobre toda la región donde se distribuye el gas.

# FUENTES PASIVAS: *DIFUSAS* (cont.)

Si llamamos  $\varepsilon_{\gamma,0}$  a la emisividad local (en la vecindad del sol),

podemos escribir:

$$\frac{\varepsilon_{\gamma}}{\varepsilon_{\gamma,0}} \approx \frac{\omega_{\text{CR}}}{\omega_{\text{CR},0}} = K_s$$

Donde  $\omega_{\text{CR}}$  es la densidad de rayos cósmicos, que localmente vale

$$\omega_{\text{CR},0} \approx 1 \frac{\text{eV}}{\text{cm}^3}$$

Parámetro de magnificación



$$F_{\gamma} \approx \frac{1}{4\pi d^2} \int K_s \varepsilon_{\gamma,0} n(\vec{r}) d^3r$$

Se mide

Se supone  
(distribución  
de materia)

Se *infiere* la distribución de rayos cósmicos en la galaxia si se conoce la distribución de densidad del medio y su distancia (por ejemplo a través de observaciones radioastronómicas)

# FUENTES PASIVAS: *DIFUSAS* (cont.)

De aquí que, si se conoce

- la **distribución de densidad del medio**
- y su **distancia**

➔ puedan hacerse inferencias sobre la distribución de los rayos cósmicos de la Galaxia.

Sin embargo, el *decaimiento de*  $\pi_0$  no es la única contribución a la emisión difusa.

La *interacción de la componente leptónica de los rayos cósmicos con el gas interestelar* también puede producir radiación  $\gamma$  por Bremsstrahlung relativista.

Además, la interacción de estas mismas partículas con la **radiación de fondo de 2.73 K** puede resultar en una fuente adicional de rayos  $\gamma$ .

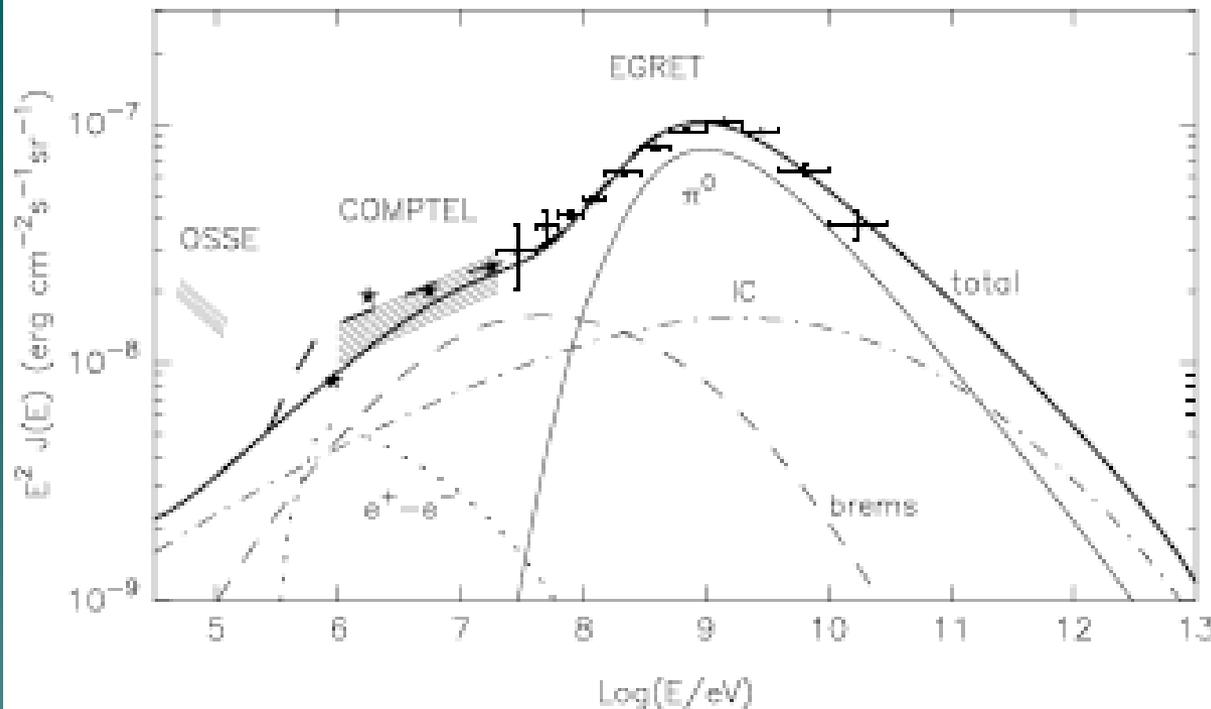
## FUENTES PASIVAS: *DIFUSAS* (cont.)

➔ Se deben desarrollar **modelos muy detallados** para hacer una reproducción confiable de la **emisión  $\gamma$  difusa de la Galaxia**.

Estos modelos deben contar con una descripción cuantitativa detallada de

- la **distribución de materia** en la Galaxia y
- con modelos adecuados de los diferentes **campos radiativos** (que además de la radiación de fondo cósmico incluyen campos infrarrojos y luz estelar).

La contribución de rayos gamma por decaimiento de piones neutros contribuye a explicar el “GeV bump” (Aharonian & Atoya 2000)



**Fig. 6.** The fluxes of diffuse radiation produced by both electronic and nucleonic components of cosmic rays in the inner Galaxy, calculated for a hard power-law source functions of the electrons with  $\Gamma_{e,0} = 2.15$ , and of the protons with  $\Gamma_{p,0} = 2.1$ , and the escape time parameters  $\delta = 0.65$ ,  $\tau_{10} = 1.4 \times 10^7$  yr,  $\tau_{conv} = 2 \times 10^7$  yr. Other model parameters are:  $w_e = 0.075$  eV/cm<sup>3</sup>,  $w_p = 1$  eV/cm<sup>3</sup>,  $N_H = 1.5 \times 10^{22}$  cm<sup>-2</sup>,  $l_d = 15$  kpc,  $B = 6$   $\mu$ G. Contributions from  $\pi^0$ -decay (thin solid line), bremsstrahlung (dashed), inverse Compton (dot-dashed), and positron annihilation in flight (dotted line, for  $C_+ = 0.5$ )  $\gamma$ -radiation mechanisms are shown. The heavy solid line shows the total flux without contribution from the positron annihilation, and the heavy dashed line takes this flux into account.

# FUENTES PASIVAS: *DISCRETAS*

Las fuentes pasivas discretas están formadas básicamente por medio interestelar altamente estructurado.

En particular, pueden ser fuentes discretas:

- nubes moleculares masivas,
- nubes de polvo,
- o incluso nubes más pequeñas ubicadas localmente o próximas a aceleradores de rayos cósmicos.

Si la densidad de la nube es aproximadamente constante:

$$F_{\gamma} = \frac{1}{4\pi d^2} \int n(\vec{r}) \varepsilon_{\gamma}(\vec{r}) d^3r \quad \longrightarrow \quad F_{\gamma} \approx \frac{M_{\text{cl}}}{m_p} \frac{\varepsilon_{\gamma}}{4\pi d^2}$$

donde { hemos supuesto que la nube está formada principalmente por H y  $M_{\text{cl}}$  es la masa total irradiada por los rayos cósmicos.

# FUENTES PASIVAS: *DISCRETAS* (cont.)

Si  $\varepsilon_\gamma \approx K_s \varepsilon_{\gamma,0}$   $\rightarrow$   $F_\gamma \approx \frac{1}{4\pi d^2} K_s \varepsilon_{\gamma,0} \frac{M_{cl}}{m_p}$

Luego, podemos escribir

$$\frac{F_\gamma}{\text{phcm}^{-2} \text{s}^{-1}} \approx 10^{-9} \left( \frac{M_{cl}}{1000M_\odot} \right) \left( \frac{d}{\text{kpc}} \right)^{-2} K_s \left( \frac{\omega_{CR,0}}{\text{eV/cm}^3} \right) \eta_A$$

donde  $\eta_A \approx 1.5$  es un factor que tiene en cuenta la presencia en el medio de elementos más pesados que el H.

De esta ecuación vemos que si  $K_s \approx 1$  la mayoría de las nubes moleculares no serán detectables por instrumentos como EGRET (sensibilidad  $\sim 10^{-8} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) a menos que:

- 1) sean muy cercanos o
- 2) haya un acelerador cerca de tal forma que  $K_s > 1$

## FUENTES PASIVAS: *DISCRETAS* (cont.)

El caso  $K_s > 1$  se puede dar si la nube está cerca de un *acelerador de rayos cósmicos*, como puede ser un remanente de supernova o un microquasar.

En algunos casos el acelerador mismo puede ser una fuente de rayos  $\gamma$  (fuente activa).

Es interesante notar que hay una acumulación de fuentes de rayos  $\gamma$  en regiones de formación estelar conocidas como asociaciones OB.

En estas asociaciones hay

- objetos jóvenes que pueden acelerar partículas (púlsares, microquasares, remanentes de supernova)
- y nubes que pueden ofrecer blancos pasivos a las partículas relativistas que en estas regiones tienen una densidad de energía mayor que la usual ( $K_s \gg 1$ ).

Como los campos magnéticos en las nubes moleculares son mayores que en el medio interestelar, una vez que los rayos cósmicos penetran en ellos pueden quedar atrapados allí, con tiempos de difusión muy largos, lo que **aumenta la densidad de rayos cósmicos en su interior.**

# FUENTES ACTIVAS

Las **fuentes activas de rayos  $\gamma$**  son aquellas que son aceleradores eficientes de partículas relativistas y, al mismo tiempo, ofrecen campos adecuados para que estas partículas interactúen y emitan radiación.

Podemos dividir a las fuentes activas en dos grandes clases:



# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES*

Entre las **fuentes activas no-acretantes** podemos incluir a los púlsares aislados, los remanentes de supernova y los sistemas binarios de estrellas tempranas con vientos en colisión.

## FUENTES ACTIVAS NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

- PÚLSARES
- REMANENTES DE SUPERNOVA
- BINARIAS CON VIENTOS EN COLISIÓN

Todas estas fuentes son *galácticas*.

Entre las *extragalácticas* podemos mencionar:

## FUENTES ACTIVAS NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS

- GALAXIAS ERUPTIVAS (“STARBURSTS”)
- CÚMULOS DE GALAXIAS
- GALAXIAS NORMALES

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

Concentrémonos ahora en las fuentes galácticas no-acretantes.  
Discutiremos brevemente los casos de

- púlsares
- remanentes de supernova
- binarias tempranas

# FUENTES ACTIVAS:

***NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*** → ***PÚLSARES***

Hemos visto ya que los púlsares generan diferencias de potencial que permiten acelerar partículas hasta altas energías...

# PÚLSARES (repass)

Los **púlsares** son sistemas astrofísicos capaces de manifestar **grandes diferencias de potencial que permitan una aceleración electrostática de partículas cargadas**.

Fueron descubiertos en 1967 por Hewish and Bell (Hewish et al. 1968). Se trata de **estrellas colapsadas** donde la presión de la gravedad es sostenida por la presión de degeneración de los nucleones.

El tamaño típico de estas estrellas es de  $R_* \cong 10^6 \text{ cm}$

y su masa  $M_* \cong 1,4 M_\odot$

Esto hace que su densidad sea

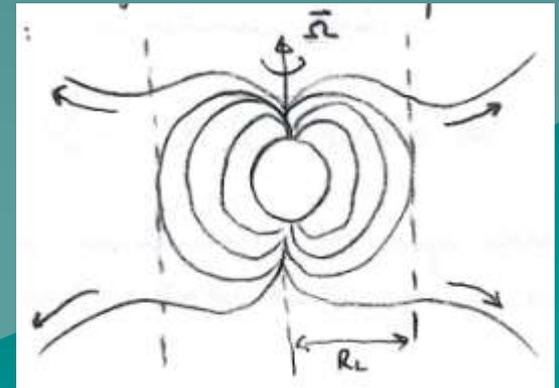
$$\rho_{\text{EN}} \approx \frac{M_*}{4/3\pi R_*^3} \approx \frac{1,4 \times 1,99 \times 10^{33} \text{ g}}{4/3\pi 10^{18} \text{ cm}^3} \approx 6,6 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$$

Al colapsar, las estrellas arrastran su campo magnético, por lo que las estrellas de neutrones resultantes están **magnetizadas y en rotación rápida**.



El **campo resultante** es **dipolar**:

Campo magnético superficial típico  $B \cong 10^{12} \text{ G}$



Principales características de los **púlsares**:

- pulsos de **períodos cortos** y muy estables
- **emisión en radio polarizada**

$$P = 2\pi / \Omega \cong 10^{-3} - 3 \text{ s}$$

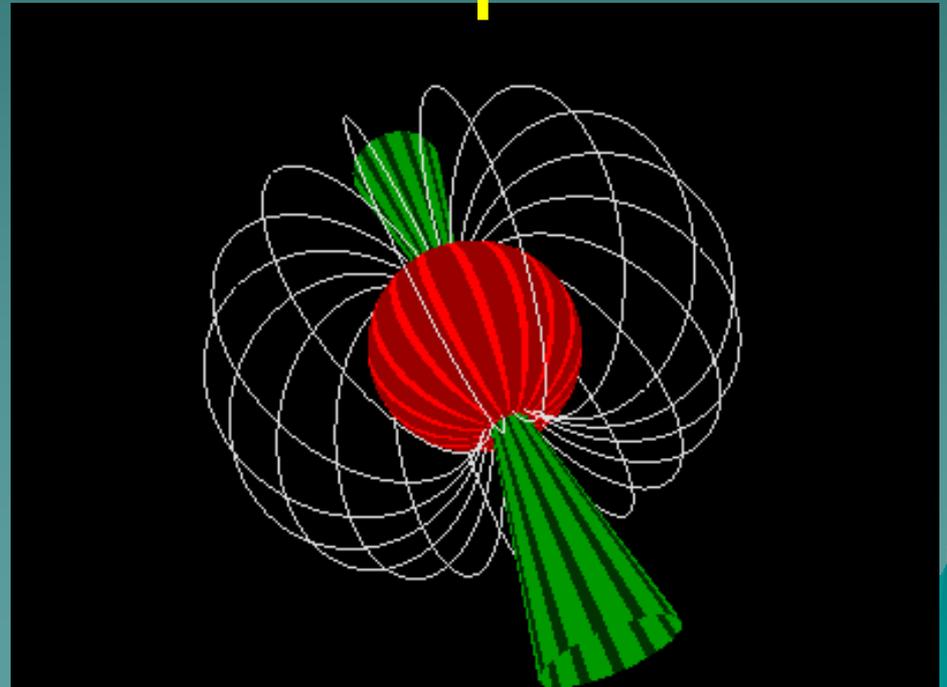
$\Omega$  Momento angular de rotación

Los **pulsos en radio** se observan cuando **el eje del campo magnético de la estrella** y su **eje de rotación** están **desalineados**.

Los pulsos se originan a partir de los haces de emisión en radio emitida a lo largo del eje magnético.

La velocidad con la cual **se modifica el período de los pulsos** puede usarse para derivar una **estimación de la edad del púlsar**.

↑ Eje de rotación



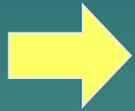
Si una esfera magnetizada rota, las cargas sobre ella experimentarán una **fuerza de Lorentz**

$$\vec{F} = \frac{e}{c} (\vec{v} \times \vec{B}), \quad \vec{v} = \vec{\Omega} \times \vec{r}$$

Estas fuerzas son muy fuertes y exceden ampliamente la fuerza de atracción gravitatoria

$$\frac{e}{c} (\vec{v} \times \vec{B}) / \left( \frac{G M m_e}{r^2} \right) \approx e \Omega r^3 / G M m_e \approx 10^{12}$$

→ Para el pulsar en “Crab nebula”



La estructura de la magnetosfera de la estrella de neutrones esta completamente **dominada por las fuerzas electromagnéticas**

Esto hará que las cargas se separen originando un campo eléctrico

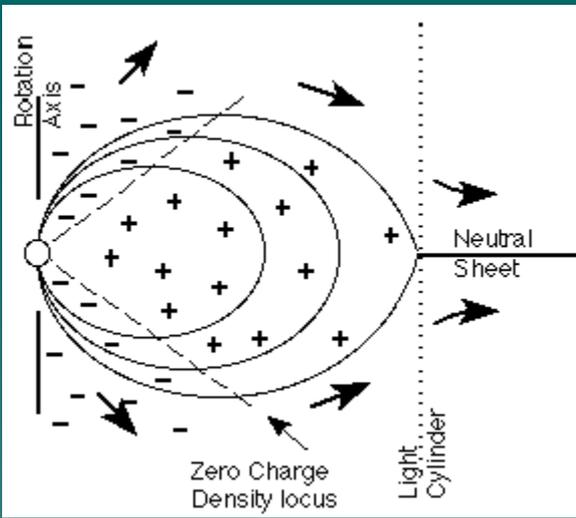
$$\vec{E} = -\frac{1}{c} (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \times \vec{B}$$



existe un plasma totalmente conductor rodeando a la estrella de neutrones, y las **corrientes eléctricas pueden fluir en la magnetosfera.**

Existe un cierto radio, llamado “**cilindro de luz**” o “**radio de corrotación**”, para el cual la velocidad de rotación del material que se mueve con la estrella de neutrones es igual a la velocidad de la luz

$$R_L = \frac{c}{\Omega} \approx 4,8 \times 10^9 \left[ \frac{P}{1s} \right] \text{cm}$$



- Dentro del cilindro de luz, las partículas cargadas están atadas a las líneas de campo magnético, las cuales están cerradas.
- Las líneas que se extienden más allá del cilindro de luz están abiertas, y las partículas arrancadas de los polos de la estrella de neutrones pueden escapar del sistema.

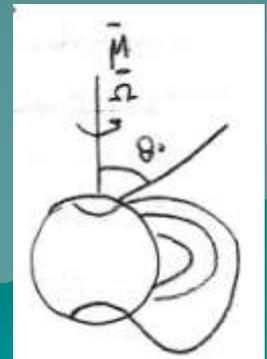
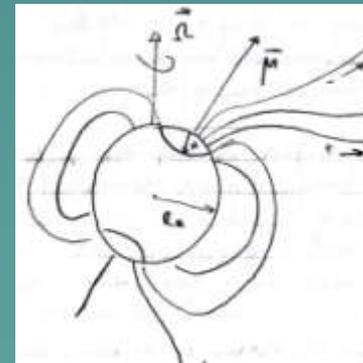
El potencial electrostático generado en la superficie  $r = R_*$  será:

$$V \approx E R_* = \frac{\Omega B R_*^2}{c} \approx 6 \times 10^{16} \left( \frac{B}{10^{12} \text{ G}} \right) \left( \frac{R_*}{10^6 \text{ cm}} \right) \left( \frac{P}{1 \text{ s}} \right)^{-1} \text{ V}$$



Las partículas arrancadas de la superficie y que se mueven por las líneas de campo pueden ser aceleradas hasta altas energías.

Como las partículas escapan del sistema a través de las líneas de campo abiertas, el flujo quedará determinado por  $r=a$ , donde  $a$  es el radio donde se originan las líneas abiertas.



Como las líneas de un dipolo quedan definidas por  $\text{sen}^2(\theta) / r = \text{cte}$

resulta que

$$\frac{\text{sen}^2(\theta_0)}{R_*} \cong \frac{1}{R_L} \quad \Rightarrow \quad \text{sen}(\theta_0) \cong \left( \frac{R_*}{R_L} \right)^{1/2}$$

Además, se tiene que

$$a \approx R_* \text{sen}(\theta_0) \quad \Rightarrow \quad a \cong \left( \frac{R_*^3}{R_L} \right)^{1/2} = \left( \frac{R_*^3 \Omega}{c} \right)^{1/2}$$

Así, el potencial electrostático generado en  $r=a$  es:

$$V = \frac{\Omega B a^2}{c} = \frac{\Omega^2 B R_*^3}{c^2}$$

$$V \approx 10^{13} \left( \frac{B}{10^{12} \text{ G}} \right) \left( \frac{R_*}{10^6 \text{ cm}} \right)^3 \left( \frac{P}{1 \text{ s}} \right)^{-2} \text{ V}$$

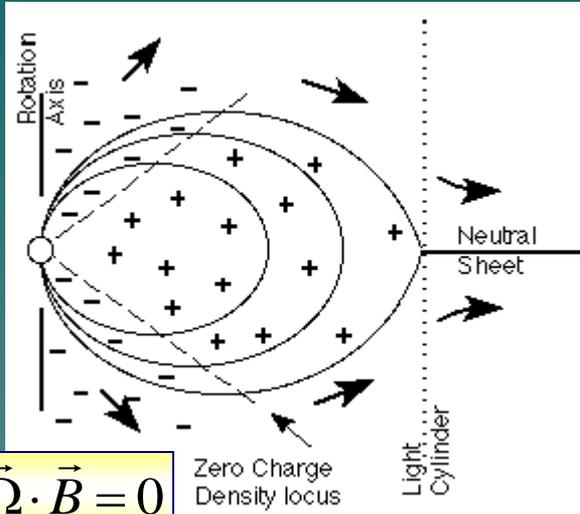
Por lo tanto, los púlsares pueden acelerar partículas hasta energías  $\sim 10^{13} \text{ eV} = 10 \text{ TeV}$ .

Si el púlsar es muy rápido,  $E_{\text{max}} \sim 10^{15-16} \text{ eV}$ .

El límite efectivo es seguramente menor que esta cantidad ya que las partículas sufrirán pérdidas radiativas durante el proceso de aceleración.

# FUENTES ACTIVAS:

## NO-ACRETANTES GALÁCTICAS → PÚLSARES



Si  $\vec{\Omega} \cdot \vec{B} < 0$  el campo eléctrico sobre el “*polar cap*” del pulsar se dirige siempre hacia afuera de la estrella.

A diferencia de los leptones, los **iones** pueden estar firmemente aferrados a la superficie formando una red cristalina.

En cambio, los **positrones** (creados cerca de la superficie de la estrella resultante, por ej., de la conversión de un rayo gamma de fondo) pueden ser libremente acelerados. Estos se mueven a lo largo de las líneas de campo sufriendo *pérdidas por radiación de curvatura*.

Si el *factor de Lorentz* de los positrones es  $\gamma$

donde  $R_c \approx 10^{4.9} \left( \frac{R_*}{1 \text{ cm}} \right)^{1/2} \left( \frac{P}{1 \text{ s}} \right)^{1/2} \text{ cm}$  es el **radio de curvatura**

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{2}{3} \frac{e^2}{m_e c^2} \left( \frac{c}{R_c} \right)^2 \gamma^4$$

# FUENTES ACTIVAS:

## NO-ACRETANTES GALÁCTICAS → PÚLSARES

Esta energía que pierden los positrones se emite como fotones  $\gamma$  (cont.) que inician una cascada electromagnética a través de la reacción:

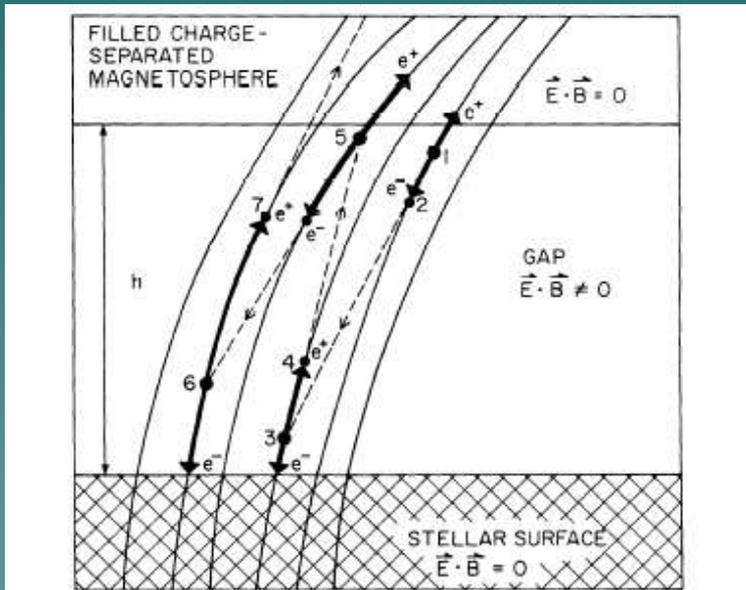
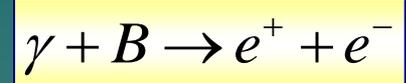


FIG. 3.—Breakdown of the polar gap. The solid lines are polar field lines of average radius of curvature  $\rho$ ; for a pure dipole field  $\rho \sim (Rc/\Omega)^{1/2} \sim 10^8 P^{1/2}$  cm, but for a realistic pulsar one expects  $\rho \sim 10^6$  cm if many multipoles contribute near the surface. A photon (of energy  $> 2 mc^2$ ) produces an electron-positron at 1. The electric field of the gap accelerates the positron out of the gap and accelerates the electron toward the stellar surface. The electron moves along a curved field line and radiates an energetic photon at 2 which goes on to produce a pair at 3 once it has a sufficient component of its momentum perpendicular to the magnetic field. This cascade of pair production—acceleration of electrons and positrons along curved field lines—curvature radiation—pair production results in a “spark” breakdown of the gap.

Los **positrones** son acelerados a su vez hacia afuera del púlsar por el campo eléctrico del gap, produciendo nuevos fotones  $\gamma$  y más pares  $e^\pm$ .

Los **electrones** son acelerados hacia la superficie donde impactan produciendo un calentamiento que resulta en la **emisión de rayos X**.

Esquema de la situación.

# FUENTES ACTIVAS:

## NO-ACRETANTES GALÁCTICAS → PÚLSARES

(cont.)

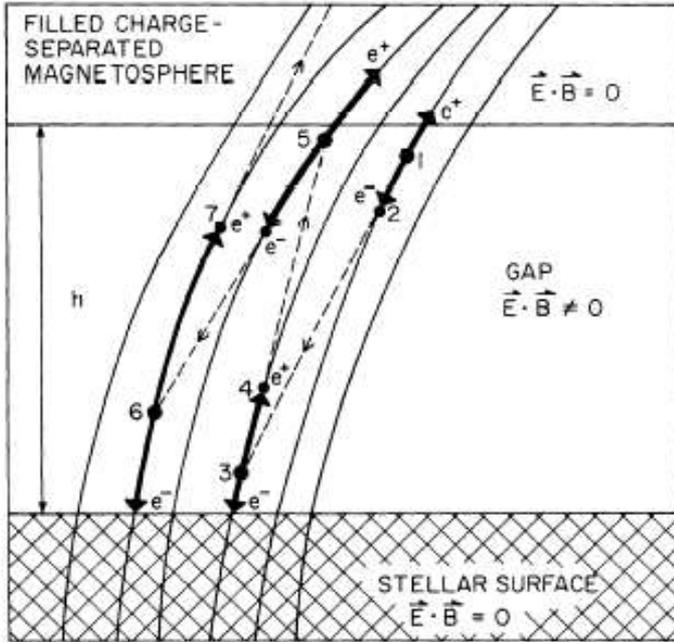


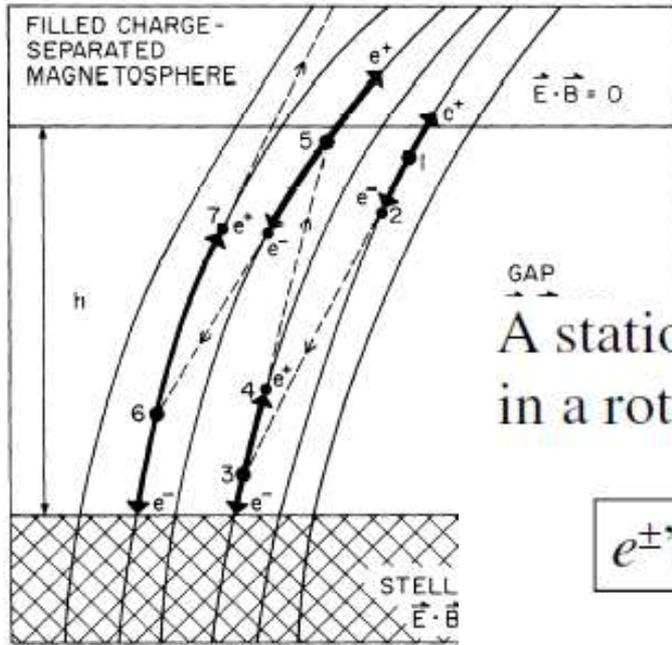
FIG. 3.—Breakdown of the polar gap. The solid lines are polar field lines of average radius of curvature  $\rho$ ; for a pure dipole field  $\rho \sim (Rc/\Omega)^{1/2} \sim 10^8 P^{1/2}$  cm, but for a realistic pulsar one expects  $\rho \sim 10^6$  cm if many multipoles contribute near the surface. A photon (of energy  $> 2 mc^2$ ) produces an electron-positron at 1. The electric field of the gap accelerates the positron out of the gap and accelerates the electron toward the stellar surface. The electron moves along a curved field line and radiates an energetic photon at 2 which goes on to produce a pair at 3 once it has a sufficient component of its momentum perpendicular to the magnetic field. This cascade of pair production—acceleration of electrons and positrons along curved field lines—curvature radiation—pair production results in a “spark” breakdown of the gap.

La interacción de estos rayos X generados por los electrones que impactan en la superficie de la estrella, con los fotones producidos por los electrones al moverse hacia el púlsar sobre las líneas de campo da lugar a pares sobre la superficie, de donde salen los positrones originalmente acelerados.

# FUENTES ACTIVAS:

***NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*** → ***PÚLSARES***

(cont.)



A stationary, self-sustained pair-production cascade in a rotating NS magnetosphere:

$e^\pm$ 's are accelerated by  $E_{\parallel}$

Relativistic  $e^+/e^-$  emit  $\gamma$ -rays via synchro-curvature, and IC processes

$\gamma$ -rays collide with soft photons/B to materialize as pairs in the accelerator

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS* → *PÚLSARES*

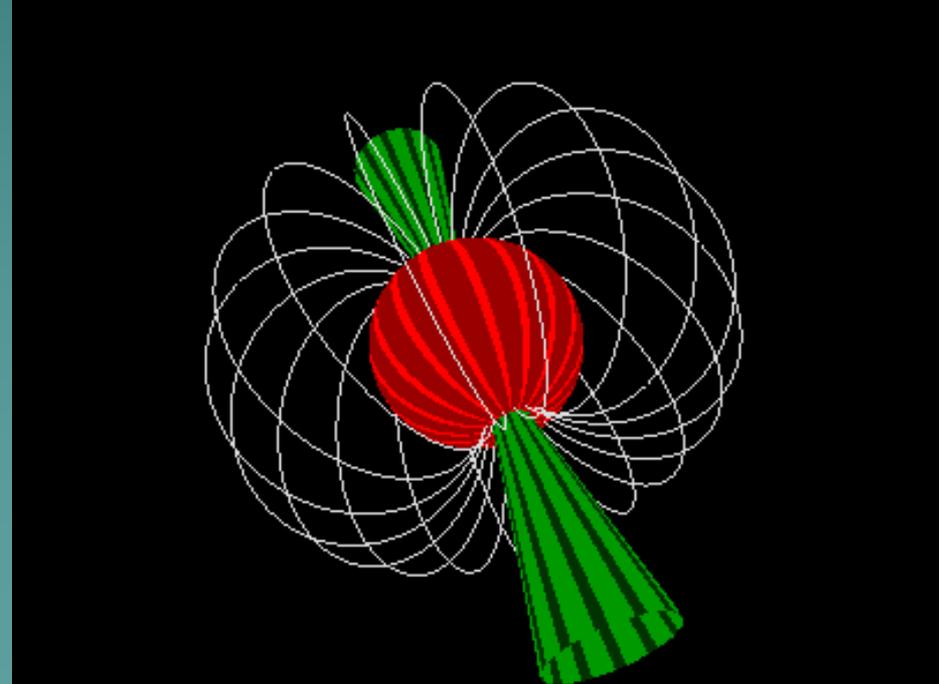
(cont.)

Los rayos  $\gamma$  finalmente escapan formando un cono con centro en el momento dipolar magnético  $\vec{\mu}$ .

Como el púlsar está en rotación, si  $\vec{\Omega}$  no es paralelo a  $\vec{\mu}$   
→ la *emisión aparece pulsada* en el sistema del observador.

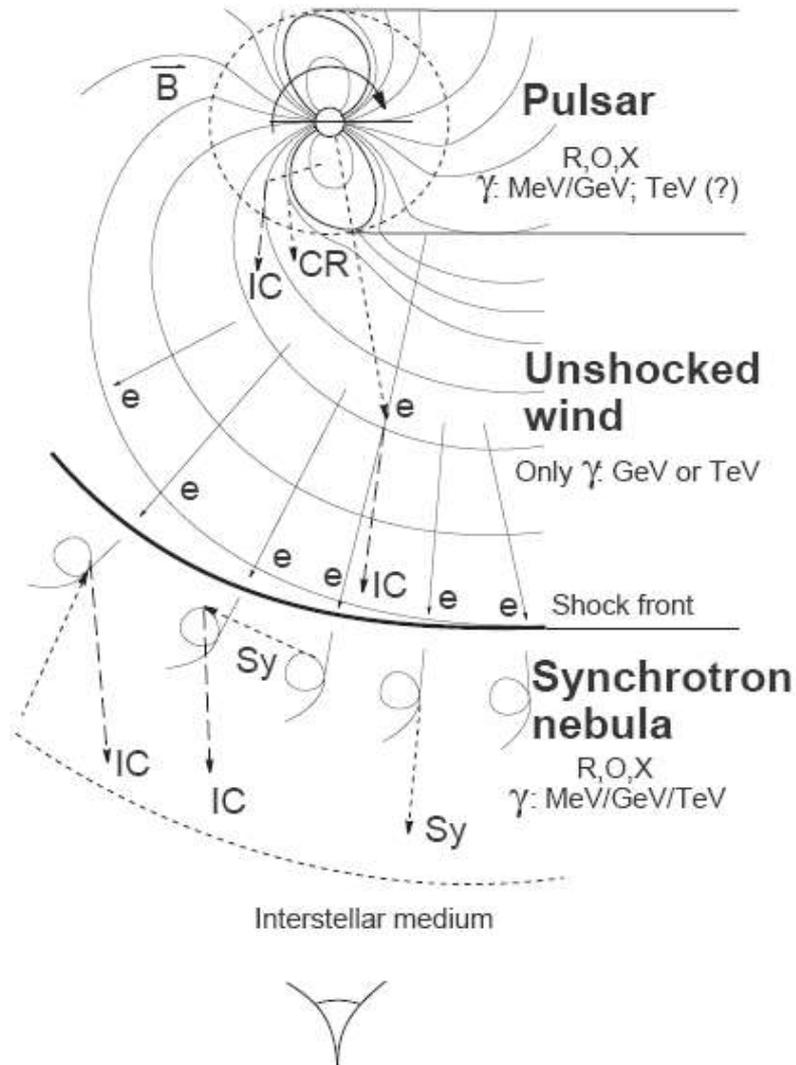
El período de pulsación es igual al período de rotación  $P$ .

Además de esta emisión *no isotrópica*, puede haber emisión de rayos  $\gamma$  en el **viento del pulsar** y en la llamada **nebulosa sincrotrón**.



# PÚLSARES

Radiation from a **Pulsar-wind-nebula** complex



Existen tres regiones de radiación no-térmica asociadas con la emisión por pérdida de energía rotacional en una estrella de neutrones.

- 1) La *primera* región corresponde al **pulsar y su magnetosfera**, hasta el cilindro de luz. Esta emisión es periódica (pulsada).
  - 2) La *segunda* región corresponde al **viento del pulsar**, cuya emisión es debida principalmente a dispersiones Compton inverso de los electrones relativistas.
  - 3) Por *último* la **nebulosa sincrotrón**, donde las partículas son re-aceleradas en el choque entre el viento y el medio interestelar.
- (Aharonian & Bogovalov, 2003)

# FUENTES ACTIVAS:

## NO-ACRETANTES GALÁCTICAS → PÚLSARES (cont.)

Los diferentes telescopios del satélite Compton han identificado 7 púlsares que emiten en rayos  $\gamma$ , y hay varios candidatos más.

Tabla con las principales características de estos objetos.

Nombre	P (s)	$\tau$ (Ky)	$\dot{E}$ (erg/s)	$F_E$ (erg/cm <sup>2</sup> s)	d (kpc)	$L_{HE}$ (erg/s)	$\eta$ (E>1 eV)
Crab	0.033	1.3	$4.5 \times 10^{38}$	$1.3 \times 10^{-8}$	2.0	$5.0 \times 10^{35}$	0.001
B1509-58	0.150	1.5	$1.8 \times 10^{37}$	$8.8 \times 10^{-10}$	4.4	$1.6 \times 10^{35}$	0.009
Vela	0.089	11	$7.0 \times 10^{36}$	$9.9 \times 10^{-9}$	0.3	$8.6 \times 10^{33}$	0.001
B1706-44	0.102	17	$3.4 \times 10^{36}$	$1.3 \times 10^{-9}$	2.3	$6.6 \times 10^{34}$	0.019
B1951+32	0.040	110	$3.7 \times 10^{36}$	$4.3 \times 10^{-10}$	2.5	$2.5 \times 10^{34}$	0.007
Geminga	0.237	340	$3.3 \times 10^{34}$	$3.9 \times 10^{-9}$	0.16	$9.6 \times 10^{32}$	0.029
B1055-52	0.197	530	$3.0 \times 10^{34}$	$2.9 \times 10^{-10}$	0.72	$1.4 \times 10^{33}$	0.048
B1046-58	0.124	20	$2.0 \times 10^{36}$	$3.7 \times 10^{-10}$	2.7	$2.6 \times 10^{34}$	0.013
B0656+14	0.385	100	$4.0 \times 10^{34}$	$1.6 \times 10^{-10}$	0.3	$1.3 \times 10^{32}$	0.003
J0218+4232	0.002	460,000	$2.5 \times 10^{35}$	$9.1 \times 10^{-11}$	2.7	$6.4 \times 10^{33}$	0.026

- eficiencia en la producción de rayos  $\gamma$   $\eta$

- la edad del pulsar  $\tau$

- su distancia  $d$

- el flujo de energía medido en la Tierra  $F_E$

- la luminosidad a altas energías  $L_{HE}$

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS* *PÚLSARES (cont.)*

En la Tabla vemos que los períodos están comprendidos entre 0.033 seg. (Crab) y 0.237 seg. (Geminga).

Las luminosidades en rayos  $\gamma$  pueden llegar, como en el caso de Crab, a  $5 \times 10^{35}$  erg s<sup>-1</sup>.

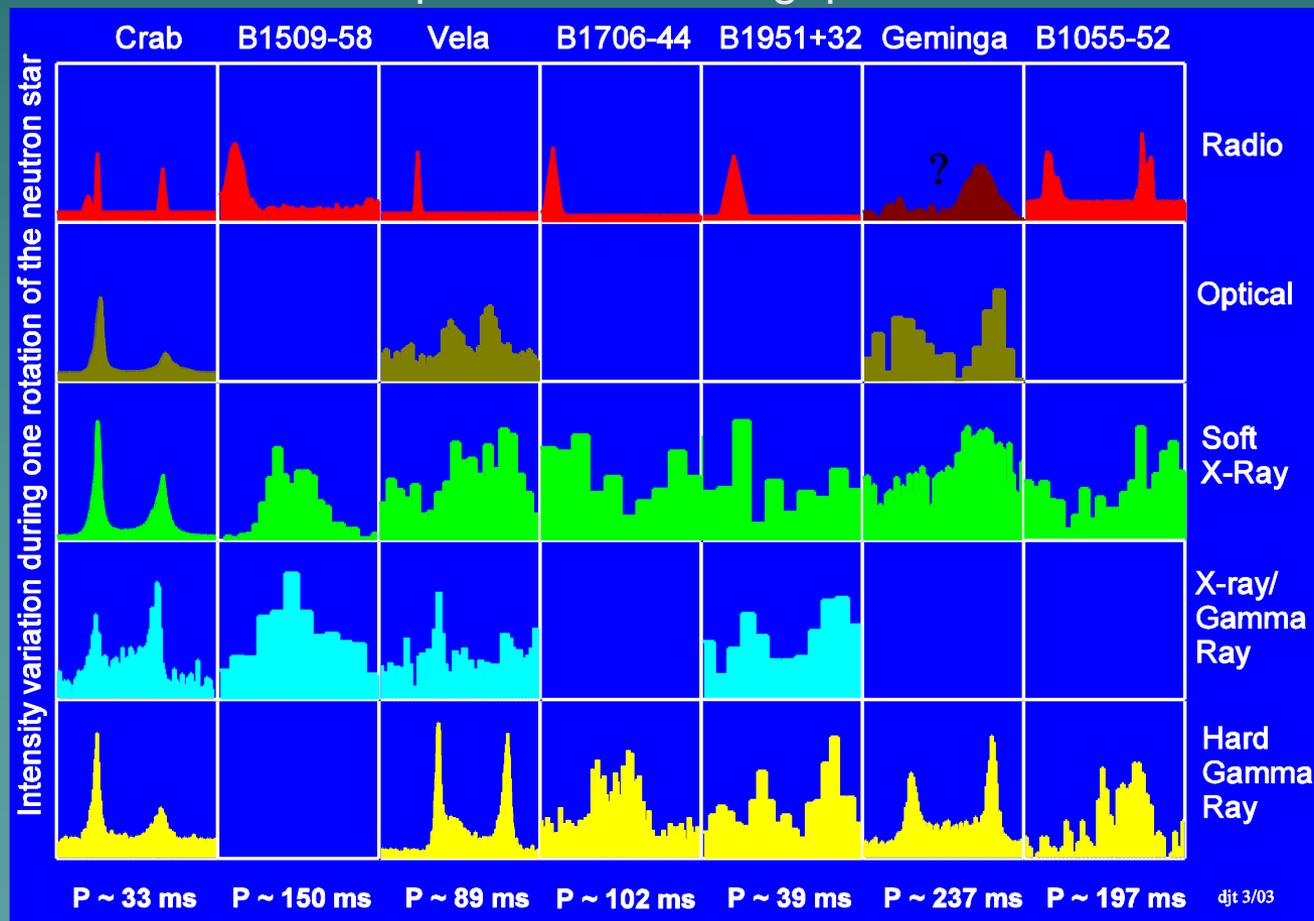
Nombre	P (s)	$\tau$ (Ky)	$\dot{E}$ (erg/s)	$F_E$ (erg/cm <sup>2</sup> s)	d (kpc)	$L_{HE}$ (erg/s)	$\eta$ (E>1 eV)
Crab	0.033	1.3	$4.5 \times 10^{38}$	$1.3 \times 10^{-8}$	2.0	$5.0 \times 10^{35}$	0.001
B1509-58	0.150	1.5	$1.8 \times 10^{37}$	$8.8 \times 10^{-10}$	4.4	$1.6 \times 10^{35}$	0.009
Vela	0.089	11	$7.0 \times 10^{36}$	$9.9 \times 10^{-9}$	0.3	$8.6 \times 10^{33}$	0.001
B1706-44	0.102	17	$3.4 \times 10^{36}$	$1.3 \times 10^{-9}$	2.3	$6.6 \times 10^{34}$	0.019
B1951+32	0.040	110	$3.7 \times 10^{36}$	$4.3 \times 10^{-10}$	2.5	$2.5 \times 10^{34}$	0.007
Geminga	0.237	340	$3.3 \times 10^{34}$	$3.9 \times 10^{-9}$	0.16	$9.6 \times 10^{32}$	0.029
B1055-52	0.197	530	$3.0 \times 10^{34}$	$2.9 \times 10^{-10}$	0.72	$1.4 \times 10^{33}$	0.048
B1046-58	0.124	20	$2.0 \times 10^{36}$	$3.7 \times 10^{-10}$	2.7	$2.6 \times 10^{34}$	0.013
B0656+14	0.385	100	$4.0 \times 10^{34}$	$1.6 \times 10^{-10}$	0.3	$1.3 \times 10^{32}$	0.003
J0218+4232	0.002	460,000	$2.5 \times 10^{35}$	$9.1 \times 10^{-11}$	2.7	$6.4 \times 10^{33}$	0.026

# The Seven Highest-Confidence Gamma-ray Pulsars

Pulsos de la emisión, a diferentes longitudes de onda.

Como puede verse, en rayos  $\gamma$  es común una estructura doble del pulso que puede deberse a

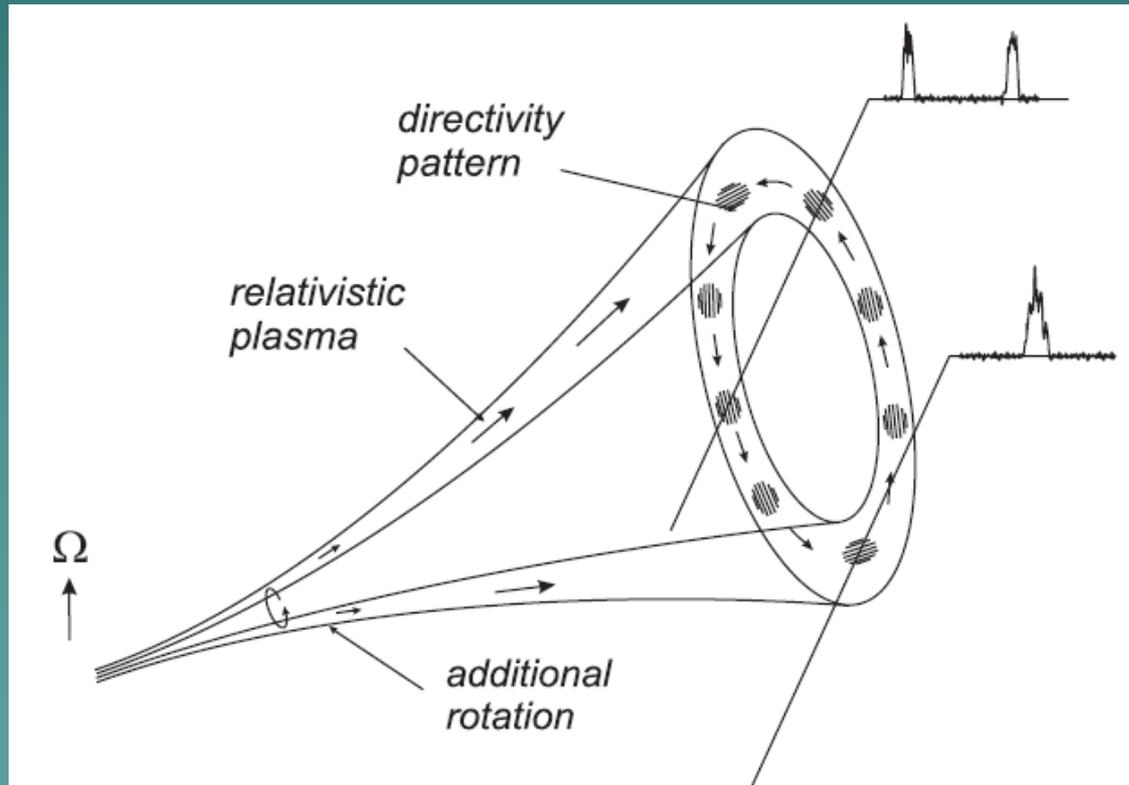
- un efecto de apantallamiento de la radiación dentro del cono de emisión en el *polar cap*
- o a efectos asociados a la presencia de un gap exterior.



# The “Hollow Cone” Model

Secondary particle generation is impossible in rectilinear magnetic field.

In central regions of open magnetic lines, a decrease in secondary plasma density should be expected because the intensity of the curvature radiation is low.



We should expect a single mean profile in pulsars whose line of sight intersects the directivity pattern far from its center and the double profile for the central passage.

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS* → *PÚLSARES*

(cont.)

El **pulsar Geminga** fue descubierto primero como una fuente de rayos  $\gamma$  no identificada y mucho después *se hallaron pulsos en su emisión*.

La existencia de estas **pulsaciones** indica que la fuente es un objeto **compacto en rotación**. Sobre escalas de tiempo largas, sin embargo, los púlsares *no parecen ser variables*. Por ello se los suele usar como población de comparación para estudiar la variabilidad de otras fuentes de rayos  $\gamma$ .

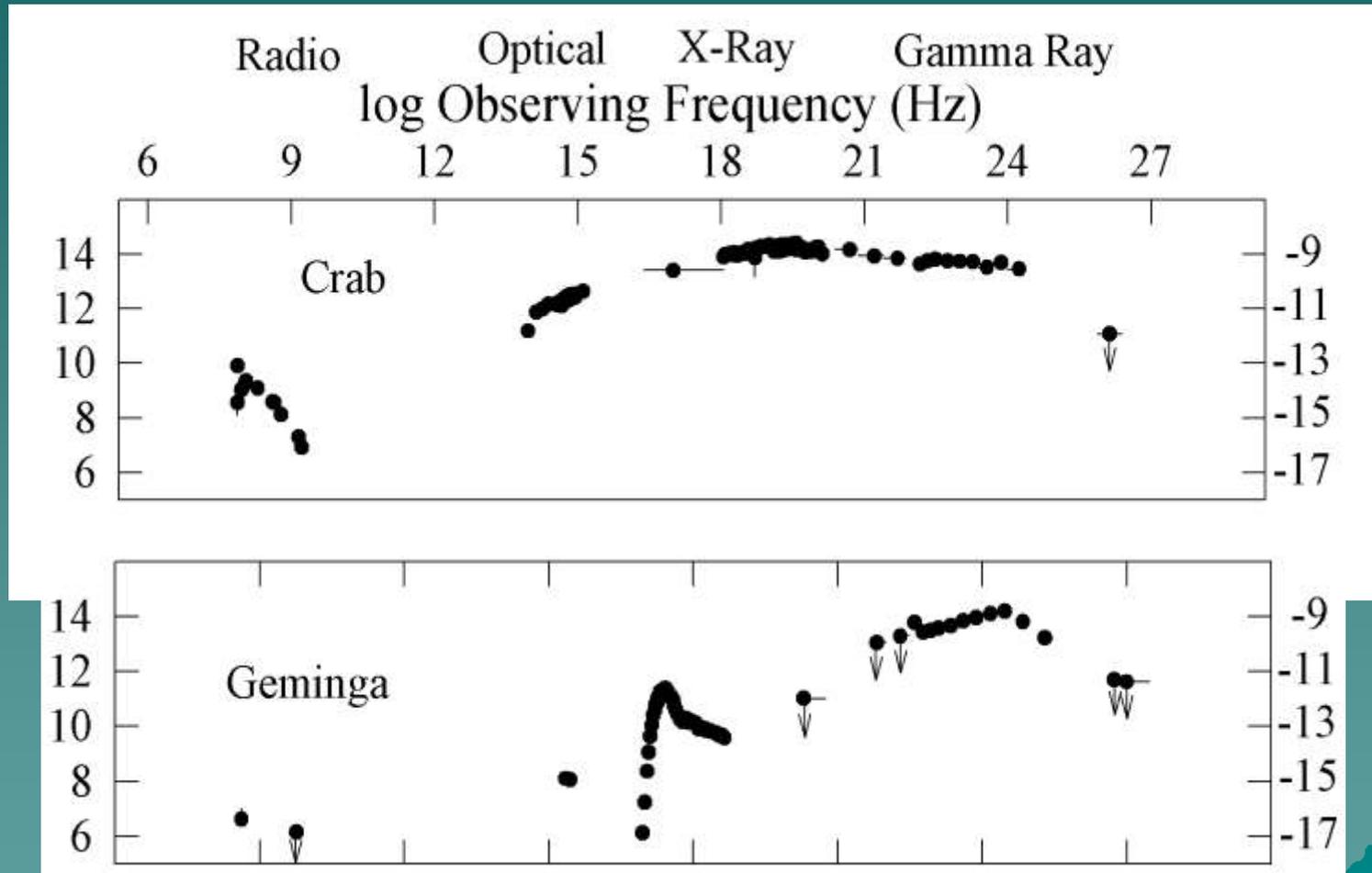
Los espectros de los púlsares de rayos  $\gamma$  muestran diferentes contribuciones:

- emisión **no-térmica** de origen coherente en **radio**,
- emisión de **rayos X térmica**, proveniente de la superficie, y
- emisión **no-térmica incoherente en rayos  $\gamma$** .

La mayor parte de la luminosidad es producida en rayos  $\gamma$ .

# Pulsars

## Multiwavelength Spectra



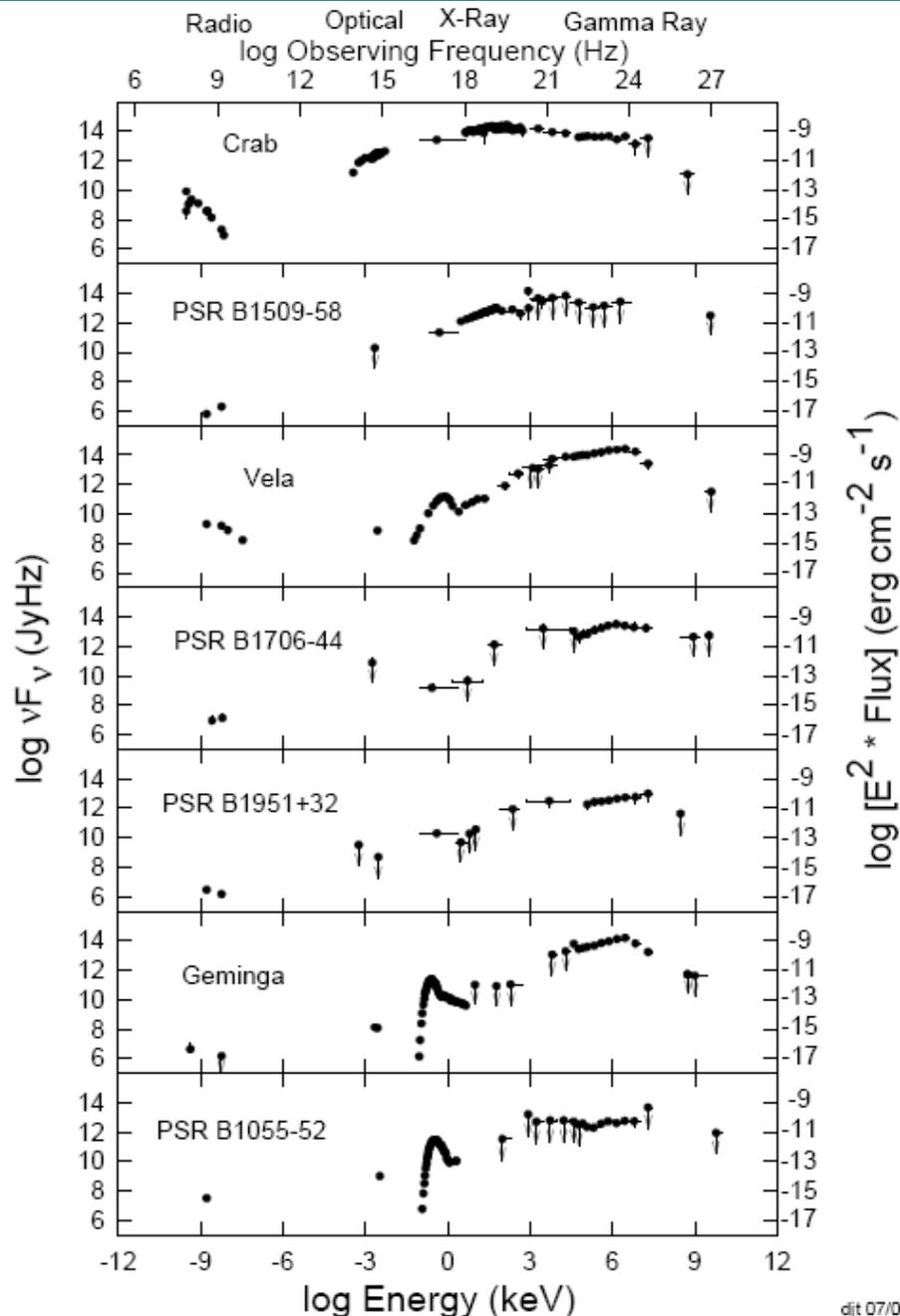
Very different from blazar spectra. Multiple emission components are visible.

# Pulsars Multiwavelength Spectra

Tiene espectro plano y son emisores constantes sobre largos períodos de tiempo, y su emisión gamma es mucho menor que la pérdida de energía rotacional.

Sobre una gran parte del espectro la emisión es caracterizada por una ley de potencias.

Todos tienen un corte en energías de rayos gamma en el rango de GeV-TeV.



# Crab Nebula Pulsar

Pulsar de 33 ms ubicado en la **Nebulosa del Cangrejo (Crab Nebula)** en la constelación Taurus, formada a partir de una explosión de supernova tipo II.

Siendo relativamente joven, el Crab Nebula Pulsar fue el primer ejemplo conocido de una estrella de neutrones ubicada dentro de un objeto ópticamente visible.

El **pulsar wind nebula** (“**pleriión**”) es una nebulosa generada por viento relativista de partículas eyectadas por el pulsar. La emisión del pleriión resulta de la **radiación sincrotrón** de las partículas de alta energía inyectadas por el pulsar en presencia de un fuerte campo magnético.



Imagen compuesta de la Crab Nebula en rayos-X (azul), y óptico (rojo).

Las **estructuras tipo anillo emiten en rayos X** por mecanismo sincrotrón en el campo magnético ambiente.

## Crab Nebula Pulsar

As the young pulsar slows down, large amounts of energy are injected into its surroundings. In particular, a high-speed wind of matter and anti-matter particles plows into the surrounding nebula, creating a **shock wave that forms the expanding ring seen.**

**Jets from the poles of the pulsar spew X-ray emitting matter and antimatter particles in a direction perpendicular to the ring.**



The goal of these latest Chandra observations was to pinpoint the location of remarkable **gamma-ray flares observed by NASA's Fermi Gamma Ray Observatory and Italy's AGILE Satellite.** A strong gamma-ray flare was observed from the Crab in September 2010, followed by an even stronger series of "superflares" in April 2011. The gamma-ray observatories were not able to locate the source of the flares within the nebula, but it was hoped that Chandra, with its high-resolution images, would.

Chandra began observing the Crab on monthly intervals beginning six days after the discovery of the gamma-ray flare in September 2010.

## Crab Nebula Pulsar



When Fermi scientists saw that more flaring activity was beginning in April 2011, a pre-planned set of five Chandra observations was initiated. Two of these observations were made when strong gamma-ray flares occurred, but no clear evidence was seen for correlated flares in the Chandra images.

The Chandra data provide strong constraints on the behavior, at relatively low energies, of the particles that have been accelerated to produce the gamma-ray flares. Another possible explanation follows if the gamma-ray flaring occurred in regions very close to the pulsar. Then they would have been missed by Chandra, because the Crab pulsar is so bright that the detectors are in essence "overexposed" so variations from that region cannot be observed.

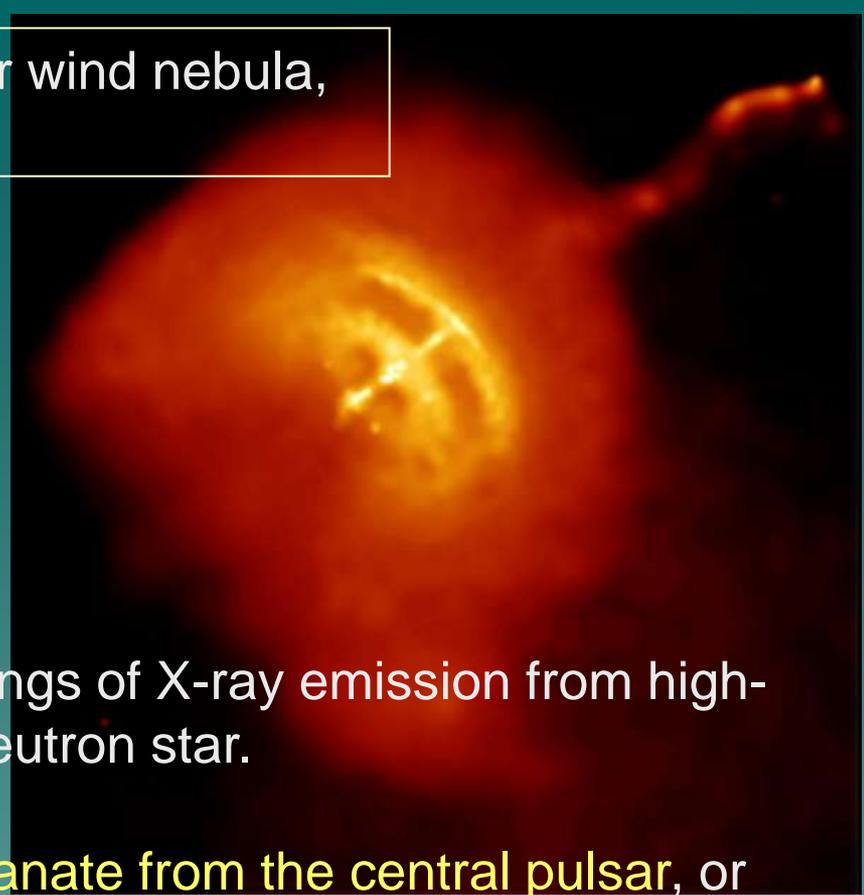
The Vela Pulsar and its surrounding pulsar wind nebula, Chandra X-Ray image.

Chandra image of compact nebula around Vela pulsar. The image shows a dramatic **bow-like structure at the leading edge** of the cloud, or nebula, embedded in the Vela supernova remnant.

This bow and the smaller one inside it, are thought to be the near edges of tilted rings of X-ray emission from high-energy particles produced by the central neutron star.

**Perpendicular to the bows are jets that emanate from the central pulsar, or neutron star.** The jets point in the same direction as the motion of the pulsar. The swept back appearance of the nebula is due to the motion of the pulsar through the supernova remnant.

The rings are thought to represent shock waves due to matter rushing away from the neutron star. More focused flows at the neutron star's polar regions produce the jets. The origin of this activity is thought to be enormous electric fields caused by the combination of the rapid rotation and intense magnetic fields of the neutron star.



Prior to the launch of Fermi, gamma-ray pulsations were only detected from pulsars previously discovered using radio or X-ray telescopes.

Radio telescopes can detect pulsars only if one of the narrow radio beams is directly aimed at the telescope; otherwise the pulsar can remain hidden.

A pulsar's radio beams represent only a few parts per million of its total power, whereas its gamma rays account for 10 percent or more.

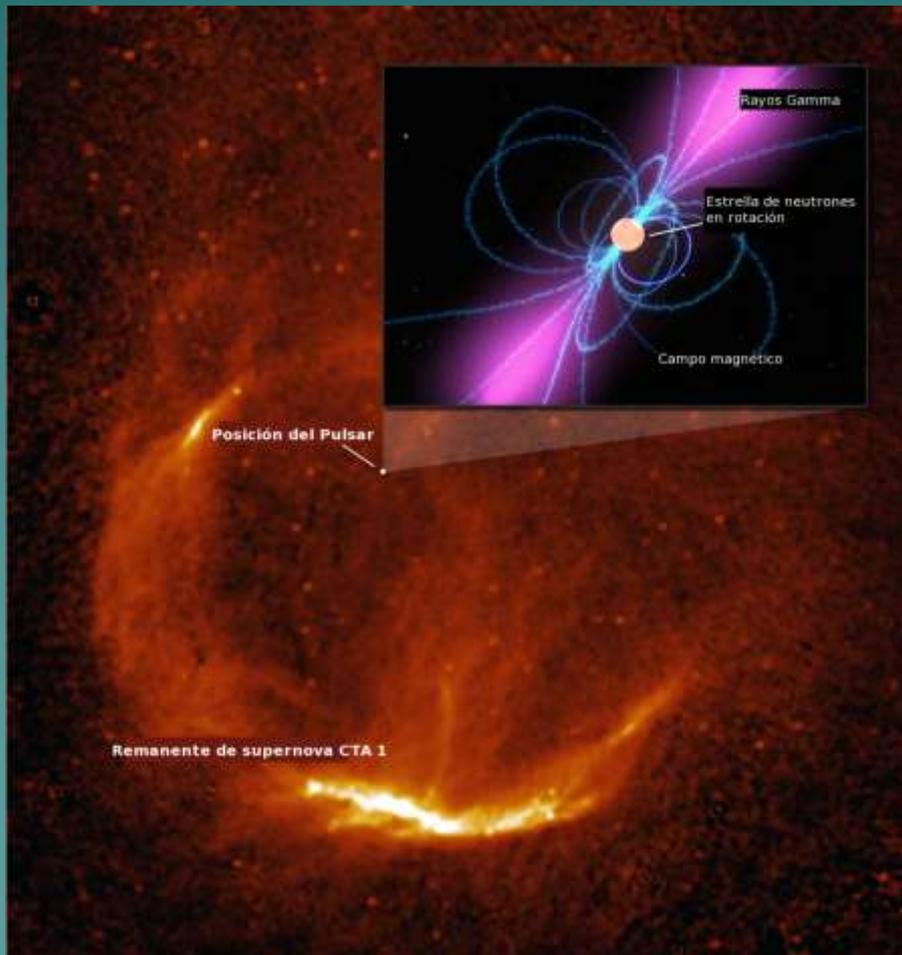
The much broader gamma-ray beams allowed the new pulsars to be discovered as part of a comprehensive search for periodic gamma-ray emission using Fermi LAT data and new computational techniques.

The Large Area Telescope (*Fermi*/LAT, hereafter LAT), the primary instrument on the *Fermi Gamma-ray Space Telescope* (*Fermi*) mission, is an imaging, wide field-of-view, high-energy -ray telescope, covering the energy range from **below 20 MeV to more than 300 GeV**.



The LAT was built by an international collaboration with contributions from space agencies, high-energy particle physics institutes, and universities in France, Italy, Japan, Sweden, and the United States.

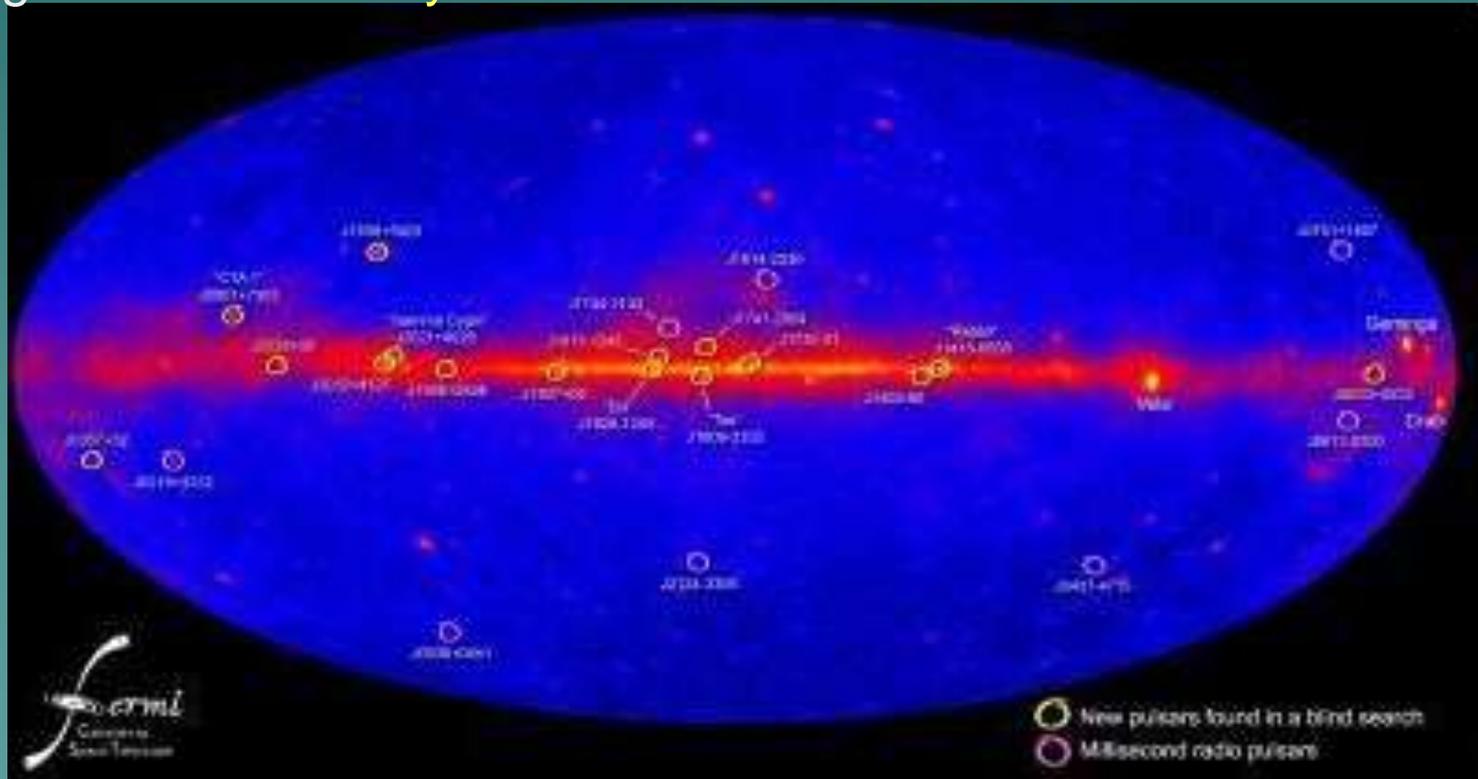
The first major discovery of Fermi came when the space telescope detected a pulsar in the CTA 1 supernova remnant that appeared to emit radiation in the gamma ray bands only, a first for its kind. This new pulsar sweeps the earth every 316.86 milliseconds and is about 4,600 light years away.



El pulsar no se ubica en el centro del remanente de la supernova que lo rodea, CTA 1

The newly discovered pulsars, with rotation periods that range from 48 to 444 milliseconds, help reveal the geometry of emission from rotation-powered pulsars and provide valuable information on population statistics.

In two studies published in the July 2 edition of Science Express (2009), international teams have analyzed gamma-rays from two dozen pulsars, including **16 discovered by Fermi**.



Newly found pulsars (circled in yellow) and millisecond pulsars (circled in magenta) by Fermi Gamma-ray Space Telescope

NOVEDAD (7/10/11): Un grupo internacional de científicos ha encontrado el púlsar de milisegundos más joven conocido que, además, posee una fuerza magnética muy superior a la de cualquier púlsar de este tipo. De hecho, los expertos creían erróneamente que su brillo provenía de la suma de cientos de púlsares. También es el segundo que gira más rápido y el más alejado de la Tierra que se ha visto en rayos gamma.

Desde que se puso en órbita el telescopio espacial de rayos gamma Fermi, el 11 de junio de 2008, ha detectado poblaciones enteras de objetos nunca antes vistos. Un hallazgo de Fermi afecta al **púlsar J1823-3021A**, avistado en 1994 con el radiotelescopio Lovell, en Inglaterra. Un equipo internacional de expertos se ha dado cuenta de que esta estrella pulsante emite rayos gamma y gracias a Fermi ha podido caracterizar sus inusuales propiedades. Los resultados de su investigación se publican en el último número de Science. El dato que más sorprende a los investigadores es su brillo. “Las emisiones de rayos gamma de uno de los cúmulos globulares de la Vía Láctea, llamado NGC 6624, nos hacían pensar que este albergaba 100 púlsares de milisegundo diferentes. Pero ahora hemos descubierto que todo viene de este único púlsar”, desvela a SINC Paulo Freire, investigador del Instituto Max-Planck de Radioastronomía en Alemania.

NOVEDAD (7/10/11)- cont.: El brillo tan intenso que desprende revela que su campo magnético es mucho más fuerte de lo que los astrónomos creían posible para un pulsar de este tipo. “Quizá tendremos que cambiar las teorías de formación de púlsares de milisegundo tras este descubrimiento, que ayudará a entender cómo se forman estos objetos en el universo”, explica Freire.

Además, su período de rotación confirmó a los expertos que se trata de un pulsar de milisegundo ya que gira sobre sí mismo más de 183 veces por segundo.

“No es el más rápido que se conoce. Existe otro en el cúmulo globular Terzan 5 que gira más de 716 veces por segundo”, apunta Freire. Además, la detección en rayos gamma indica a los investigadores que está perdiendo energía a un ritmo mucho mayor que otros púlsares parecidos.

Debido al ritmo al que está cambiando su velocidad de rotación, los científicos pueden saber que es el más joven de todos los púlsares de milisegundo conocidos. Freire comenta que “tiene ‘solamente’ 25 millones de años. Si consideramos que los demás púlsares están en edades adultas, este tendría pocos meses de edad”.

NOVEDAD (7/10/11)- cont.: Se calcula que está situado a 27.000 años luz de la Tierra “porque se ubica en el centro del cúmulo globular NGC 6624, del cual sí conocemos la distancia a la que se encuentra”, aclara Freire.

El investigador añade que pese a que tampoco es el pulsar más lejano descubierto hasta ahora, sí es el más lejano que se ha visto en rayos gamma, un dato “que nos dice que tiene que ser un objeto extremadamente brillante”.

Respecto a su tamaño, los científicos calculan que mide aproximadamente 12 kilómetros de radio y posee una masa medio millón de veces superior a la de la Tierra. “Estas cifras nos revelan que su densidad es de cientos de millones de toneladas por centímetro cúbico. Necesita ser así de denso para poder girar a esa velocidad”, explica Freire.

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS



## REMANENTES DE SUPERNOVAS

Los remanentes de supernova pueden acelerar partículas cargadas hasta velocidades relativistas por medio del mecanismo de Fermi.

Se trata de un proceso de aceleración difusivo que lleva a una ley de potencia en la distribución de las partículas:

$$n(E) dE = K E^{-\Gamma} dE [\text{cm}^{-3}]$$

El flujo isotrópico de estas partículas es:

$$I(E) = \frac{c n(E)}{4\pi} [\text{cm}^{-2} \text{erg}^{-1} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}]$$

Estas partículas, ya sean electrones o protones, pueden interaccionar con el material barrido por la explosión de supernova produciendo rayos  $\gamma$ .

Consideremos un remanente de unos 10 pc de radio que se expande en un medio que originalmente tenía una densidad  $n = 0.1 \text{ cm}^{-3}$ .

El material desplazado por la onda de choque será:

$$N = \frac{4}{3} \pi R^3 n \approx \frac{4}{3} \pi (3 \times 10^{19})^3 0.1 = 10^{59} \text{ partículas}$$

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REMANENTES DE SUPERNOVAS (cont.)

Si se trata de un medio formado por H:

$$M \approx N m_p \approx 10^{59} 1.67 \times 10^{-24} \text{ g} \approx 2 \times 10^{-35} \text{ g} \approx 100 M_\odot$$

Si el remanente está a una distancia  $d$ :

$$F_{\pi^0 \rightarrow 2\gamma}(E > 100 \text{ MeV}) \approx 10^{-10} \left( \frac{M}{100 M_\odot} \right) \left( \frac{d}{\text{Kpc}} \right) \kappa_s \text{ [phcm}^{-2} \text{ s}^{-1}]$$

Vemos que para un remanente a 2 Kpc necesitamos  $\kappa_s > 200$  a fin de que sea detectable por un instrumento como EGRET.

Si el remanente, por el contrario, se encuentra en un medio denso ( $n > 1 \text{ cm}^{-3}$ ), está en interacción con alguna nube molecular o es muy cercano, puede ser detectable.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REMANENTES DE SUPERNOVAS (cont.)*

Un ejemplo de remanente con emisión  $\gamma$  de posible origen hadrónico es RX J1713-39, detectado por EGRET, CANGAROO III y HESS.

En remanentes no muy fuertes en radio (emisión producida por la radiación sincrotrón de leptones relativistas), se espera en general que la emisión de origen hadrónico domine sobre el Bremsstrahlung relativista.

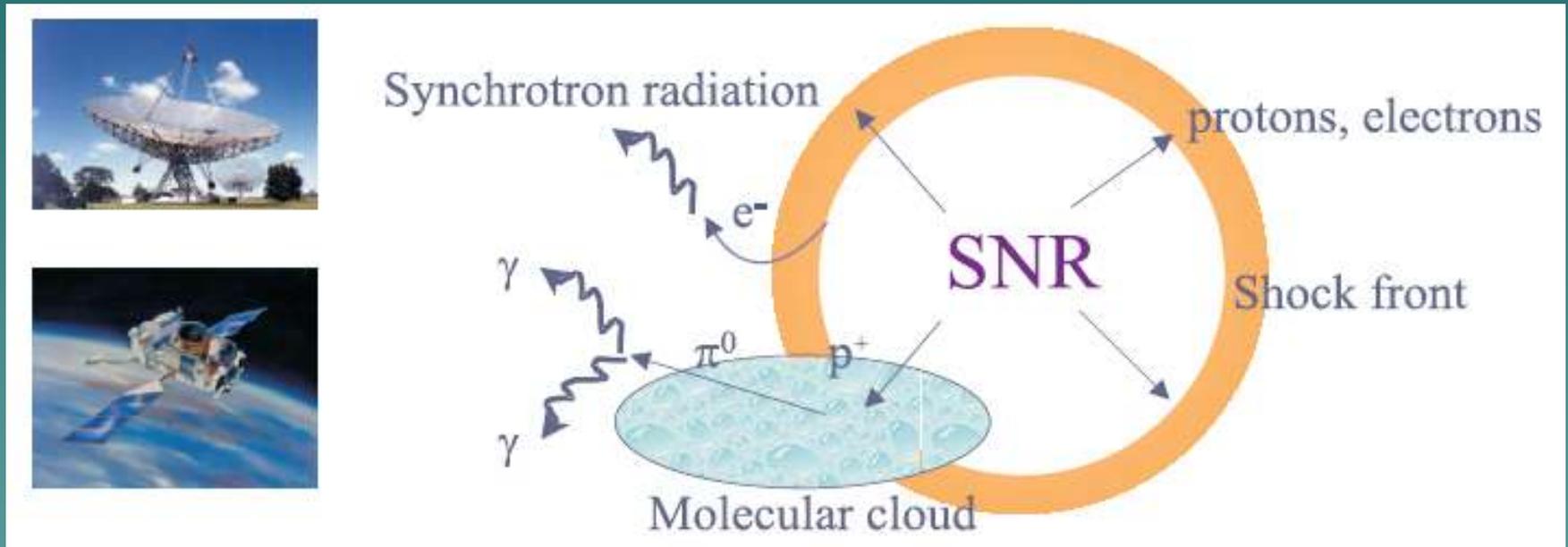
Por otro lado, en remanentes jóvenes, con alta densidad de rayos cósmicos que se expanden en un medio no muy denso **la interacción Compton inversa con fotones de 2.7 K puede ser dominante.**

Este parece ser el caso de SN 1006.

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REMANENTES DE SUPERNOVAS (cont.)

Diferentes mecanismos y regiones de emisión de un remanente que se encuentra interaccionando con una nube molecular:



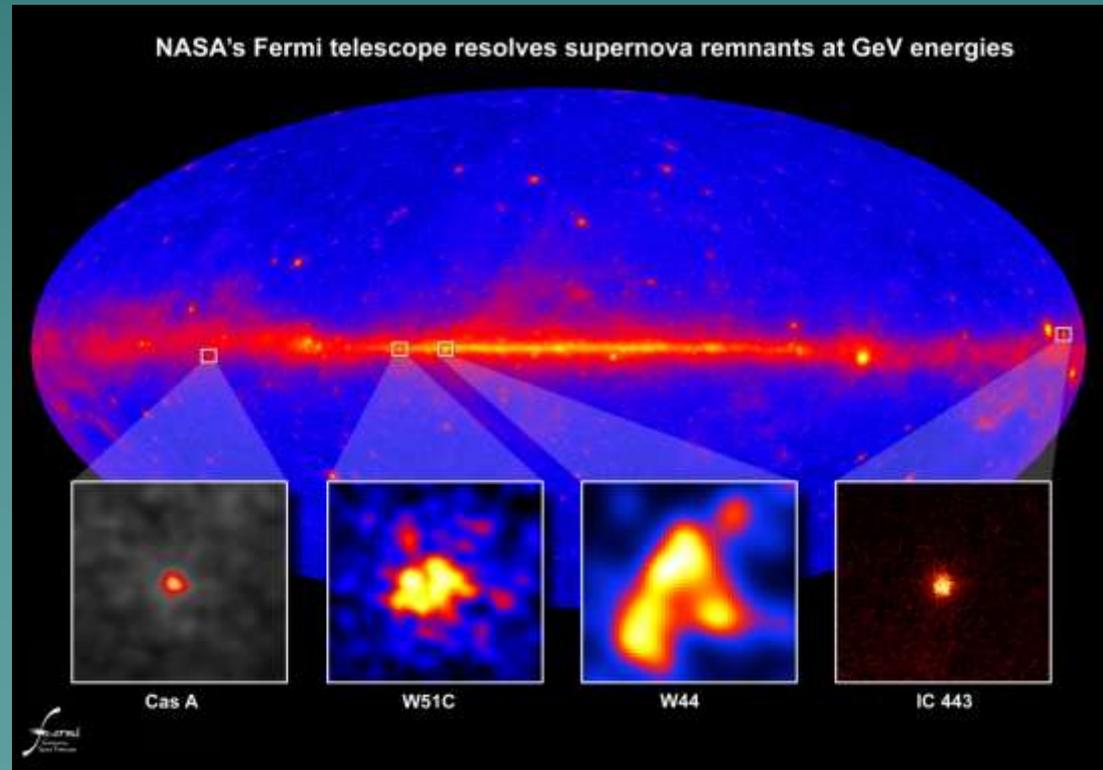
Hay 22 fuentes  $\gamma$  en el tercer catálogo EGRET que coinciden posicionalmente con remanentes de supernovas conocidos. La significancia estadística de este resultado es de  $5.7\sigma$ , lo que sugiere que no todas esas coincidencias son fruto del azar.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REMANENTES DE SUPERNOVAS (cont.)*

Fermi's Large Area Telescope (LAT) mapped GeV gamma-rays from three middle-aged supernova remnants -- known as **W51C**, **W44** and **IC 443** -- that were never before resolved at these energies.

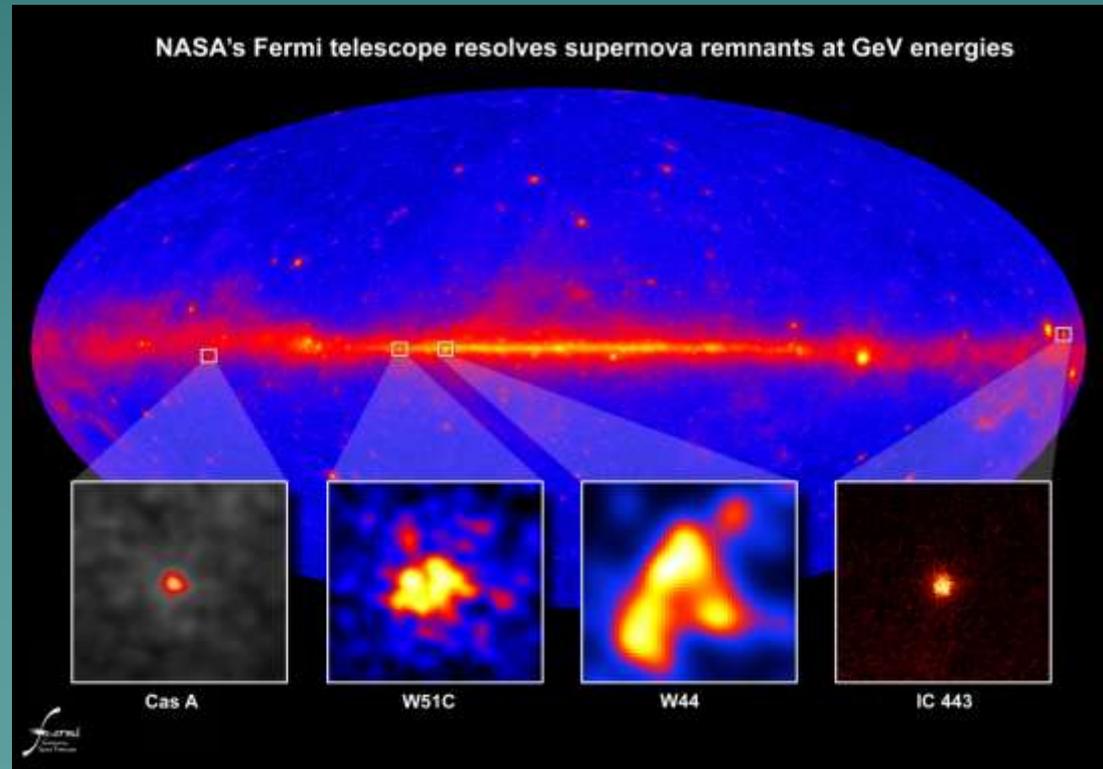
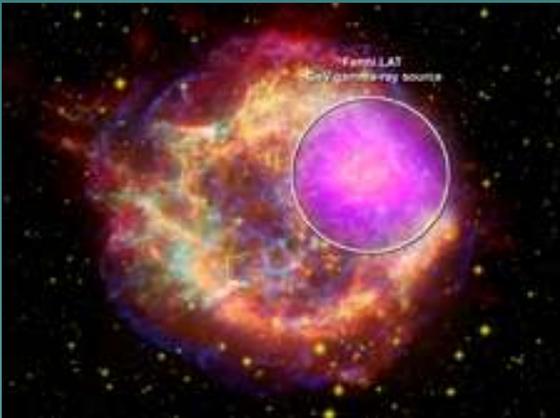
Each remnant is the expanding debris of a massive star that blew up between 4,000 and 30,000 years ago.



# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

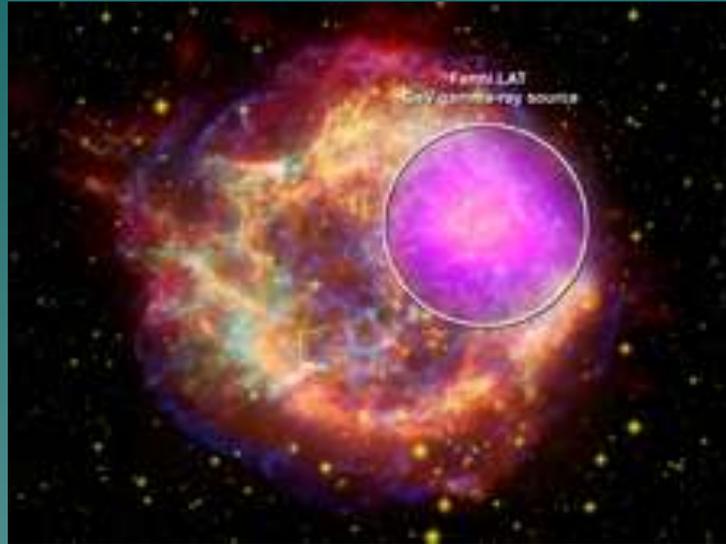
## ➔ *REMANENTES DE SUPERNOVAS (cont.)*

In addition, Fermi's LAT also spied GeV gamma rays from Cassiopeia A (Cas A), a supernova remnant only 330 years old. Ground-based observatories, which detect gamma rays thousands of times more energetic than the LAT was designed to see, have previously detected Cas A.



# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ *REMANENTES DE SUPERNOVAS (cont.)*



This composite shows the **Cassiopeia A supernova remnant** across the spectrum:

Gamma rays (magenta) from NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope;  
X-rays (blue, green) from NASA's Chandra X-ray Observatory;  
visible light (yellow) from the Hubble Space Telescope;  
infrared (red) from NASA's Spitzer Space Telescope; and  
radio (orange) from the Very Large Array near Socorro

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REMANENTES DE SUPERNOVAS (cont.)*



Fermi mapped GeV-gamma-ray emission regions (magenta) in the **W44 supernova remnant**. The features clearly align with filaments detectable in other wavelengths.

This composite merges X-rays (blue) from the Germany-led ROSAT mission, infrared (red) from NASA's Spitzer Space Telescope, and radio (orange) from the Very Large Array near Socorro,

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REMANENTES DE SUPERNOVAS (cont.)*

Older remnants are extremely bright in GeV gamma rays, but relatively faint at higher energies.

Perhaps the highest-energy cosmic rays have left older remnants, and Fermi sees emission from trapped particles at lower energies.

**Younger remnants** show a different behavior.

They seem to possess both stronger magnetic fields and the highest-energy cosmic rays. Stronger fields can keep the highest-energy particles in the remnant's shock wave long enough to speed them to the energies observed.

The Fermi observations show GeV gamma rays coming from places where the remnants are known to be interacting with cold, dense gas clouds.

An alternative explanation is that fast-moving electrons emit gamma rays as they fly past the nuclei of gas atoms.

For now, we can't distinguish between these possibilities.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *BINARIAS DE ESTRELLAS TEMPRANAS*

Estos sistemas están formados por estrellas tempranas como ser Wolf-Rayet o estrellas O, las cuales tienen fuertes vientos.

Los vientos colisionan formando una onda de choque que puede acelerar partículas hasta velocidades relativistas.

Los electrones se *enfrían* entonces a través de radiación sincrotrón en radio (puede llegar hasta el IR o el óptico), que es detectada en muchos casos.

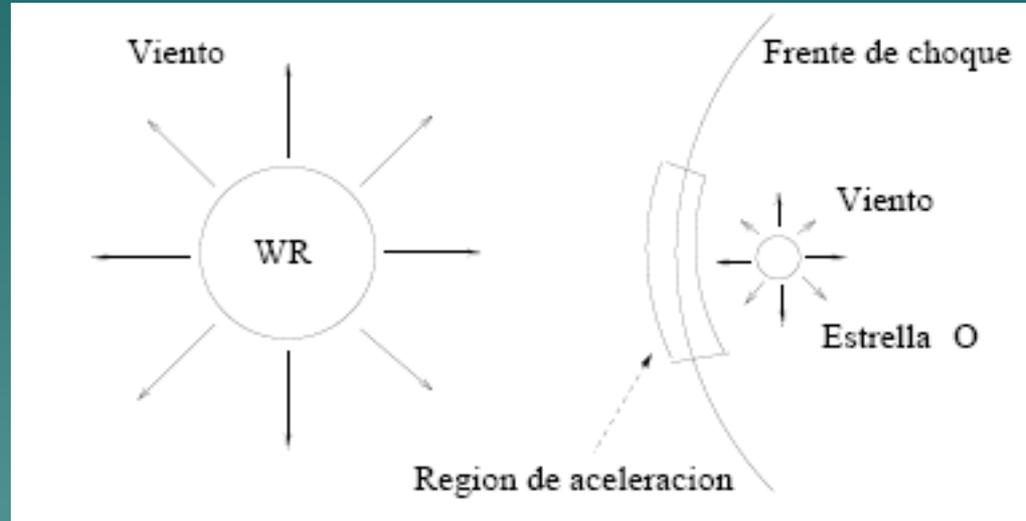
Como las estrellas emiten mucha radiación electromagnética (con un pico en el UV) los electrones se *enfrían* también por interacciones Compton inverso. Estos últimos fotones caen en el rango X-  $\gamma$  .

Los protones acelerados en la onda de choque también pueden producir rayos  $\gamma$  por decaimiento de piones neutros si logran difundirse hasta la base del viento.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *BINARIAS DE ESTRELLAS TEMPRANAS (cont.)*

La situación general es ilustrada para un sistema WR + O.



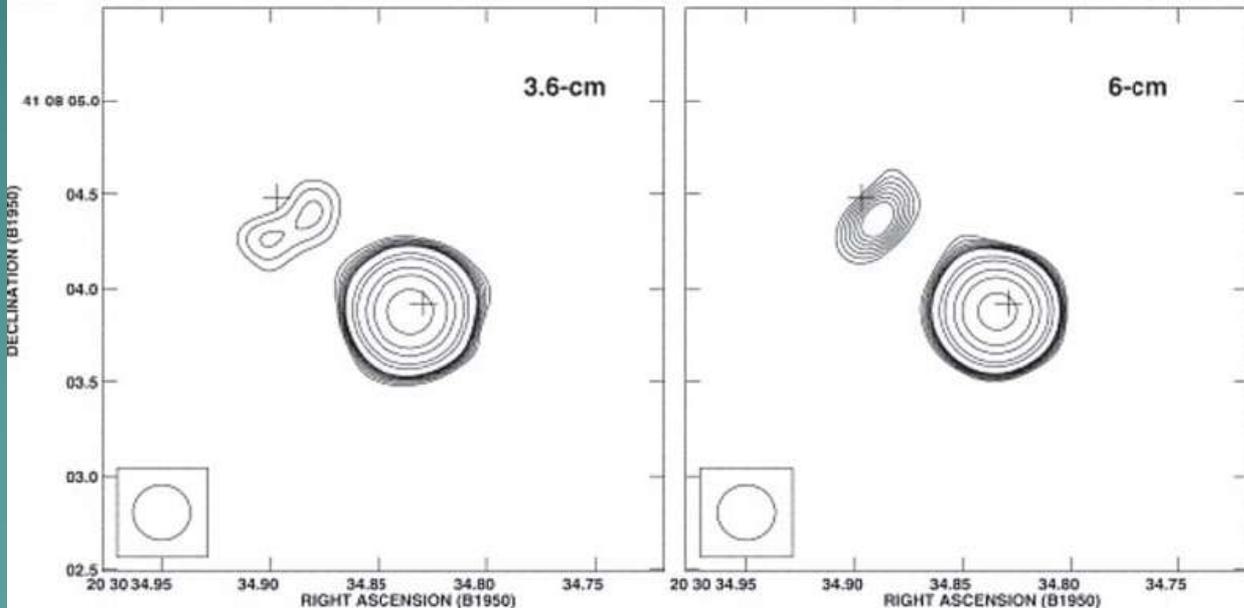
Sistema binario de dos estrellas de gran masa.  
En el frente de choque se reaceleran partículas y se produce la colisión de los vientos estelares.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *BINARIAS DE ESTRELLAS TEMPRANAS (cont.)*

Un ejemplo de binaria con colisión de vientos, emisión no-térmica en radio y posible emisión  $\gamma$  es CygnOB2 5:

Formado por 3 estrellas: dos O muy cercanas, y una B0 a unos 0.008 pc. Está ubicado en la asociación estelar de Cygnus, la más rica de la galaxia en estrellas O y B: ¡unas 2600!, a  $\sim 1.8$  kpc.



Imágenes tomadas con el Very Large Array. Izquierda: con el receptor centrado en 8 GHz ( $\lambda = 3.6$  cm).

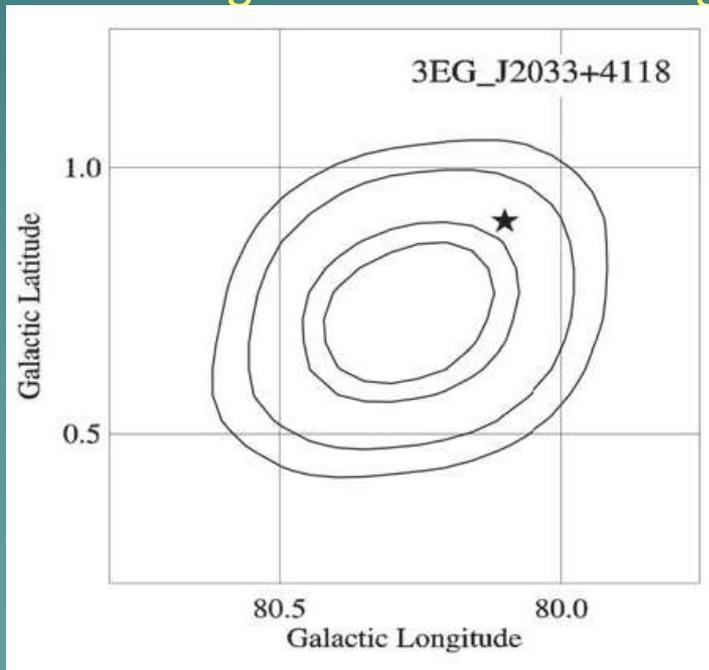
Derecha: con el receptor de 5 GHz ( $\lambda = 6$  cm) hacia Cyg OB2 #5. La cruz central representa la posición de la binaria cercana O+O, y la cruz a la izquierda, la estrella B terciaria

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ BINARIAS DE ESTRELLAS TEMPRANAS (cont.)

Un ejemplo de binaria con colisión de vientos, emisión no-térmica en radio y posible emisión  $\gamma$  es CygnOB2 5:

El sistema está superpuesto a una fuente gamma no identificada: 3EG J2033+4118. Si suponemos que esta fuente está a igual distancia que el sistema estelar, el flujo medido por EGRET corresponde a una luminosidad igual a  $2.5 \times 10^{35}$  erg/s.



Contornos de probabilidad de localización de la fuente de rayos gamma detectada por el telescopio EGRET, 3EG J2033+4118 (50, 65, 90 y 99%). La estrella marca la posición de Cyg OB2 #5

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR*

(Romero 2008)

La identificación de regiones de formación estelar (*SFRs*) con fuentes de rayos gamma se remonta a los primeros intentos de correlacionar estadísticamente los datos de COS-B con *SFRs*, que fue posteriormente confirmada por el Compton Gamma-Ray Observatory y el Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope (EGRET).

Al principios de 1980, se desarrollaron teorías sobre la aceleración de rayos cósmicos en los vientos fuertes de estrellas de tipo temprano

➔ Las estrellas masivas fueron propuestas como potenciales fuentes de rayos gamma.

# Estrellas tempranas con vientos poderosos



Algunas estrellas, como la Wolf Rayet 124 (imagen de HST), tiene **enormes vientos estelares que resultan en ondas de choque** similares a las producida por explosiones de supernovas, y potencialmente capaces de acelerar partículas a altas energías  
Nebulosa alrededor de la estrella: M1-67

# Asociación de estrellas masivas

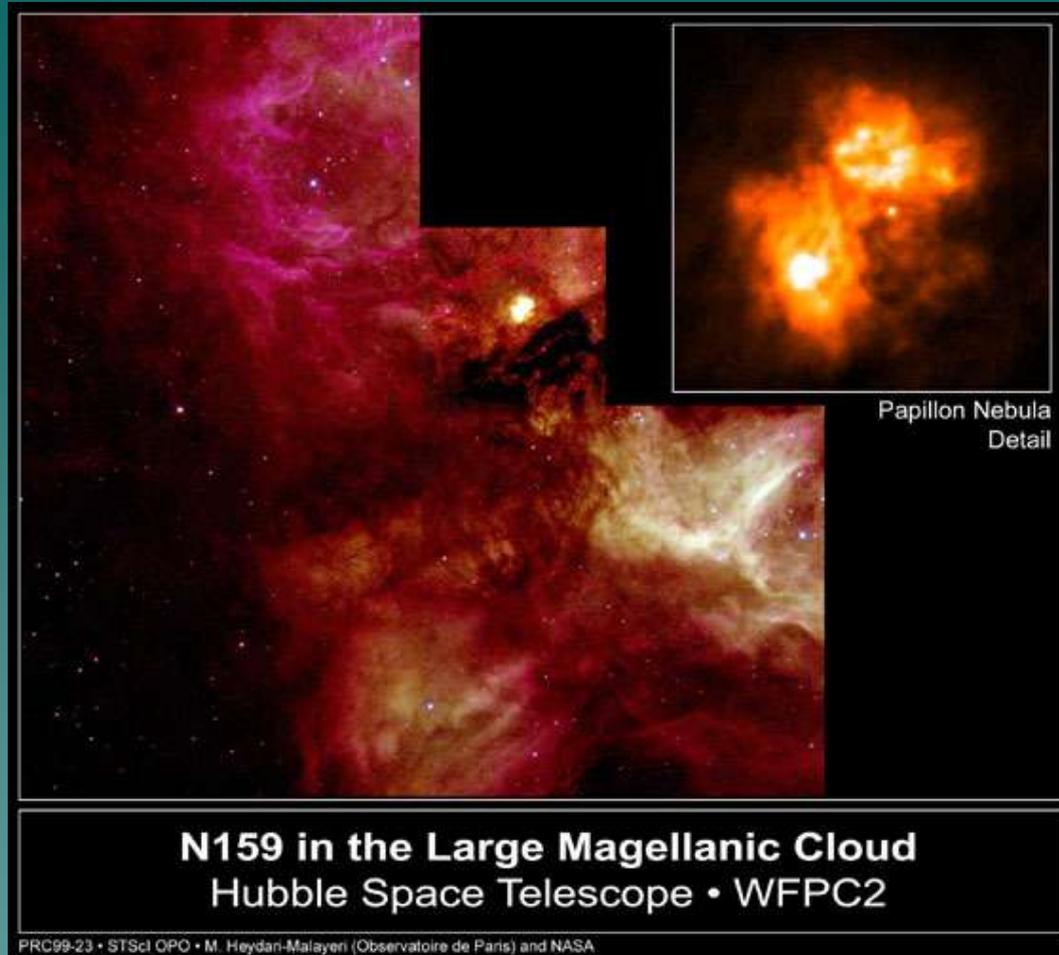


Imagen de N159 en la Nube Mayor de Magallanes tomada por el HST. Los vientos estelares de estrellas masivas formadas recientemente generan arcos y filamentos en las nubes. La nebulosa generada tiene forma dipolar: posiblemente, el gas eyectado por las estrellas masivas es ocultado por la absorción central.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)*

Debido a que otro tipo de fuentes podrían contribuir a la emisión gamma en la dirección de SFRs

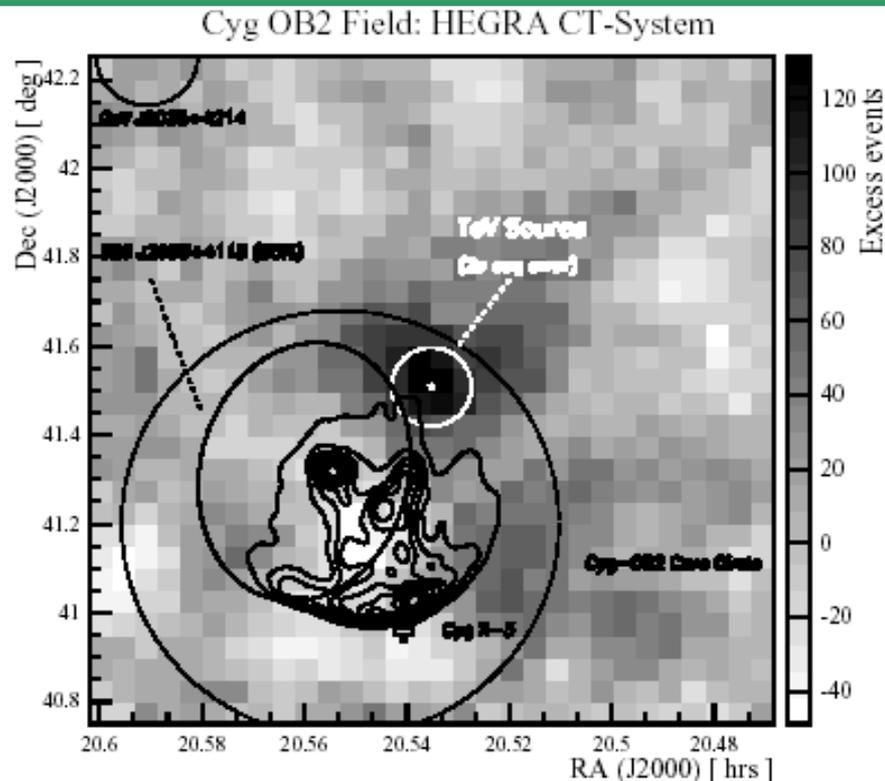
(agujeros negros acretantes, pulsares, remanentes de supernovas, la nebulosa del viento del púlsar)



la hipótesis de que los efectos estelares en una SFR podía ser una fuente de alta energía fue considerada a partir del descubrimiento de la fuente TeV J2032+4130 en Cygnus OB2 por el arreglo de telescopios Cherenkov HEGRA en 2002.

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)



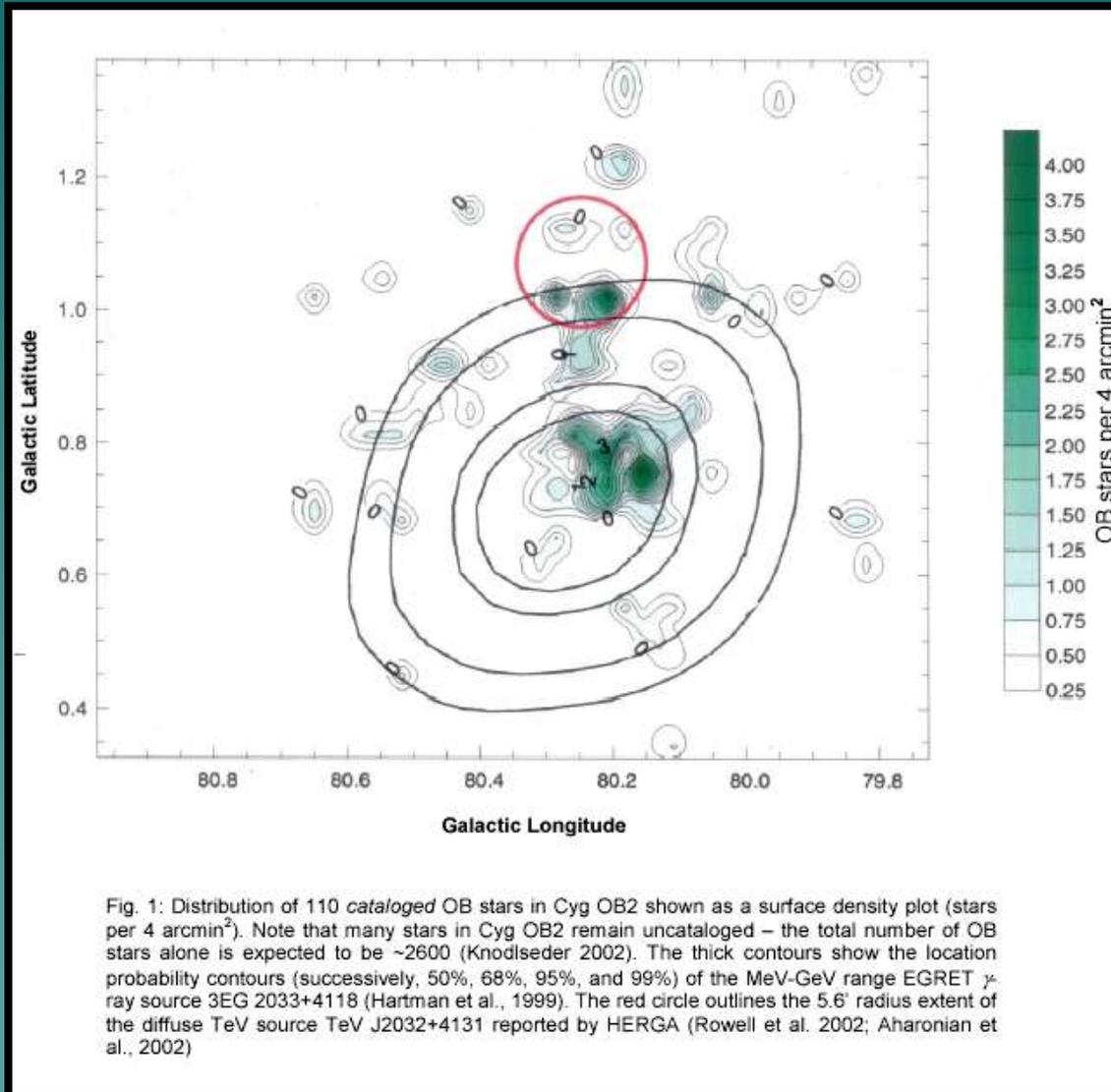
**Fig. 1.** Skymap ( $1.5^\circ \times 1.5^\circ$  view at  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$  binning) of excess events  $s - ab$ , using the template background model. At each bin, the excess is estimated from events within a radius  $\theta = 0.12^\circ$ . Included are 95% error ellipses of various EGRET sources, the core of Cygnus OB2 (Knödlseder 2000), the TeV COG (star), its  $2\sigma$  error circle, and the location of Cyg X-3. ASCA GIS contours (2–10 keV) are overlaid.

HEGRA Collaboration discovers the first unidentified TeV source close to the most massive star formation region in the Galaxy (Aharonian et al., 2002, A&A, 393, L37)

Deep observation (113 hrs) of the Cygnus region at TeV energies using the HEGRA stereoscopic system of air Cherenkov telescopes has serendipitously revealed a signal positionally inside the core of the OB association Cygnus OB2, at the edge of the 95% error circle of the EGRET source 3EG J2033+4118, and 0:5 north of Cyg X-3.

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)



# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

A partir del descubrimiento de la fuente TeV J2032+4130 en Cygnus OB2 por el arreglo de telescopios Cherenkov HEGRA en 2002, se detectaron otras dos fuentes de alta energía en SFR:

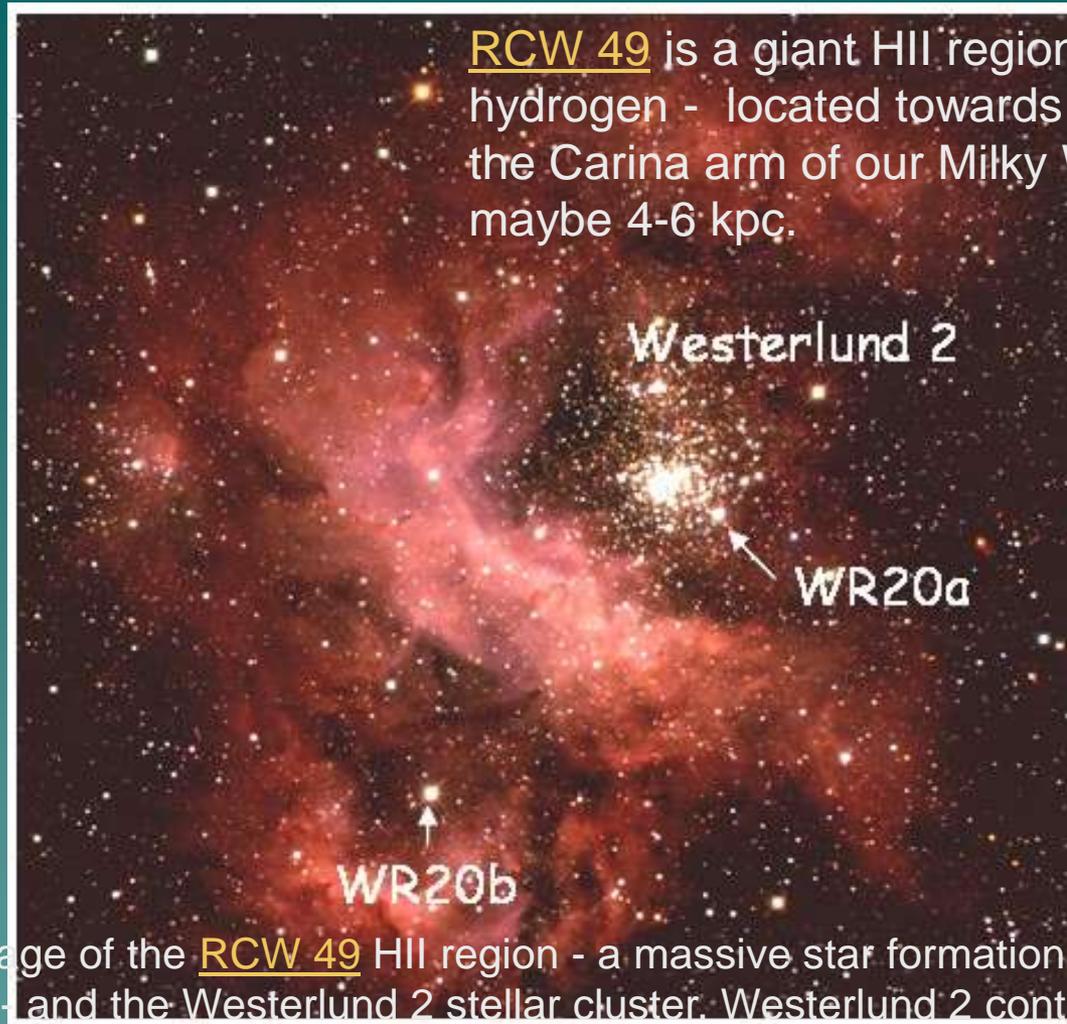
➤ **Westerlund 2**: un cúmulo de estrellas masivas jóvenes oscurecido de 1-2 Myr de edad.

➤ **W43**: una de las SFR más energéticas de la Galaxia; representa un excelente laboratorio para estudiar formación estelar masiva desde la fase protoestelar a regiones HII gigantes.



Todo indica que las estrellas tempranas y el efecto colectivo de sus vientos pueden acelerar partículas más allá de energías de TeV y producir significativa emisión de rayos gamma.

RCW 49 is a giant HII region - a cloud of ionized hydrogen - located towards the outer edge of the Carina arm of our Milky Way, at a distance of maybe 4-6 kpc.



Infrared/optical image of the RCW 49 HII region - a massive star formation region about 300-400 light years across - and the Westerlund 2 stellar cluster. Westerlund 2 contains a number of Wolf-Rayet stars, among them WR 20b and WR 20a, a binary system of two 70-solar-mass Wolf-Rayet stars in a tight orbit. their winds collide with relative speeds of order 1000 km/s. Massive binary systems are therefore likely sources of high-energy gamma rays, produced either by inverse-Compton scattering of accelerated electrons, or by acceleration of nuclei followed by collisions with ambient material and gamma-ray production via the decay of pions created in the collision (Reimer, Pohl und Reimer 2006, Bednarek 2005).

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Formación de estrellas masivas

La formación y evolución temprana de estrellas masivas no está bien entendido aún: Se han propuesto dos mecanismos diferentes (no excluyentes entre sí) que tienen lugar dentro de una nube molecular:

- **Proceso de acreción:** la estrella masiva se forma por acreción de gas en un núcleo molecular denso, acompañado por la eyección de jets térmicos que pueden propagarse dentro de la nube molecular y llegar a salir de ella.
- **Proceso de coalescencia:** las estrellas masivas se forman por la fusión de protoestrellas de masas baja o intermedia.

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Formación de estrellas masivas

#### ➔ Evolución de la SFR:

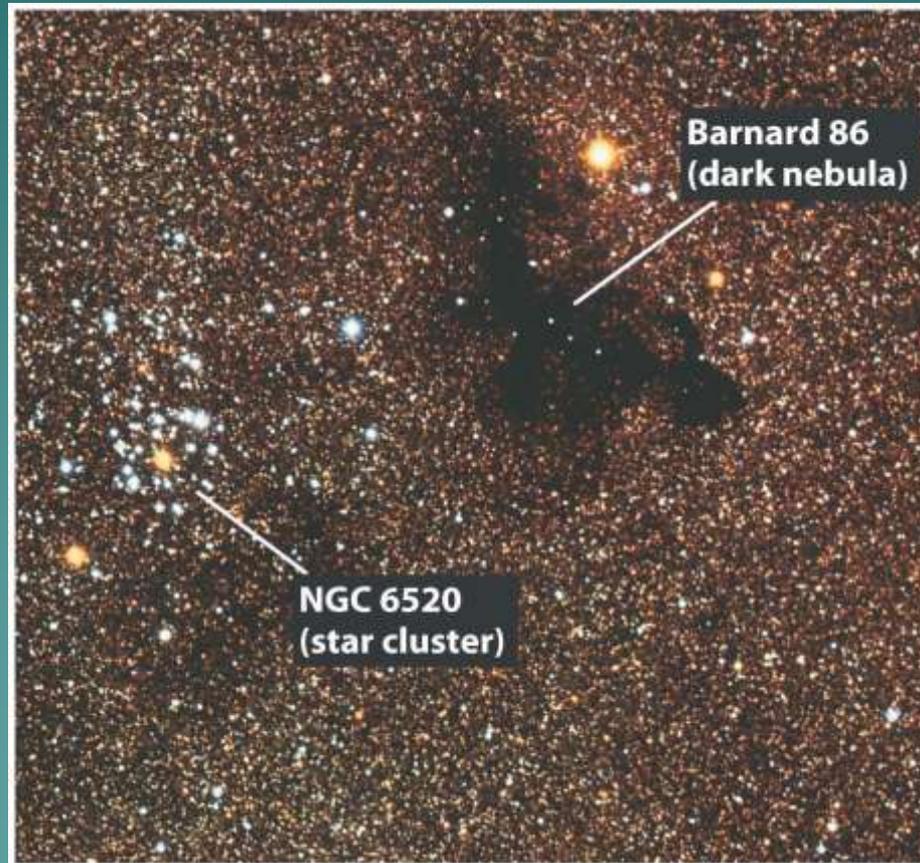
- ❖ Comienza como una nube oscura.
- ❖ Pronto **calentada e iluminada** por la formación estelar que ocurre en su interior.
- ❖ A medida que pasa el tiempo, se forman las estrellas masivas y *sus fuertes vientos barren el material circundante* dando lugar a un **cúmulo abierto**.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)*

### Formación de estrellas masivas

➔ Evolución de la SFR: etapas inicial y final



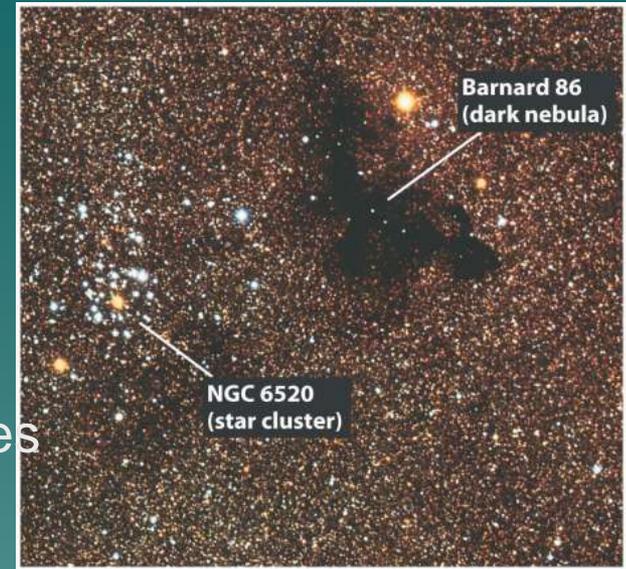
# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Formación de estrellas masivas

Las densas nubes moleculares que son sitios de formación de estrellas masivas tienen:

- **tamaños** relativamente pequeños ( $< 0.1$  pc)
- altas temperaturas que las convierten en fuertes fuentes IR ( $T > 100$  K)
- **densidades** del orden de  $10^7$   $\text{cm}^{-3}$  o más
- altas **luminosidades** en el rango de  $10^4 - 10^6 L_{\odot}$
- el medio seguramente es no homogéneo con una **distribución de densidad** proporcional a  $r^p$  ( $p = 1 - 3$ )
- las estrellas masivas se forman bajo fuertes tasas de caída de masa, del orden de  $10^{-3}$  a  $10^{-2} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$
- **el proceso de formación es bastante rápido**, con escalas de tiempo del orden de unos pocos miles de años.



# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Efecto colectivo de vientos estelares en SFR

Una vez que se formó la asociación estelar, se espera que

- el efecto combinado de los vientos resulte en aceleración de partículas hasta energías relativistas.
- Además, las explosiones de supernovas de estrellas muy masivas (y que, por lo tanto, evolucionan rápidamente) pueden ayudar a crear super-burbujas y shocks colectivos donde las partículas pueden ser eficientemente aceleradas.

➔ En consecuencia, se espera que la densidad promedio de rayos cósmicos en SFR sea mayor que el promedio galáctico.

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Efecto colectivo de vientos estelares en SFR

Los rayos cósmicos generados localmente pueden interactuar con:

- objetos extendidos pasivos (ej.: nubes moleculares)
- medio intracúmulo
- o los mismos vientos de las estrellas masivas.

Este mecanismo podrían operar en galaxias *starburst* donde el efecto combinado de un gran número de estrellas masivas produciría una alta densidad de rayos cósmicos en un medio muy rico.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)*

### **Rayos gamma de estrellas masivas y sistemas binarios masivos**

Estrellas individuales calientes con fuertes vientos:

Han sido propuestas como potenciales fuentes de rayos gamma. Los trabajos teóricos consideran

- aceleración de partículas en el shock terminal
- aceleración de partículas en shocks embebidos en los vientos

Algunos de estos trabajos predijeron detección de estrellas masivas aisladas por EGRET, pero eso no sucedió:

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)*

### Rayos gamma de estrellas masivas y sistemas binarios masivos

Estrellas individuales calientes con fuertes vientos:

La falta de detección por parte de EGRET se debe a que:

La **aceleración eficiente de electrón y protón en el viento interno es poco probable** debido a **fuertes pérdidas** sufridas por estas especies durante el proceso.

Además, aún si se producen rayos gamma, los mismos serán **absorbidos** por la fotosfera estelar produciendo pares electrón-positrón.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)*

### **Rayos gamma de estrellas masivas y sistemas binarios masivos**

Vientos en colisión en sistemas binarios:

Estos sistemas son más prometedores en cuanto a su detección en rayos gamma.

La clara **detección de emisión no-térmica en radio** proveniente de la **zona de colisión de vientos** en sistemas como WR140, WR146, WR 147, and Cyg OB2 #5 **indican que los electrones han sido acelerados hasta energías relativistas.**

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Rayos gamma de estrellas masivas y sistemas binarios masivos

Vientos en colisión en sistemas binarios:

Los **electrones acelerados** están ubicados relativamente **cerca de la estrella secundaria**, por lo que deben sufrir fuertes pérdidas por IC que podría resultar en señal en rayos gamma detectable.

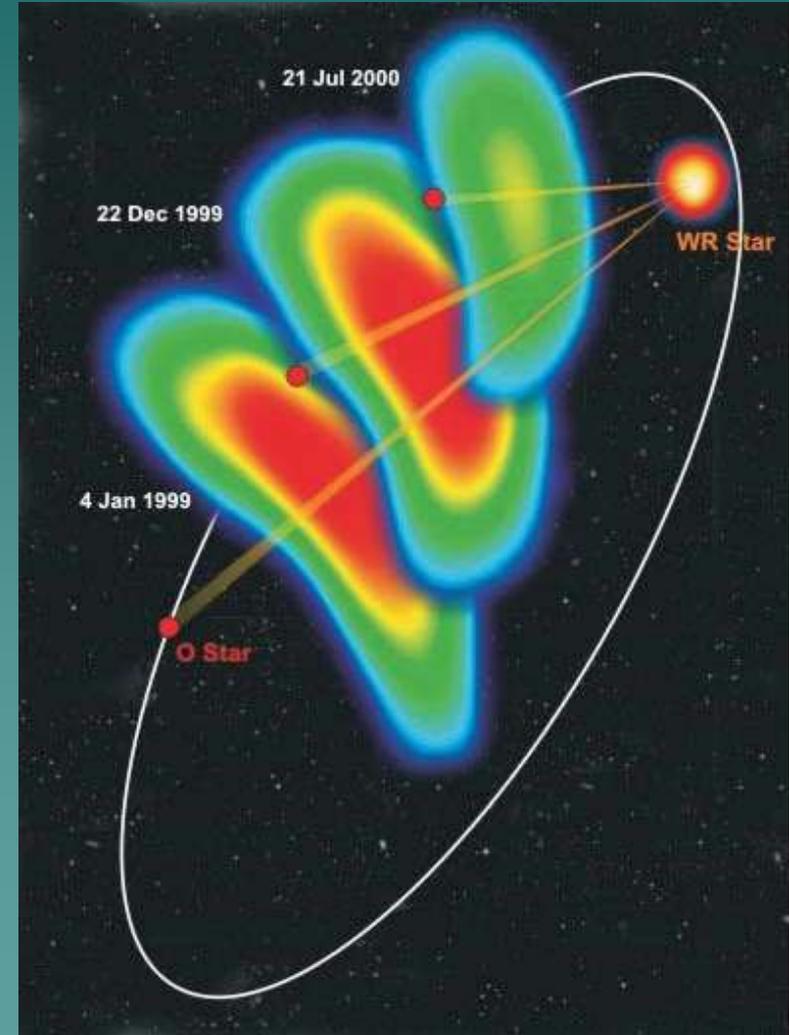
Los **protones** podrían en principio ser **acelerados** e interactuar tanto con el **material del viento** como difundirse para interactuar con **nubes moleculares cercanas**.

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)*

### Rayos gamma de estrellas masivas y sistemas binarios masivos

Evolución de la región de colisión  
de vientos en longitud de onda  
de radio en WR140.



# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Rayos gamma de proto- estrellas

En SFR muy jóvenes, la contracción gravitacional de núcleos moleculares densos pueden dar lugar a una fenomenología muy rica:

Las nubes moleculares son aglutinadas y altamente inhomogéneas. En regiones sobre-densas se forman las protoestrellas que son rodeadas por regiones ultra-compactas de gas ionizado. La medida de estas regiones es muy chica ( $< 0,05$  pc) , lo cual implica tiempos de vida muy cortos ( $10^3 - 4$  Años)

La nube alrededor de la estrella se calienta y radia en el IR con luminosidades extremadamente altas (hasta  $10^5 L_{\odot}$ ).

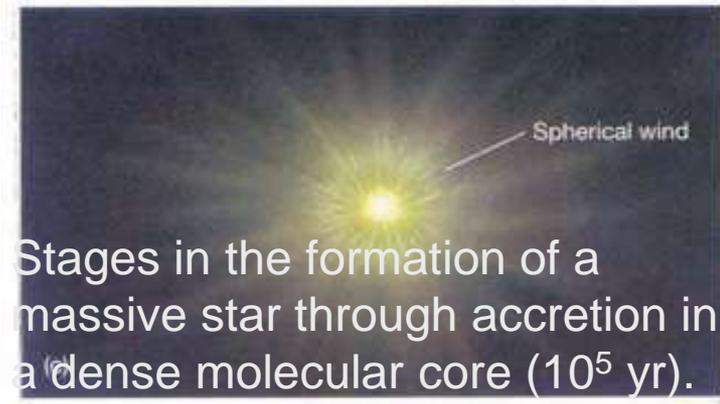
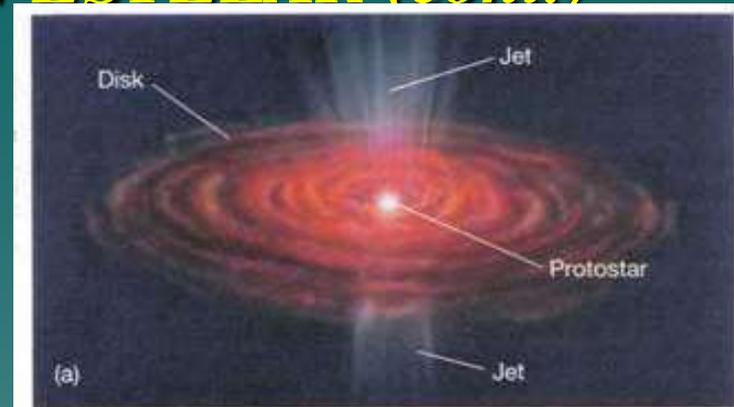
# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Rayos gamma de proto-estrellas

Es probable que el núcleo protoestelar tenga **momento angular** resultando en la **formación de un disco protoestelar**. Se han encontrado evidencias de tales discos en IR, óptico y radio.

Los **campos magnéticos** que se creen son fuertes en el núcleo interno de las nubes moleculares son arrastrados y retorcidos por la caída de materia dando lugar a un **jet térmico con velocidades terminales de hasta unos pocos de miles de  $\text{km s}^{-1}$** .

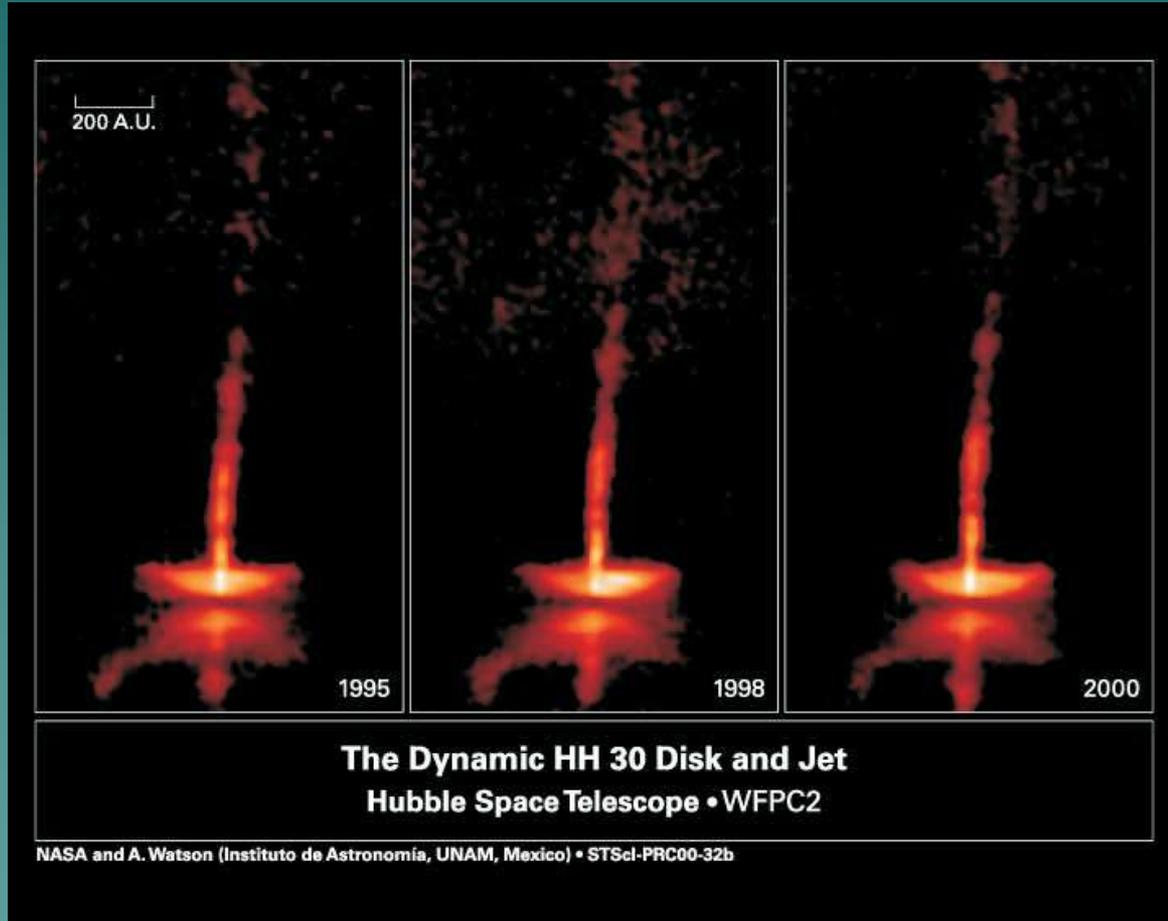


Stages in the formation of a massive star through accretion in a dense molecular core ( $10^5$  yr).

# FUENTES ACTIVAS: *NO-ACRETANTES GALÁCTICAS*

## ➔ *REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)*

### Rayos gamma de proto- estrellas



A protostellar disk and the associated jet  
as observed by the Hubble Space Telescope

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Rayos gamma de proto- estrellas

Se espera que se formen **shocks** en los extremos de los jets, capaces de acelerar partículas, según lo indican la detección de emisión no-térmica en radio de origen sincrotrón, como IRAS 1654-4247, Serpens, W3(OH) y HH 80-81.

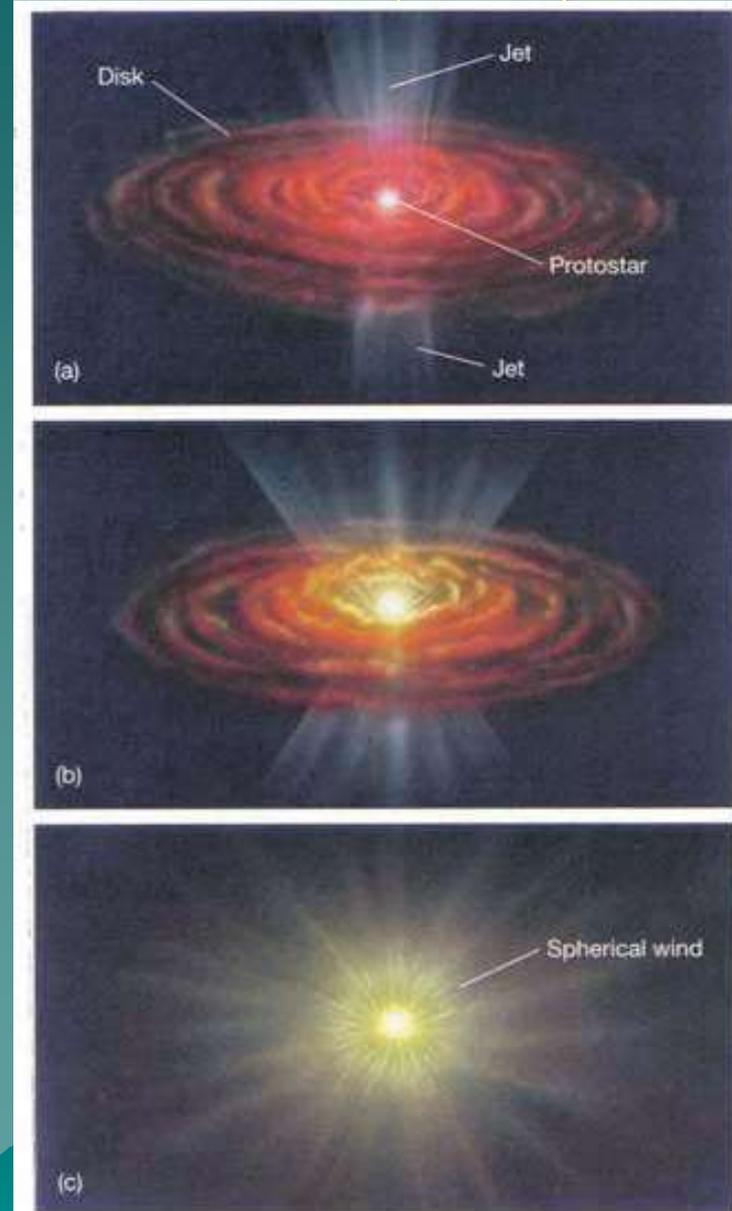
La presencia de partículas relativistas en estos medios sugieren que **es probable que ocurra emisión de altas energías** debido a Bremsstrahlung relativista e interacciones IC con los fotones IR, en el caso de los electrones , y a través de colisiones pp en el caso de los protones.

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

### Rayos gamma de proto- estrellas

A medida que pasa el tiempo, la estrella comienza a quemar hidrógeno, el viento posterior vuela el disco circumestelar y el jet desaparece.



# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)

Star forming region in Carina, with several molecular cores and associated outflows.

Starforming Region in the Carina Nebula



HST-ACS/WFC



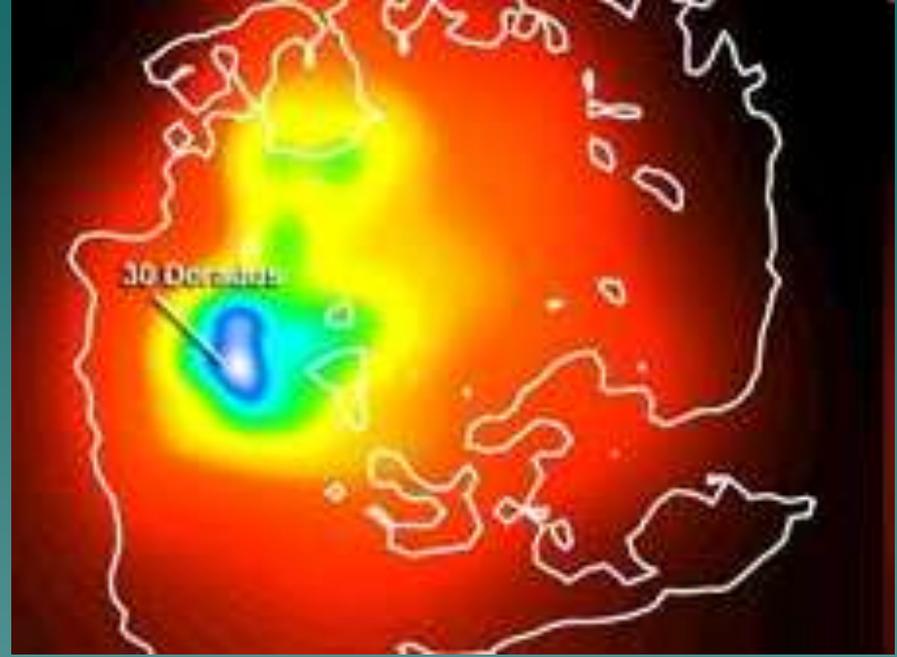
SFR are promising sites for the production of gamma-rays, by different mechanisms, along their whole evolution.

# FUENTES ACTIVAS: NO-ACRETANTES GALÁCTICAS

## ➔ REGIONES DE FORMACIÓN ESTELAR (cont.)



This mosaic of 1,500 images highlights glowing gas clouds in the Large Magellanic Cloud.



Fermi's Large Area Telescope (LAT) shows that an intense star-forming region in the Large Magellanic Cloud named 30 Doradus is also a source of diffuse gamma rays. Brighter colors indicate larger numbers of detected gamma rays.

For the first time, we're seeing diffuse emission from star-forming regions in galaxies other than our own.

# FUENTES ACTIVAS:

## ***NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS***

- Las **galaxias normales** son, por supuesto, fuentes débiles. Emiten, como nuestra Galaxia, radiación difusa que debido a su distancia puede aparecer como emisión discreta en el campo visual de un instrumento.  
Tal es el caso de la GRAN NUBE DE MAGALLANES, detectada por EGRET.  
*Las galaxias normales son fuentes débiles y sólo las más cercanas pueden ser detectables.*
- Los “**starbursts**” son galaxias con **episodios de formación estelar masiva**. Están llenos de gas y se espera que en ellos la densidad de rayos cósmicos sea alta.  
De aquí que puedan ser **fuentes de rayos  $\gamma$  significativas**.  
Entre las más cercanas:
  - NGC 253 ha sido detectada por CANGAROO II (pero no por CANGAROO III). Detectada por Fermi en 2010.
  - M83 y ARP21 probablemente sean detectadas por GLAST

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*

**NGC 253:** arquetipo de galaxia starburst  
(galaxia de la moneda de plata)

- ❖ NGC 253 es una de las galaxias espirales más luminosas y también, polvorientas.
- ❖ Se encuentra a 3,94 Mpc y es uno de los mayores miembros del cúmulo de Escultor, un conglomerado de galaxias cercano a nuestro Grupo Local.



# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*

**NGC 253:** arquetipo de galaxia starburst

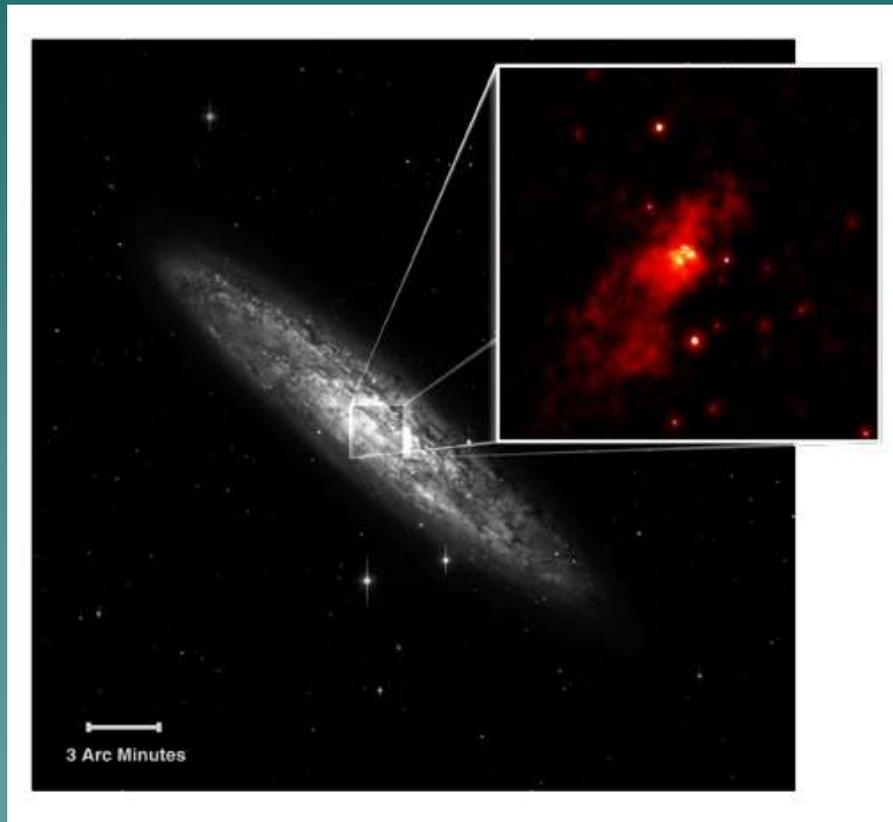


- ❖ Su región nuclear es particularmente activa, revelando
  - numerosas fuentes de radio compactas (Antonucci & Ulvestad 1988),
  - emisión en radio extendida y fuerte: apta para medidas de absorción de HI (Combes, Gottesman & Weliachew 1977; Dickey, Brinks & Puche 1992; Koribalski, Whiteoak & Houghton 1995),
  - barra detectada en infrarrojo cercano (Scoville et al. 1985; Forbes & DePoy 1992), en óptico (Pence 1980), y, en escala más chica, en emisión de CO (Canzian, Mundy & Scoville 1988; see also Mauersberger et al. 1996).

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*

**NGC 253:** arquetipo de galaxia starburst



This Chandra X-ray image (inset) shows the central region of the starburst galaxy known in comparison to the optical view.

Chandra detects a proportionally high number of suspected intermediate-size black holes.

NGC 253 has at least six so-called ultraluminous (very powerful X-ray) point sources.

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*

**NGC 253:** arquetipo de galaxia starburst

In gamma rays...

The CANGAROO-II telescope observed sub-TeV gamma-ray emission from the nearby starburst galaxy NGC 253.

The emission region was extended with a radial size of 0.3-0.6 degree.

On the contrary, HESS could not confirm this emission and gave upper limits at the level of the CANGAROO-II flux.

In order to resolve this discrepancy, (Itoh et al. 2007, A&A, 462, 67) analyzed new observational results for NGC 253 by CANGAROO-III.

**The result by the CANGAROO-III was negative.** The upper limit of gamma ray flux was 5.8% Crab at 0.58 TeV for point-source assumption. In addition, the significance of the excess flux of gamma-rays by the CANGAROO-II was lowered to less than 4 sigma after assessing treatment of malfunction of photomultiplier tubes.

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*

**NGC 253:** arquetipo de galaxia starburst

In gamma rays...

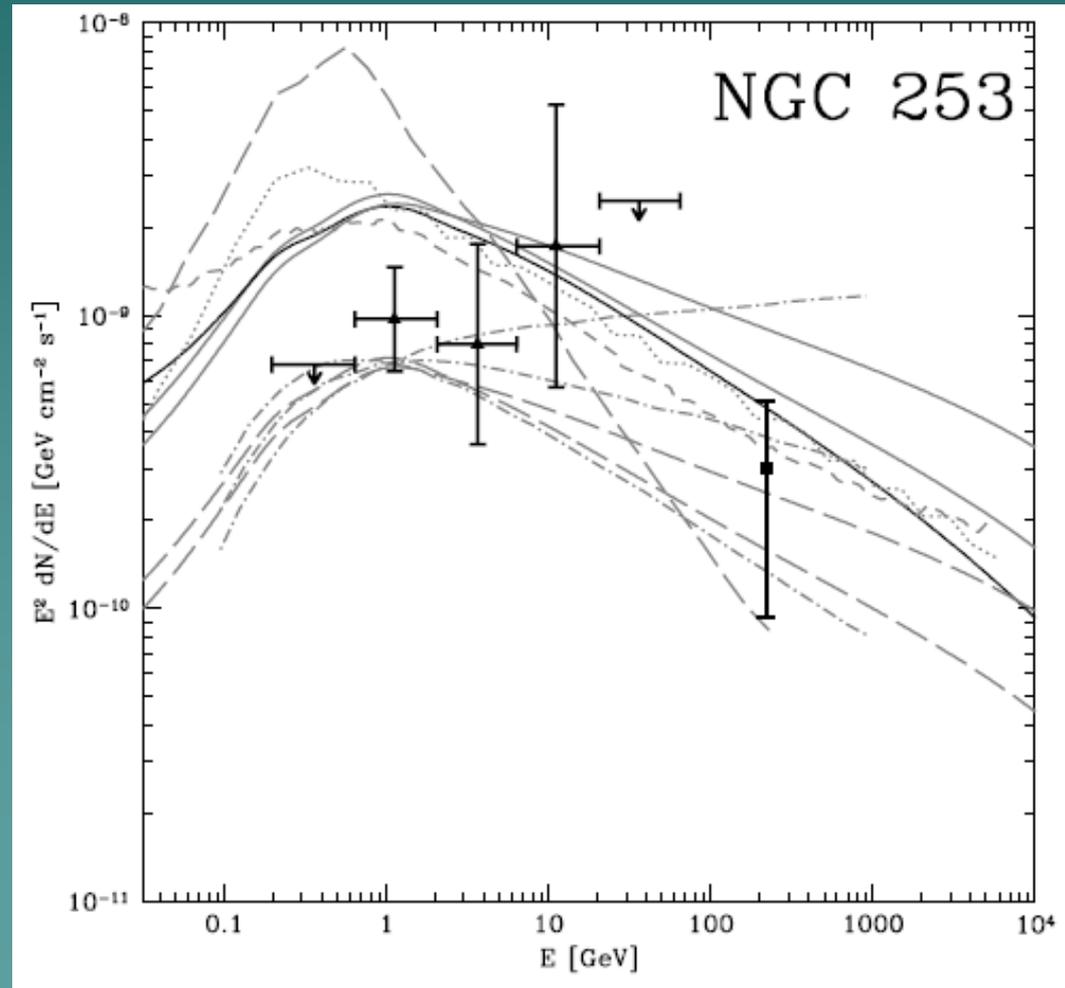
The gamma-ray spectra of  
NGC 253

from Fermi (solid triangles:  
Abdo et al. (2010a));

VERITAS (open triangles)  
and HESS (filled squares).

$\gamma$ -rays are predominantly  
Hadronic in origin

(Brian et al. 2011)



## FUENTES ACTIVAS:

### ***NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)***

Fermi's LAT sees diffuse emission from the starburst galaxies **M82** and **NGC 253**, both of which were also seen this year by ground-based observatories sensitive to gamma rays hundreds of times more energetic than the LAT can detect (VERITAS).



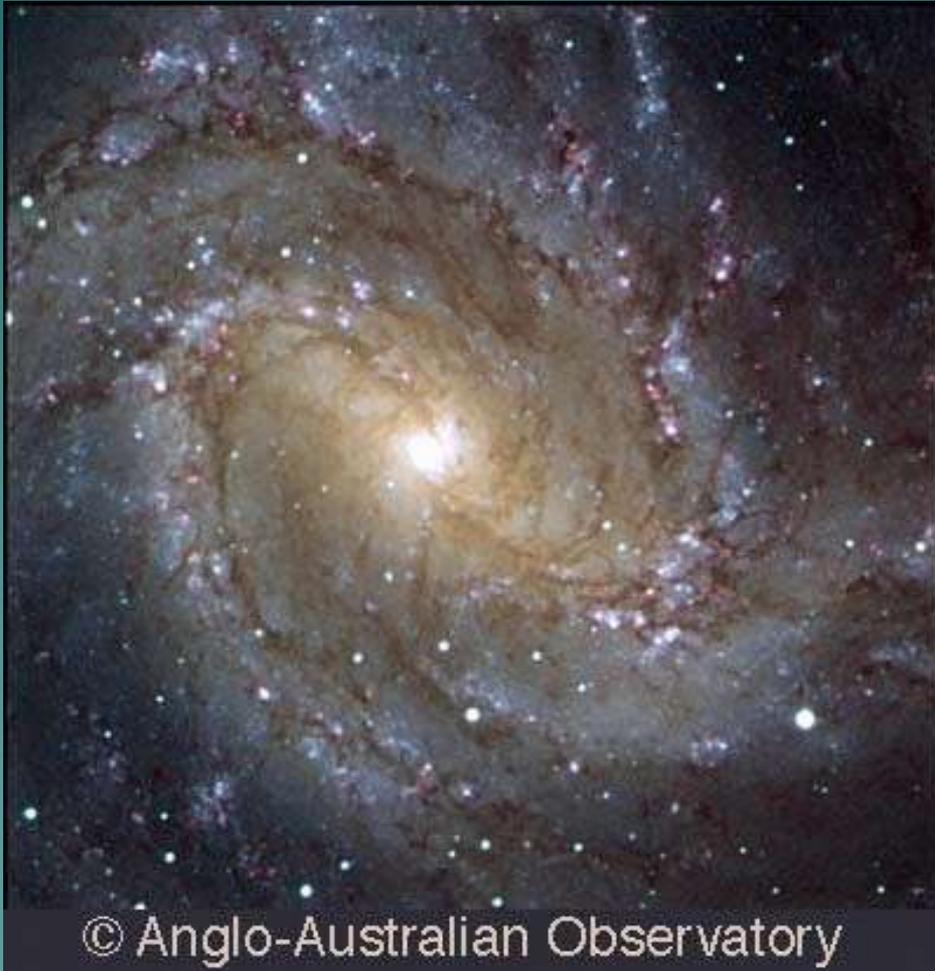
**M82**, also known as the Cigar Galaxy, lies 12 million light-years away in the constellation Ursa Major.

Fermi's LAT and the ground-based VERITAS observatory have detected diffuse gamma rays from the galaxy's core, which produces stars at a rate ten times faster than our entire galaxy

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*

**M83**, NGC 5236, the 'Southern Pinwheel' galaxy



M83 fue clasificada como un paso intermedio entre las espirales normales y las barradas por G.de Vaucouleurs.

Se encuentra a 4.7 Mpc.

Forma un pequeño grupo físico, el grupo de M83, con la peculiar radio galaxia Centauro A.

## FUENTES ACTIVAS:

### *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*

**M83**, NGC 5236, the 'Southern Pinwheel' galaxy



Chandra's image of M83 shows numerous point-like X-ray sources scattered throughout the disk of the galaxy. These sources are probably stellar, more accurately the stellar remnants of supernova explosions (i.e., neutron stars). The bright nuclear region glows prominently due to a cloud of hot gas and a high concentration of stellar x-ray sources that were created during a burst of star formation. This starburst is estimated to have begun about 20 million years ago in the galaxy's time frame.

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*



The **Antennae Galaxies** are an example of a very high starburst galaxy occurring from the collision of NGC 4038/NGC 4039

# FUENTES ACTIVAS:

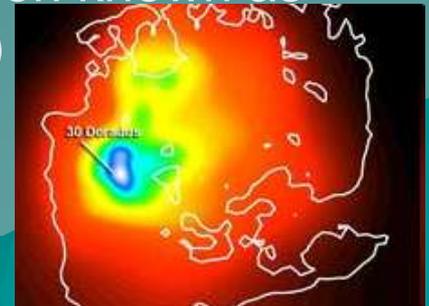
## ***NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)***

Two so-called "starburst" galaxies, plus a satellite of our own Milky Way galaxy, represent a new category of gamma-ray-emitting objects detected both by Fermi and ground-based observatories.

Starburst galaxies have not been accessible in gamma rays before. Most of the galaxies Fermi sees are exotic and distant blazars, which produce jets powered by matter falling into enormous black holes. But these new galaxies are much closer to us and much more like our own.

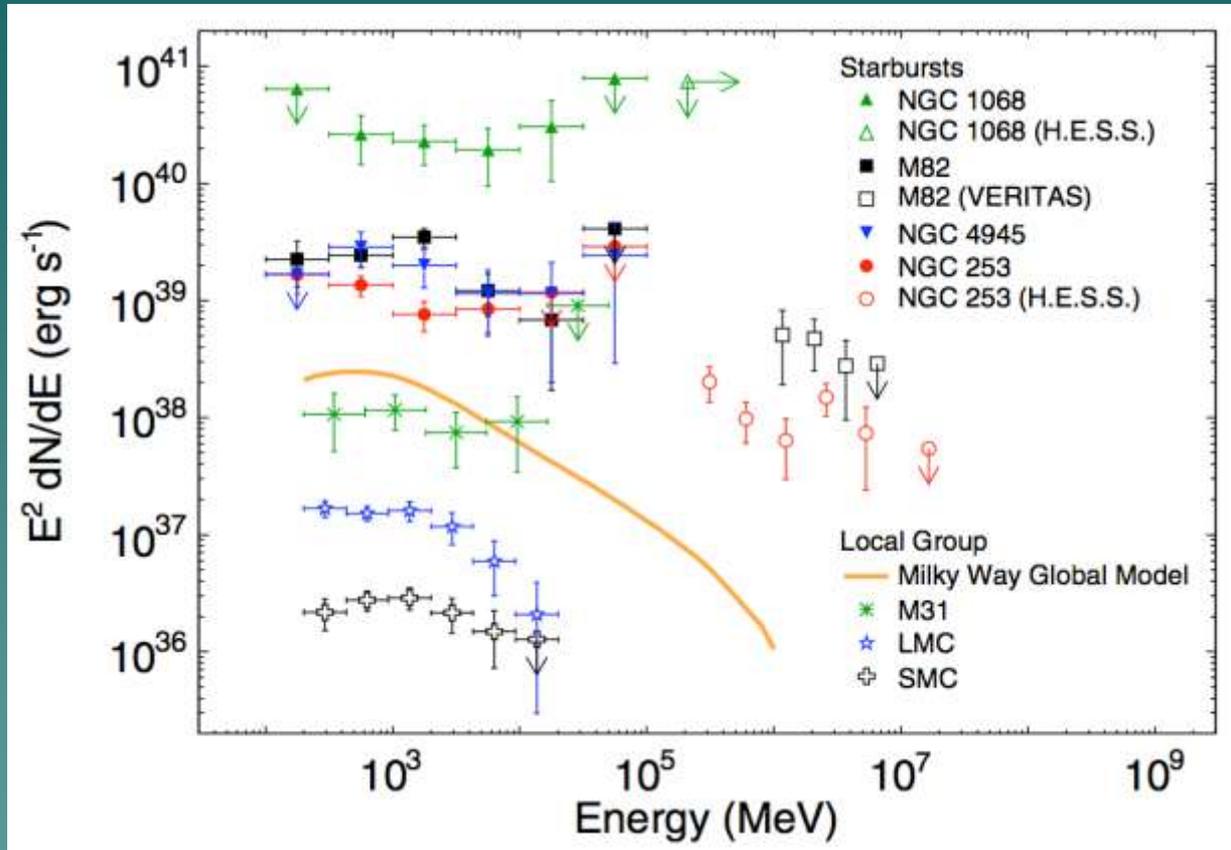


This mosaic of 1,500 images highlights glowing gas clouds in the Large Magellanic Cloud, a galaxy that orbits our own. Fermi sees gamma-ray emission from the large, prolific star-forming region known as **30 Doradus** (center left)



# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*



- Different galactic CR populations
- Different transport conditions (rather than source)
- Test CR propagation knowledge

Flatter spectra for starburst systems M82 and NGC253:

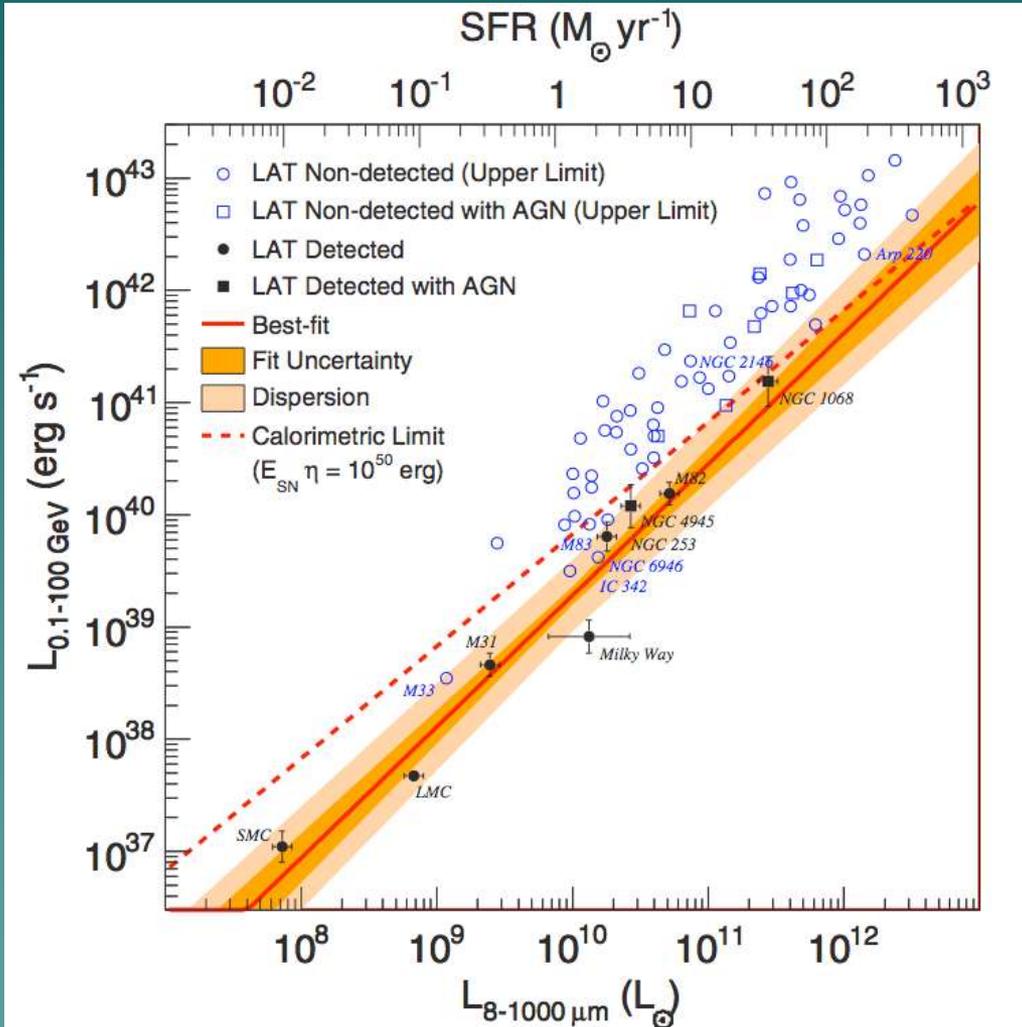
$2.2-2.3 \pm 0.1$

Milky Way has  $2.6-2.7$

(Martin, *A&A*, Vol. 564, A61 –*arXiv 1402.0383*)

# FUENTES ACTIVAS:

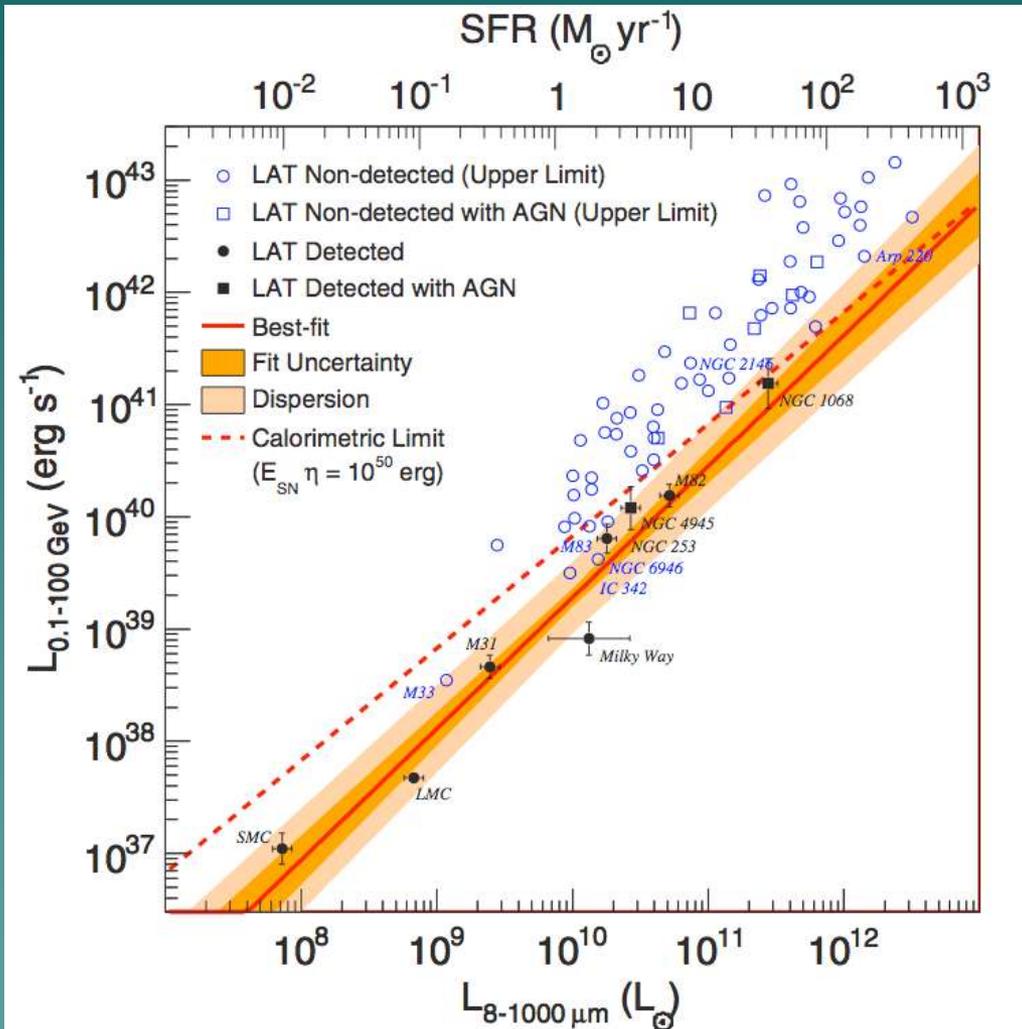
## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*



Fermi/LAT observations of 64 IR-bright galaxies  
Upper limits  
Almost linear correlation over broad range  
Power-law index  $1.1 \pm 0.1$   
(with P-values  $\leq 0.05$  and sensitivity to SMC/LMC)

# FUENTES ACTIVAS:

## *NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)*



Possible physical connection:

- Star formation  $\rightarrow$  massive stars

- .. UV/O radiation heats dust
- .. reradiates in IR  $\rightarrow$  LIR

- Star formation  $\rightarrow$  massive stars

- .. powerful outflows and shocks

- .. particle acceleration, CRs

- .. interact with ISM  $\rightarrow$  Ly

# FUENTES ACTIVAS:

## ***NO-ACRETANTES EXTRAGALÁCTICAS (cont.)***

- Los **cúmulos de galaxias** son las mayores estructuras conocidas en el Universo. Están formados por miles de galaxias. El medio intracúmulo está lleno de gas caliente, contaminado químicamente por explosiones de supernova, vientos galácticos, etc.

Ondas de choque pueden acelerar electrones y protones hasta velocidades ultra-relativistas.

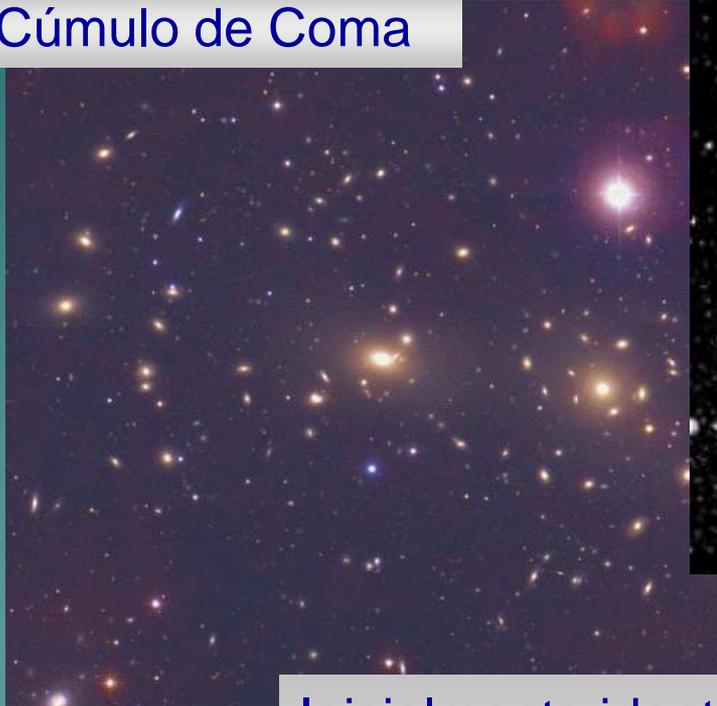
Los *leptones* se enfrían por **radiación sincrotrón** (algunos cúmulos como el de Virgo son detectados en radio como fuentes no-térmicas) y, en principio, por interacciones Compton inverso con fotones del fondo cósmico.

De aquí que se haya propuesto que ciertos cúmulos de galaxias podrían ser fuentes  $\gamma$  detectables por GLAST.

# Cúmulos de galaxias

## RELEVAMIENTOS ÓPTICOS DE CÚMULOS DE GALAXIAS

Cúmulo de Coma



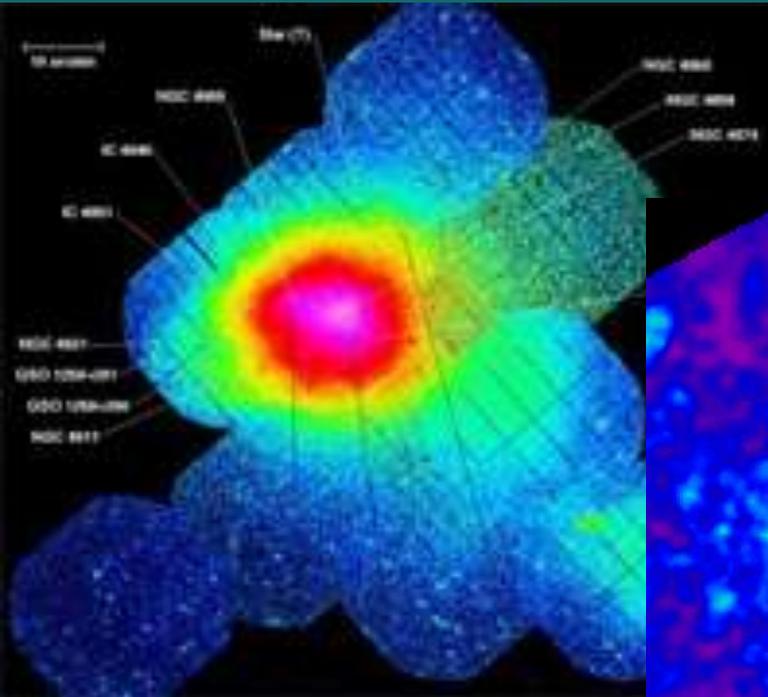
Cúmulo de Virgo

Inicialmente identificados como grandes concentraciones de galaxias (Abell 1958; Zwicky et al. 1966; Abell et al. 1989):

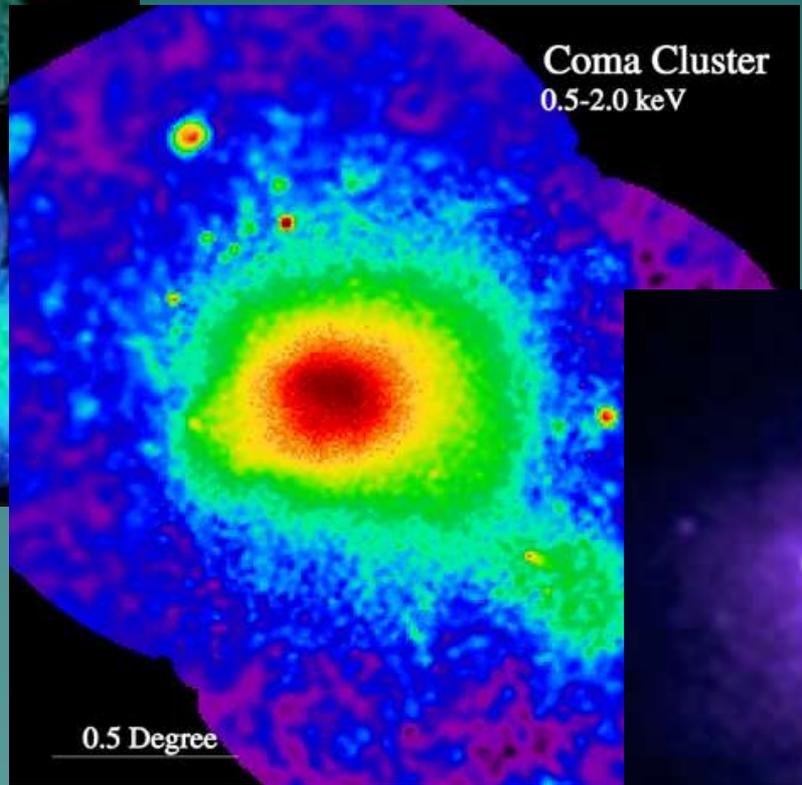
- ❖ cientos de galaxias en una región de  $\sim 1$  Mpc,
- ❖ detectadas hasta profundidades de varios cientos de Mpc.

# Cúmulos de galaxias

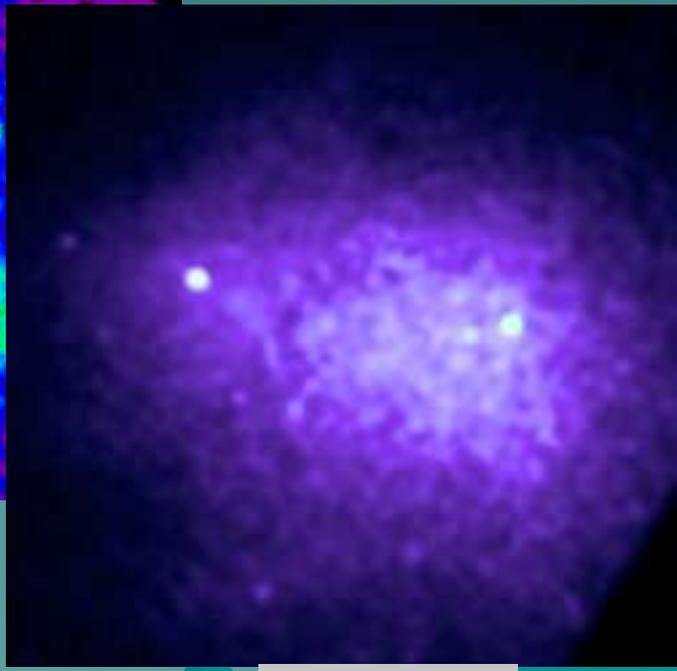
## Cúmulo de Coma



XMM-Newton



ROSAT

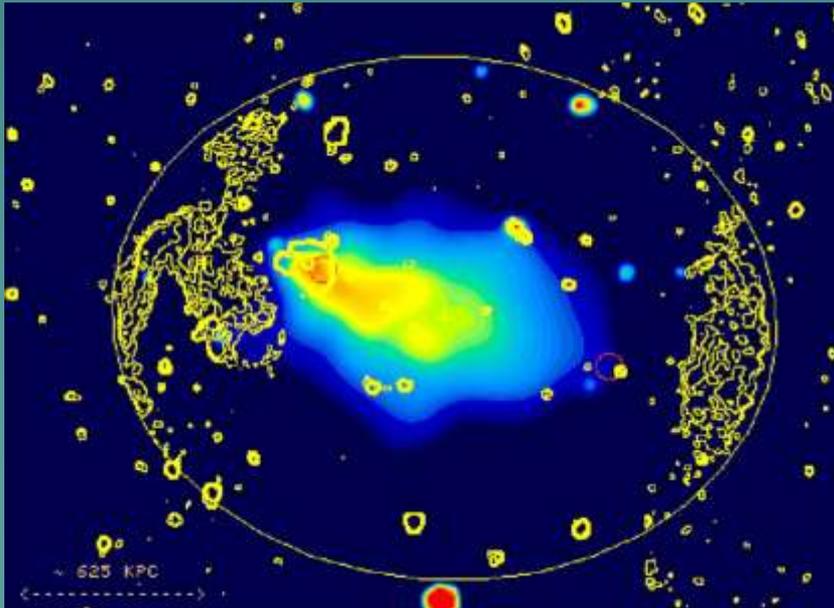


Chandra

# Cúmulos de galaxias

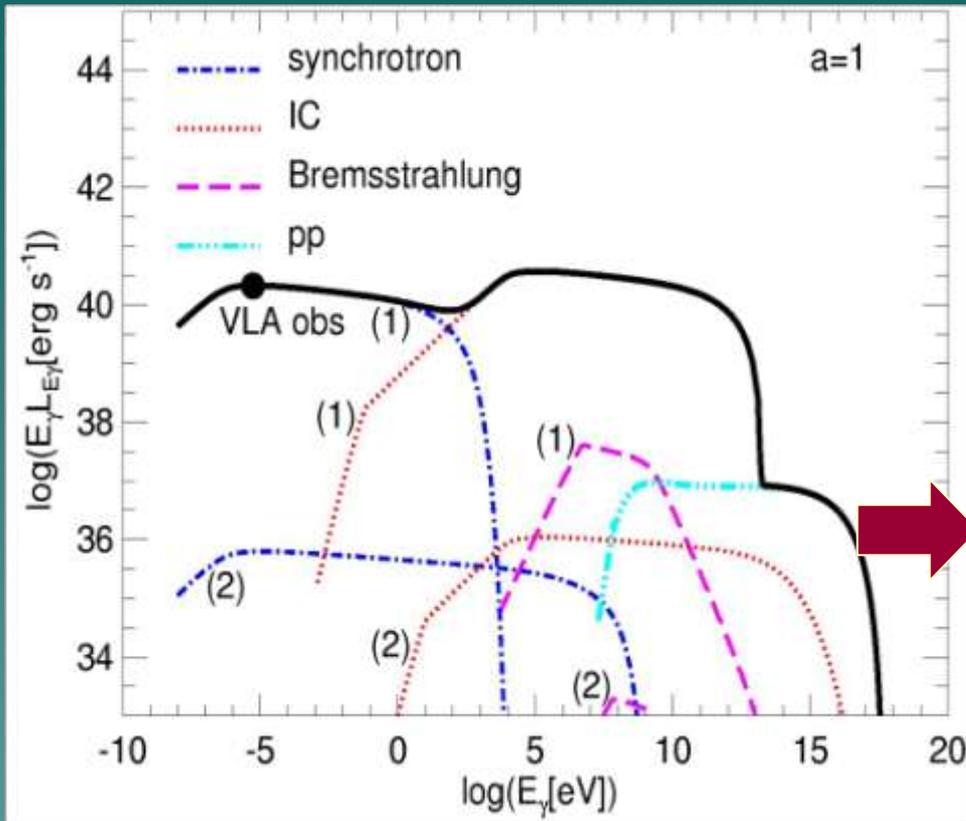
- Los más grandes sistemas virializados en el Universo, con profundos pozos de potencial, determinados por la materia oscura, en los cuales quedan atrapados las galaxias y el medio intracúmulo.
- **Medio Intracúmulo**: gas caliente y difuso calentado por shocks de acreción cuando gas de relativamente baja temperatura se incorpora al cúmulo.

**Los shocks generados durante la formación y fusión de cúmulos de galaxias son sitios potencialmente interesantes para la aceleración de partículas de alta energía por el mecanismo de Fermi, incluyendo electrones y protones**



The rich cluster of galaxies Abell 3376 has been detected by *ROSAT* and *XMM-Newton* through its X-ray emission revealing strong evidence for merger activity of subclusters.

# Cúmulo de galaxias A3376



decay from  $pp$  interactions contribute to the gamma-ray emission, being its luminosity smaller than that of IC interactions because of the low density of thermal protons at the location of radio relics

IC photons from cluster Abell 3376 could be detected by gamma-ray instruments such as GLAST satellite and the Cherenkov telescope HESS II, which operates in the ranges  $\sim 100$  MeV to  $\sim 100$  GeV, and 0.1 to 10 TeV, respectively

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES

- Núcleos galácticos activos (AGN)
- Microcuasares (MQ)

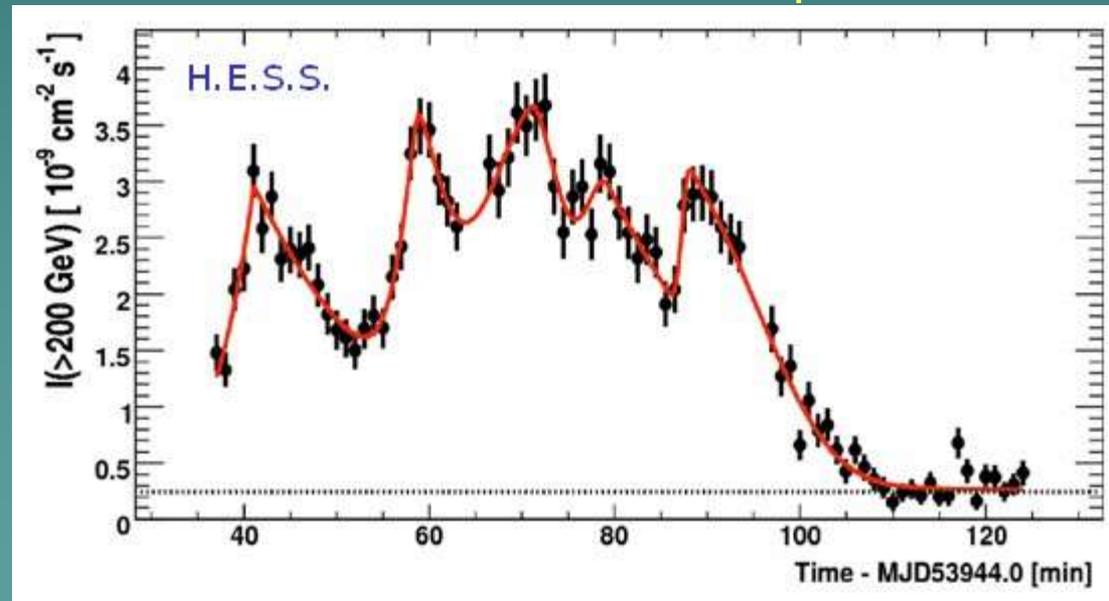
# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → AGN

Los núcleos galácticos activos presentan emisión electromagnética a lo largo de todo el espectro, desde radio hasta, en muchos casos, rayos  $\gamma$ .

Las distancias determinadas a través del corrimiento cosmológico al rojo de sus líneas espectrales y los flujos observados permiten inferir luminosidades gigantescas ( $\geq 10^{44}$  erg s<sup>-1</sup>).

Al mismo tiempo suelen presentar variabilidad muy rápida:  $\Delta t$  pequeño, lo cual implica que la región de emisión es extremadamente compacta.

(El requerimiento de que distintas partes de una fuente variable estén causalmente conectadas implica  $R < c\Delta t$ .)



*An extraordinary flare from the AGN PKS 2155-304 as detected with the HESS telescopes. Shown is the integral flux above 200 GeV observed jul/06.*

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → AGN

Los núcleos galácticos activos presentan emisión electromagnética a lo largo de todo el espectro, desde radio hasta, en muchos casos, rayos  $\gamma$ .

Las distancias determinadas a través del corrimiento cosmológico al rojo de sus líneas espectrales y los flujos observados permiten inferir luminosidades gigantescas ( $\geq 10^{44}$  erg s<sup>-1</sup>).

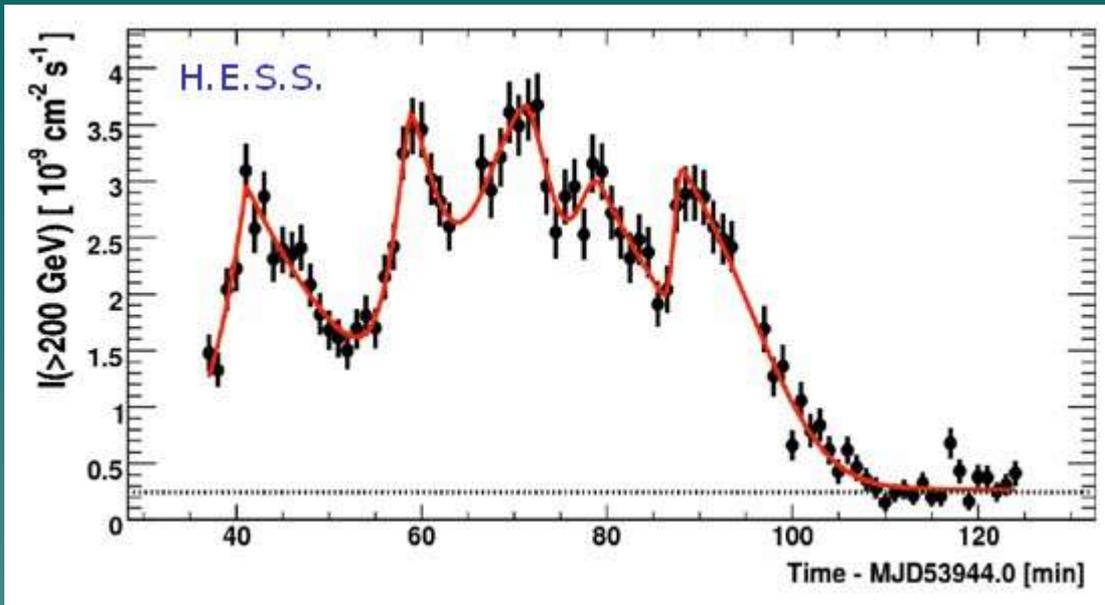
Al mismo tiempo suelen presentar variabilidad muy rápida:  $\Delta t$  pequeño, lo cual implica que la región de emisión es extremadamente compacta.

(El requerimiento de que distintas partes de una fuente variable estén causalmente conectadas implica  $R < c\Delta t$ .)

Resulta natural entonces suponer que la acreción de materia sobre un objeto compacto (por ejemplo, un agujero negro supermasivo con  $M \sim 10^7 - 10^9 M_{\odot}$ ) es responsable de la emisión.

Para que la acreción esférica de un gas sobre un objeto se mantenga, la fuerza de la gravedad debe sobrepasar a la fuerza ejercida por la presión de radiación.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ AGN



*AGN PKS 2155-304: The data are binned in 1 minute intervals. The horizontal dotted line represents the flux from the Crab Nebula, the brightest steady source in the VHE gamma-ray sky. (Aharonian et al., ApJ (2007), 664, p. L71-L74).*

It is not clear if this is the minimum variability time in blazars. With CTA, such flares should be detectable within seconds, rather than minutes. Probing variability down to the shortest time scales will significantly constrain acceleration and cooling times, instability growth rates, and the time evolution of shocks and turbulences.

# FUENTES ACTIVAS: *ACRETANTES* → AGN

❖ **Acreción de gas** → material se calienta por la inmensa gravedad del agujero negro → radía

Los fotones emitidos debido a esta liberación de energía ejercen **presión sobre los electrones debido al scattering de Compton.**

La sección eficaz de scattering para el protón es menor que para el electrón por un factor  $(m_e/m_p)^2$

❖ **La gravedad ejerce una fuerza atractiva sobre los protones de este gas.**

La fuerza de gravedad sobre los electrones puede despreciarse debido a su pequeña masa en relación a la de los protones.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES AGN

Consideremos un gas que está siendo acretado:

$$|\vec{F}_{\text{rad}}| \leq |\vec{F}_{\text{grav}}|$$

$$\frac{\sigma_T L}{4\pi cr^2} \leq \frac{GMm_p}{r^2}$$

donde  $M$  es la masa del objeto compacto y  $L$  su luminosidad.



La **presión de radiación** actúa sobre el electrón:

El **flujo de fotones**  $N_{\text{ph}}$  le comunica al electrón un **momento**  $p = h\nu/c$  por segundo.

La fuerza de radiación es  $F_{\text{rad}} = \sigma_T N_{\text{ph}} p$

Como el flujo de fotones a una distancia  $r$  de la fuente es  $N_{\text{ph}} = L/4\pi r^2 h\nu$



$$F_{\text{rad}} = \sigma_T L/4\pi r^2 c$$

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → AGN

$$\frac{\sigma_T L}{4\pi cr^2} \leq \frac{GMm_p}{r^2} \quad \Rightarrow \quad L \leq \frac{4\pi G c m_p}{\sigma_T} M$$

La luminosidad a la cual la *acreción se detiene* se denomina **luminosidad de Eddington**:

$$L_E = \frac{4\pi G c m_p}{\sigma_T} M$$

$$L_E \simeq 1.3 \times 10^{46} \left( \frac{M}{10^8 M_\odot} \right) \text{ erg s}^{-1}$$

Asociada a esta luminosidad hay una **tasa de acreción de Eddington** a la cual se puede sostener la luminosidad de Eddington, dada una eficiencia de uno para la conversión de masa en radiación:

$$\dot{M} = \frac{L_E}{c^2} \sim 0.23 \left( \frac{M}{10^8 M_\odot} \right) M_\odot \text{ yr}^{-1}$$

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → AGN

Ahora bien, algunos AGNs parecen presentar luminosidades mayores que la de Eddington. Esto se interpreta como un indicio de la **anisotropía de la emisión**.

De hecho, observaciones con interferómetros de radio muestran que la **emisión no-térmica forma jets o “chorros”** que emanan de la fuente central.

La energía potencial de una masa  $m$  a una distancia  $r$  de la masa central  $M$  que es liberada durante el proceso de acreción es:

$$U = \frac{GMm}{r}$$

La tasa a la cual la energía potencial de la **materia acretante** es **convertida en radiación** es:

$$L \approx \frac{dU}{dt} = \frac{GM}{r} \frac{dm}{dt} = \frac{GM\dot{M}}{r}$$

donde  $\dot{M}$  es la tasa de acreción sobre el objeto compacto.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → AGN

El radio de Schwarzschild de un agujero negro de masa  $M$  es:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \sim 3 \times 10^{13} \left( \frac{M}{10^8 M_\odot} \right)$$

A partir de un cálculo completamente clásico, la velocidad de escape de la superficie de una estrella de masa  $M$  y radio  $r$  es  $v = (2GM/r)^{1/2}$ , y por lo tanto, simplemente haciendo  $v = c$

resulta  $r = 2GM/c^2$

Análisis relativistas indican que si la radiación es emitida desde la coordenada radial  $r = 2GM/c^2$ , la frecuencia de cualquier onda se corre al valor de frecuencia cero, indicando que ninguna información puede alcanzar el infinito desde un radio  $r < R_s = 2GM/c^2$  (Longair, vol. 2, pag. 115 y 117)

El radio de Schwarzschild indica la posición de la superficie que separa el interior del agujero negro del resto del Universo.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ AGN

La última órbita estable alrededor del agujero está a  $3R_S$  (Longair, vol2, 118), por tanto la energía liberada por la materia acretante es:

$$L \approx \frac{dU}{dt} = \frac{GM}{r} \frac{dm}{dt} = \frac{GM\dot{M}}{r}$$

$$R_S = \frac{2GM}{c^2} \sim 3 \times 10^{13} \left( \frac{M}{10^8 M_\odot} \right)$$



$$L = \frac{GM\dot{M}}{3R_S} = \frac{GM\dot{M}}{6GM/c^2} \sim \frac{1}{6} \dot{M} c^2$$

La eficiencia del proceso, por tanto, es mucho mayor que la de procesos termonucleares.

De hecho, la eficiencia radiativa real es un poco menor ya que por el teorema virial, la mitad de la energía va a calentar el gas, y la otra mitad es radiada. Luego,

$$L \sim 0.1 \dot{M} c^2$$

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES AGN

La *energía radiada* por un disco se emite según la *ley de Wien*:

$$L = \frac{GM\dot{M}}{2r} = 2\pi r^2 \sigma T^4$$

 constante de Stefan-Boltzmann

Indica que se considera la radiación proveniente de cada superficie del disco

 
$$T(r) = \left( \frac{GM\dot{M}}{4\pi\sigma r^3} \right)^{1/4}$$

Si la materia tiene momento angular formará un disco alrededor del objeto compacto. En este caso es posible demostrar que:

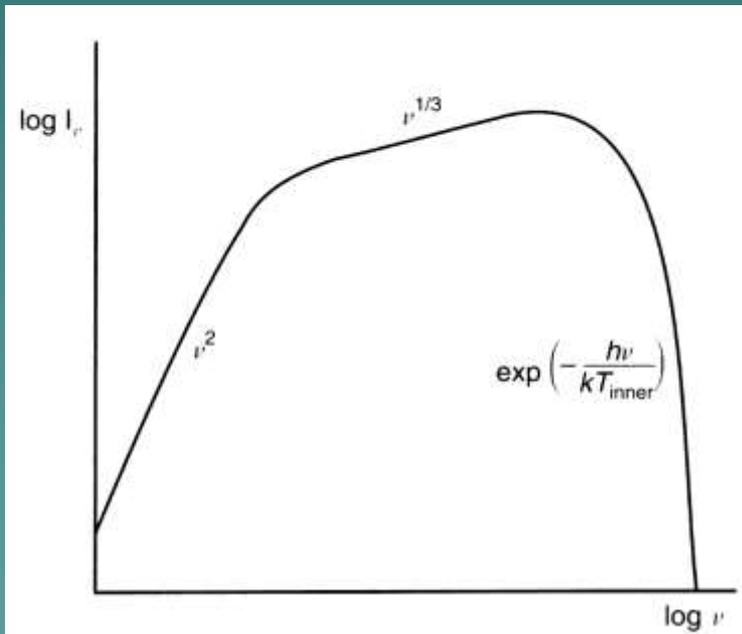
$$T(r) = \left\{ \frac{3GM\dot{M}}{8\pi\sigma r^3} \left[ 1 - \left( \frac{R_{\text{in}}}{r} \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/4}$$

donde  $R_{\text{in}}$  es el borde interno del disco de acreción.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ AGN

A cada  $r$  el disco radía como un cuerpo negro:

$$B_\nu(T) \propto \frac{\nu^3}{\exp(h\nu/\kappa T) - 1}$$



El espectro total se obtiene integrando sobre todo el disco:

Espectro típico del disco de acreción delgado, en función de la frecuencia.

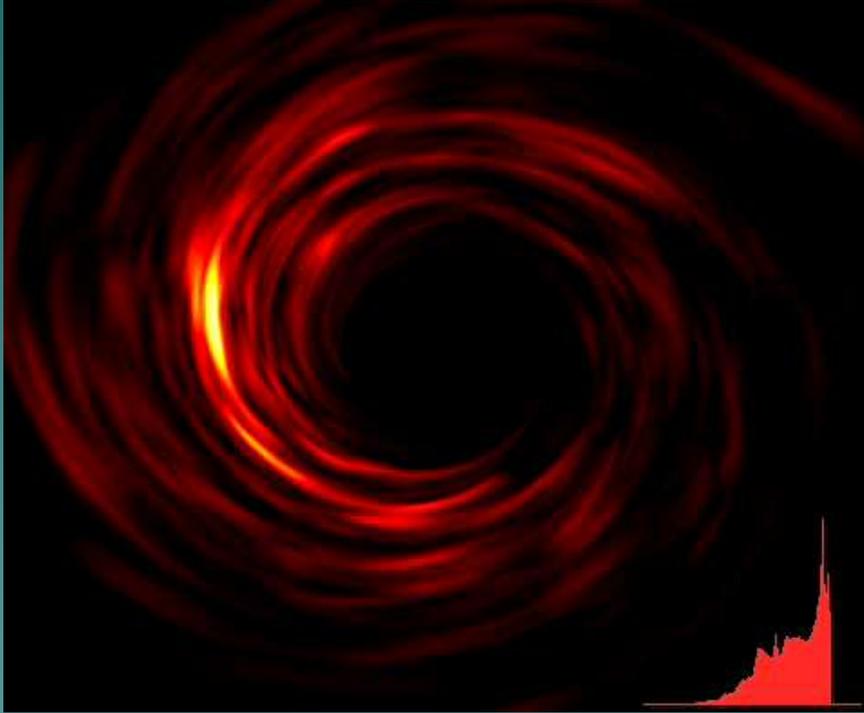
$$T(r) = \left\{ \frac{3GM\dot{M}}{8\pi\sigma r^3} \left[ 1 - \left( \frac{R_{\text{in}}}{r} \right)^{1/2} \right] \right\}^{1/4}$$

$$I(\nu) \propto \int_{R_{\text{in}}}^{R_{\text{out}}} B_\nu(T(r)) r dr$$

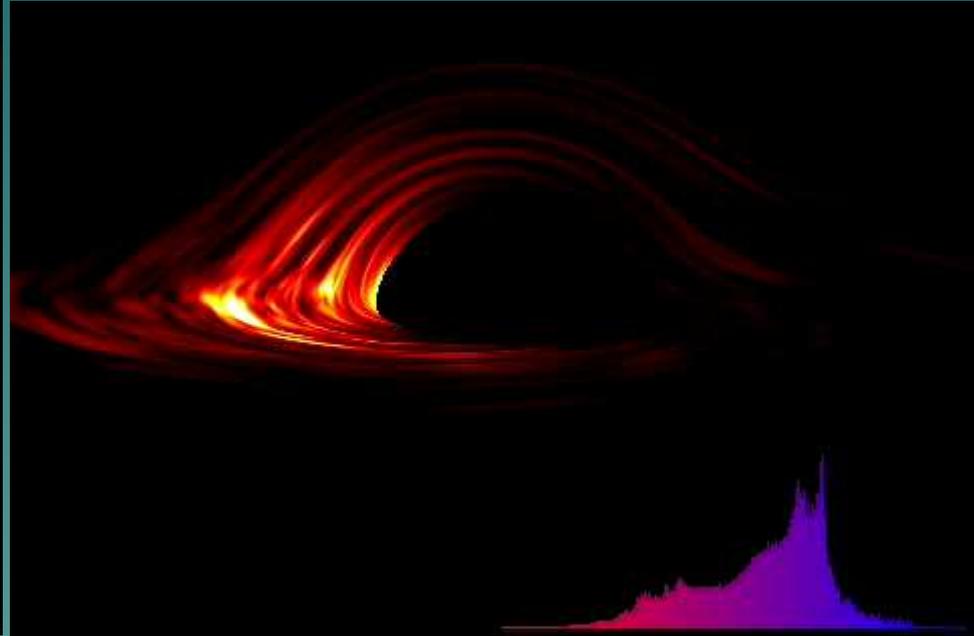
# Agujeros negros supermasivos

*Como veríamos un agujero negro?*

Cash et al. (2003)



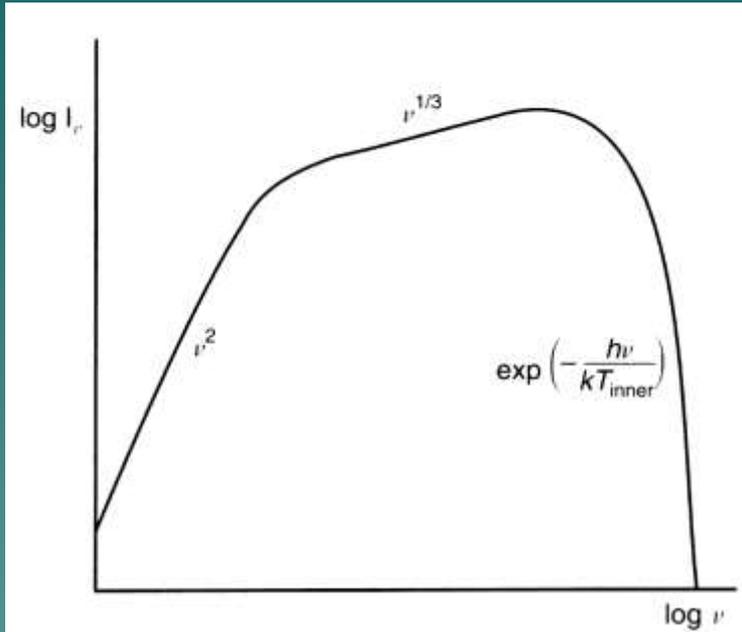
Disco de acreción visto con un ángulo de inclinación de  $60^\circ$



Ángulo de inclinación de  $10^\circ$

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ AGN

A cada  $r$  el disco radía como un cuerpo negro:



Espectro típico del disco de acreción delgado, en función de la frecuencia.

El espectro típico de un AGN tiene una forma bastante diferente del correspondiente a este disco de acreción.

El espectro está formado por la contribución de diferentes procesos que dan lugar a diferentes partes del espectro.

En particular el *big blue bump* en el UV es emitido por el disco de acreción.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → AGN

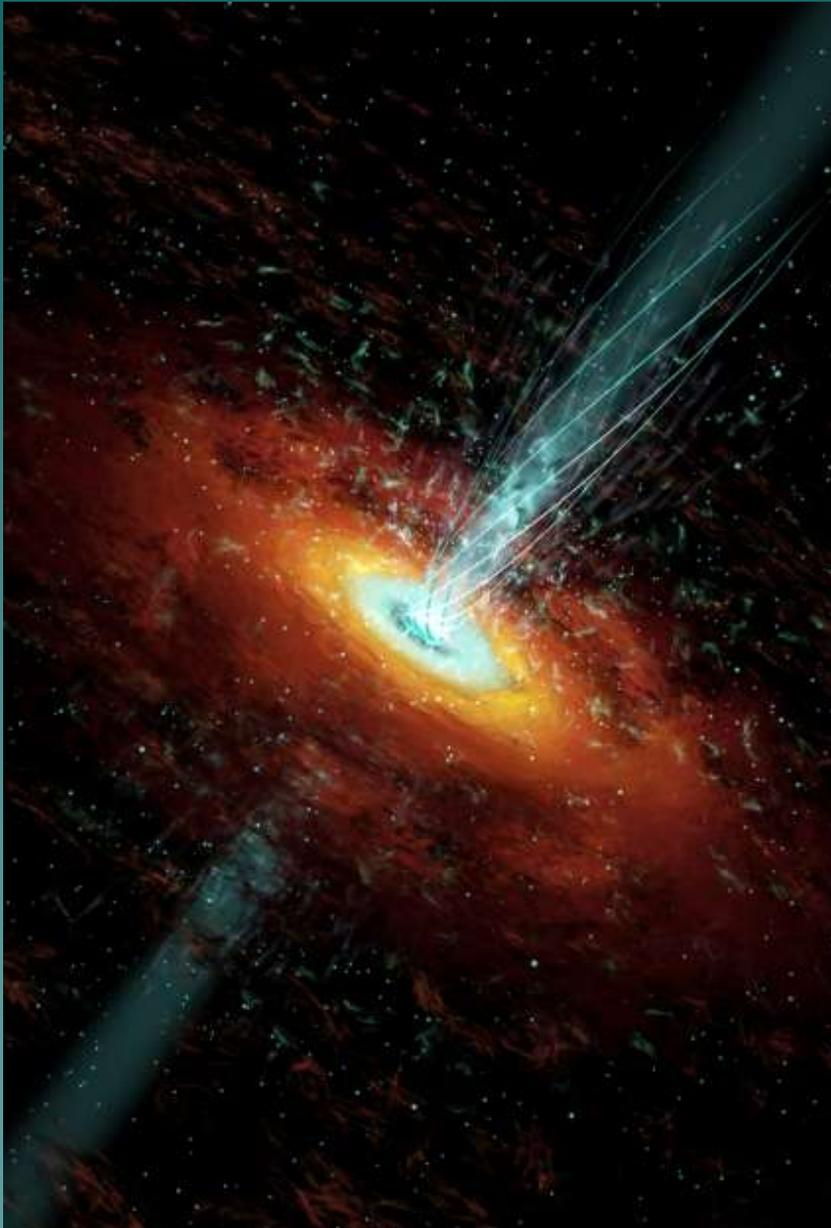
No podemos entrar ahora en detalles de la emisión de los **discos de acreción** y los diferentes modelos existentes. Basta decir que estos **modelos permiten reproducir de forma razonable la emisión térmica** (desde el óptico a los rayos X suaves) que presentan los AGNs.

A energías más altas la emisión puede tener una componente debida a Comptonización térmica pasando luego a ser no-térmica y dominada por los jets (el electrón relativista comptoniza al fotón).

**El mecanismo de producción de los jets no está claramente establecido.** Es muy probable que los campos magnéticos asociados al disco de acreción jueguen un papel importante en el lanzamiento y la colimación del plasma relativista.

El fluido puede comenzar como un plasma térmico que se mueve a velocidades relativistas macroscópicas.

# Modelo estándar de jet relativista



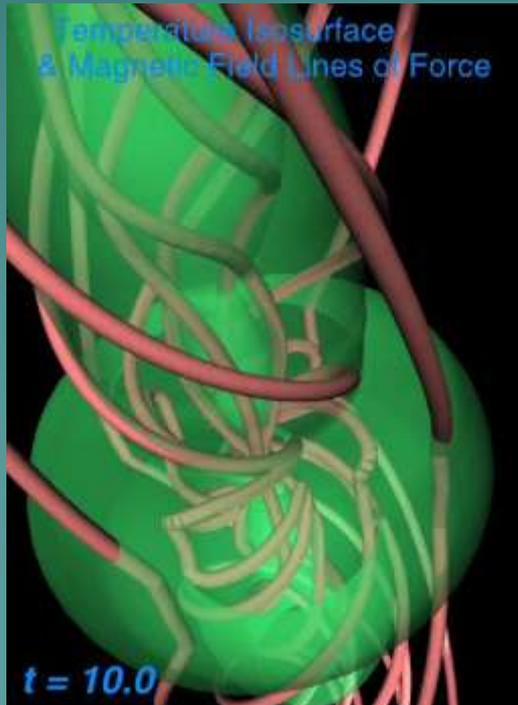
## *Jet Relativistas en AGN*

- Originados de la acreción de materia en torno a agujeros negros supermasivos.
- Están formados por plasma (pares electrón+positrón o electrón+protón) con energía interna y velocidades *relativistas*
- Campo magnético arrastrado del disco probablemente colima y acelera el plasma

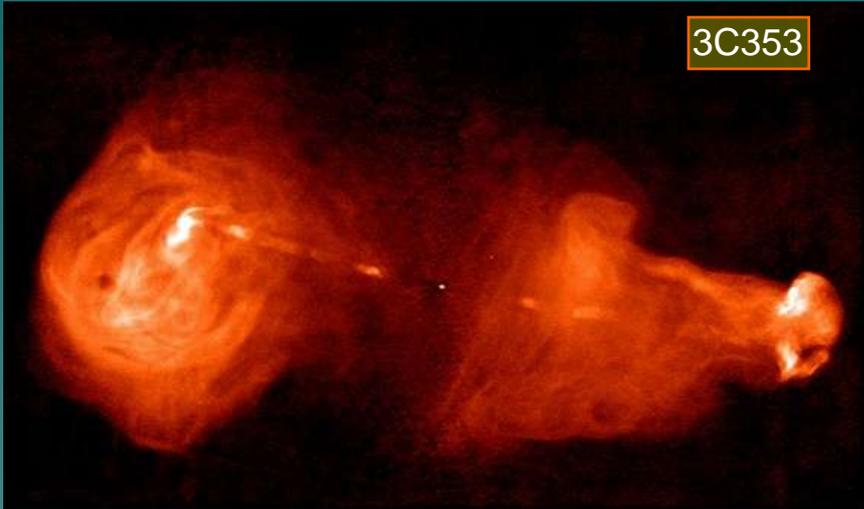
# Formación de jets relativistas

## Mecanismo de Blandford y Payne:

Líneas de campo magnético ancladas en el disco de acreción extraen material de las regiones más internas del disco, siendo eyectadas a lo largo del eje de rotación del agujero negro.



# Modelo estándar de jet relativista



3C353

## Jet Relativistas en AGN

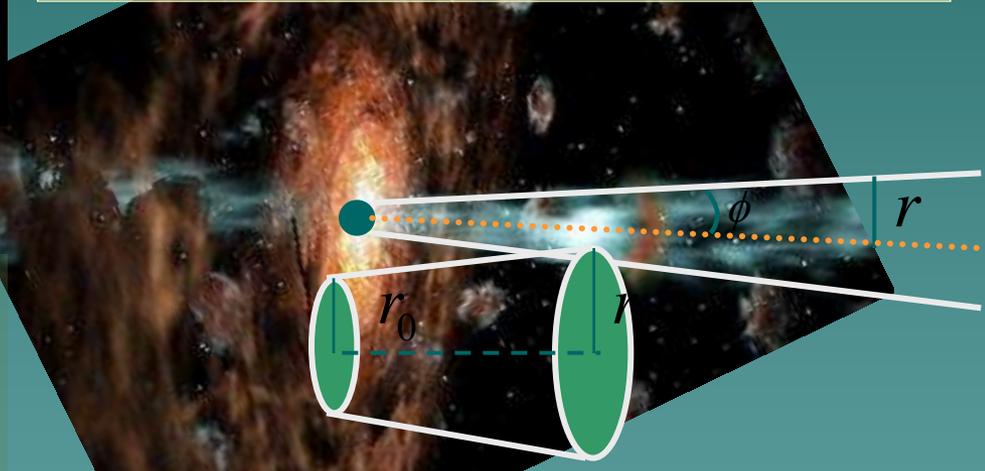
- Mantienen una increíble colimación, con un ángulo de apertura fijo de varios grados, terminando en una fuerte interacción (“hot spots”) con el medio externo inter galáctico.

### Evolución a lo largo del jet

Presenta pérdidas de energía a lo largo del mismo debido a:

#### Expansión adiabática

La conservación del flujo magnético nos permite estimar la evolución del campo a lo largo del jet



Campo paralelo  $B_{\parallel} \propto B_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-2}$

Campo perpendicular  $B_{\perp} \propto B_0 \left( \frac{r}{r_0} \right)^{-1}$

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → AGN

*Ondas de choque* pueden entonces transformar la energía cinética macroscópica en energía de las partículas, que al volverse relativistas se enfrían por radiación sincrotrón e interacciones Compton inverso.

Los fotones “semilla” para estas últimas interacciones pueden ser los propios fotones sincrotrónicos, o fotones de fuentes externas como pueden ser el disco o radiación reprocesada en nubes que orbitan cerca del objeto compacto.

Las nubes más cercanas se encuentran en la llamada región de líneas anchas (BLR: BROAD LINE REGION).

Se trata de nubes que se mueven a velocidades  $\sim 5000 \text{ km s}^{-1}$  en el campo gravitacional del objeto compacto.

Más lejos hay una región de líneas angostas (NLR: NARROW LINE REGION), más lentas.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → AGN

Nubes más cercanas: región de líneas anchas  
(BLR: BROAD LINE REGION).

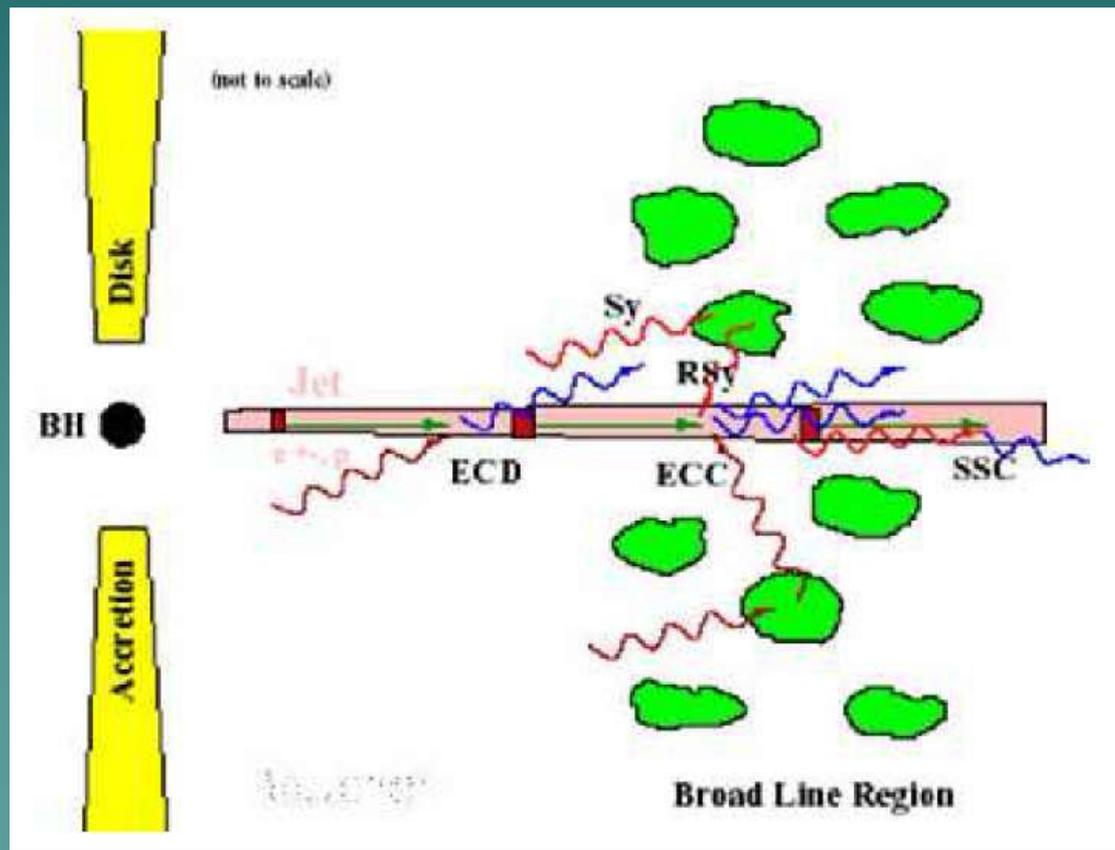
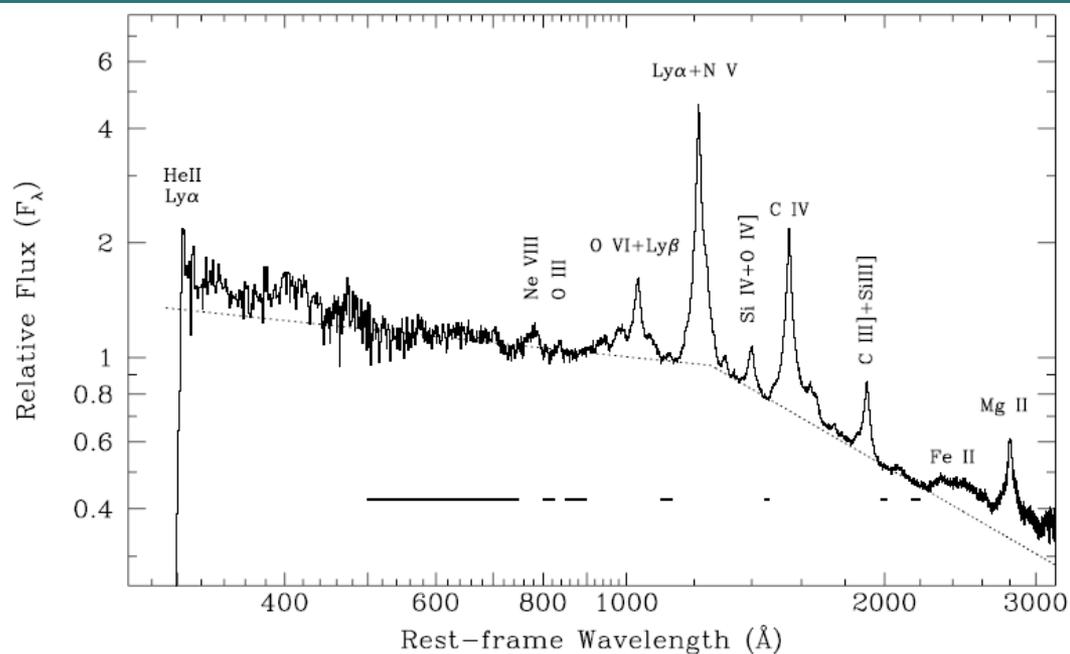


Diagrama (fuera de escala) de la región central de una AGN

# SPECTRUM OF A QUASAR

The **optical** and **ultraviolet** spectrum of a quasar typically shows **strong broad emission lines** characteristic of moderately dense gas.

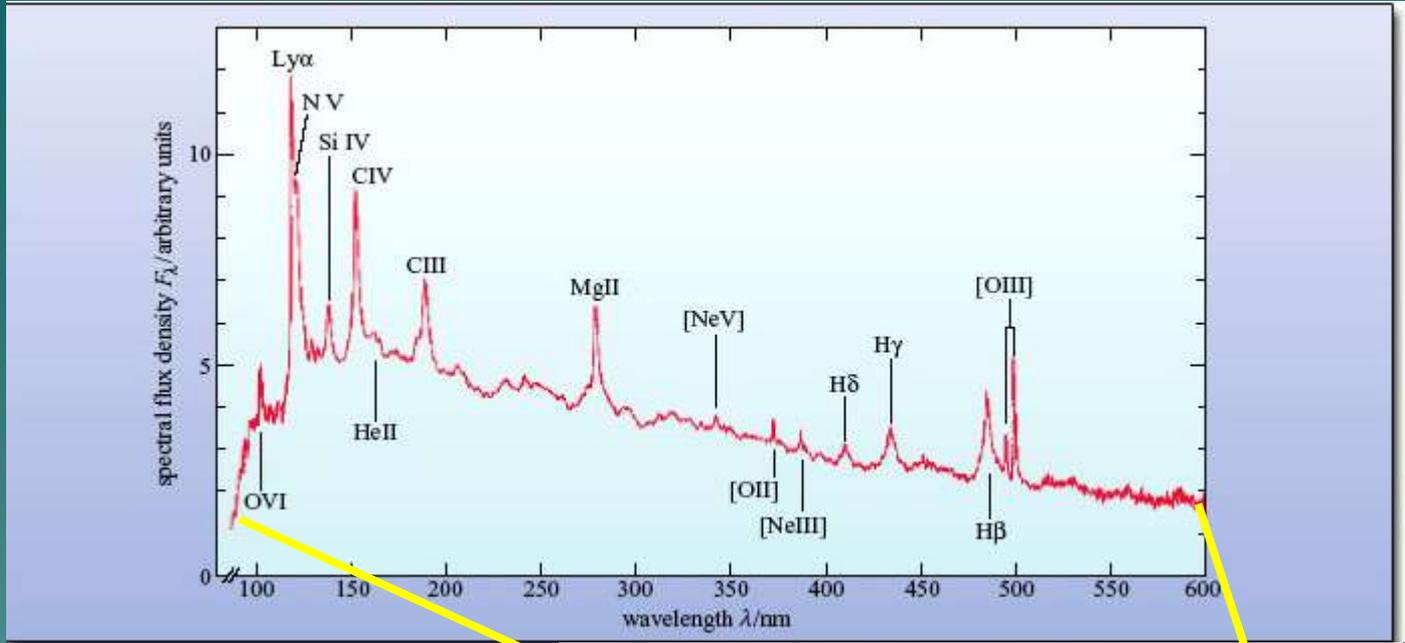


The **widths** of the lines correspond to the **Doppler shifts** expected from emitting gas travelling at speeds of approx.  $10,000 \text{ km s}^{-1}$ .

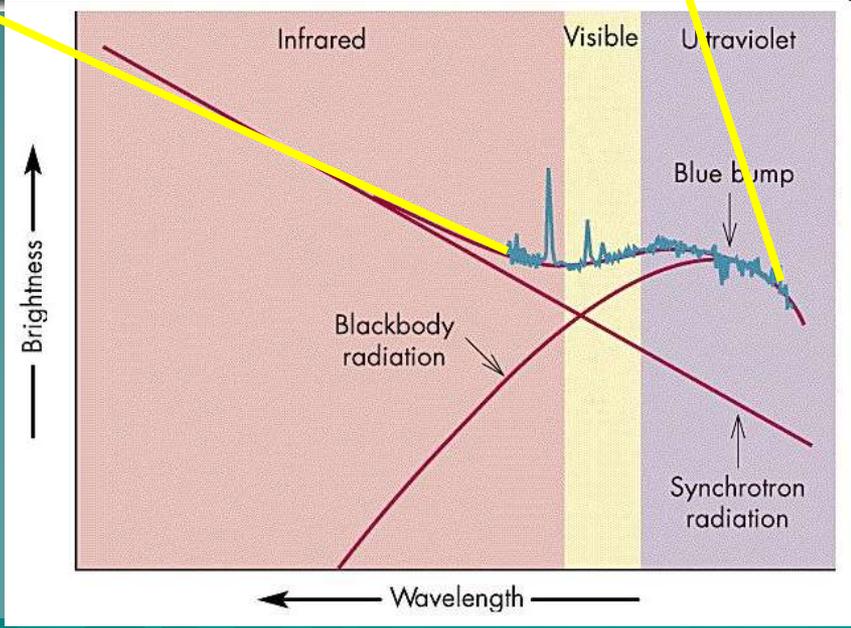
Quasars are surprisingly alike in their emission-line spectra.

The object-to-object similarities span:

- the full range of QSO redshifts,  $0.1 < z < 6.4$ ,
- more than 4 orders of magnitude in luminosity.

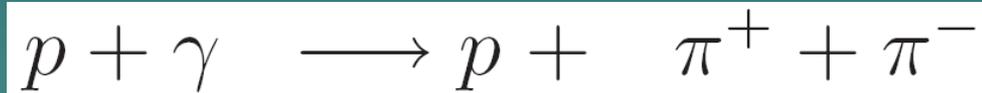
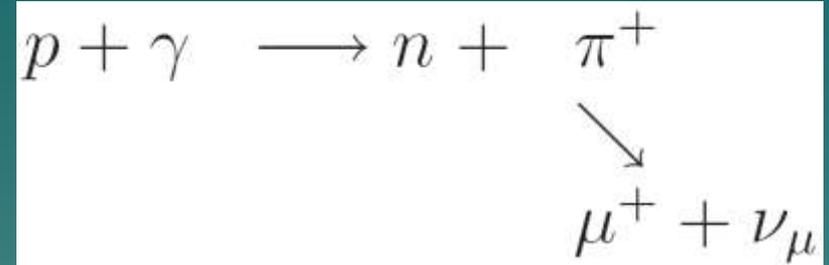
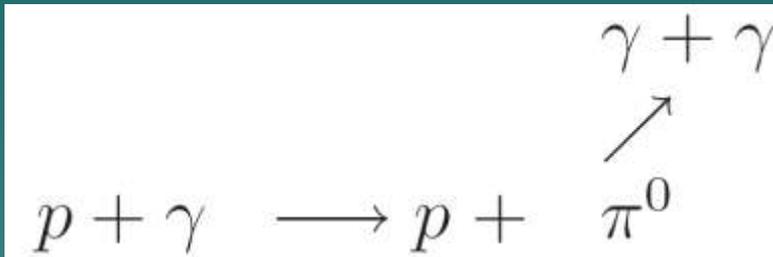


Spectrum of a quasar:  
contains **very broad**  
emission lines



# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES AGN

Si el jet tiene **contenido hadrónico**, rayos  $\gamma$  se pueden producir por reacciones del tipo:

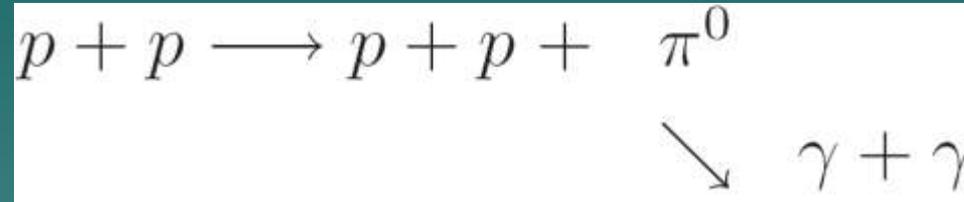


Donde los fotones para la reacción original pueden venir de una **corona** formada por un plasma muy caliente ( $T \sim 10^9$  K) alrededor de la fuente central.

Este plasma, que probablemente es calentado por procesos de reconexión magnética, se enfría por Comptonización de los fotones más fríos del disco produciendo rayos X que pueden interaccionar con protones relativistas para producir piones. El decaimiento de estos piones lleva a rayos  $\gamma$  y a cascadas electromagnéticas.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES AGN

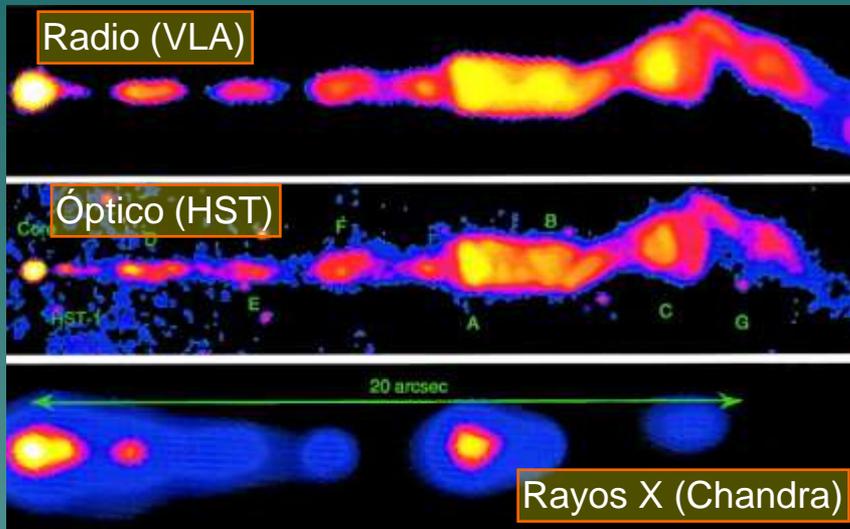
También es posible que un haz de protones interactúe con una nube molecular y se produzcan rayos  $\gamma$  a través de reacciones :



El contenido de materia de los jets de los AGNs, sin embargo, no está claramente establecido.

Podría tratarse de un fluido formado por  $e^-$  y  $e^+$  relativistas,  
por  $e^+$  relativistas y  $e^-$  y  $p$  fríos,  
o por una mezcla de estas posibilidades.

# Modelo estándar de jet relativista



Marshall et al. (2002)

## ***M87 a diferentes frecuencias***

Recientes observaciones en rayos X con Chandra muestran que esta puede ser sincrotrón, aunque otros autores sugieren lo contrario.

## ***Jet Relativistas en AGN***

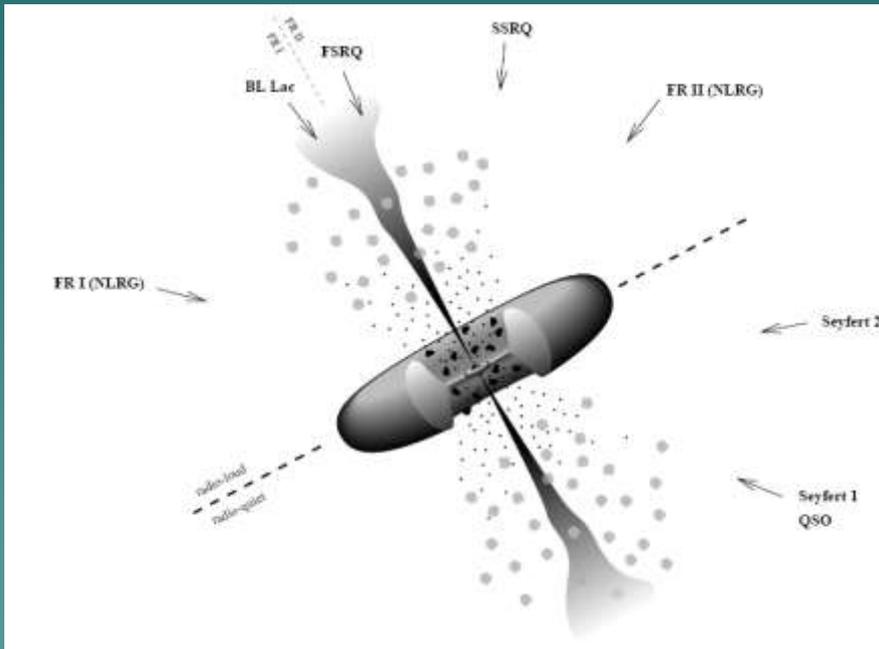
- *Emisión no-térmica* producida por procesos sincrotrón e inverse Compton
- *Sincrotrón* es el responsable de la emisión a longitudes de onda de radio
- A más altas energías (óptico, rayos X) hay una fuerte componente sincrotrón, pero el *inverse Compton* también puede jugar un papel importante

En los modelos SSC los fotones que producen el inverso Compton supone que provienen del propio jet, de ahí el nombre de “Synchrotron Self Compton”

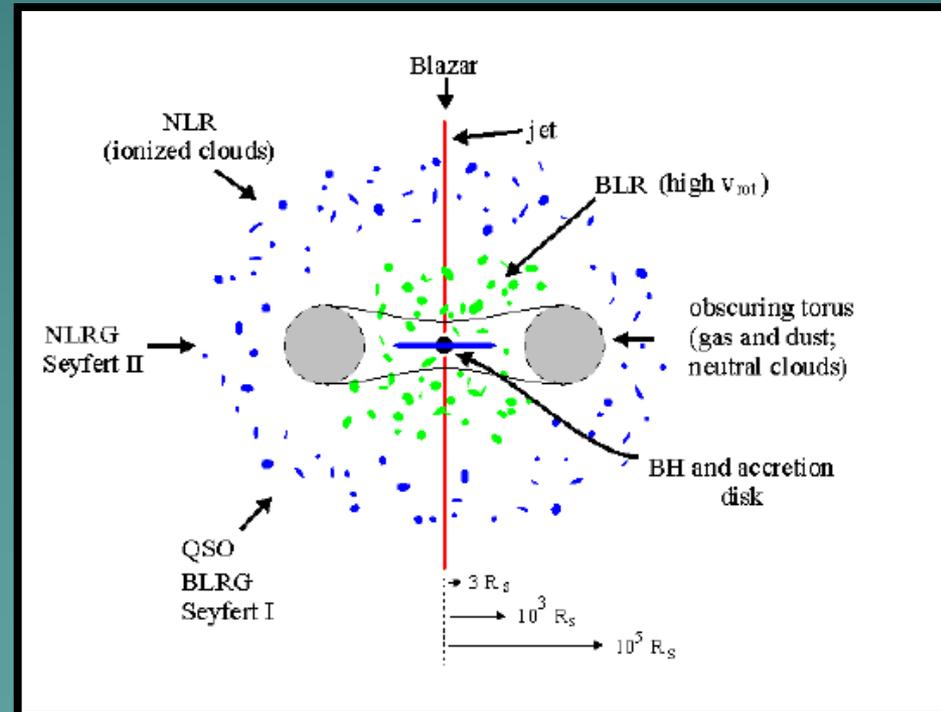
En el modelo *EC* (“External Compton”) estos fotones provienen de la corona que rodea al agujero negro (son externos al jet)

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → AGN

Modelo estándar de AGN. En la figura se señalan las distintas fenomenologías (distintos ángulos) que se observan, de acuerdo al modelo de Unificación.



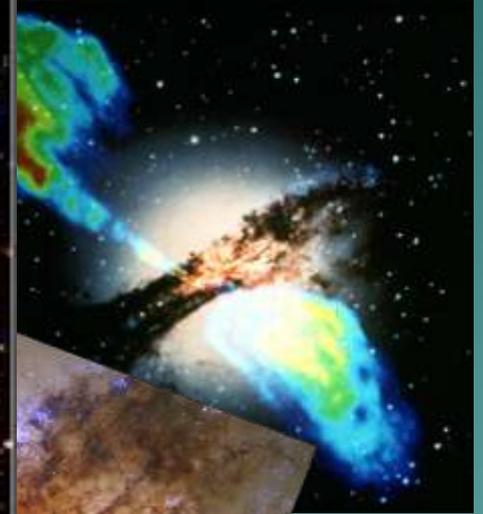
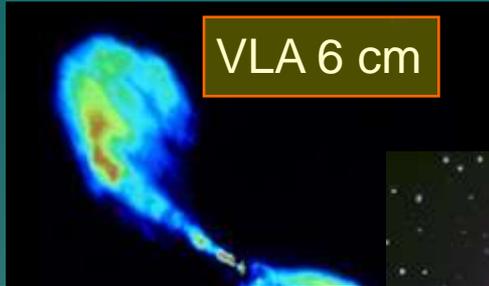
(FSRQ: flat spectrum radio quasar)



# Agujeros negros supermasivos

Centaurus A es una de las radio fuentes más brillantes y cercanas, situada a tan solo 3 Mpc

VLA 6 cm



Composición multifrecuencia



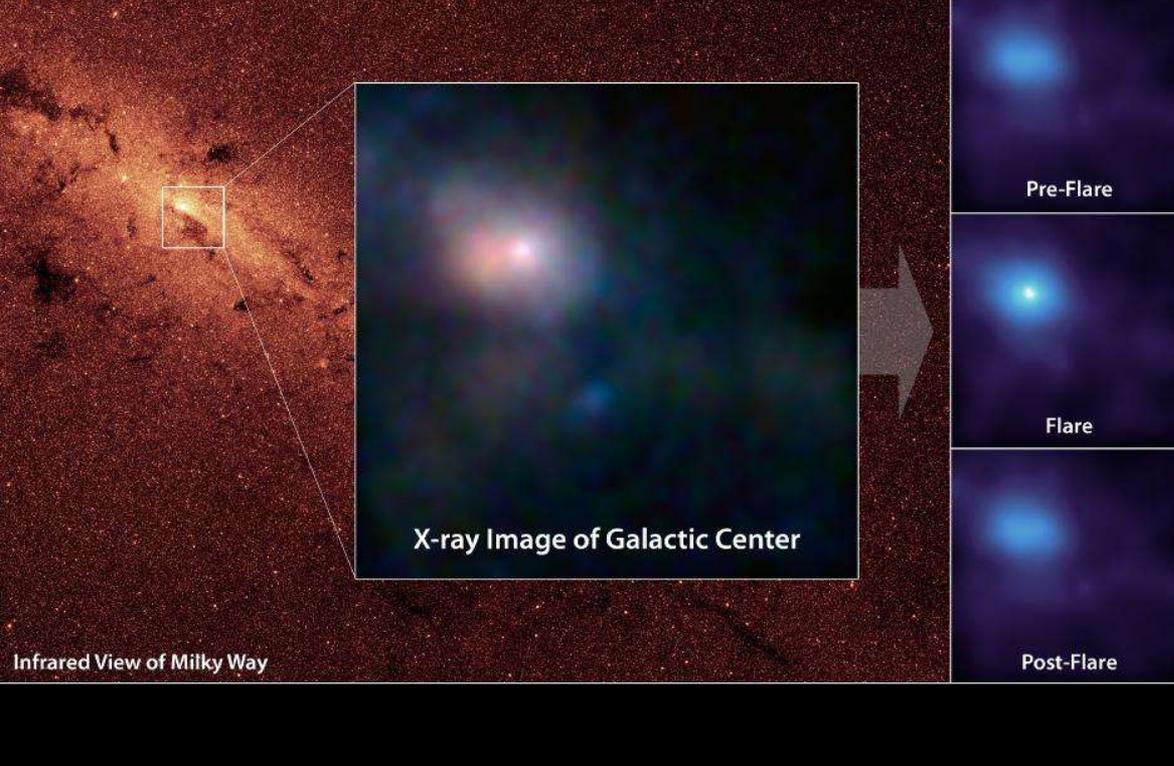
Rayos X, Chandra

# NASA's NuSTAR Spots Flare From Milky Way's Black Hole (Sgr A)



NuSTAR: Nuclear Spectroscopic Telescope Array

# NASA's NuSTAR Spots Flare From Milky Way's Black Hole (Sgr A)



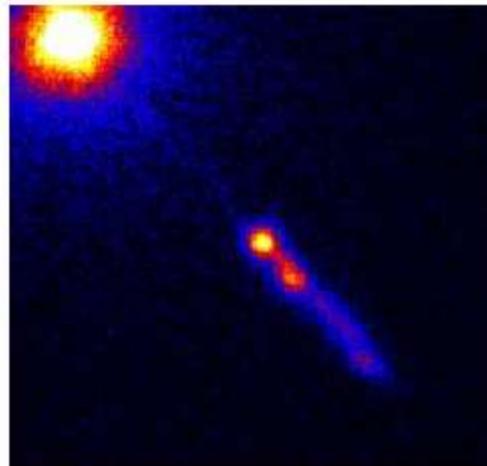
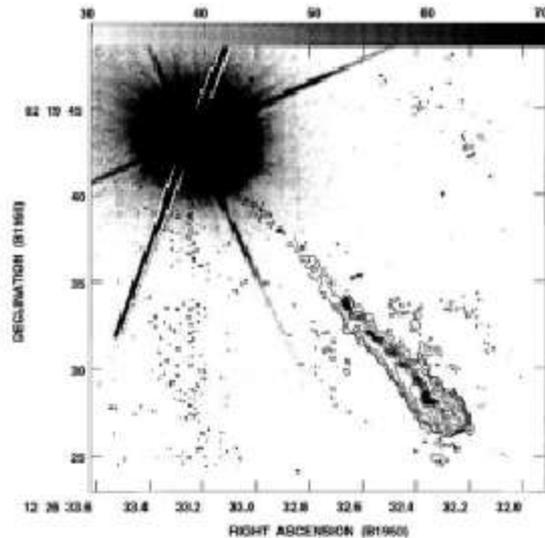
In the main image, the brightest white dot is the hottest material located closest to the black hole, and the surrounding pinkish blob is hot gas, likely belonging to a nearby supernova remnant.

The time series at right shows a flare caught by NuSTAR over an observing period of two days in July 2012; the middle panel shows the peak of the flare, when the black hole was consuming and heating matter to temperatures up to 180 million degrees Fahrenheit (100 million degrees Celsius).

The main image is composed of light seen at four different X-ray energies. Blue light represents energies of 10 to 30 kiloelectron volts (keV); green is 7 to 10 keV; and red is 3 to 7 keV. The time series shows light with energies of 3 to 30 keV.

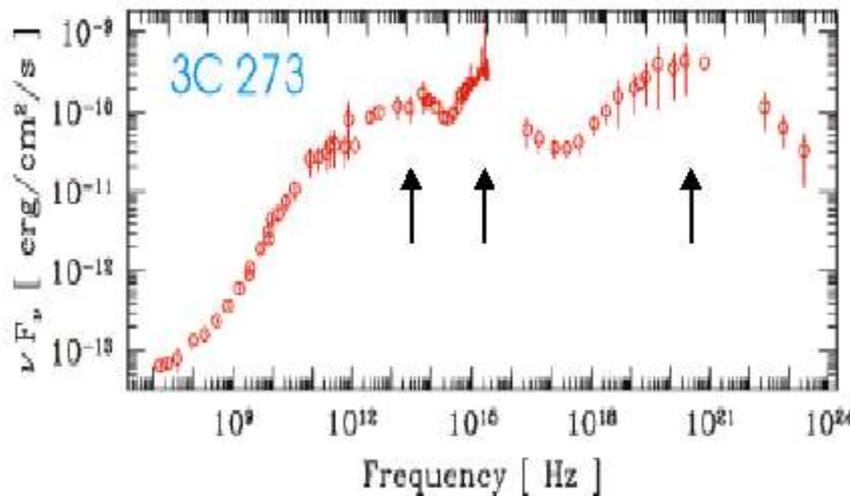
# General Properties

## Nearby FSRQ: 3C 273



$$z = 0.158,$$
$$d_L = 2.1 \times 10^{27} \text{ cm},$$
$$\Omega_m = 0.3, \Omega_L = 0.7, h = 0.65$$

Nucleus, Hot Spots, Lobes



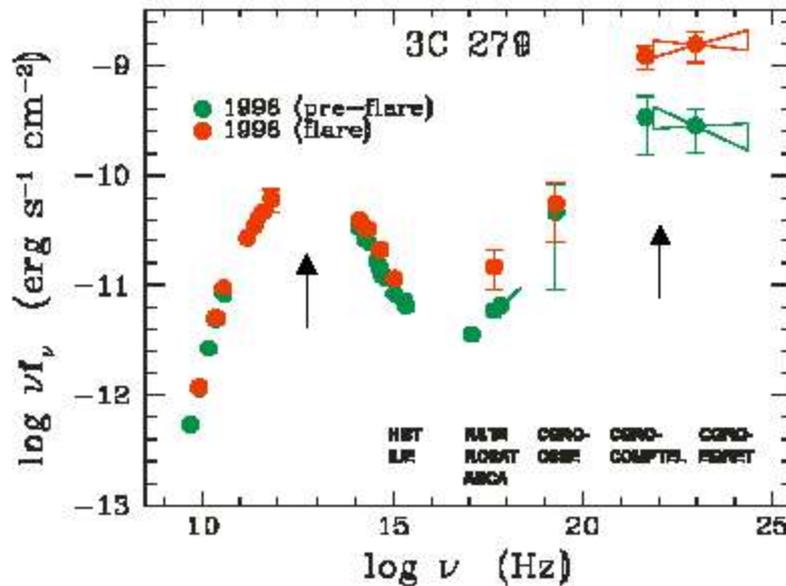
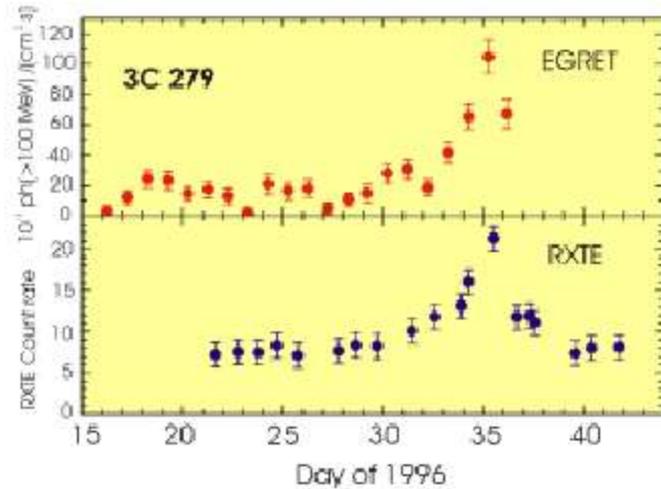
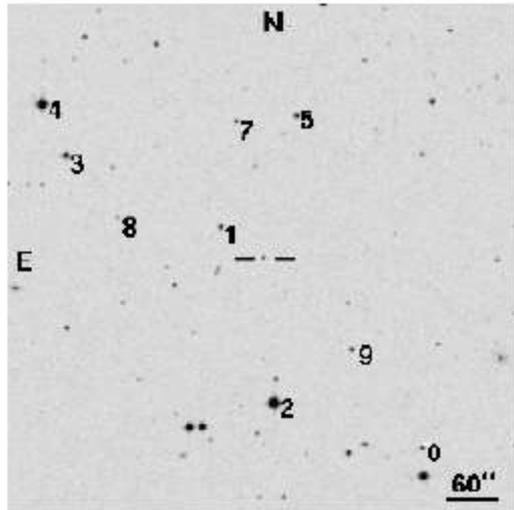
(Extranuclear Gamma Rays?)

Gamma-ray luminosity:  
 $\sim 6 \times 10^{46} f_B \text{ ergs s}^{-1}$

Variability timescale at  
gamma-ray energies:  
 $\sim \text{EGRET VP}$

$$dL/dt \sim 5 \times 10^{40} \text{ erg / s}^2$$

# Blazar 3C 279



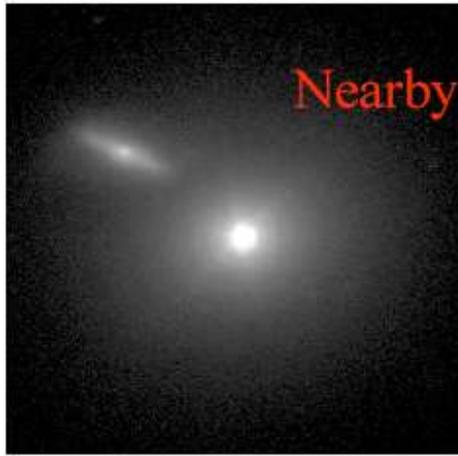
$$z = 0.538, d_L = 8.8 \times 10^{27} \text{ cm}$$

Gamma-ray luminosity:  
 $\sim 5 \times 10^{48} f_B \text{ ergs s}^{-1}$

Variability timescale at  
 gamma-ray energies:

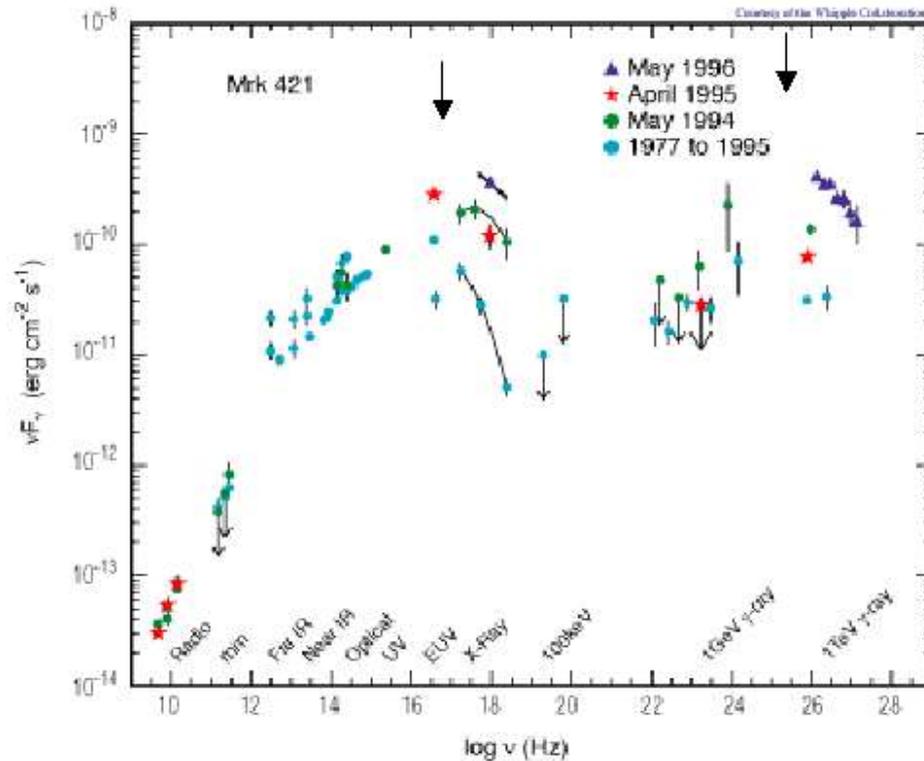
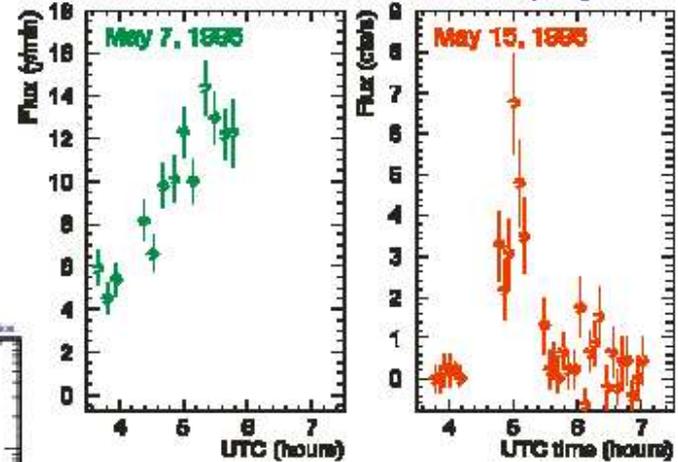
$$dL/dt \sim 6 \times 10^{43} \text{ erg / s}^2$$

“energy acceleration”



## Nearby BL Lac: Mrk 421

### Mrk 421, $>300$ GeV $\gamma$ -rays



$$z = 0.031, d_L = 4.4 \times 10^{26} \text{ cm}$$

Gamma-ray luminosity:  
 $\sim 10^{45} f_B \text{ ergs s}^{-1}$

Variability timescale at  
 gamma-ray (TeV)  
 energies:  $\sim 15 \text{ min}$

$$dL/dt \sim 10^{42} \text{ erg / s}^2$$

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

Los llamados microcuasares fueron descubiertos en la década de 1990. Se trata de **sistemas binarios formados por una estrella y un objeto compacto** (agujero negro o estrella de neutrones).

- Si la estrella es de la secuencia principal de baja masa, hablamos de *Mqs de baja masa*.
- Si la compañera es una estrella temprana de gran masa, se habla de *Mqs de alta masa*.

Las características definitorias de estos sistemas son que la materia de la estrella se acreta sobre el objeto compacto formando un **disco de acreción** que **emite en rayos X** y que sobre el eje de rotación del sistema se forman y coliman **jets relativistas** que pueden ser detectados en **radio** debido a su **emisión sincrotrónica**.

# MICROQUASARS

Como el objeto compacto está siempre en rotación la materia no cae radialmente hacia él, sino que lo hace más lentamente y siguiendo una trayectoria de tipo espiral. Se forma entonces un disco alrededor del objeto central, conocido como **disco de acreción**.

Durante el proceso de acreción el gas se calienta a medida que es acretado y comienza a emitir radiación electromagnética. Esta radiación es muy energética y ocupa típicamente la **banda de los rayos X**, por lo que estos sistemas reciben el nombre de **binarias de rayos X**.

## MICROQUASARS

Hay más de **400 binarias de rayos X** conocidas en nuestra **galaxia**, y también se han identificado algunas en galaxias vecinas.



Imagen en rayos X del centro de nuestra galaxia obtenida con el satélite Chandra. Los puntos pequeños son en su mayoría binarias de rayos X. El área blanca brillante en el centro de la imagen es el centro galáctico, que alberga un agujero negro supermasivo.

# MICROQUASARS

La materia en la parte más interna del disco de acreción está muy caliente, y puede a su vez "inflarse" formando una nube de **gas caliente y menos denso llamada corona**.

**Tanto la corona y el disco de acreción emiten rayos X.**

Finalmente, es posible que una fracción de la materia en acreción no sea tragada por el objeto compacto, sino que sea **expulsada del sistema en forma de dos chorros colimados (con un ángulo de apertura pequeño) de partículas o jets**.

A las binarias de rayos X que presentan jets se las denomina **microquasares**.

Vemos entonces, que en su morfología general los Mqs parecen ser versiones a escala reducida de los quasares extragalácticos.

# MICROQUASARS

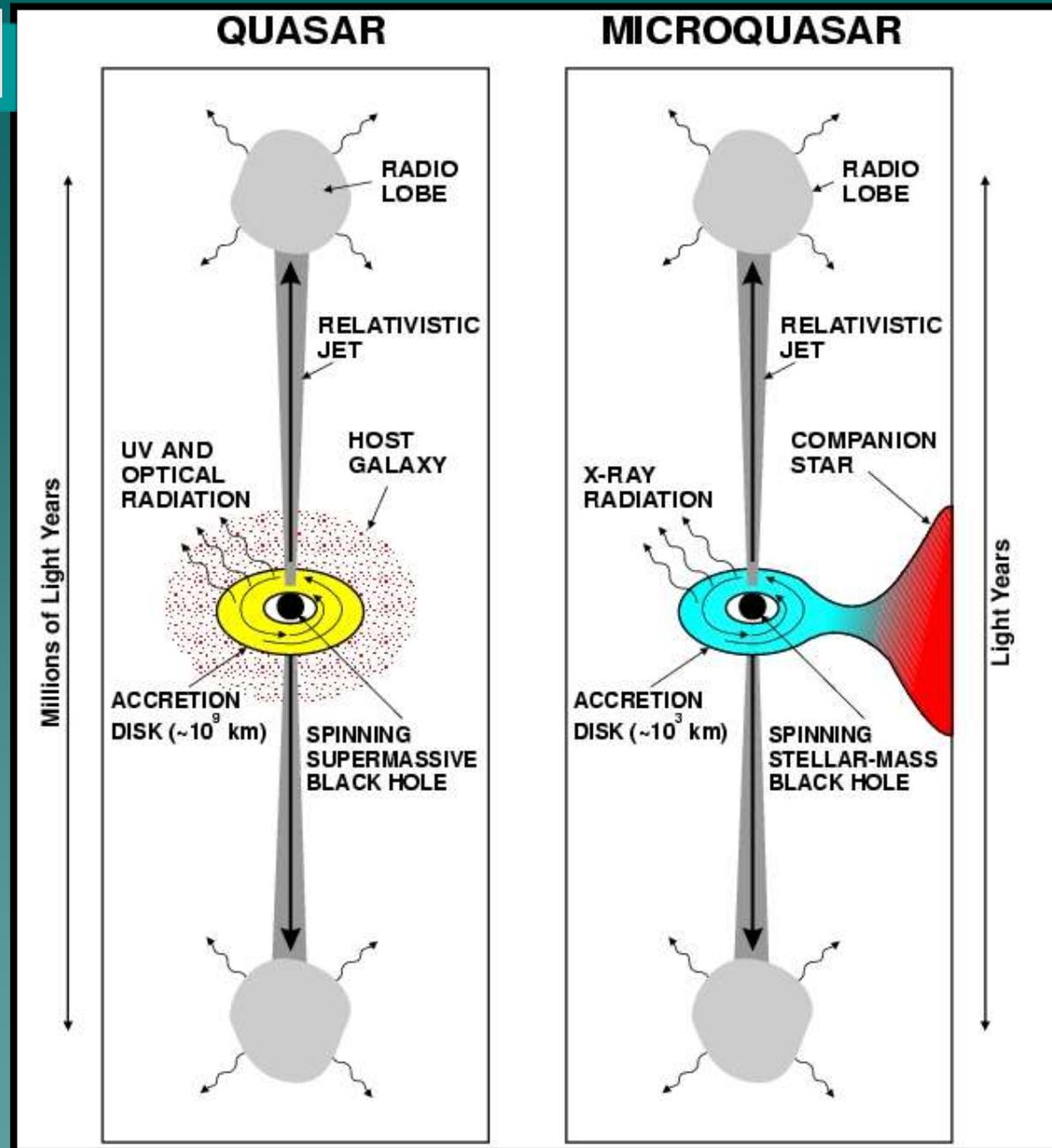
REXBs displaying relativistic *radio* jets.

Compact object may be a Neutron Star or a Black Hole (BH).

In BH, the length and time scales are proportional to the mass,  $M$ .

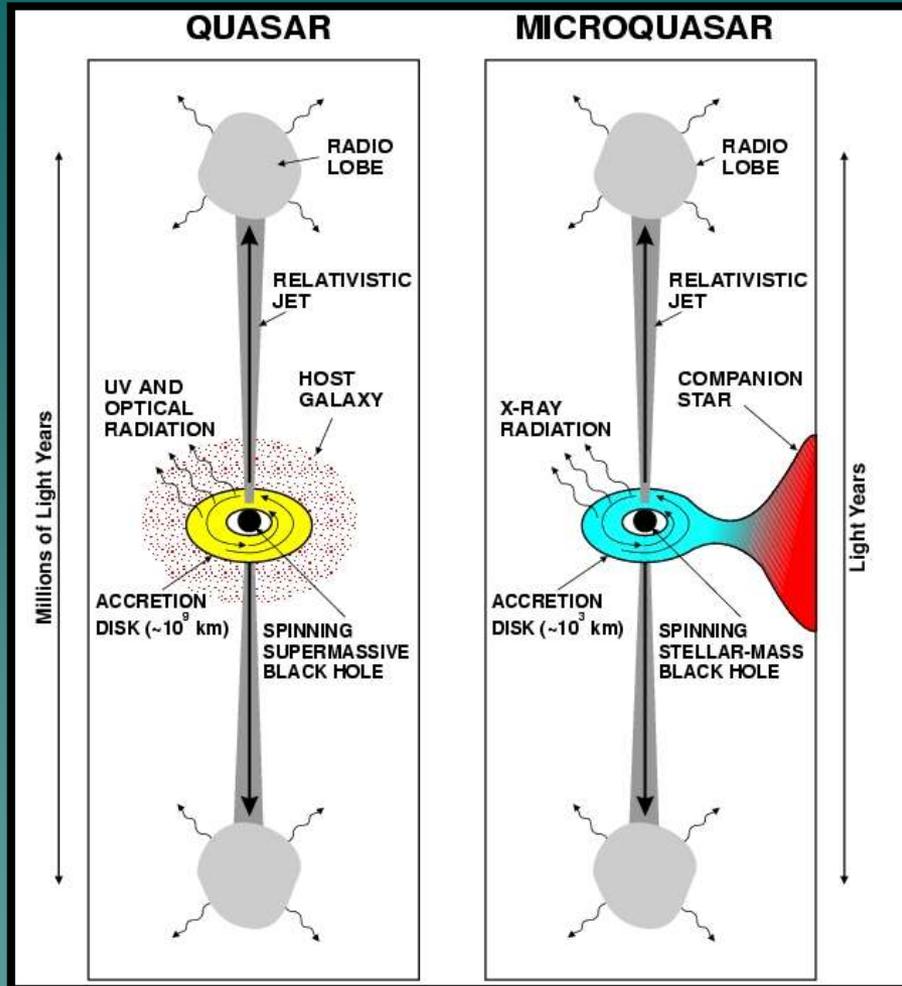
The maximum color temperature of the accretion disk is  $T_{\text{col}} \approx 2 \times 10^7 M^{-1/4}$ .

(Mirabel & Rodríguez 1998)



Similitudes, a diferentes escalas, entre un quasar y un microquasar

# MICROQUASARS



Comparación entre un quasar y un microquasar:

Ambos sistemas comparten (con diferentes escalas de longitud, masa y tiempo) ciertas características, como un objeto central acretante, un disco de acreción y jets.

Los procesos físicos básicos que operan en ambos sistemas son los mismos, aunque la presencia de la estrella compañera en los microquasares da origen a cierta fenomenología distinta.

## MICROQUASARS

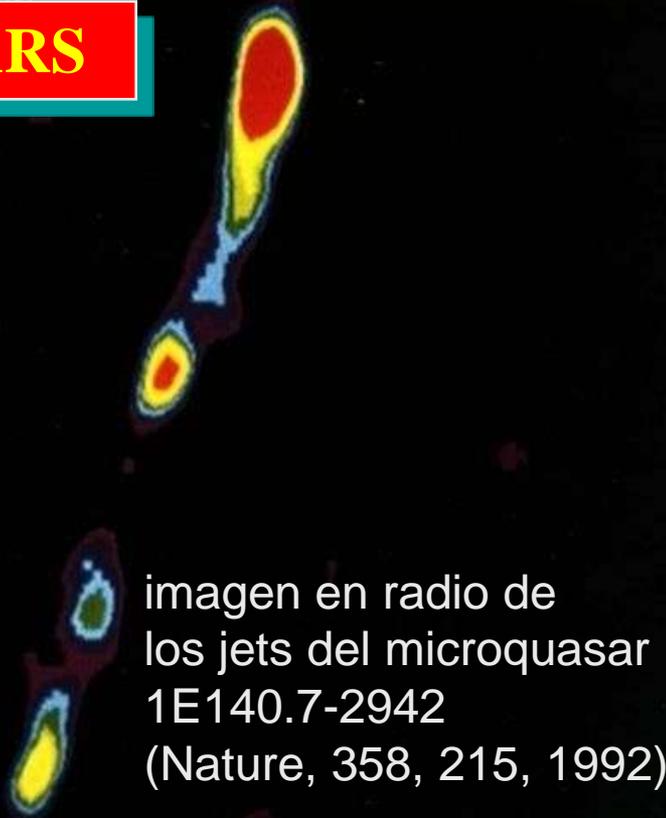


imagen en radio de  
los jets del microquasar  
1E140.7-2942  
(Nature, 358, 215, 1992)

El primer microquasar fue descubierto por Félix Mirabel, Luis Felipe Rodríguez y colaboradores en 1992. Se trata de la fuente 1E140.7-2942, cuyos jets fueron claramente observados debido a su emisión en ondas de radio. La materia que forma los jets de los microquasares es lanzada a velocidades cercanas a la de la luz; se dice entonces que las eyecciones son relativistas. Los jets transportan una cantidad enorme de energía cinética, y pueden propagarse por distancias de miles de millones de km antes de frenarse o destruirse por interacción con el medio interestelar.

# MICROQUASARS

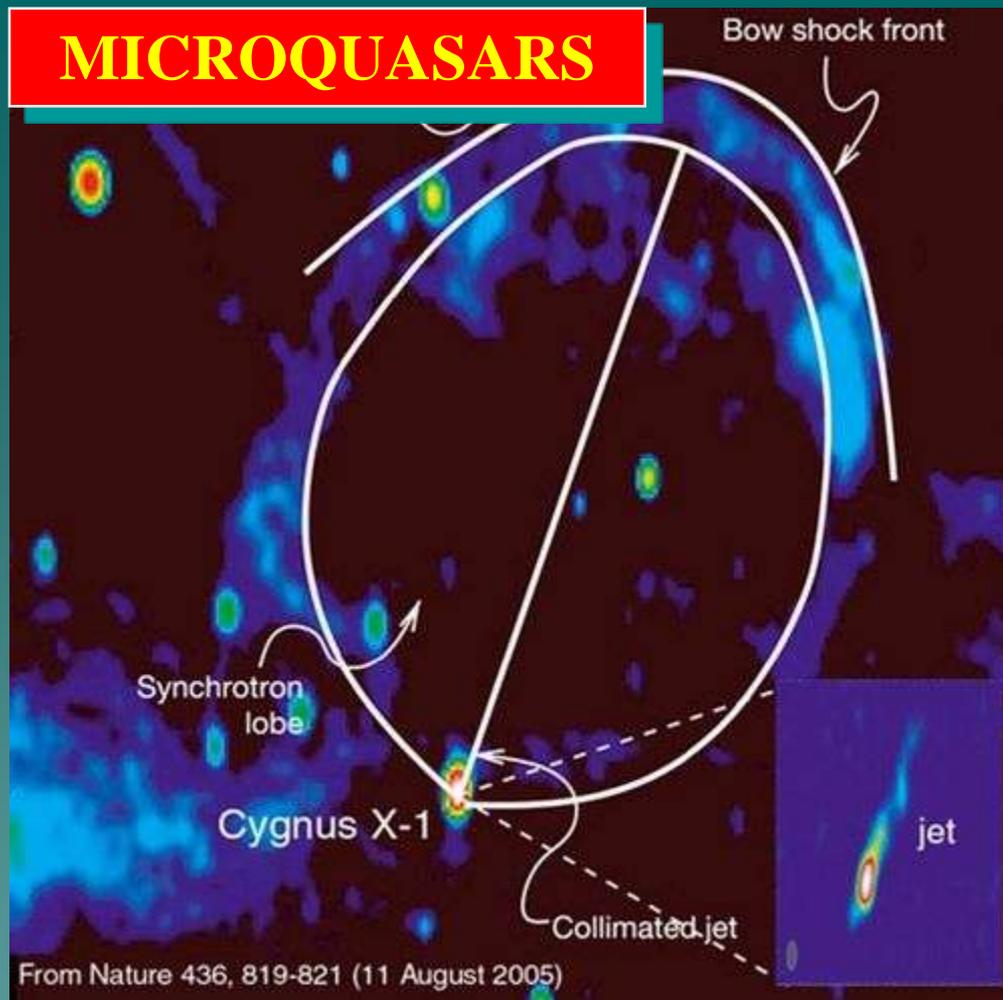


Imagen en radio de la nebulosa que rodea al microquasar Cygnus X-1. Esta nebulosa fue "inflada" por acción de los jets; la región brillante en forma de arco es la zona donde el jet se frena por interacción con el medio interestelar.

El recuadro en la parte inferior derecha de la imagen es una ampliación de la región más cercana al agujero negro donde los jets están bien colimados.

Del trabajo de Gallo et al., Nature 436, 819-821, 2005.

En algunos casos los jets son tan poderosos que pueden modificar significativamente la región que los rodea, como en el caso de los jets del microquasar **Cygnus X-1**.

# MICROQUASARS

El **proceso físico que permite el lanzamiento de los jets** no está aún hoy completamente entendido, aunque en general se acepta la idea de que está fuertemente relacionado con el campo magnético que existe en las cercanías del objeto compacto.

Otros aspectos de la **propagación de los jets**, como por ejemplo el mecanismo que los mantiene colimados sobre grandes distancias, o las inestabilidades que pueden propagarse en el gas y llegar a destruirlos, son también problemas abiertos. El estudio de estos tópicos se aborda hoy en buena parte por medio de grandes y complejas simulaciones numéricas.

La **composición de la materia que forma los jets** también es desconocida. Se sabe por cierto que una fracción deben ser electrones muy energéticos o *relativistas*. Su presencia se infiere directamente del espectro de emisión en ondas de radio de los jets.

La forma del espectro de radio indica claramente que la emisión se debe a *radiación sincrotrón*.

# MICROQUASARS

Aunque se detectan por su emisión característica en radio, el espectro radiativo de los jets abarca casi todo el espectro electromagnético, desde radio hasta rayos X, y posiblemente rayos gamma.

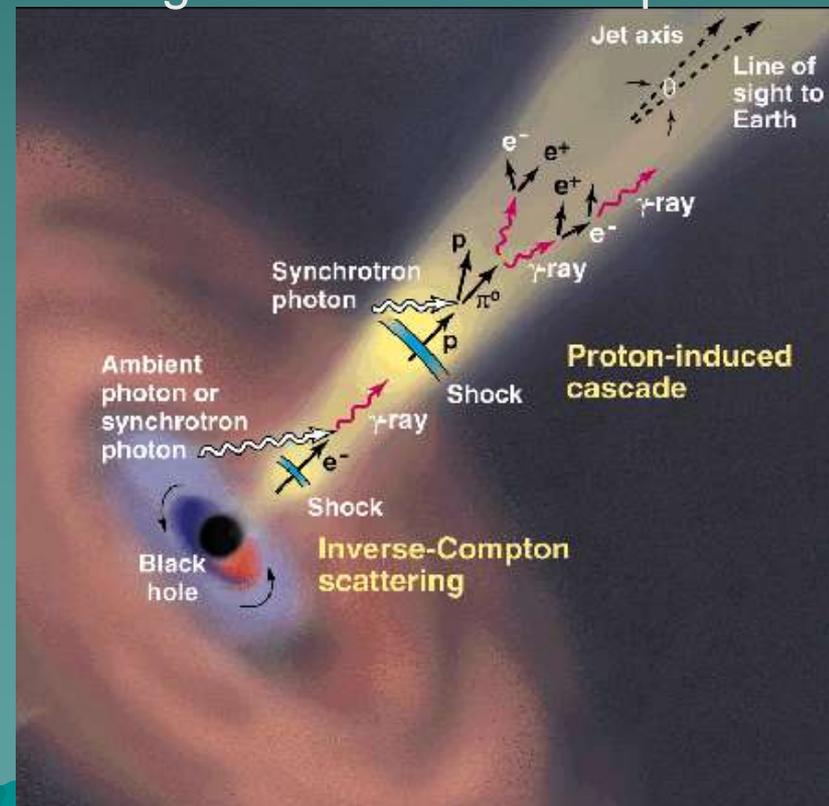
Además de la radiación sincrotrón, otros procesos físicos pueden contribuir al espectro de emisión de los jets de microcuasares. Estos procesos involucran la interacción de las partículas relativistas en el jet con otras partículas o con radiación, que pueden provenir del mismo jet o de la estrella compañera.



# MICROQUASARS

Se han propuesto algunos **mecanismos que explican de qué manera podrían acelerarse partículas** eficientemente hasta energías relativistas en las condiciones físicas presentes en los jets. Surgen aquí sin embargo dos preguntas:

- 1) ¿pueden por estos mecanismos acelerarse además de electrones otros tipos de partículas, como por ejemplo protones, si es que existen en los jets?,
- 2) ¿es posible que estas partículas alcancen energías tan altas como para emitir rayos gamma?



# MICROQUASARS

Desde hace algunos años se sabe que, en efecto, al menos algunos microcuasares son fuentes de rayos gamma.

Hasta el momento unos pocos microcuasares han sido detectados a altas energías.

En algunas fuentes la emisión es persistente, mientras que en otras (como es el caso de Cygnus X-1) se han observado fulguraciones transitorias.

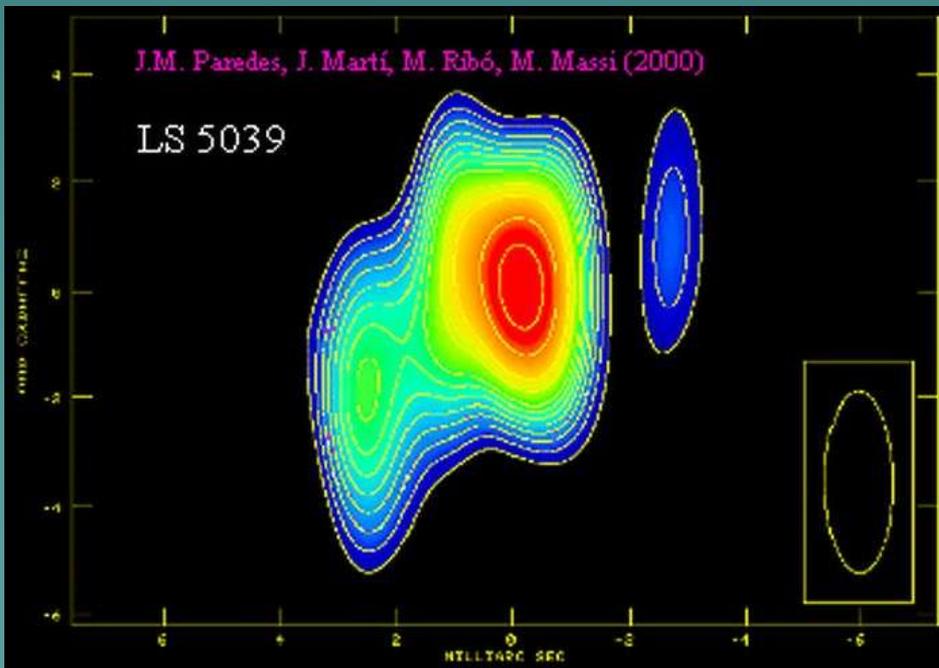


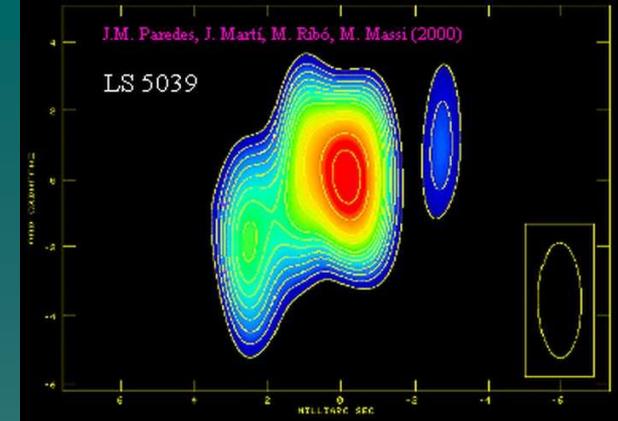
Imagen en radio del microcuasar LS 5039.

La posición de este objeto coincide con la de una fuente de rayos gamma detectada con el instrumento EGRET del satélite Compton en la década de 1990.

(Paredes, Martí, Ribó y Massi, Science, 288, 2340, 2000).

# MICROQUASARS

Imagen en radio del microquasar LS 5039.



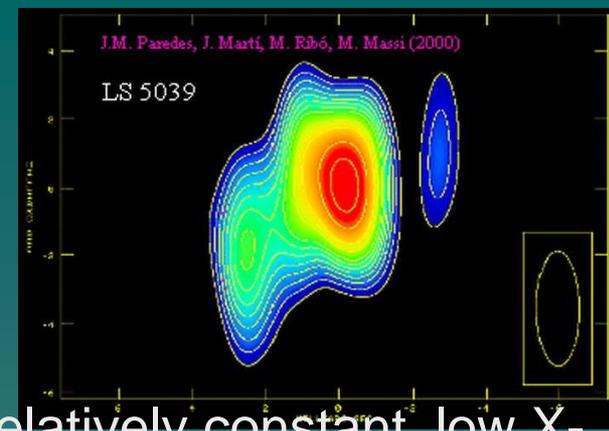
LS 5039 is a HMXB that consists of a massive, main sequence primary (ON6.5 V((f)) spectral type; McSwain et al. 2004) and a compact companion in a tightly bound, eccentric orbit (Casares et al. 2005b).

Optical and UV spectra of the system reveal nitrogen enrichment and carbon depletion at the surface of the O star, a sign of prior mass transfer that inverted the binary mass ratio before the supernova occurred (McSwain et al. 2004).

The binary remained bound and was ejected from the Galactic plane within the past 1.1 Myr in an asymmetric supernova explosion that imparted a runaway velocity of about  $150 \text{ km s}^{-1}$  to the system (Ribo et al. 2002; McSwain et al. 2004).

# MICROQUASARS

Imagen en radio del microquasar LS 5039.



As a HMXB, LS 5039 is quite inconspicuous with a relatively constant, low X-ray flux and hard spectrum; it does not experience dramatic X-ray flares or state changes that are seen in most other HMXBs.

However, it is an unusually bright radio source for a HMXB (Ribo et al. 1999).

The system distinguished itself when it was first noted as a probable g-ray source by Paredes et al. (2000) since it is the only simultaneous X-ray and radio emitter inside the 95% confidence contour of the EGRET source 3EG J1824-1514. Its bright and hard g-ray spectrum suggested that it might be observable by ground-based atmospheric Cherenkov telescope arrays, and indeed it was **detected with energies > 0.1 TeV by the HESS array** (Aharonian et al. 2005a). The identification of the g-ray source with the optical star LS 5039 was strengthened by the g-ray variability over the 4 day orbital period (Aharonian 2006). The X-ray flux is also modulated with the orbital period (Bosch-Ramon et al. 2005, 2007; Takahashi et al. 2008).

# MICROQUASARS

LS I +61 303 is a Be/X-ray binary with spectral type B0 Ve, a 26.5 day orbital period, and highly eccentric orbit.

High energy emission from LS I +61 303 was first detected 30 years ago (as g-ray source CG 135+1) by the Cosmic Ray Satellite B.

Shortly thereafter, NASA's Einstein Observatory and ground based radio observations suggested that the system was no ordinary HMXB. While the system has a relatively low X-ray luminosity for a HMXB, **LS I +61 303 is one of the 20 brightest g-ray sources known.** The Be disk interacts with the compact companion, either a neutron star or black hole, producing orbital phase modulated emission across the electromagnetic spectrum: TeV (Albert et al. 2006, 2008), X-ray, optical H $\alpha$  and radio flux.

# MICROQUASARS

Desde hace algunos años se sabe que, en efecto, al menos algunos microcuasares son fuentes de rayos gamma.

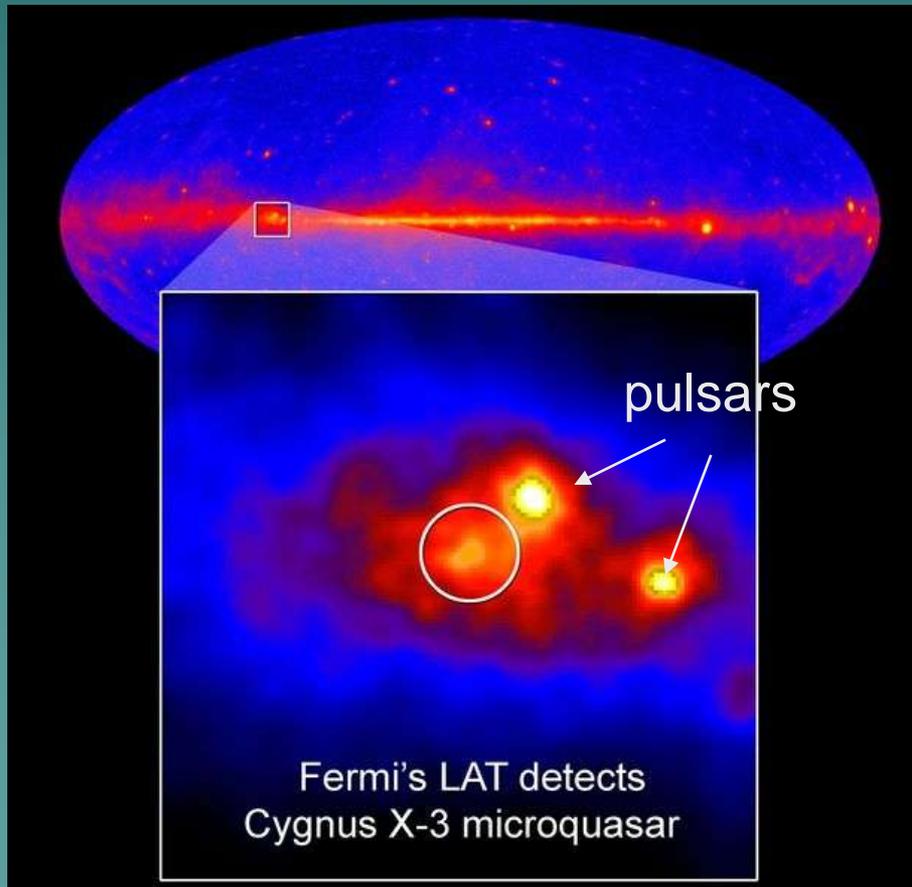
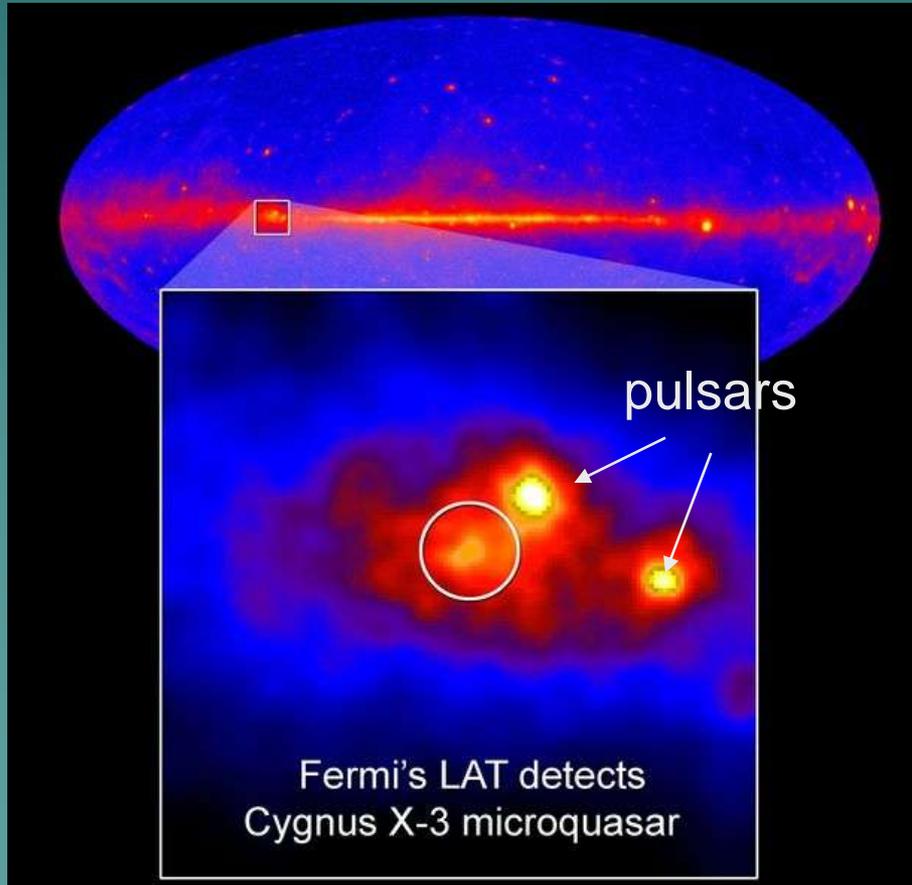


Imagen en rayos gamma del **microcuasar Cygnus X-3** obtenida con el satélite Fermi en 2009.

Cygnus X-3 ha sido detectado también por el satélite AGILE (*Astrorivelatore Gamma ad Imagini Leggero*) es un observatorio espacial de rayos gamma de la Agencia Espacial Italiana lanzado el 23 de abril de 2007; detecta fotones gamma con energías de entre 0,3 y 200 MeV)

# MICROQUASARS

Desde hace algunos años se sabe que, en efecto, al menos algunos microcuasares son fuentes de rayos gamma.



Fermi's LAT detects changes in Cygnus X-3's gamma-ray output related to the companion's 4.8-hour orbital motion. The brightest gamma-ray emission occurs when the disk is on the far side of its orbit. This suggests that the gamma rays arise from interactions between rapidly moving electrons above and below the disk and the star's ultraviolet light.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

Los jets en los microcuasares no son permanentes, sino que las fuentes alternan períodos con jets y sin jets.

Cuando presenta jets se dice que el sistema está en el **estado low-hard**,  
y cuando no en el **estado high-soft**.

El espectro radiativo en ambos estados es diferente:

- en el estado high-soft domina la emisión del disco de acreción, mientras que
- en low-hard la de la corona y posiblemente los jets.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

Los Mqs presentan distintos estados espectrales.

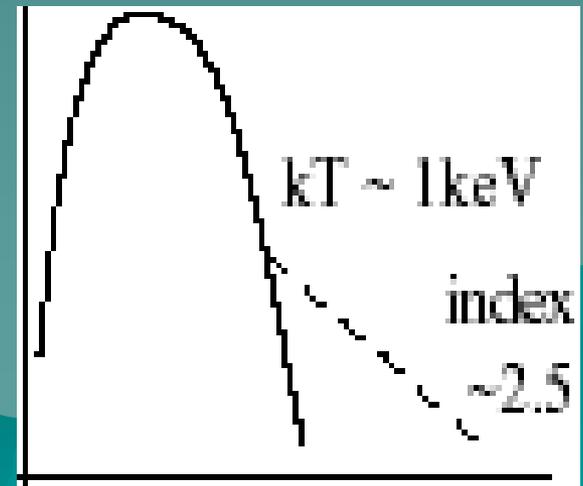
Los **dos estados más característicos** que pueden observarse en la mayoría de las fuentes son:

➤ El estado **dominado “térmicamente”**, conocido como estado **high-soft**:

Se caracteriza porque la distribución espectral de energía tiene un claro **pico a energías de ~ 1 KeV**.

Esta emisión se interpreta como **originada en el disco de acreción** y puede aproximarse por un **cuerpo negro con temperaturas tales que  $kT \sim 1 \text{ KeV}$** .

En este estado, además, se observa una contribución débil en forma de ley de potencia con un espectro muy blando (índice espectral  $n_{\text{ph}} \propto E^{-\Gamma}$ , con  $\Gamma > 2$ ).

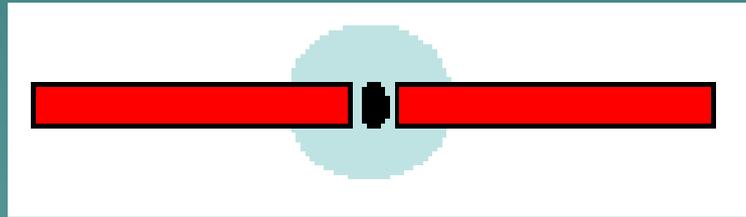


# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

El estado dominado “térmicamente”, conocido como estado **high-soft**:

Esta componente se cree originada en una **corona de plasma caliente** alrededor del objeto compacto.

En este estado **NO se observan jets**. La situación parece **dominada por el disco de acreción**, que se extiende hasta la última órbita estable.



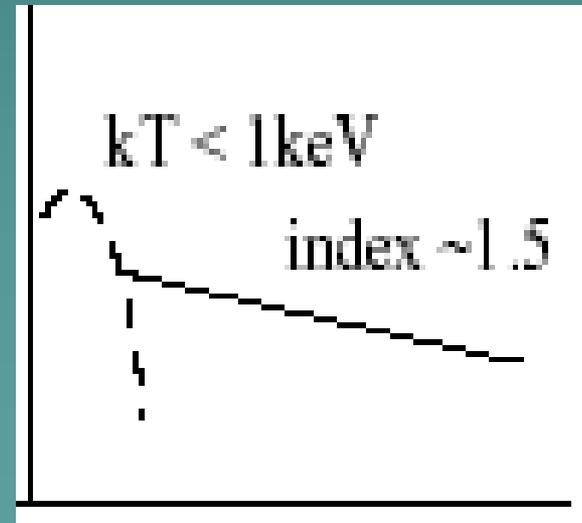
# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

Los MQs presentan distintos estados espectrales.

Los dos estados más característicos que pueden observarse en la mayoría de las fuentes son:

- El estado dominado por la **emisión no-térmica**, conocido como estado **low-hard**:

Se caracteriza por una distribución espectral de energías en la cual la componente térmica está disminuida y corrida hacia energías más bajas. Hay ahora una fuerte contribución en forma de ley de potencia con un **espectro mucho más duro** ( $\Gamma < 1.6$ ).



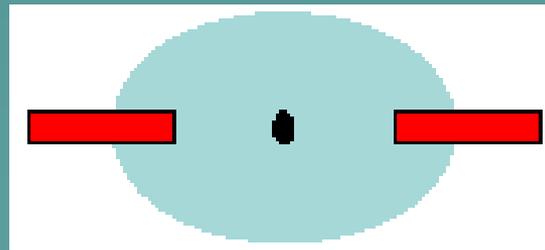
# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

El estado dominado por la emisión no-térmica, conocido como estado **low-hard**:

En este estado se observa un **jet**, que emite **radiación sincrotrón**. Esta emisión quizás contribuya a la emisión observada en **rayos X duros**.

También es posible que a estas energías haya una contribución **Compton inverso** ( $E \sim 100 \text{ KeV}$ ).

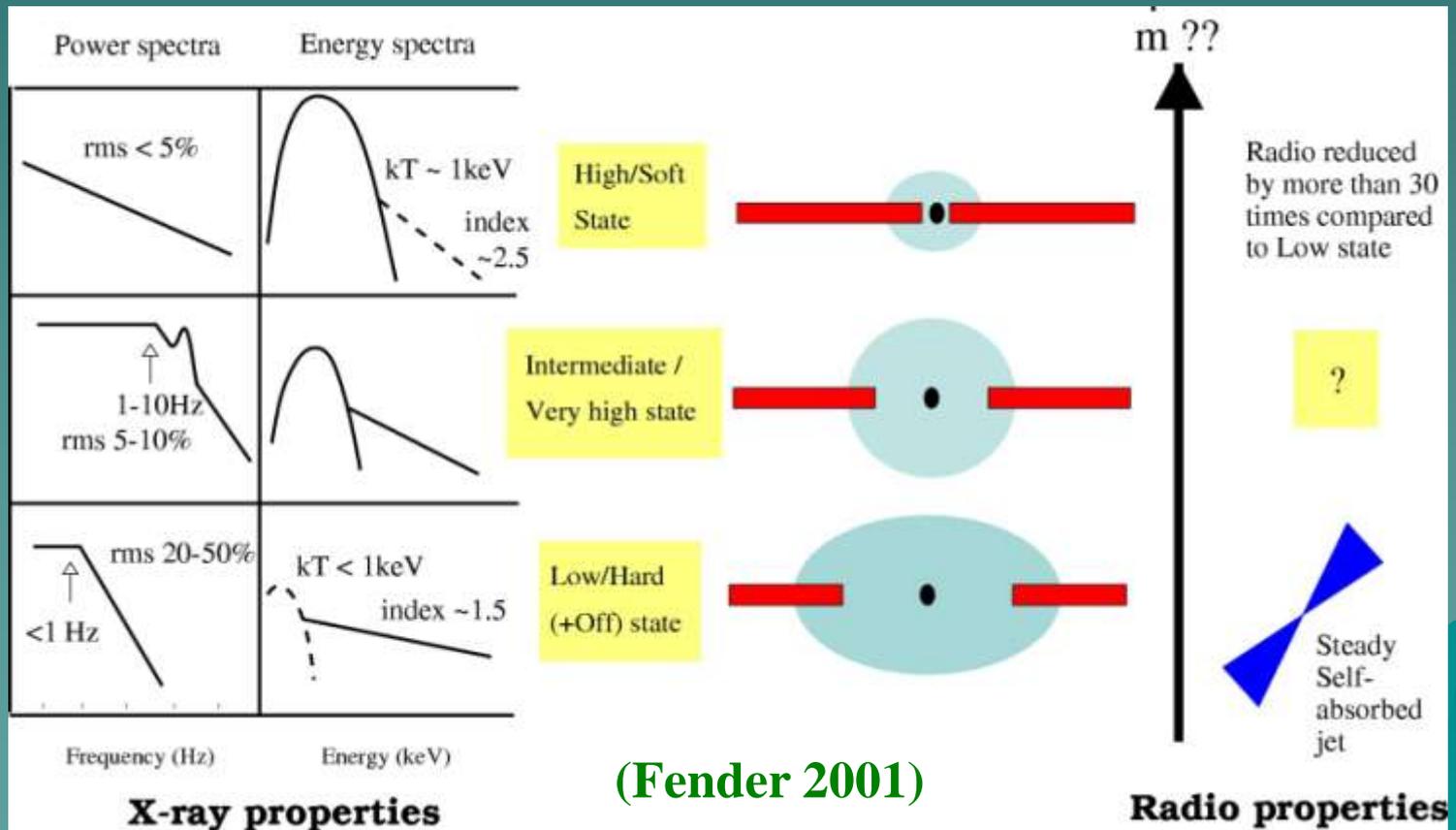
El **disco de acreción**, en esta configuración, parece estar **truncado** a una cierta distancia del objeto compacto y el papel de la **corona ahora es más importante**.



# MQs states and types of jets

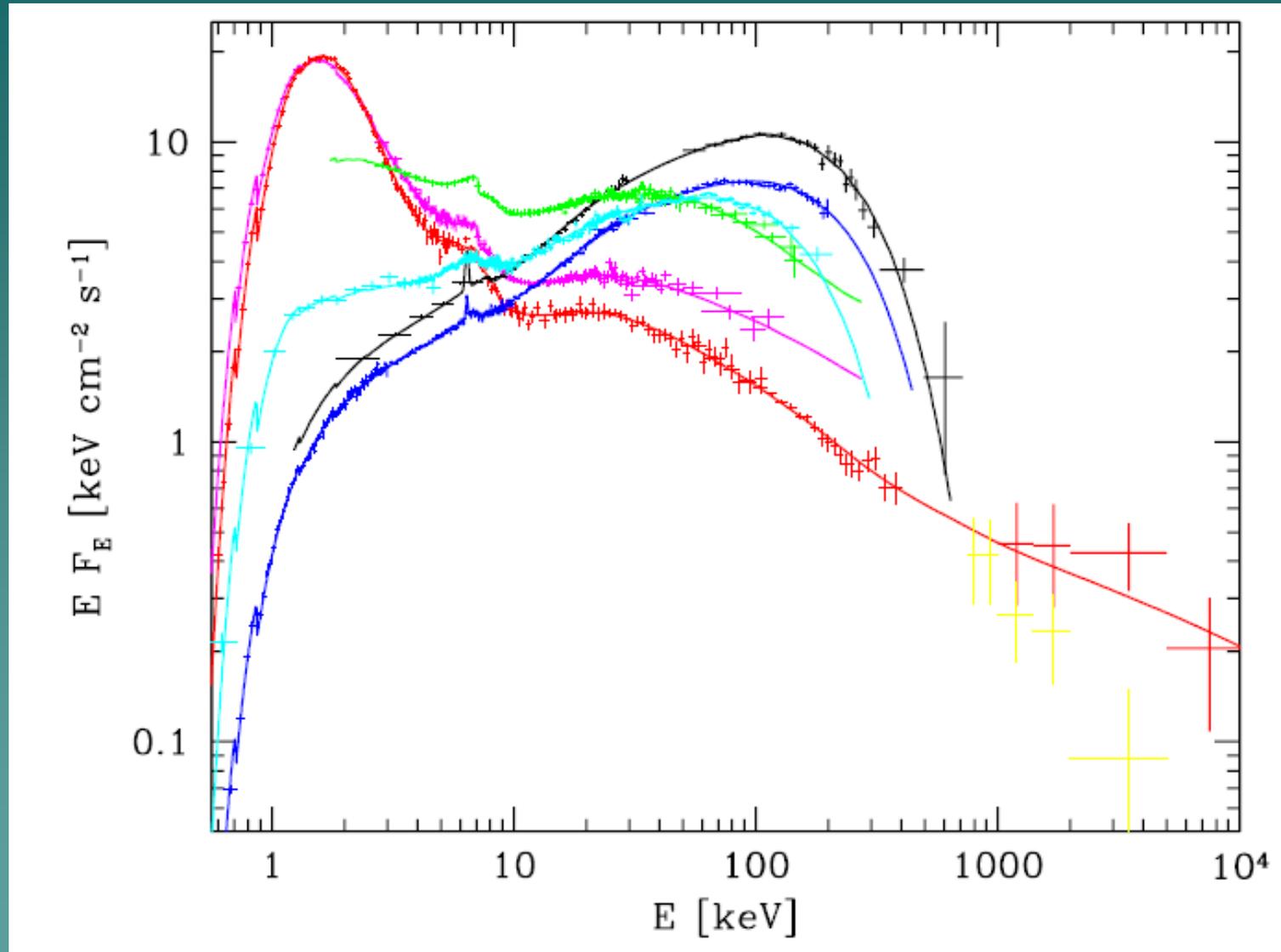
MQs display different X-ray spectral states:

- **Low/hard** state (a.k.a. power-law state). **Compact radio jet.**
- **High/soft** state (a.k.a. thermal-dominant state). **No radio emission.**
- **Intermediate and very high** states  $\rightarrow$  transitions. **Transient radio emission.**



# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ MQs

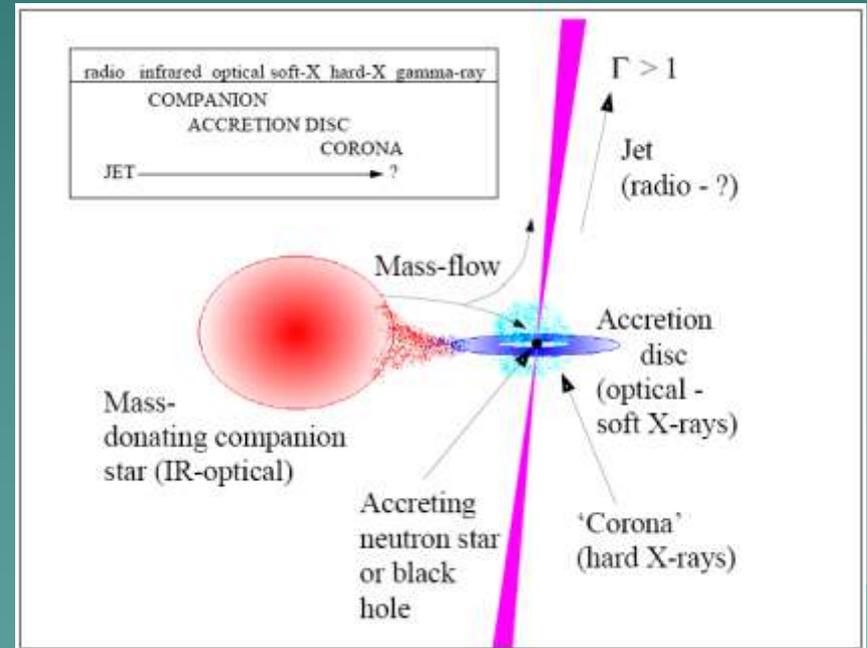
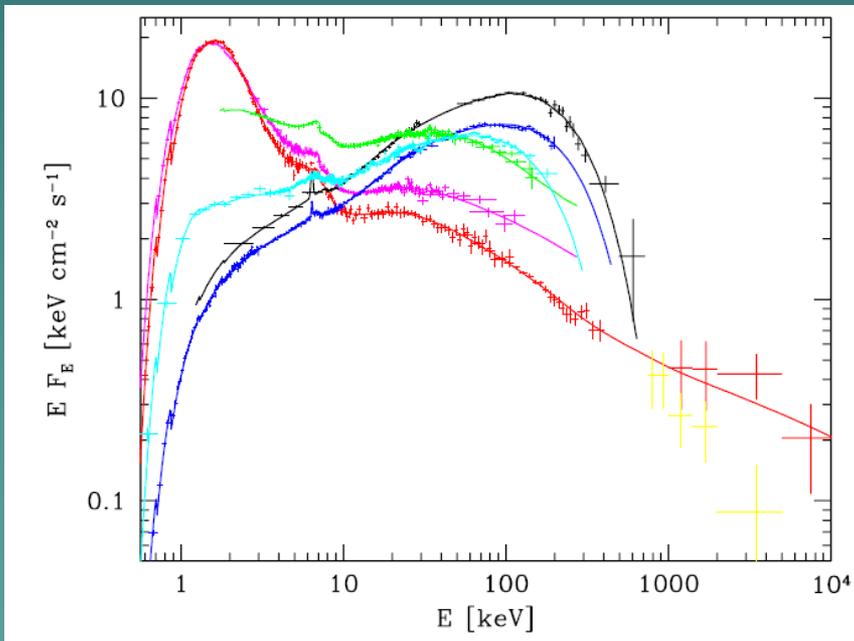
Espectros representativos de los estados **high-soft** y **low-hard**:



# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ MQs

Los MQs permanecen la mayor parte del tiempo en el estado low-hard.

El cambio al estado high-soft suele ser rápido y va acompañado de la eyección de componentes o plasmones relativistas cuyas velocidades inferidas son mayores de lo que se espera sea la velocidad macroscópica del jet en el estado low-hard.



# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

El movimiento de estas componentes, cuando es proyectado en el plano del cielo, puede aparecer como **supralumínico**, debido al efecto de **aberración relativista**.

Consideremos un poco más en detalle como es posible el movimiento aparente mayor que la velocidad de la luz:

Consideremos una fuente que en  $t_1$  está en B.

Su emisión es detectada por un observador

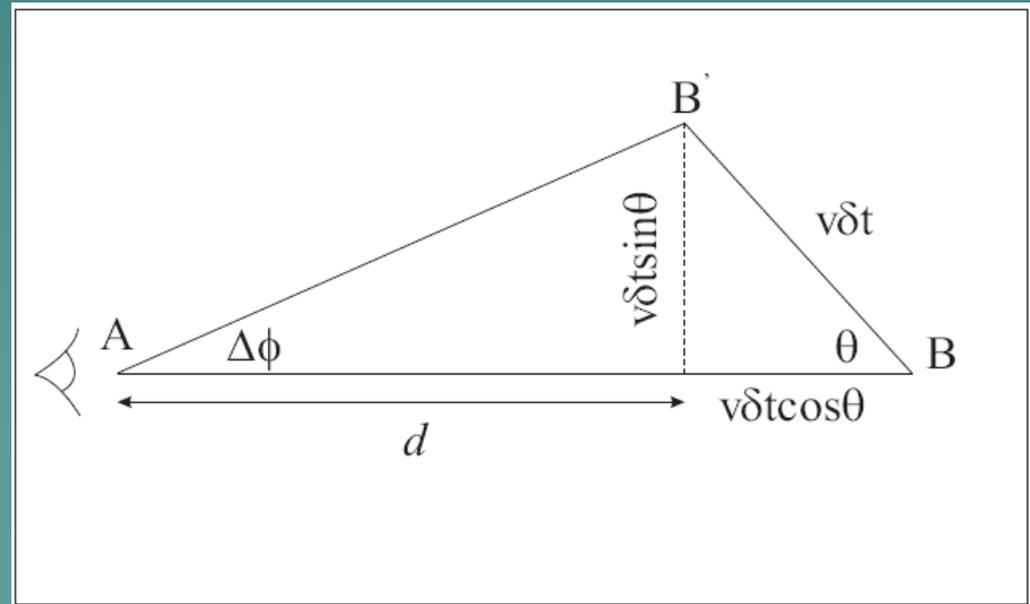
en A en un instante posterior  $t_1'$ .

La fuente se mueve de B a B'

en un tiempo  $\delta t$ .

La distancia entre B y B' es  $v \delta t$

y la dirección del movimiento forma un ángulo  $\theta$  con la visual.



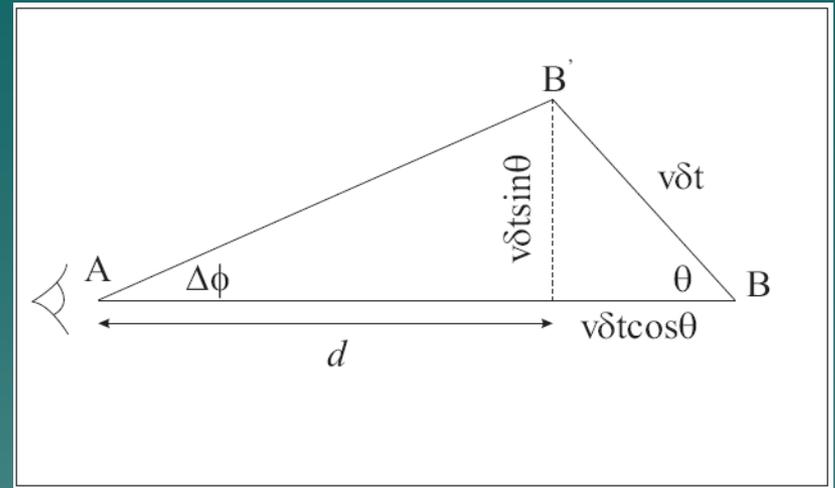
# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ MQs

La distancia AB es  $d + v \delta t \cos(\theta)$

Si  $\theta$  es pequeño, entonces  $AB' \sim d$ .

La separación angular entre B y B' es:

$$\Delta\varphi \sim \frac{v\delta t \sin\theta}{d}$$



y los instantes  $t'_1$  y  $t'_2$  son:

$$t'_1 = t_1 + \frac{d + v\delta t \cos\theta}{c}$$

$$t'_2 = t_2 + \frac{d}{c}$$

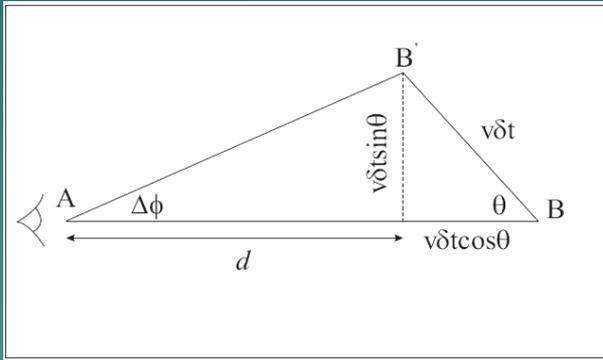
El intervalo entre las observaciones es:

$$\begin{aligned}\Delta t &= t'_2 - t'_1 = t_2 - t_1 - \frac{v\delta t \cos(\theta)}{c} \\ &= \delta t(1 - \beta \cos\theta),\end{aligned}$$

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ MQs

Luego, la velocidad transversal inferida por el observador es:

$$\beta_T = \frac{v_T}{c} = \frac{d \Delta\varphi}{c \Delta t} = \frac{v \sin(\theta)}{c(1 - \beta \cos(\theta))} = \frac{\beta \sin(\theta)}{1 - \beta \cos(\theta)}$$



$$\Delta\varphi \sim \frac{v\delta t \sin \theta}{d}$$

$$\begin{aligned} \Delta t &= t'_2 - t'_1 = t_2 - t_1 - \frac{v\delta t \cos(\theta)}{c} \\ &= \delta t(1 - \beta \cos \theta), \end{aligned}$$

Notar que  $\beta_T \rightarrow \infty$  si theta es pequeño y  $v \rightarrow c$

El resultado es que en el sistema del observador la fuente parece moverse a velocidades superiores a la de la luz.

Es un efecto aparente de aberración relativista producido por el hecho de que la fuente se mueve hacia el observador a una velocidad comparable a la de la luz.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ MQs

En el estado low-hard la potencia total del jet,  $L_j$ , está relacionada con la tasa de acreción sobre el objeto compacto:

$$L_j = q_j \dot{M} c^2$$

Donde  $q_j \approx 0.1 - 0.01$ .

Una parte de esta potencia se halla en forma de partículas relativistas, por lo que el jet puede generar rayos  $\gamma$  por medio de interacciones Compton inverso.

Los campos de fotones “semilla” para los leptones pueden ser el propio campo sincrotrón, el campo del disco, la corona o la estrella compañera (esta última, un ingrediente importante que no está presente en el caso de los AGNs).

Si el jet posee hadrones relativistas, entonces interacciones con protones del viento de la estrella compañera pueden dar lugar a rayos  $\gamma$  en el caso de MQs de alta masa.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars: recent developments (Romero 2008)

If the **jets** of microquasars carry a significant power in the form of **relativistic hadrons**, then **gamma rays and neutrinos** can be produced by interactions with *matter and photon fields* either *external or internal* to the jet.

Calculations of the interaction of **hadronic jets** with

- 1) matter of the jet itself,
- 2) photon fields generated by synchrotron radiation of both protons and electrons, and
- 3) matter external to the jet (e.g. a clumped wind).

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

A **hadronic model** for MQs is a model that represents radiative processes triggered by protons or other nuclei.

There is not such a thing as a purely hadronic radiative model in astrophysics.

**All models are actually lepto-hadronic**, since relativistic hadronic interactions unavoidably lead to meson production and the subsequent injection of leptons in the system.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

- 1) Calculations of the interaction of hadronic jets with matter of the jet itself:

### Heavy jet models

These models assume that the **jets of MQs have a very large kinetic energy** and are dominated by cold barions ( $E_j$ : SS 433  $\sim 10^{40}$  erg  $s^{-1}$ , within the SNR W50)

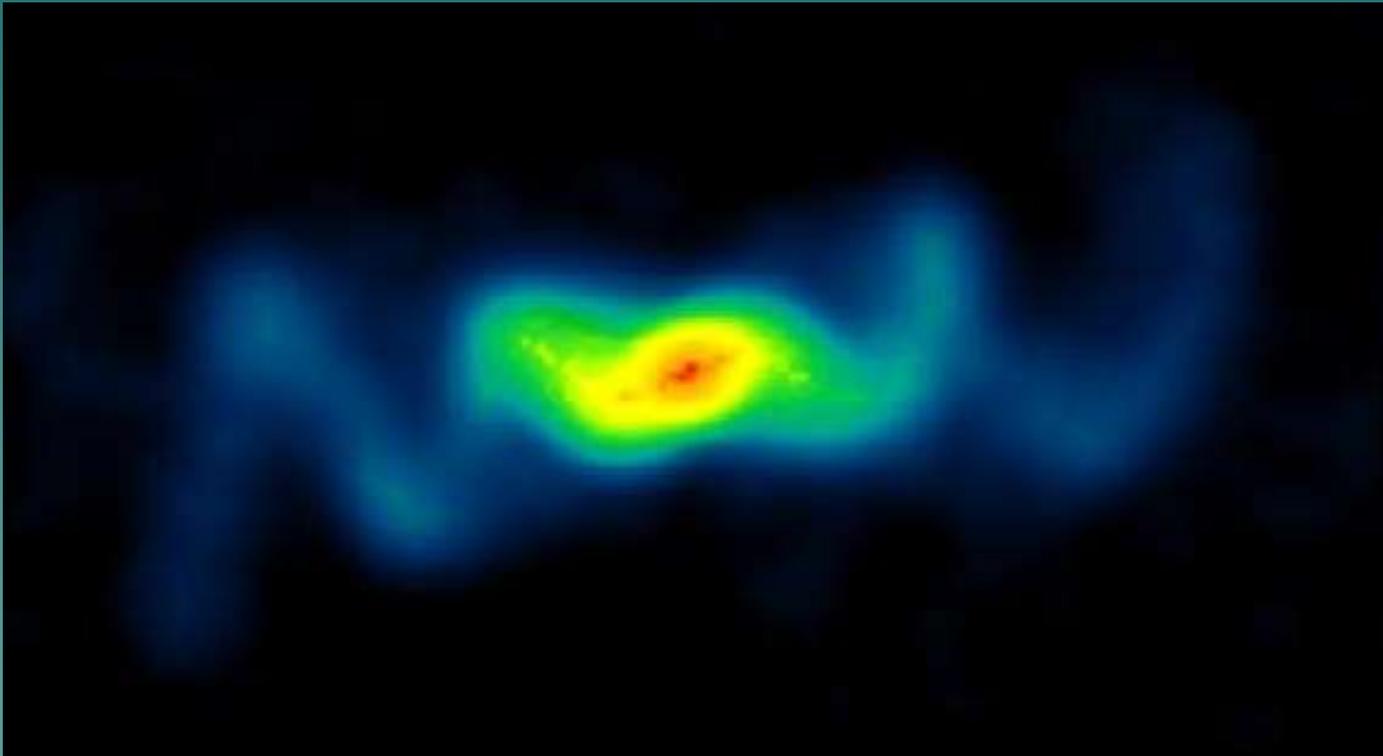
**Gamma rays are mainly due to inelastic *pp* collisions** at the base of the jet, where the density of the thermal plasma is very high.

**Absorption effects in the ambient photon field** produce a significant *modulation* of the emission.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

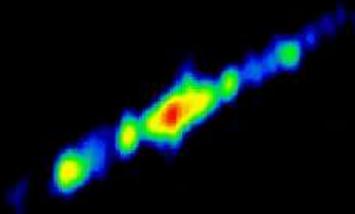
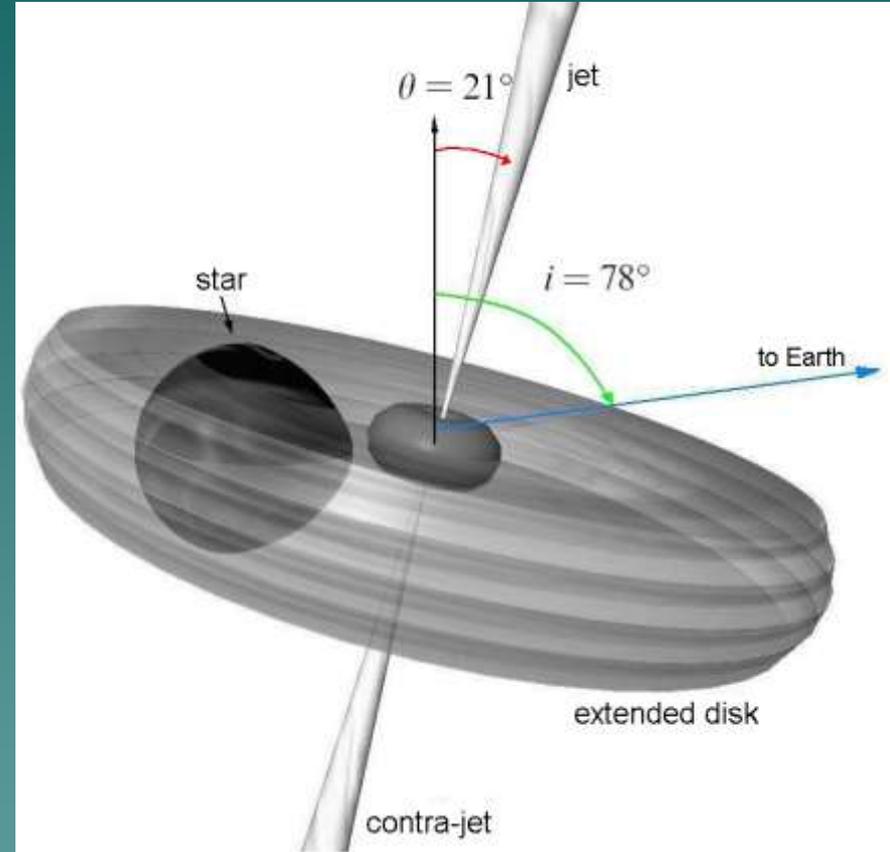
## 1) Heavy jet models



VLA image of microquasar SS 433

# SS433: a precessing microquasar with heavy jets

- ◆ Jets with high kinetic power:  
 $L_k = 10^{39}$  erg/s
- ◆ Fe lines from detected from jets (Migliari et al. 2002)
- ◆ Jets and extended disk wind in precession ( $P_{\text{prec}} = 162$  d)
- ◆ Potential neutrino source (Eichler 1980, Reynoso et al. 2008)

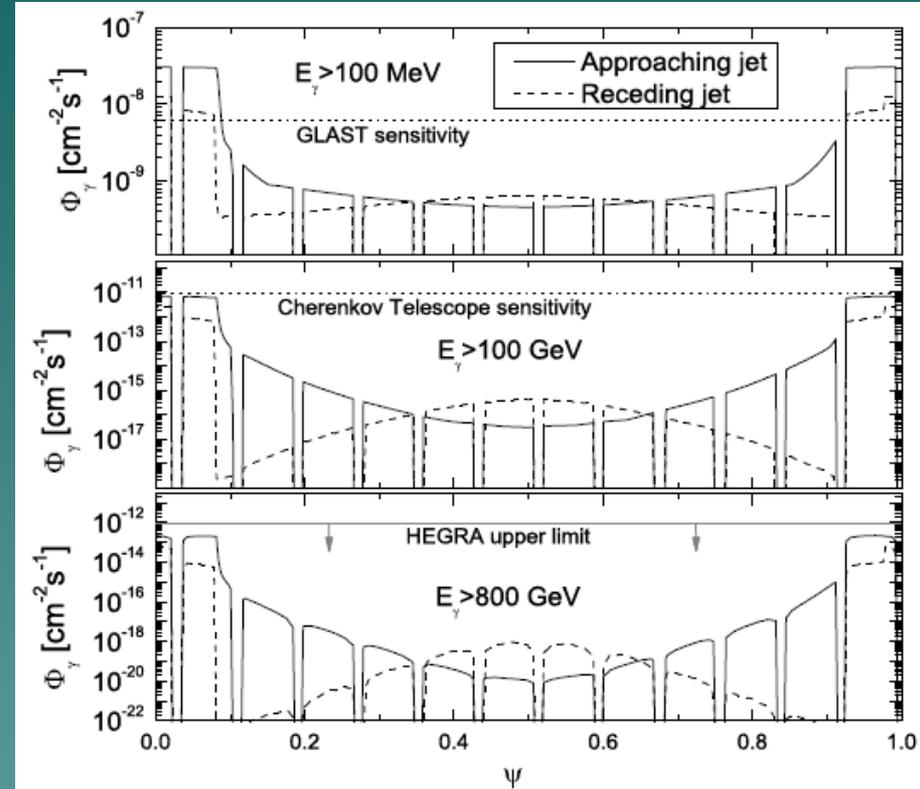
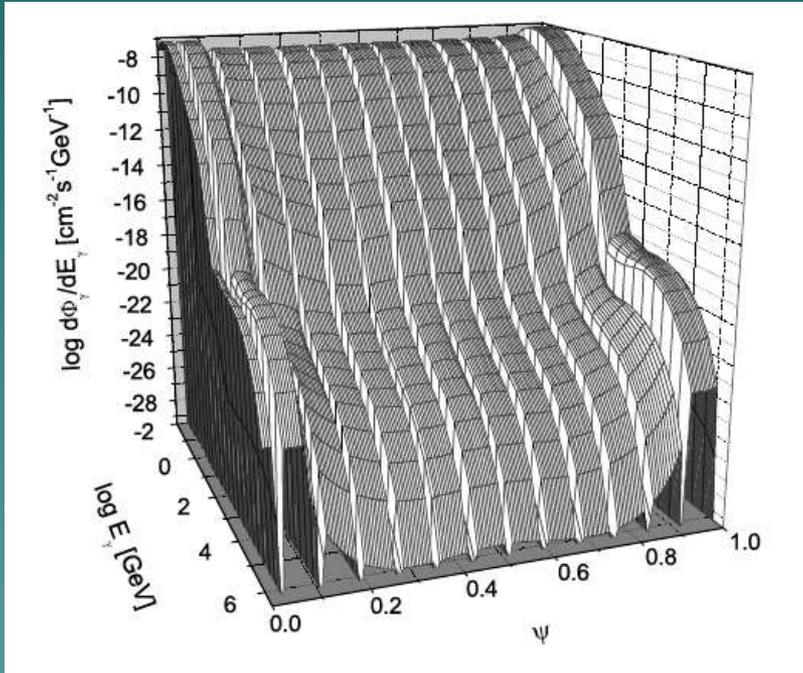


VLBA

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

### 1) Heavy jet models



**Gamma-ray flux** predicted by a heavy jet model for SS 433, as a function of time (orbital phase) and energy. Note the modulation produced by the variable absorption due to the precession of the jets.

**Gamma-ray light curve** from a heavy jet model of SS 433. The different panels show a comparison with the sensitivity of different instruments. The Cherenkov sensitivity of the middle panel corresponds to MAGIC

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

- 2) Calculations of the interaction of hadronic jets with photon fields:

### The photo-hadronic jet model

The photo-hadronic model is based on interactions between relativistic protons in the jet and synchrotron emission from electrons and protons.

The high-energy photon density necessary for efficient gamma-ray production confines the acceleration and emission region to the base of the jet.

Internal absorption is, then, very important, especially in cases where the photon field is dominated by electron synchrotron radiation

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

### 2) The photo-hadronic jet model

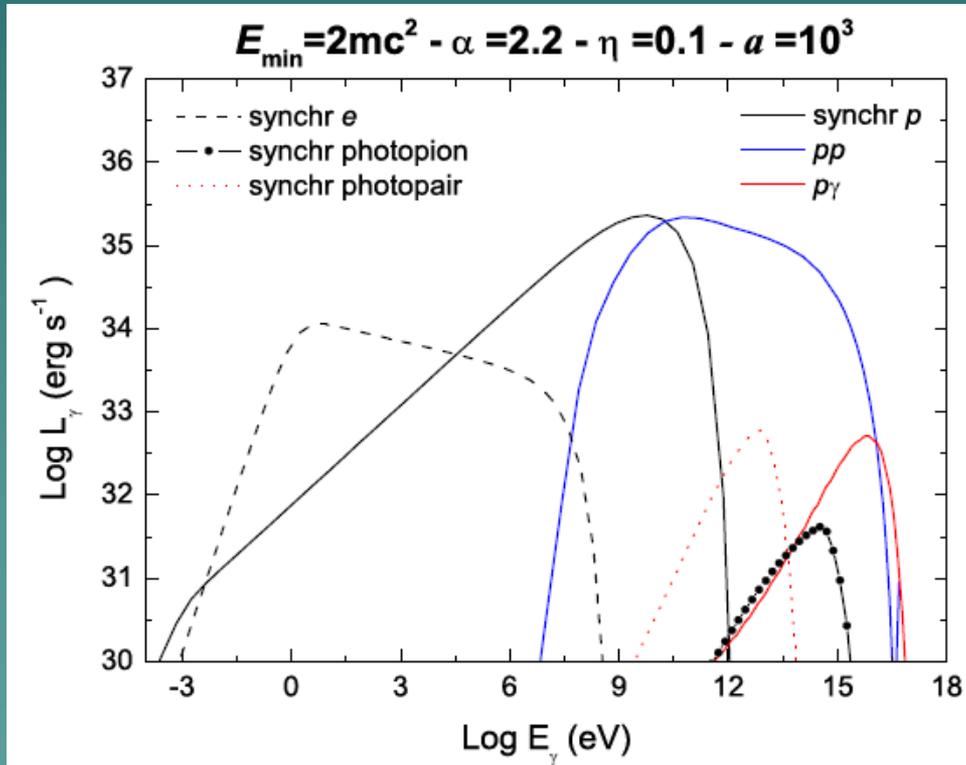
Instead, in models where the relativistic protons outnumber the electrons, high-energy gamma rays can escape with a spectrum basically unmodified by absorption.

At high-energies, contributions from electron-positron pairs injected through photopair and photo-meson production can be important.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES $\rightarrow$ MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

### 2) The photo-hadronic jet model



Spectral energy distribution of a 'proton' microquasar.

In addition to the different components due to **synchrotron and photo-hadron interactions**, the **internal  $pp$  contribution** is also shown .

The assumed particle acceleration efficiency is 10% and the injection is a power-law with index 2.2.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

- 3) Calculations of the interaction of hadronic jets with matter external to the jet:

### The windy microquasar model

In the case of HMMQs, external hadronic interactions can take place if there is **some level of mixing between the jet flow and the stellar wind** of the hot star.

This is the original windy MQs model (Romero et al. 2003).

Recent numerical simulations of jet-wind interactions show that the wind play an important role in the propagation and stability of the jet.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

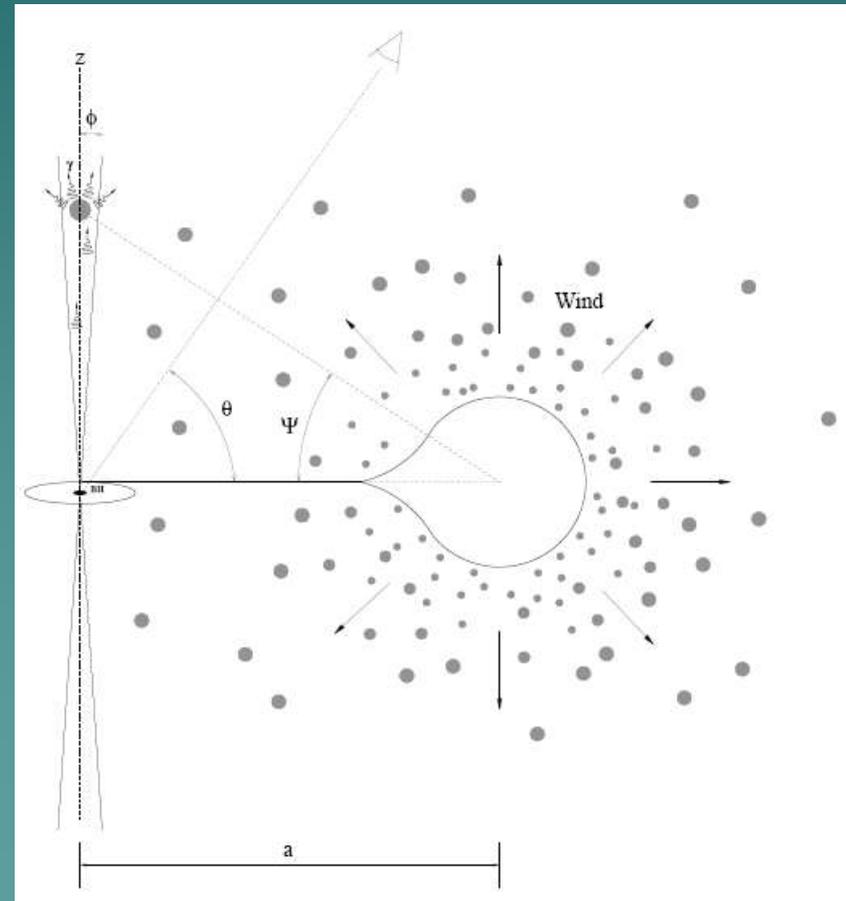
## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

### 3) The windy microquasar model

The wind of hot stars seems to have structure in the form of clumps, that are the result of plasma instabilities close to the stellar surface.

These clumps have high densities (of the order of the density of the outer atmosphere) and propagate outwards embedded in the background wind. The density contrast can be as high as  $10^{3-4}$ .

If some of these clumps interact with the jet, a rapid flare due to  $pp$  collisions can arise.



# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

### 3) The windy microquasar model

The interaction of a large number of clumps at different altitudes of the jet leads to a flickering of the gamma-ray light curve.

If this flickering is measured by GLAST-Fermi satellite, its amplitude and associated time scales can be used to infer the properties of the clumping. Typical values of the relative amplitude fluctuations would be

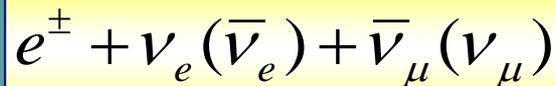
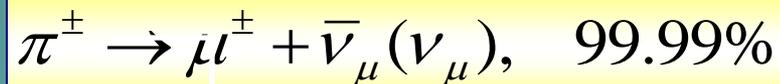
$$I_{\gamma} / \langle I_{\gamma} \rangle \approx 10\%$$

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

## Hadronic models of high-energy radiation from microquasars:

### Neutrinos

Several authors have discussed neutrino production in microquasars Romero & Vila (2008), who have taken into account internal photon absorption in heavy jets, notice that **those sources with equipartition between relativistic electrons and protons** (and hence strong synchrotron fields) **are the most efficient for neutrino production above 1 TeV** (the neutrinos are the result of photo-meson production).



# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

**Hadronic models** of high-energy radiation from microquasars:

## Neutrinos

This means that not necessarily a strong neutrino source should be associated with a strong gamma-ray source.

Another important point is that if the neutrinos are produced close to the base of the jet, where the magnetic field is very high, muon and pion losses can be important leading to significant neutrino attenuation. The most promising sources, then, are those where the hadronic interactions occur at some distance from the compact object.

# FUENTES ACTIVAS: ACRETANTES → MQs

Debido a que presentan órbitas excéntricas y cambios de estado, los Mqs deberían ser fuentes de rayos  $\gamma$  variables.

La precesión del jet también puede jugar un papel importante en la generación de la variabilidad, cambiando el ángulo de la emisión con la línea de la visual.

Al presente, hay 4 Mqs que son emisores de rayos  $\gamma$  en el rango  $E \sim 100 \text{ MeV} - 10 \text{ GeV}$ : entre ellos, LS 5039 y LSI+61303.

El primero ha sido detectado a energías de TeV por HESS.

El Mq Cygnus X-1 ha sido detectado por otro lado, por COMPTEL en el rango 1-10 MeV.

Otros Mqs aún no descubiertos pueden ser las contrapartidas de varias de las fuentes variables de rayos  $\gamma$  detectadas por el instrumento EGRET sobre el plano galáctico y que aún no han sido identificadas.

Region	Wavelength (Angstroms)	Wavelength (centimeters)	Frequency (Hz)	Energy (eV)
Radio	$> 10^9$	$> 10$	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Microwave	$10^9 - 10^6$	$10 - 0.01$	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	$10^{-5} - 0.01$
Infrared	$10^6 - 7000$	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	$0.01 - 2$
Visible	$7000 - 4000$	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	$2 - 3$
Ultraviolet	$4000 - 10$	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
X-Rays	$10 - 0.1$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Gamma Rays	$< 0.1$	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

