



Fermi  
Gamma-ray Space Telescope

# Astrophysique de Haute Energie

## “Panorama sur les Accélérateurs Cosmiques”

Benoit Lott  
Centre d'Etudes Nucléaires  
de Bordeaux-Gradignan  
[lott@cenbg.in2p3.fr](mailto:lott@cenbg.in2p3.fr)

# Plan

- *Rappels sur les Rayons Cosmiques*
- *Processus d'Accélération de Fermi*
- *Généralités sur l'Astronomie Gamma de Haute Energie*
- *Sources Galactiques*
- *Sources Extragalactiques*
- *Noyaux Actifs de Galaxie*
- *Techniques de détection*

# *Rappels sur les Rayons Cosmiques*

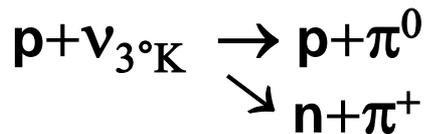
# Propriétés des rayons cosmiques (1)

---

- découverts en 1912  
(V.Hess, prix Nobel en 1936)
- composition: de p à U, e
- isotropes (déflexions aléatoires dans les champs magnétiques désordonnés)  
→ pas d'astronomie!
- loi de puissance:  $n(E) \propto E^{-K}$   
( $K=2.71$  à basse énergie)
- 2 « structures »:

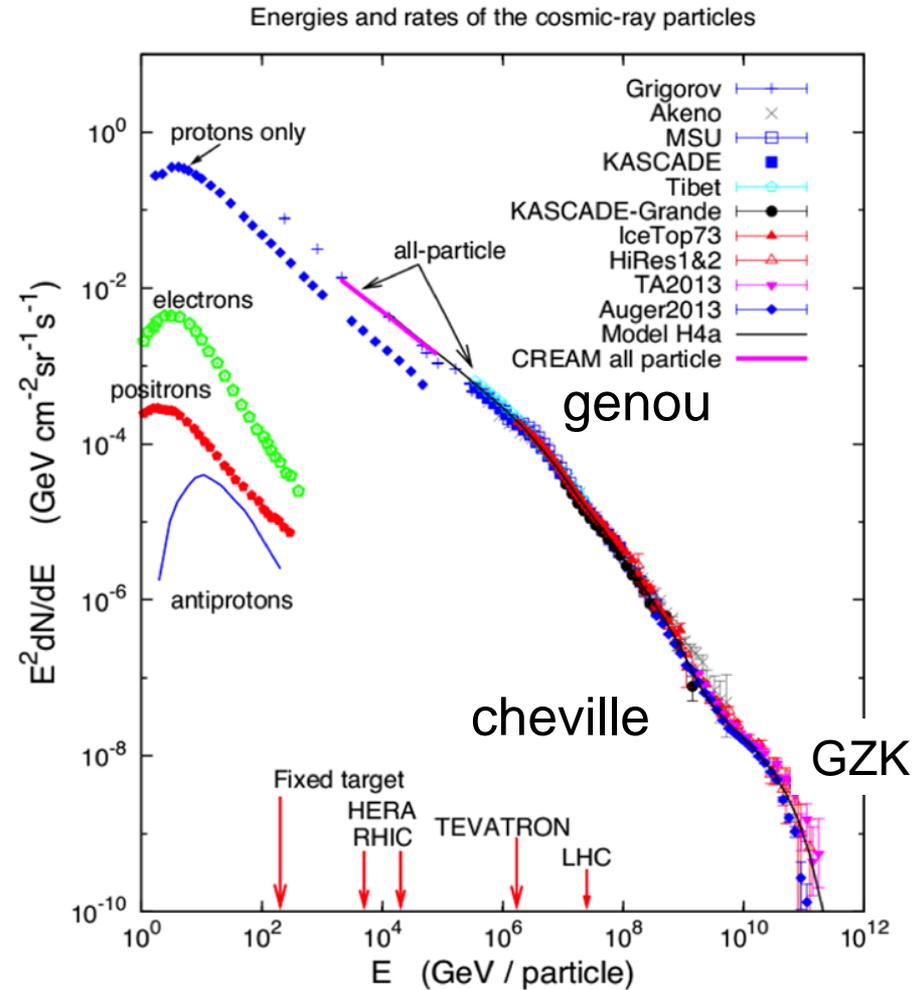
# Propriétés des rayons cosmiques (2)

- E atteint  $10^{20}$  eV (UHECR) nature?  $1\text{km}^{-2}$  siècle $^{-1}$
- coupure « GZK » (Greisen-Zatsepin-Kuzmin)



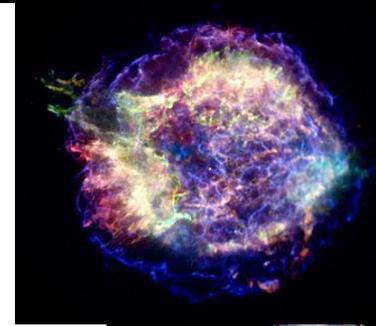
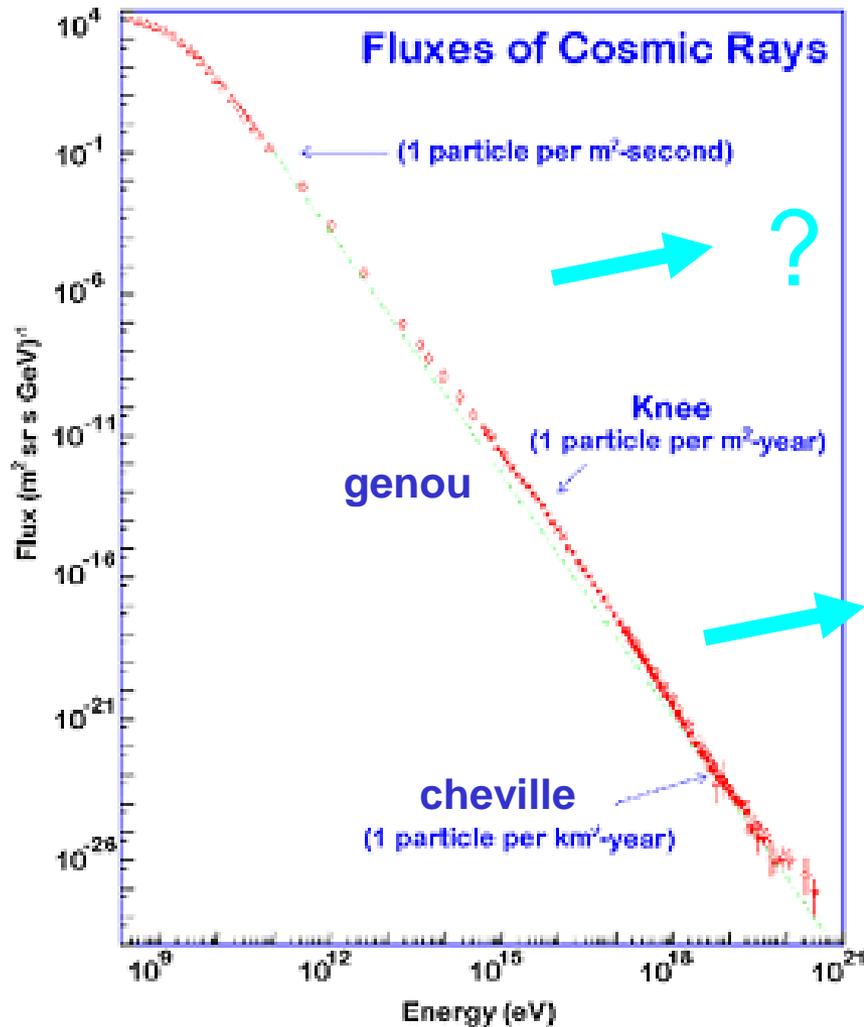
horizon  $\sim 50$  Mpc  
« directionnels »!

- découverte du positron (1932), du muon (1937), du pion (1947)
- affectent l'évolution de la vie sur Terre, la survie dans l'espace, le climat...

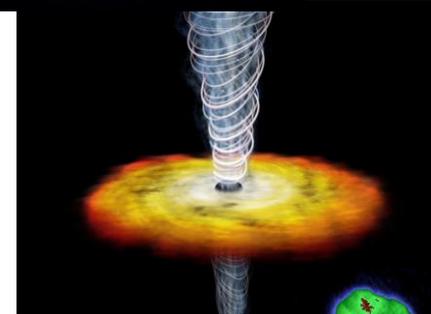


# L'origine des rayons cosmiques

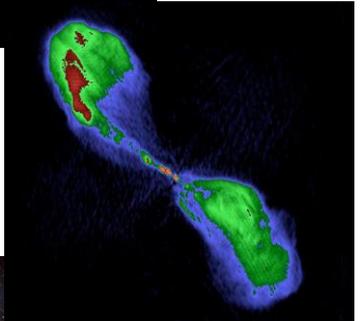
« la Grande Question »



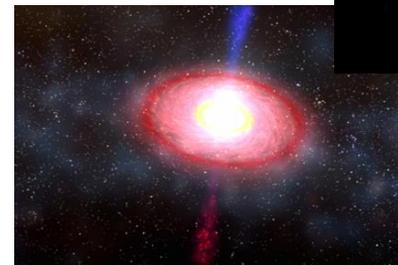
restes de  
supernova



? noyaux actifs  
de galaxie



sursauts  
gamma



tous accélérateurs d'électrons

# Fenêtres sur l'Univers de Haute Energie

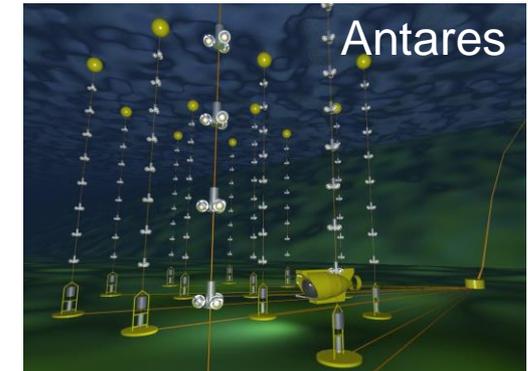
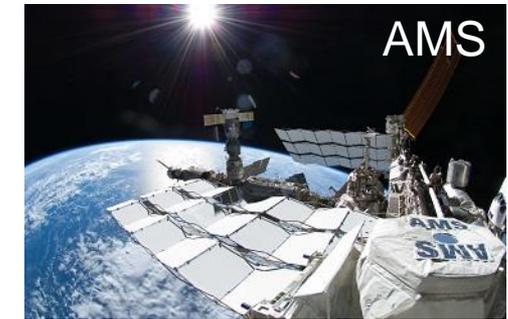
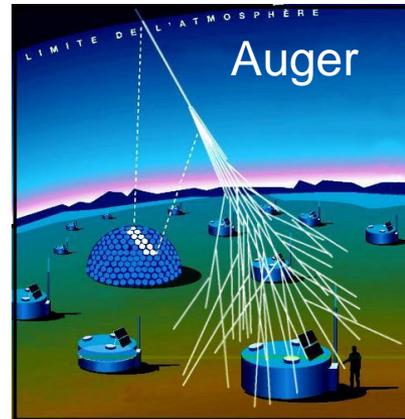
Rayons cosmiques (AMS...)

Rayons cosmiques de ultra haute énergie "UHECR" (Auger...)

Neutrinos de haute énergie (Ice Cube, Antares...)

Ondes gravitationnelles (Ligo, Virgo)

Rayonnement électromagnétique dont rayons gamma (Fermi, HESS,CTA...)



# *Processus d'accélération*

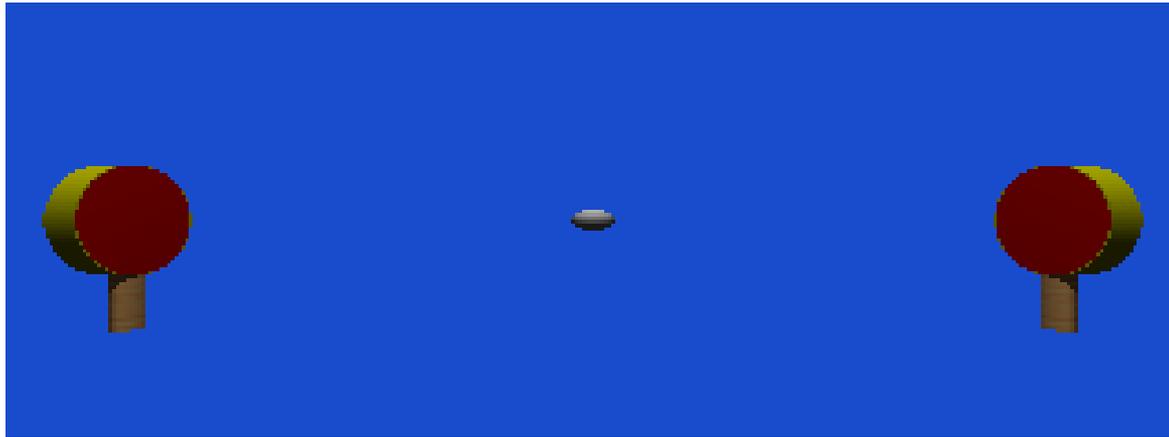
# Distributions d'énergie des particules

---

- Lois de puissance  $n(E) \propto E^{-K}$
- Rayons cosmiques  $K \sim 2.71$  au niveau de la Terre, correction de  $\sim 0.6$  provenant de la propagation  $\rightarrow K \sim 2$  à la source
- Distributions d'énergie des photons des sources de rayons gamma  $\rightarrow$  distributions d'énergie des particules émettrices en loi de puissance avec  $K \sim 2$
- Théorie de l'accélération nécessairement non-collisionnelle (sinon thermalisation)

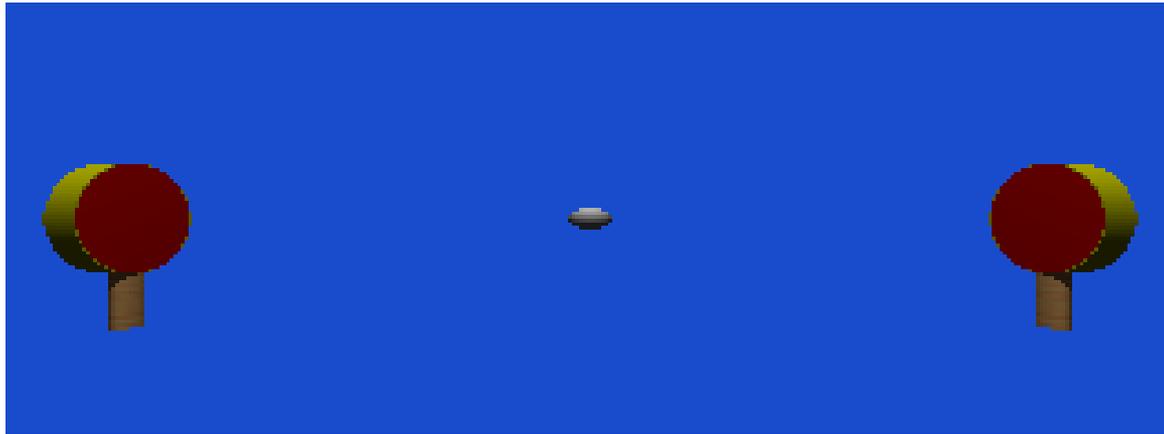
# Accélérer des particules

---



# Accélérer des particules

---



# Accélération par processus de Fermi de 1<sup>er</sup> ordre

---

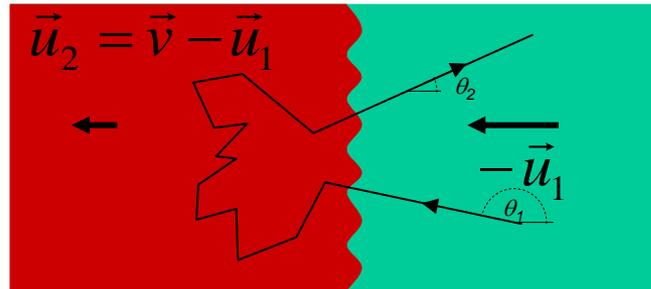
On suppose un phénomène cyclique avec  $\frac{\Delta E}{E} = \xi$

et une probabilité d'échappement des particules  $P_{ech}$

# Accélération par processus de Fermi de 1<sup>er</sup> ordre

onde de choc

matériel  
choqué  
(« aval »)



milieu interstellaire  
au repos (« amont »)

référentiel de l'observateur

*Gain d'énergie!*

On moyenne sur  $\theta_2$ :  $\frac{dn}{d\cos\theta_2} = 2\cos\theta_2$  avec  $0 \leq \cos\theta_2 \leq 1$

$$\langle \cos\theta_2 \rangle = \frac{2}{3}$$

On moyenne sur  $\theta_1$ :  $\frac{dn}{d\cos\theta_1} = -2\cos\theta_1$  avec  $-1 \leq \cos\theta_1 \leq 0$

$$\langle \cos\theta_1 \rangle = -\frac{2}{3}$$

$$\frac{\Delta E}{E} = \gamma^2 \left( 1 + \frac{4}{3}\beta + \frac{4}{3}\beta^2 \right) - 1 \simeq \frac{4}{3}\beta$$

*Processus du « premier ordre »*

Taux de passage du choc  $\tau_{cross} = \int_0^1 d\cos\theta \int_0^{2\pi} d\phi \frac{c\rho_{RC}}{4\pi} \cos\theta = \frac{c\rho_{RC}}{4}$

Taux d'avection loin du choc  $\tau_{ech} = \tau_{adv} = \rho_{RC} u_2$

# Accélération par processus de Fermi de 1<sup>er</sup> ordre

---

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{M_1^2(\Gamma + 1)}{2 + M_1^2(\Gamma - 1)}$$

avec:  $\Gamma = 5/3$ ,  $M_1 \equiv u_1/a_{s1} \gg 1$ ,  $a_{s1} = \sqrt{\frac{dP_1}{d\rho_1}} = \sqrt{\frac{\Gamma P_1}{\rho_1}}$  vitesse du son dans le milieu 1



# *Généralités sur l'Astronomie Gamma de Haute Energie*

# Le spectre électromagnétique

3 notions équivalentes: fréquence, longueur d'onde, énergie

$$E = h\nu = hc/\lambda$$

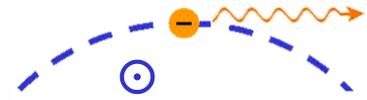
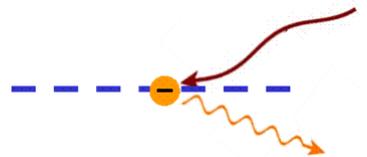
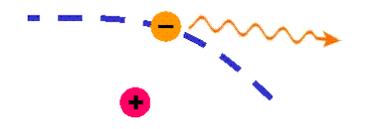
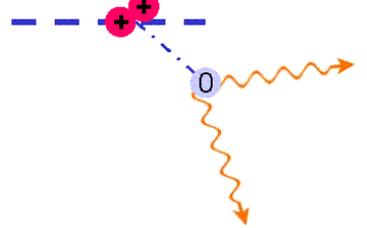
$\lambda$  augmente, E et  $\nu$  diminuent



Spectre thermique:  
Distribution de Planck  
 $E \sim kT$

$$E = 1 \text{ MeV} \rightarrow T \sim 10^{10} \text{ K}$$

# Processus d'émission non-thermique

interaction avec	dénomination	particules émettrices	représentation schématique	énergie caractéristique*
champ magnétique	émission synchrotron	électrons protons		$eB \gamma^2 \sin \theta / m$
rayonnement de basse énergie	émission Compton inverse	électrons		$\gamma^2 E_\nu$
matière	rayonnement de freinage Bremsstrahlung	électrons		$\gamma mc^2$
matière**	production de $\pi^0$	protons		$\gamma m_{\pi^0} c^2 / 2$

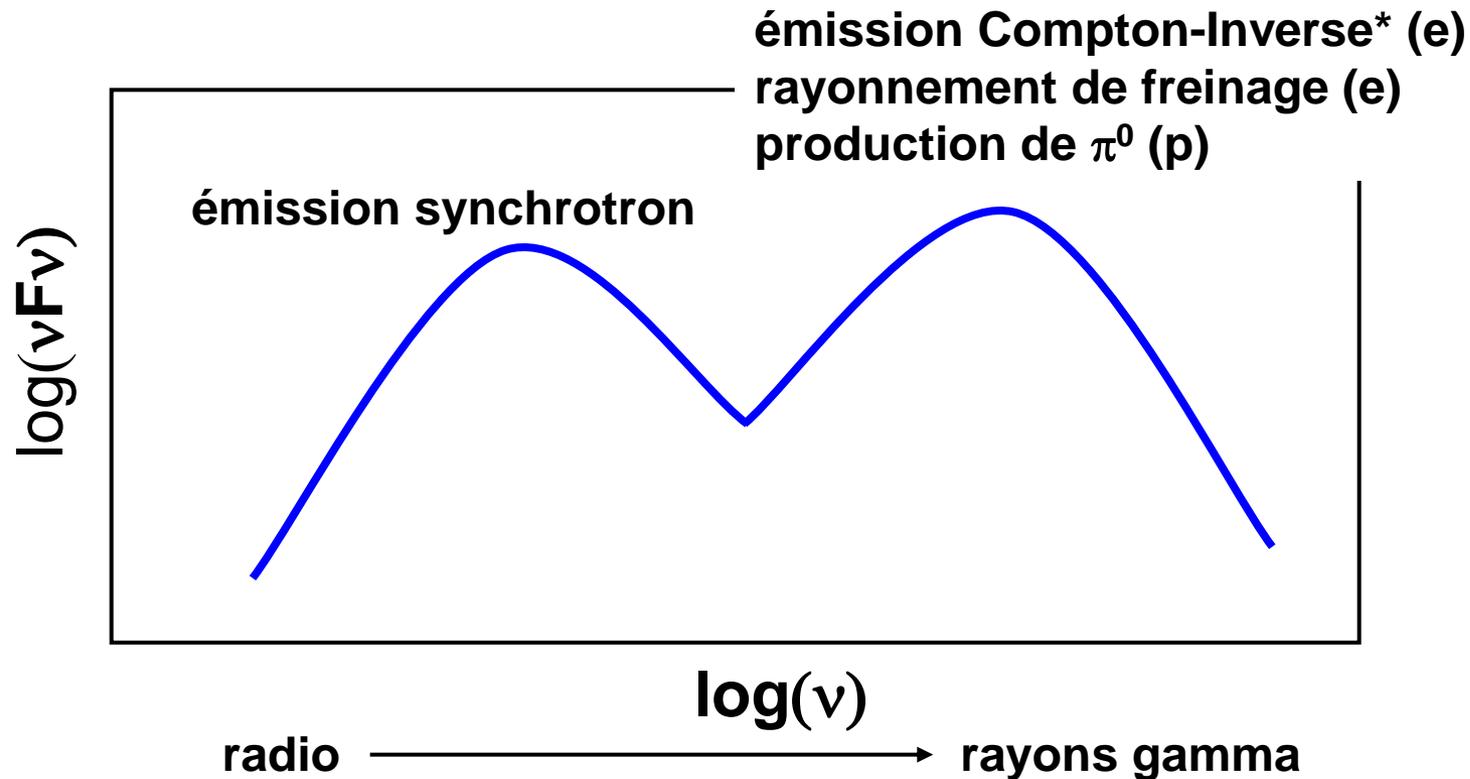
\* dans le référentiel de la source

\*\* production de  $\pi^{+,-} \rightarrow \mu^{+,-} + \nu_\mu$   
 $\rightarrow e^{+,-} + \nu_e + \nu_\mu$  électrons secondaires

## Distribution d'énergie des photons

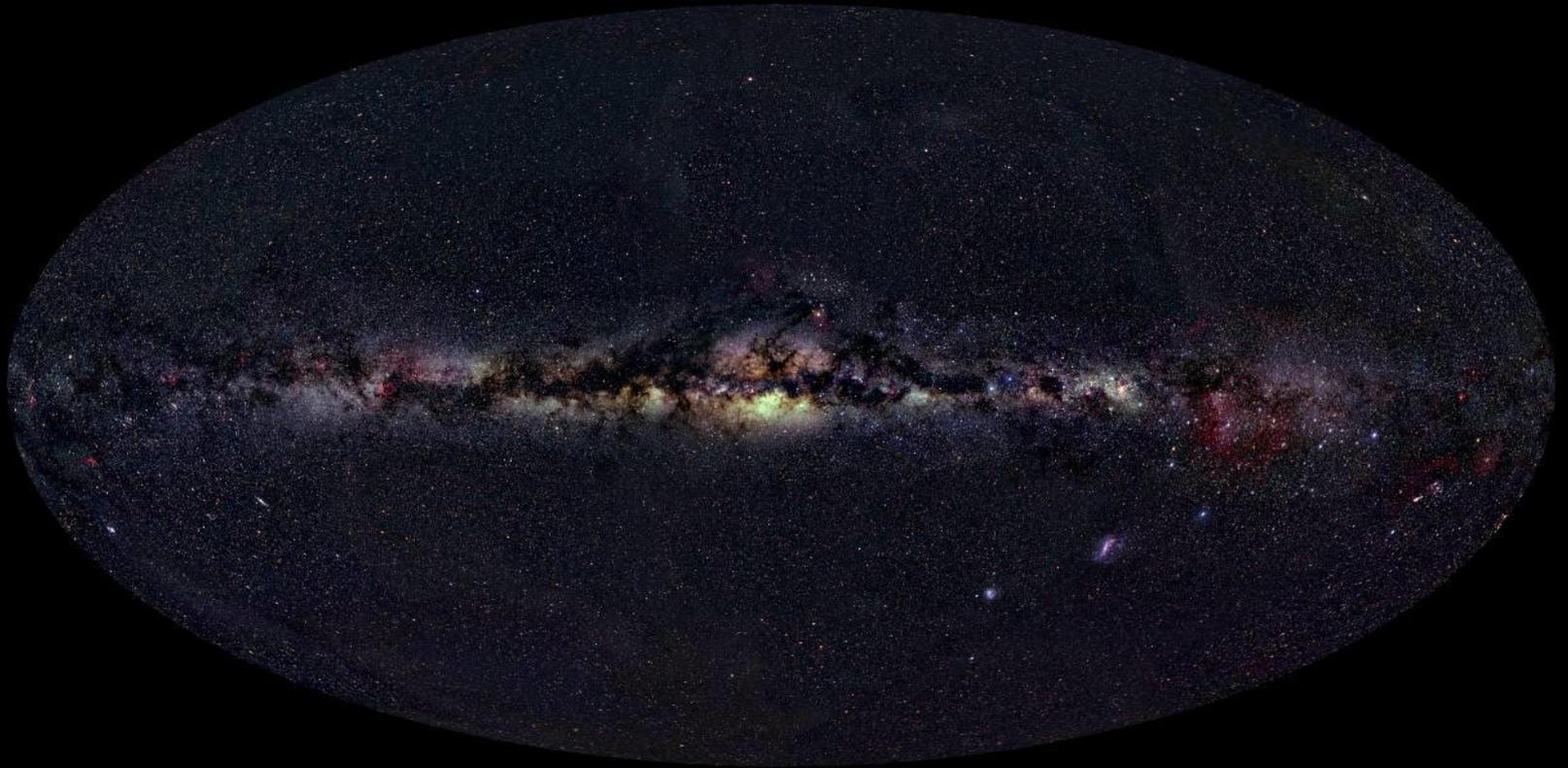
Distribution d'énergie des photons rayonnés à 2 bosses en représentation  $\nu F(\nu) \propto E^2 N(E)$   
*puissance par unité de surface et unité d'intervalle logarithmique de fréquence.*

Photons rares: 5 ph m<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup> [E>100 MeV] pour Vela

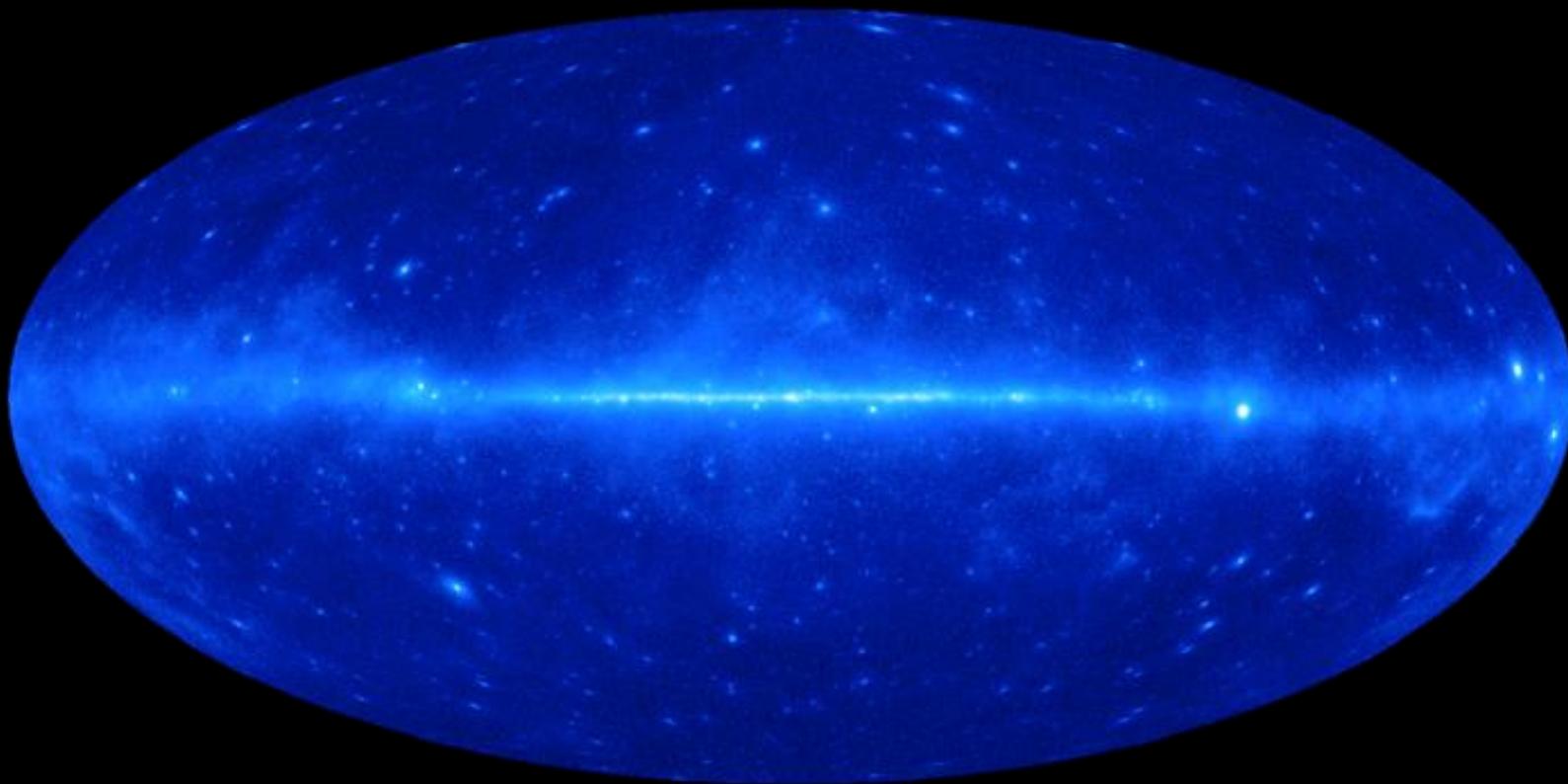


\*Photons cibles: rayonnement synchrotron ou rayonnement externe

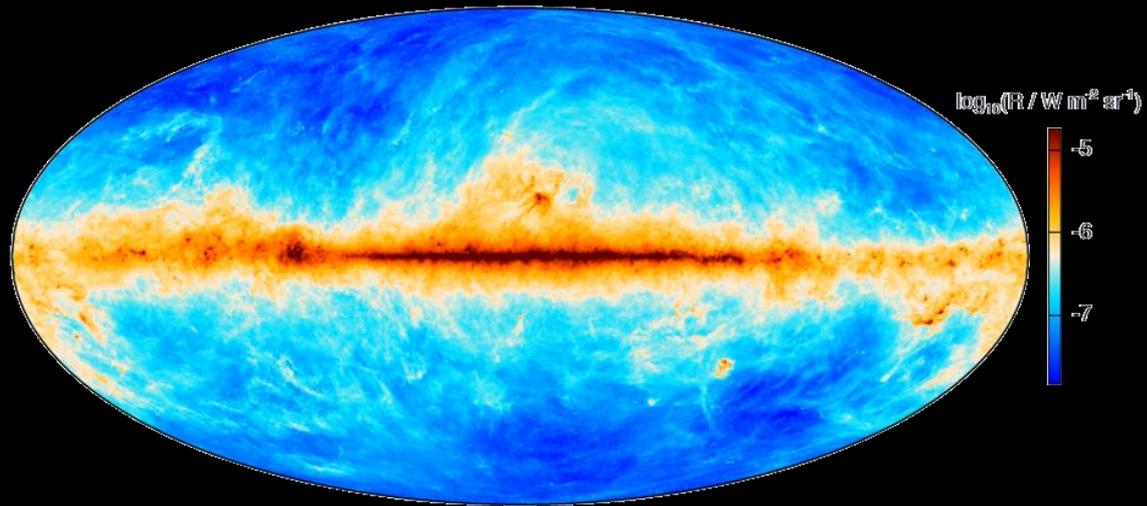
# Visible



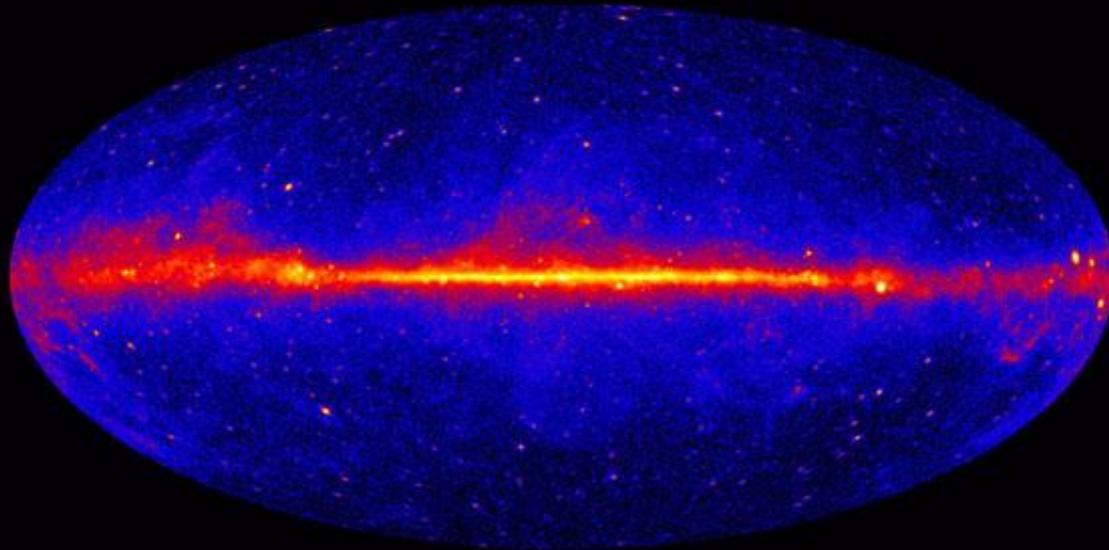
# Rayons gamma $E > 100$ MeV



Credit: Fermi Large Area Telescope Collaboration



**Planck- micro ondes; émissivité de la poussière**



**Fermi- rayons gamma  $E > 100 \text{ MeV}$**

# Fermi Large Area Telescope 2FGL catalog

○ AGN    ◆ AGN-Blazar

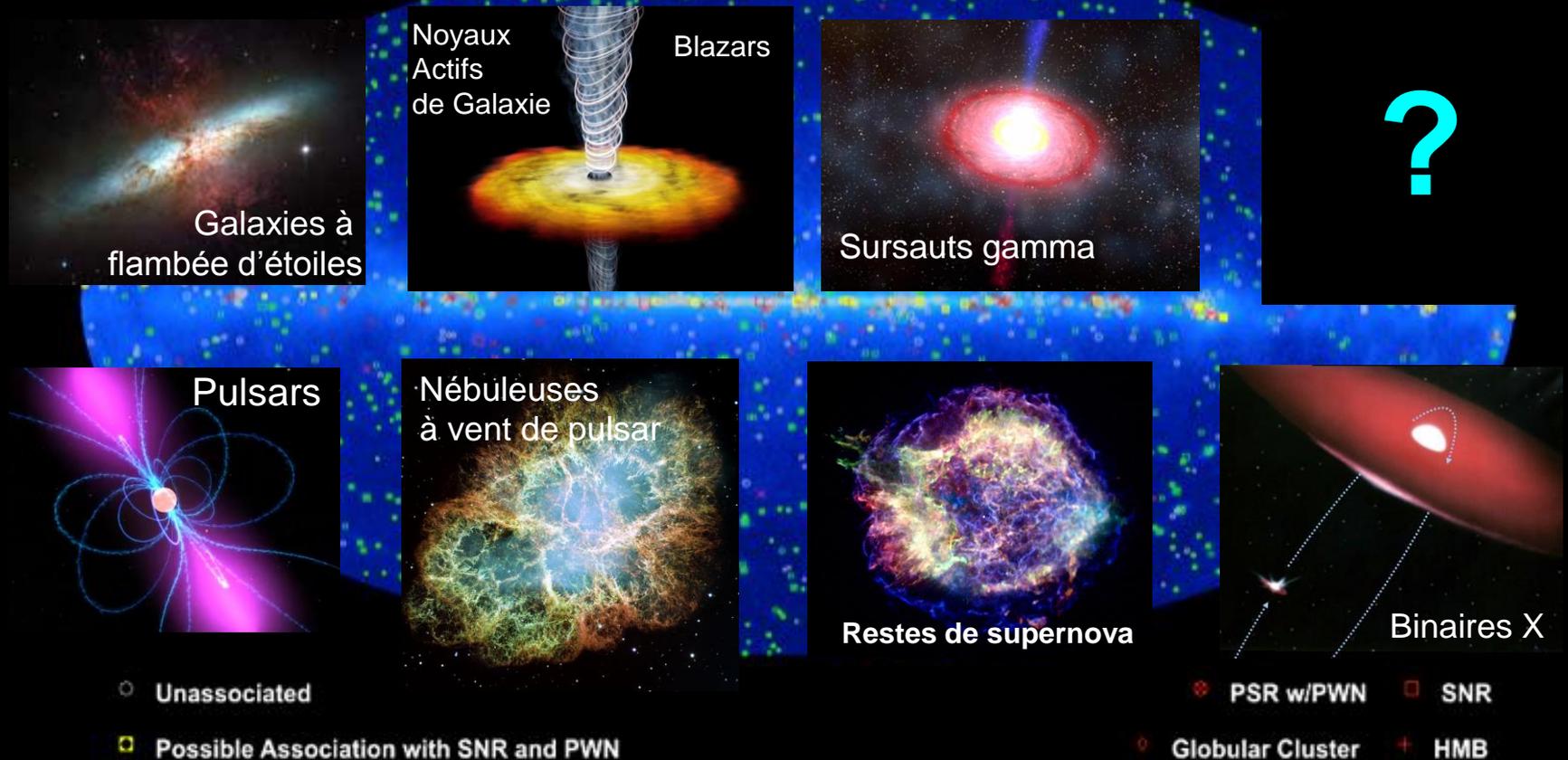
× Galaxy

\* Starburst Galaxy

□ AGN-Non Blazar

◇ Radio Galaxy

+ Seyfert Galaxy

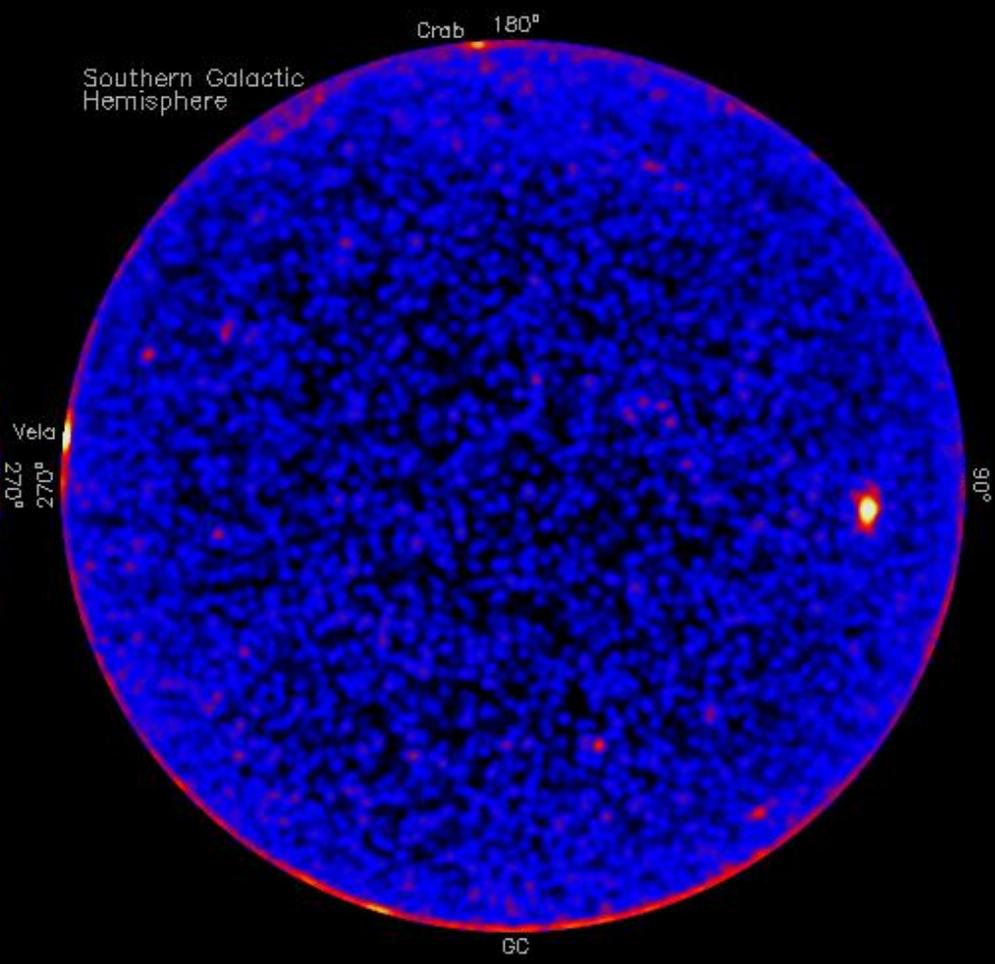
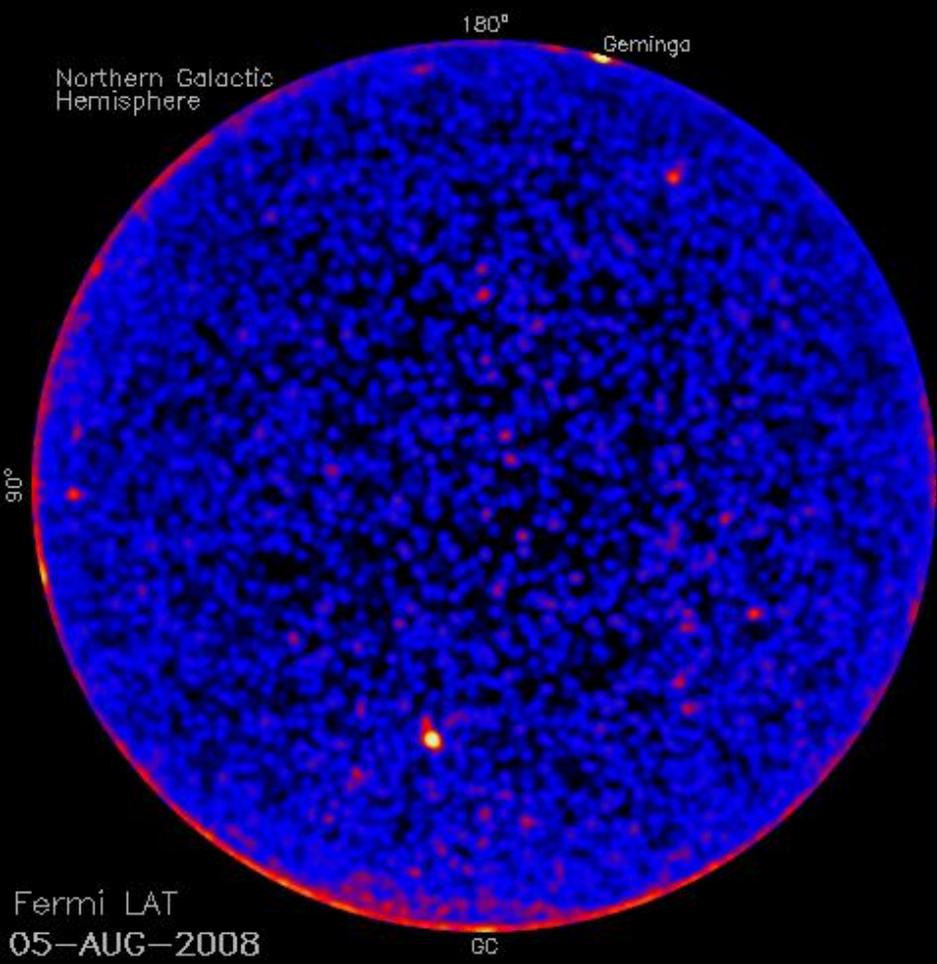


1873 sources with  $TS > 25$

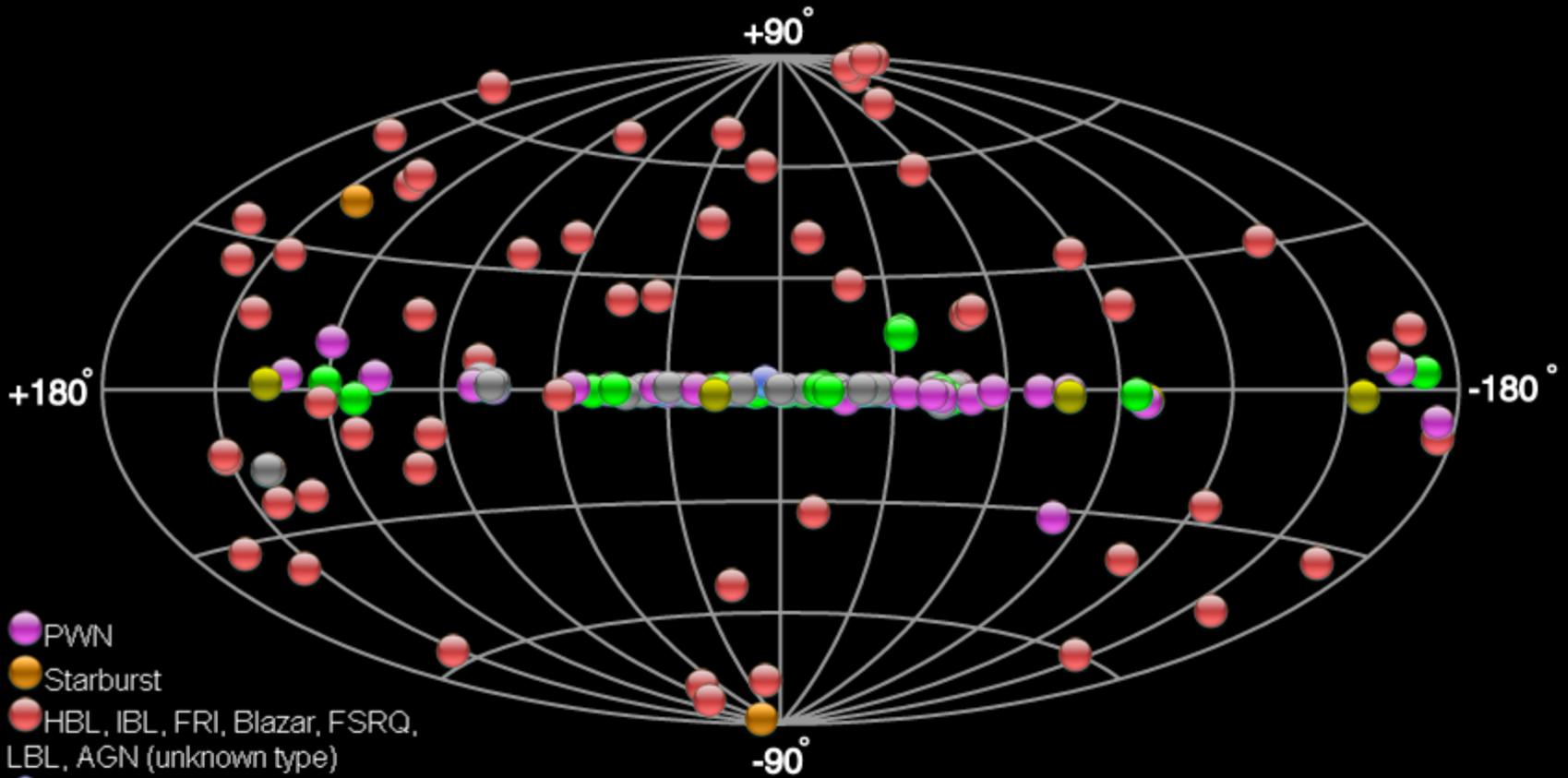
The Fermi collaboration, Nolan, P. L. et al. 2012, ApJS, 199, 31

Publication de 2012 la plus citée en Astrophysique

Credit: Fermi Large Area Telescope Collaboration



# Le ciel vu par les observatoires Cherenkov au sol

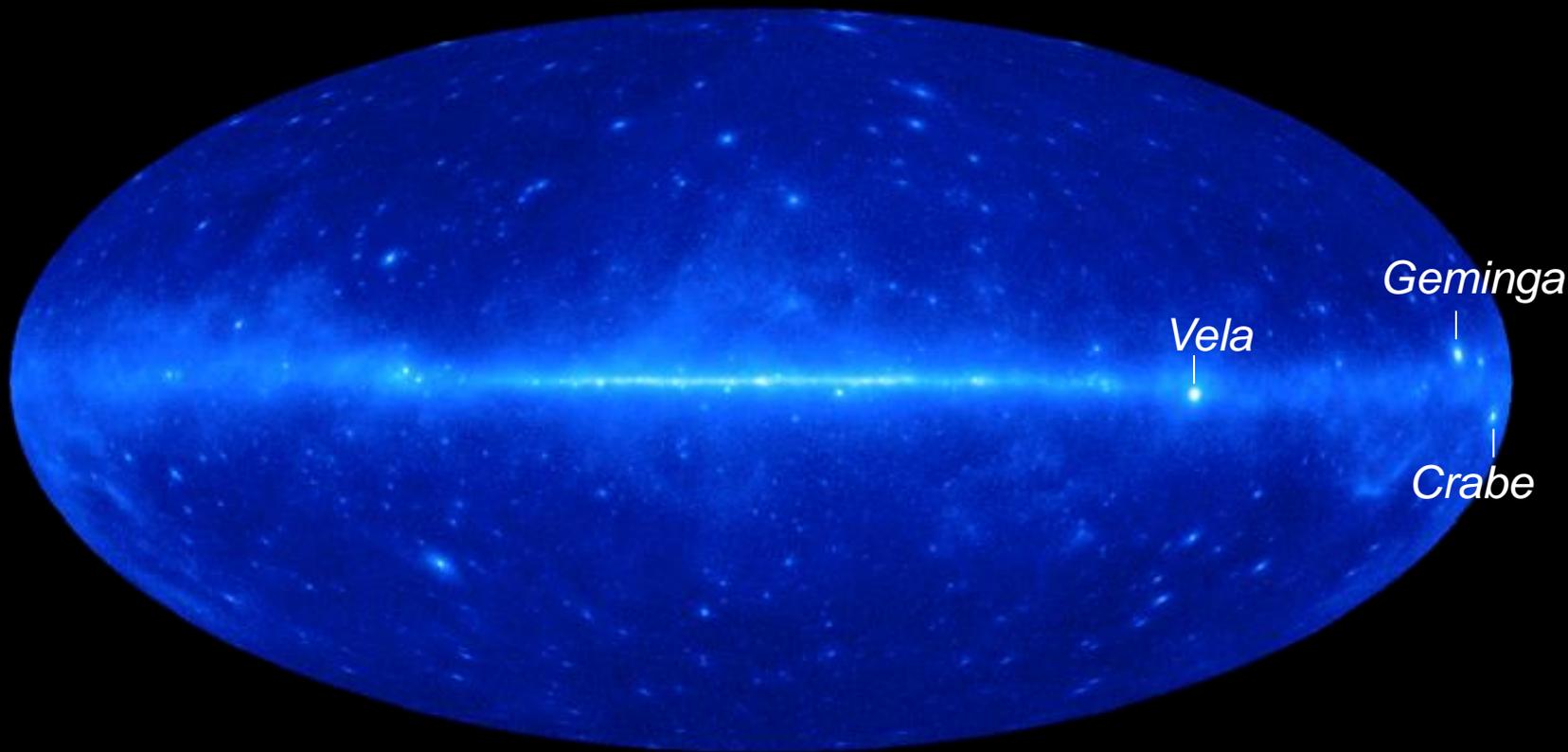


- PWN
- Starburst
- HBL, IBL, FRI, Blazar, FSRQ, LBL, AGN (unknown type)
- Globular Cluster, Star Forming Region, uQuasar, Cat. Var., Massive Star Cluster, BIN, BL Lac (class unclear), WR
- Shell, SNR/Molec. Cloud, Composite SNR
- DARK, UNID, Other
- Binary, XRB, PSR, Gamma BIN

# *Sources Galactiques*



# Rayons gamma $E > 100$ MeV

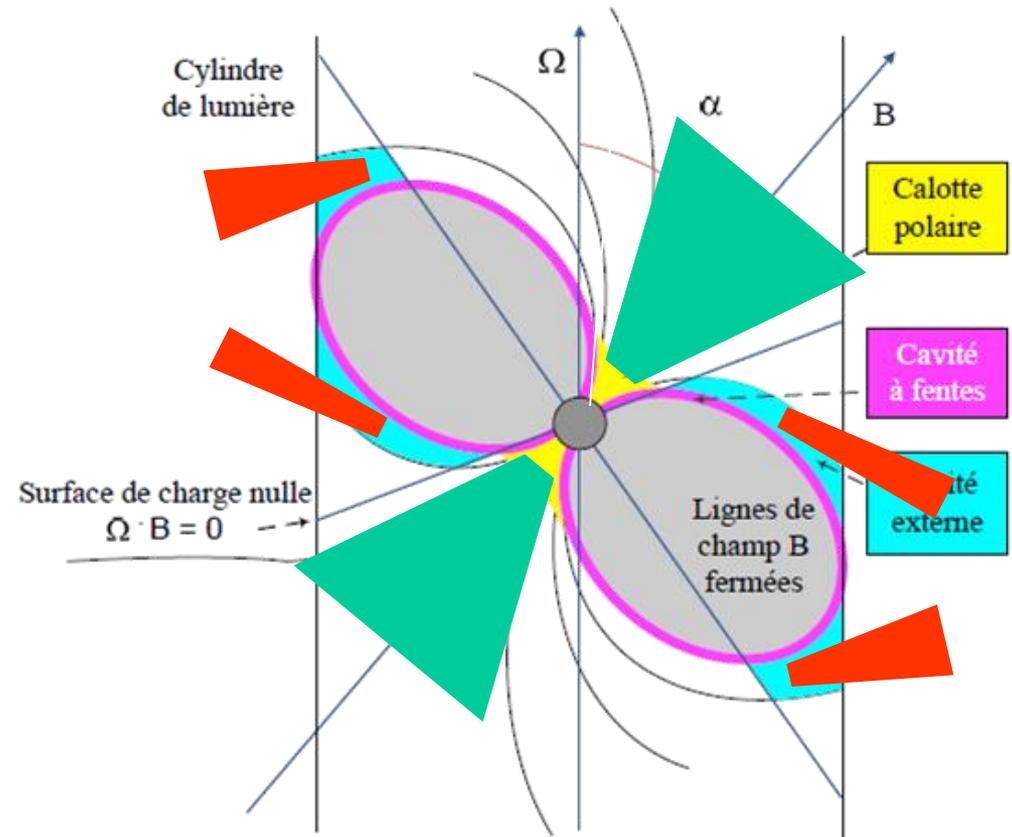


## Pulsars (2)

Magnétosphère en corotation avec l'étoile à neutrons occupant le cylindre de lumière ( $v_{\phi}=c$ )

Cavités accélératrices vides de charges se formant dans la magnétosphère

Photons gamma et radio ne sont pas produits co-spatiallement!  
→ différentes détectabilités en radio et rayons gamma



# Pulsars vus par Fermi

Perte d'énergie de rotation

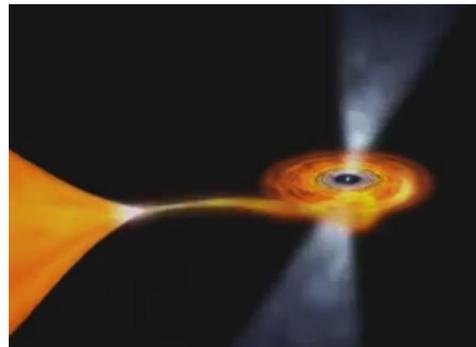
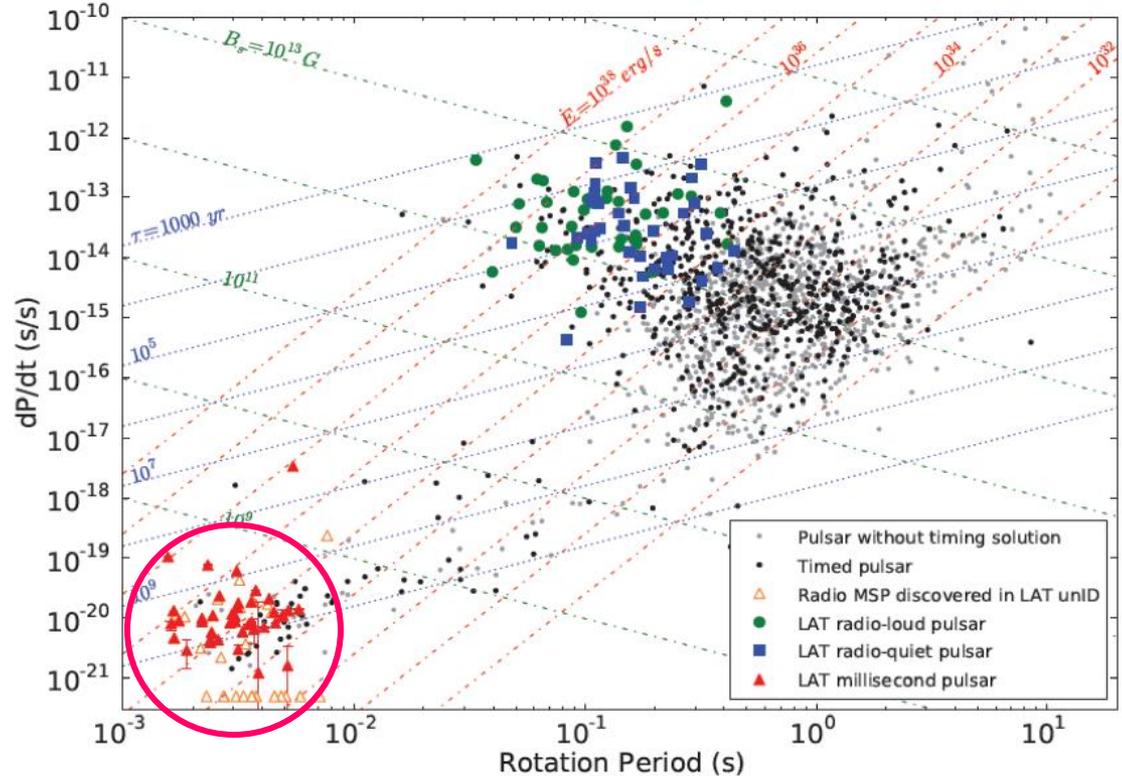
$$\dot{E} = -I\Omega\dot{\Omega}$$

Age:

$$\tau = \frac{\Omega}{2\dot{\Omega}}$$

Brillants en radio:  
Éphémérides radio

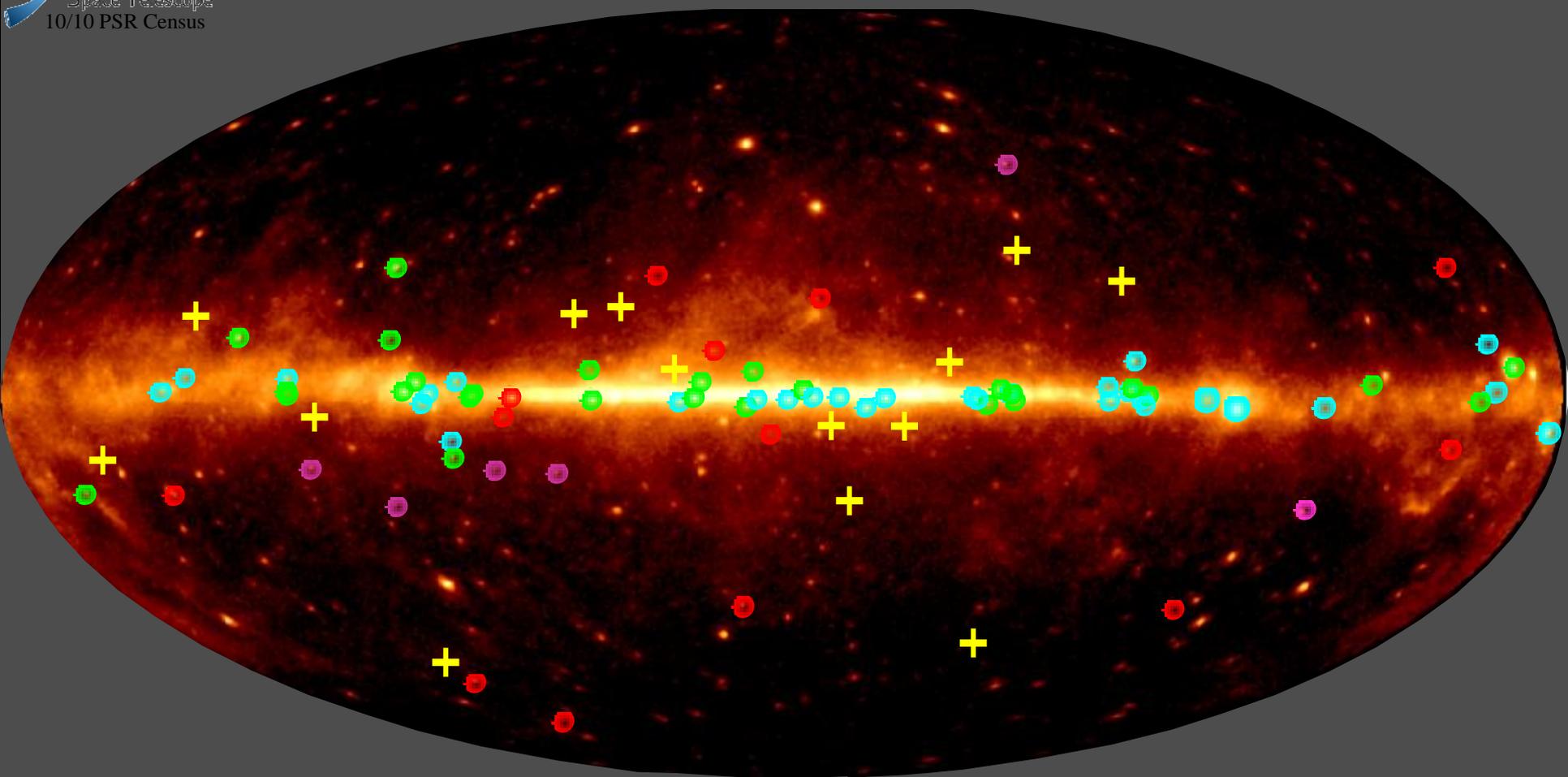
Faibles en radio:  
Périodicité établis  
grâce aux rayons gamma  
seuls



Pulsar milliseconde  
« veuve noire »

# The LAT Pulsar Sky

Pulses at 1/10<sup>th</sup>  
Real Rate



30 Young Radio-selected

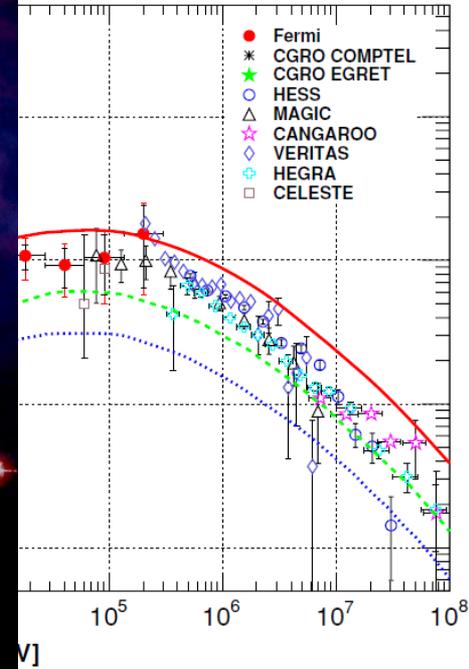
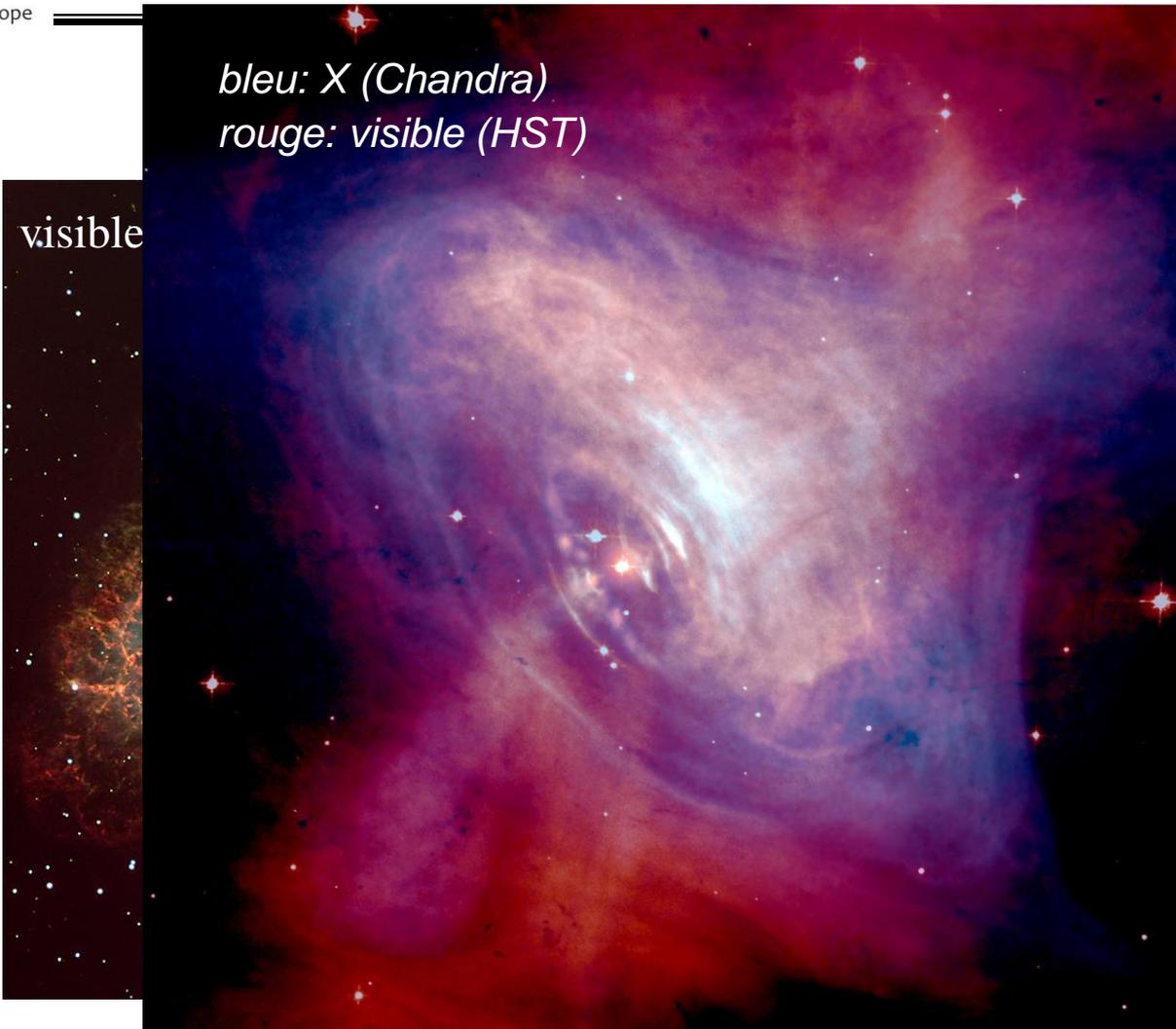
13 MSP Radio-selected

25 Young  $\gamma$ -selected

6  $\gamma$ -sel MSP  $\gamma$ /R pulse

14  $\gamma$ -sel MSP R pulse

# La nébuleuse du Crabe (nébuleuse à vent de pulsar)



synchrotron, IR  
CMB  
Pevatron à électrons

“M1”, explosion le 4 Juillet 1054  
distance: 6300 années lumière

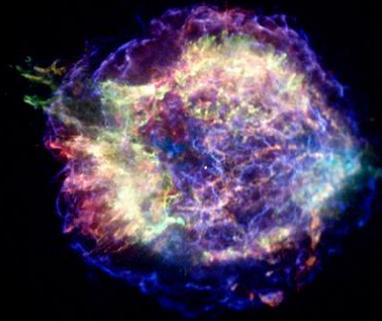
Emission de la nébuleuse variable!

## Restes de supernova « en coquille »



*Cassiopeia A (Chandra)*

# Restes de supernova « en coquille »

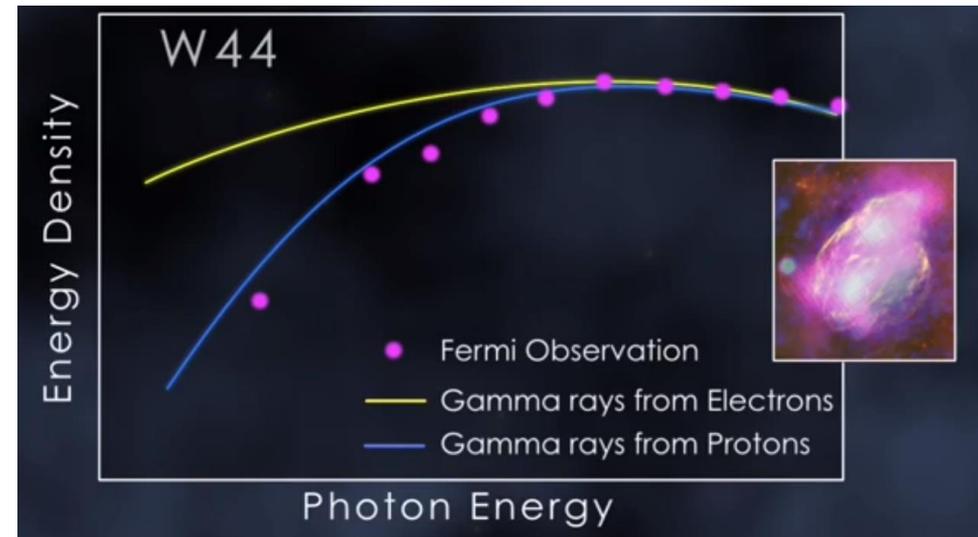
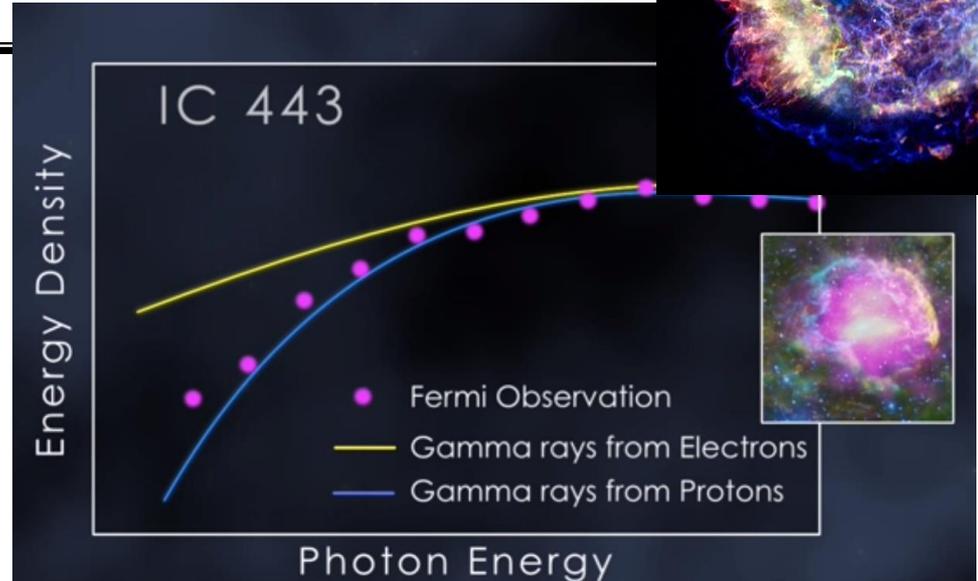


Vestiges anciens en interaction avec des nuages moléculaires: Matière « dense »: noyaux cibles pour interactions nucléaires (protons) ou rayonnement de freinage (électrons)

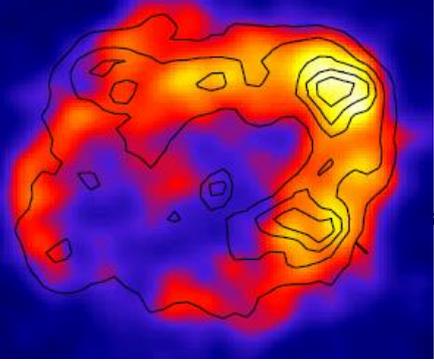
Émetteurs en rayons gamma → accélérateurs cosmiques mais d'électrons ou de protons?

Spectres gamma de Fermi → protons!

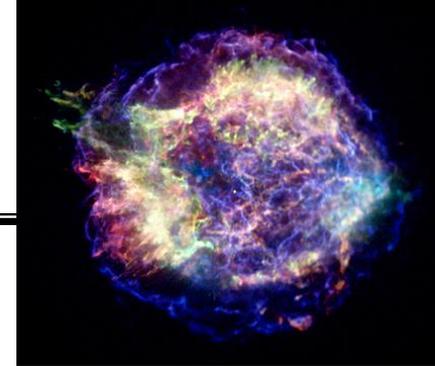
Sites confirmés d'accélération de rayons cosmiques Galactiques



Un des 10 résultats scientifiques majeurs de 2013 pour la revue Science.



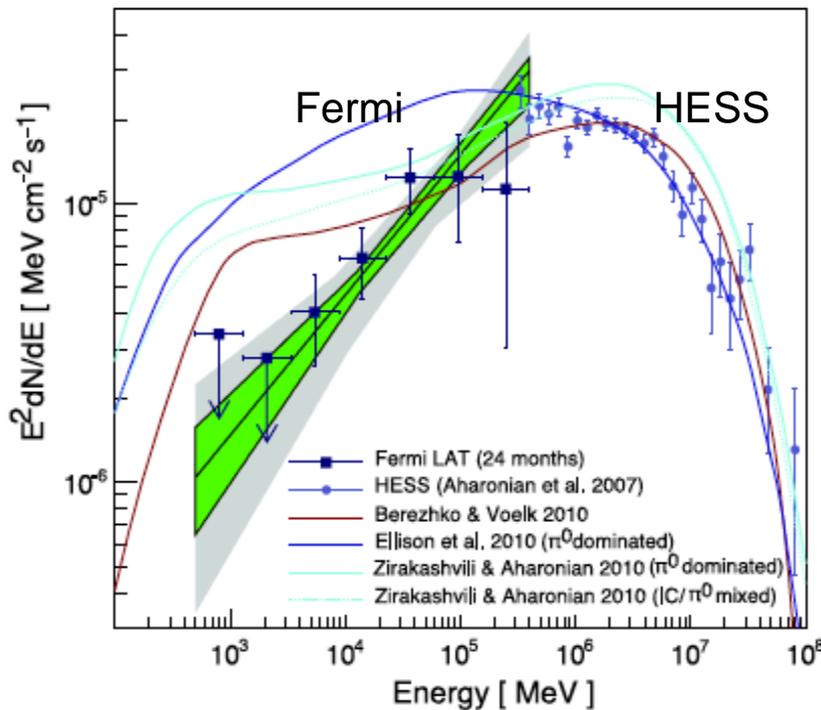
# Restes de supernova « en coquille »



RX J1713.7-3946

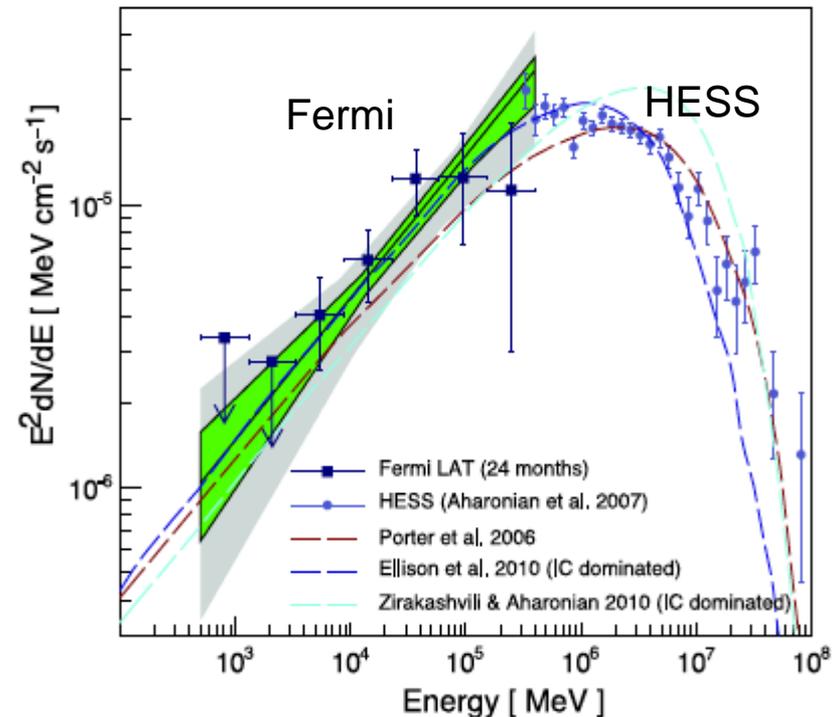
## Scénario hadronique:

Interaction proton - proton



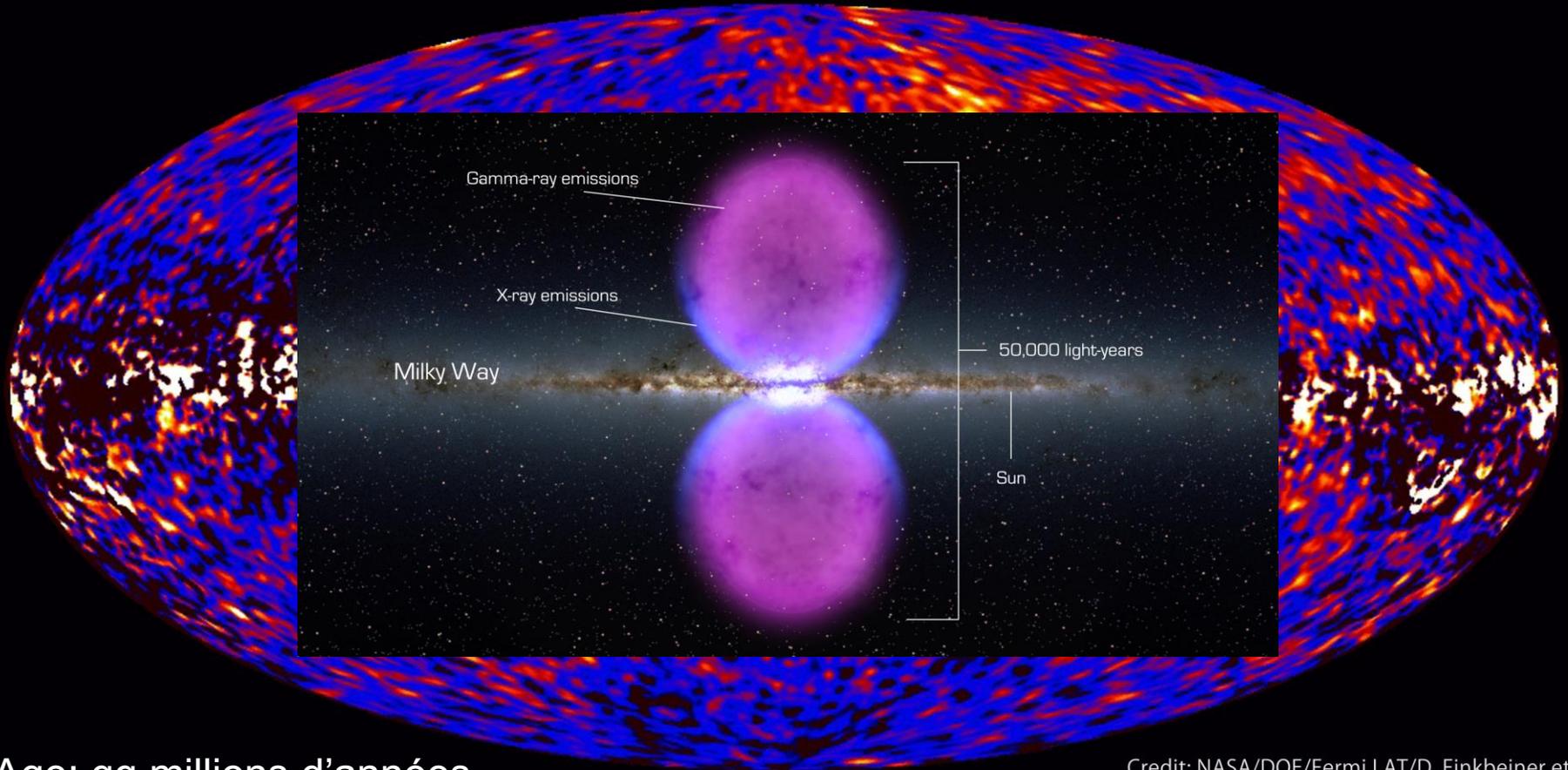
## Scénario leptonique:

Diffusion Compton inverse des électrons



*Certains restes de supernova accélèrent des protons. Seule origine des rayons cosmiques de basse énergie?*

# Fermi data reveal giant gamma-ray bubbles



Age: qq millions d'années

Relique d'un jet émanant du trou noir central?

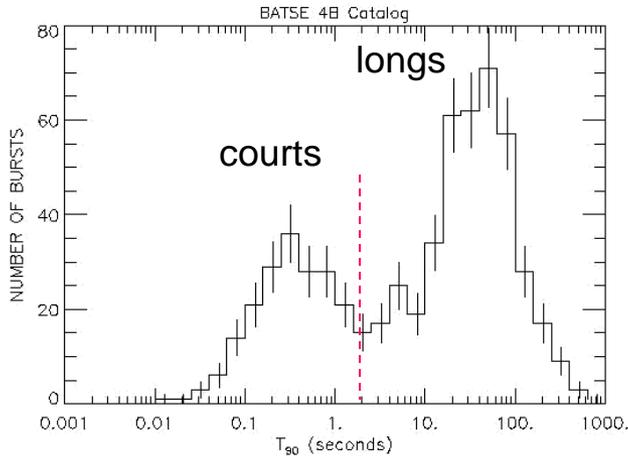
Episode intense de formation d'étoiles?

Fusion d'un trou noir secondaire?

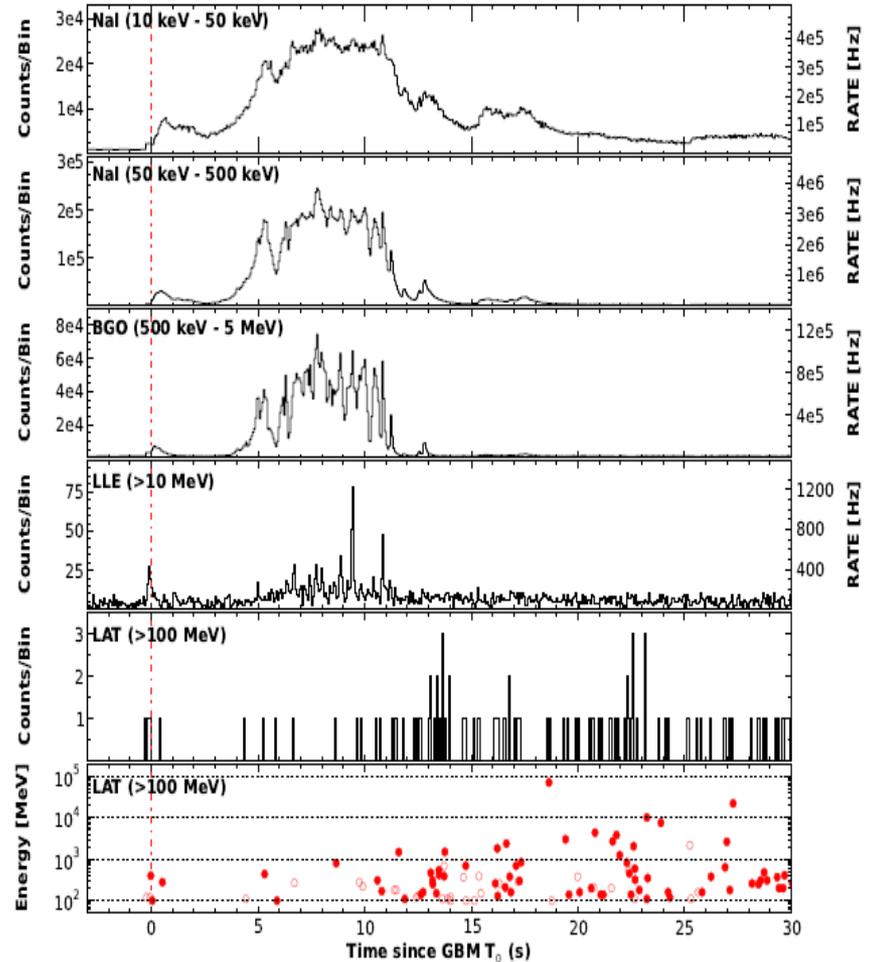
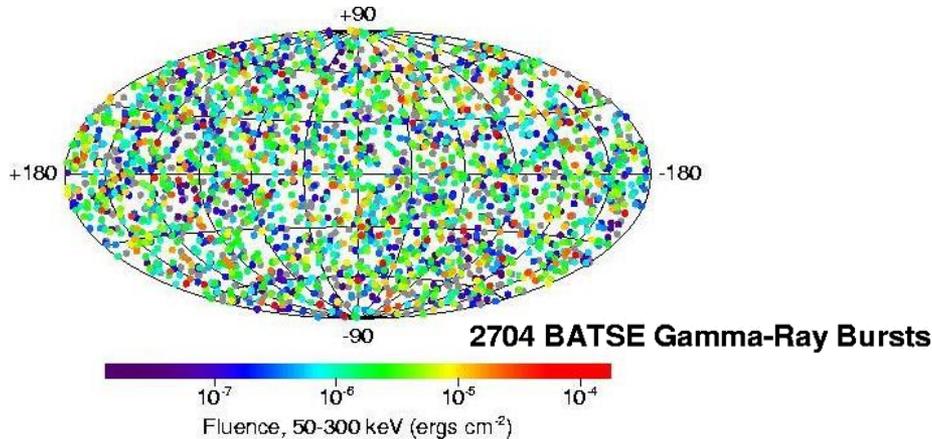
Credit: NASA/DOE/Fermi LAT/D. Finkbeiner et al.

# *Sources Extragalactiques*

# Sursauts gamma (1)

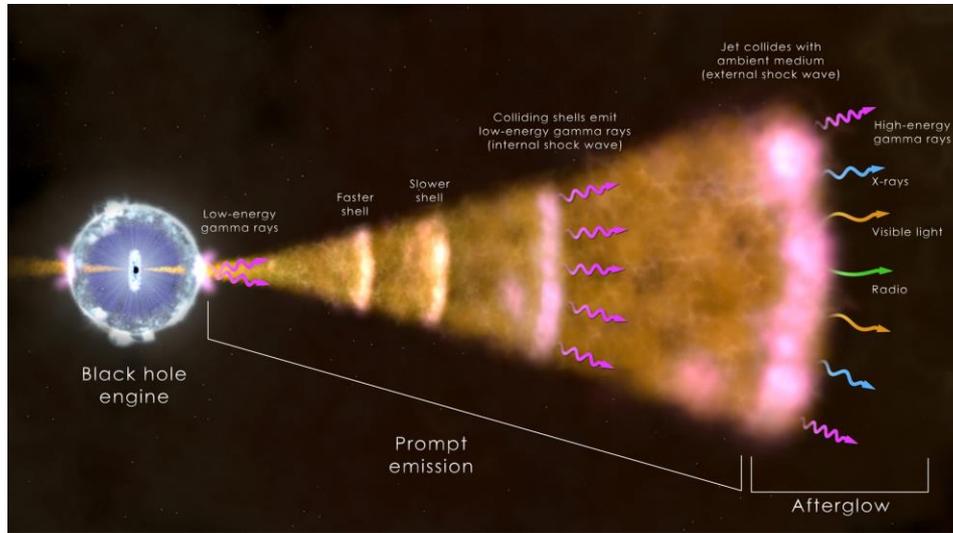


Découverts en 1967, « révélés » en 1973  
 'prompt': 100 ms-100 s (sous structure ms)  
 'rémanence': quelques jours  
 20% avec  $z > 5$ ,  $z_{\text{max}} = 8.3$   
 Explosions les plus puissantes connues  
 $E_{\text{iso}} = 10^{53} - 10^{55}$  erg s $^{-1}$  ( $1 M_{\odot} = 2 \times 10^{54}$  erg)



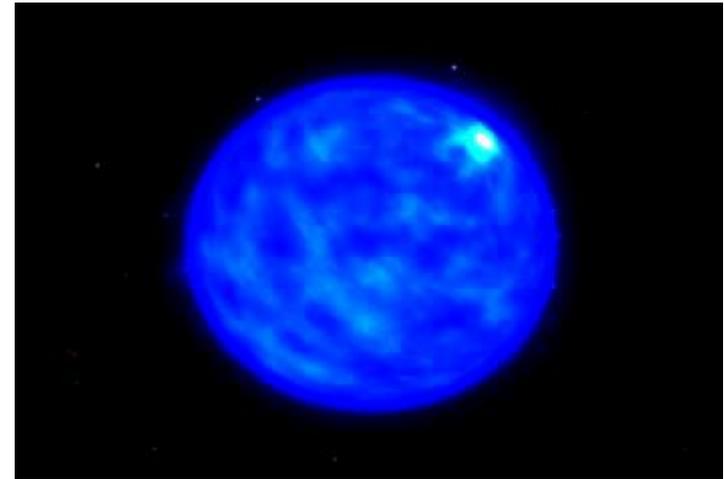
*extinction de l'Ordovicien-Silurien?*

# Sursauts gamma (2)



Naissance d'un trou noir - Jet avec  $\Gamma \sim 100-1000$

longs: hypernova ( $>30 M_{\odot}$ )



courts: coalescence d'objets compacts



# *Noyaux actifs de galaxie*

*Jet optique de M87 (Curtiss, 1918)*



*Hubble heritage*

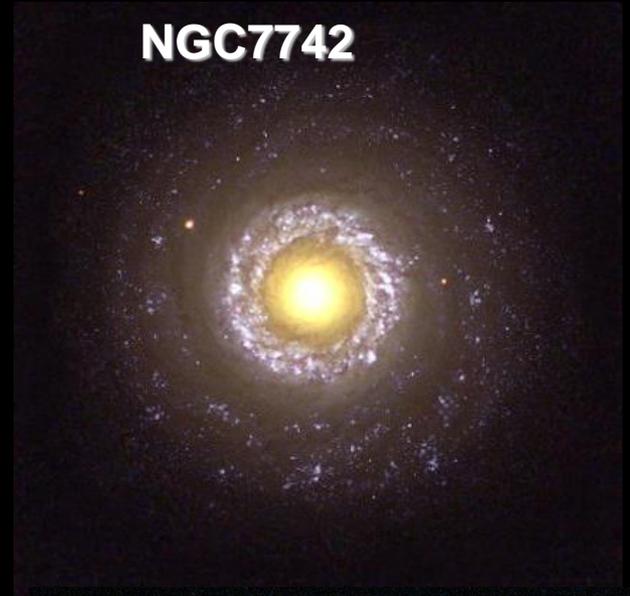
## Galaxie de Seyfert

Galaxies spirales

Cœurs compacts et lumineux

Raies d'émission large

NGC7742



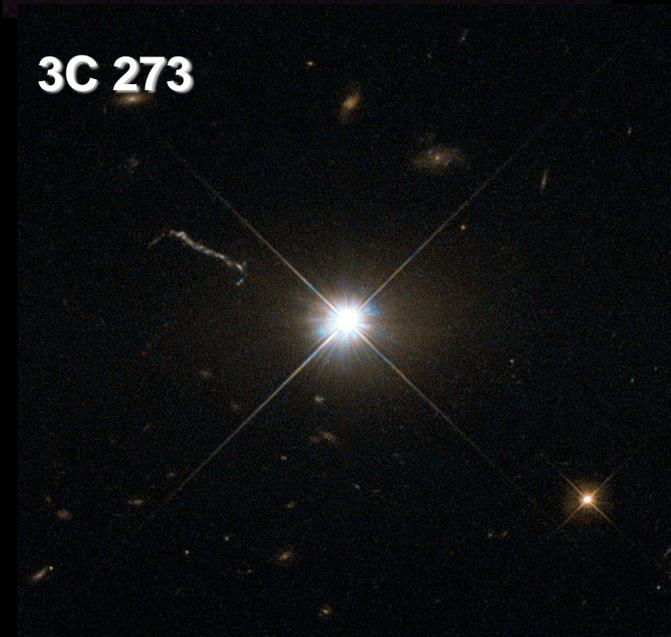
## Quasars (quasi-stellar radio source)

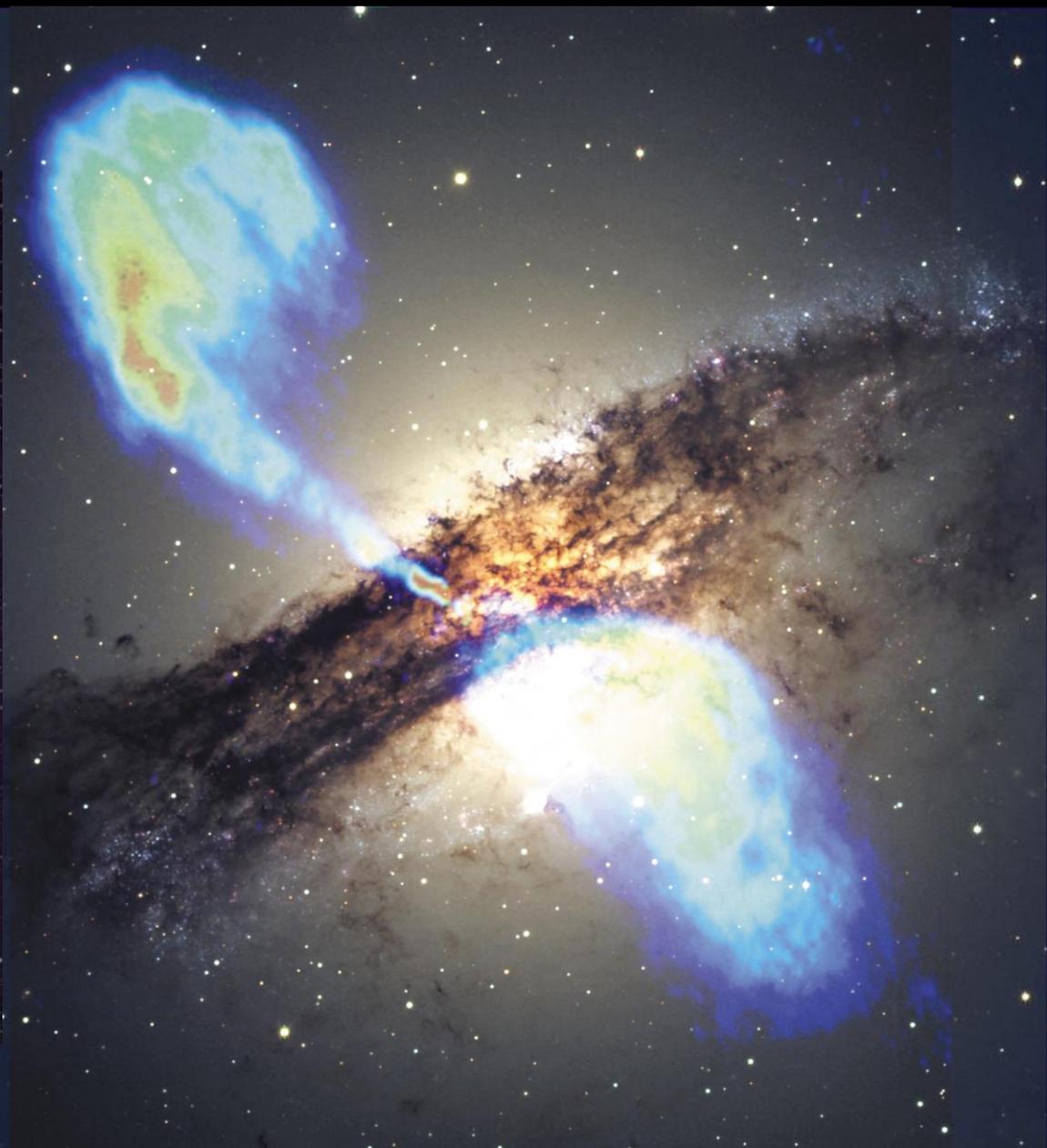
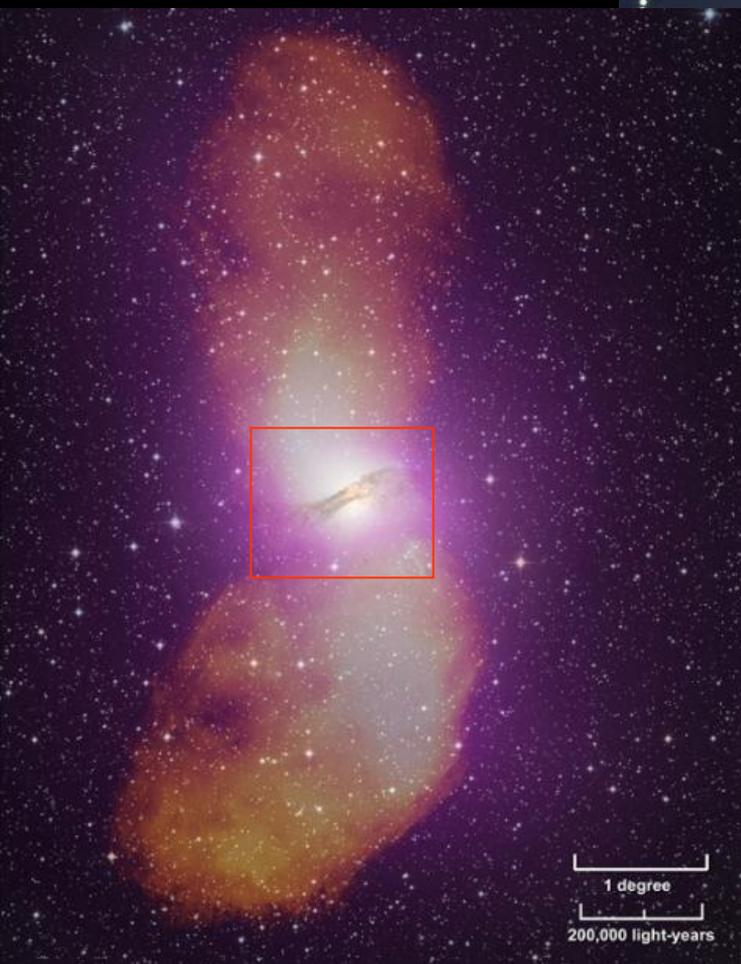
Propriétés similaires aux Seyfert

mais plus lumineux

Galaxies hôtes elliptiques

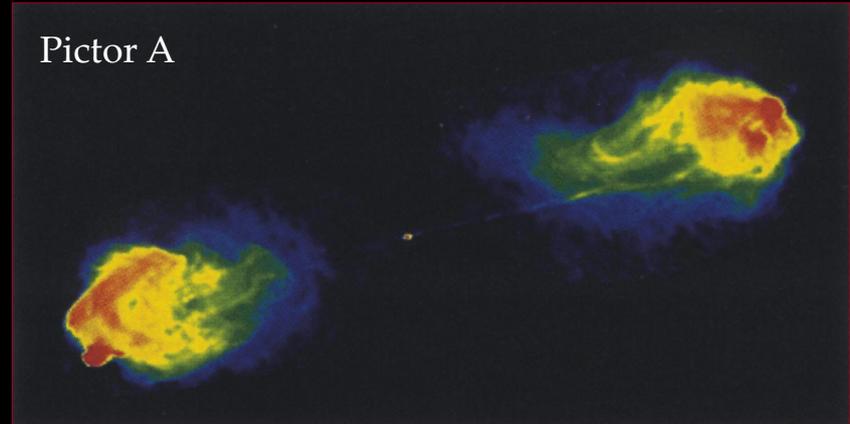
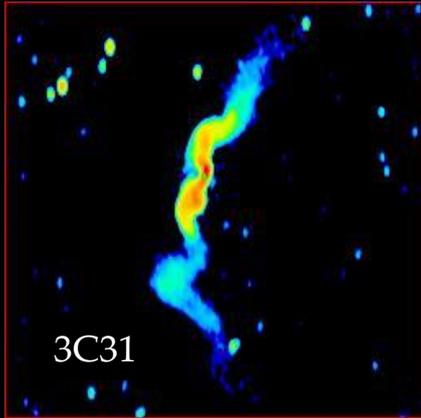
3C 273





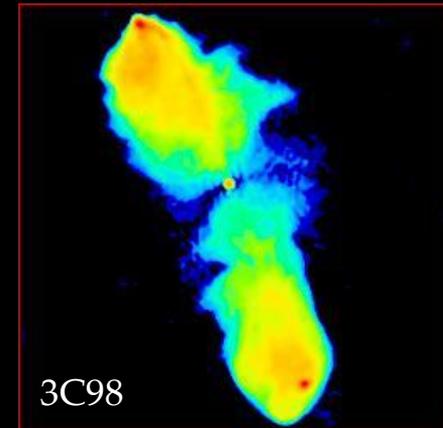
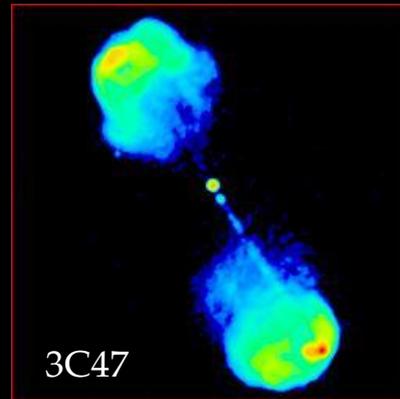
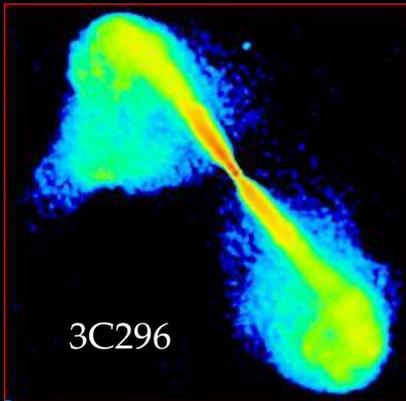
Centaurus A Radio Galaxy (VLT KUEYEN + FORS2)

# Radio galaxies



FR2: très lumineuses  
jet brillant aux extrémités

FR1: peu lumineuses  
jet brillant près du coeur



Très grande  
luminosité →  
énergie  
gravitationnelle

grande efficacité  
42% de l'énergie de  
masse disponible  
pour un trou noir à  
rotation maximale

Luminosité  
maximale

$$L_E = \frac{2\pi r_g m_p c^3}{\sigma_T} = 1.3 \times 10^{38} \left( \frac{M}{M_\oplus} \right) \text{ erg s}^{-1}$$

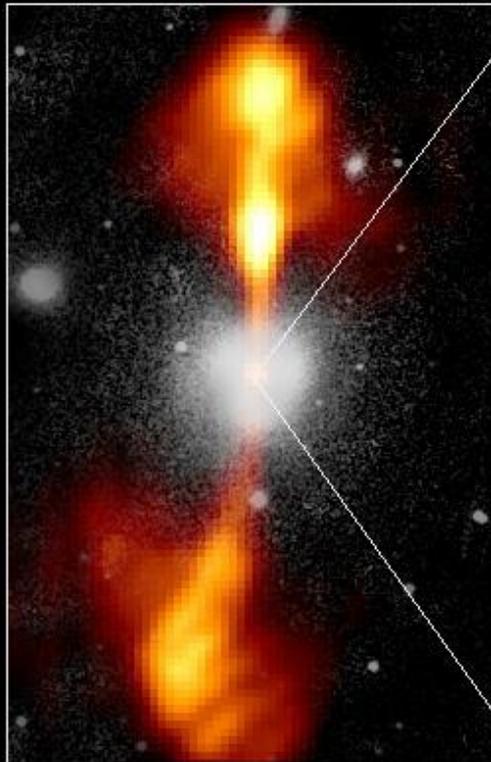


# Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

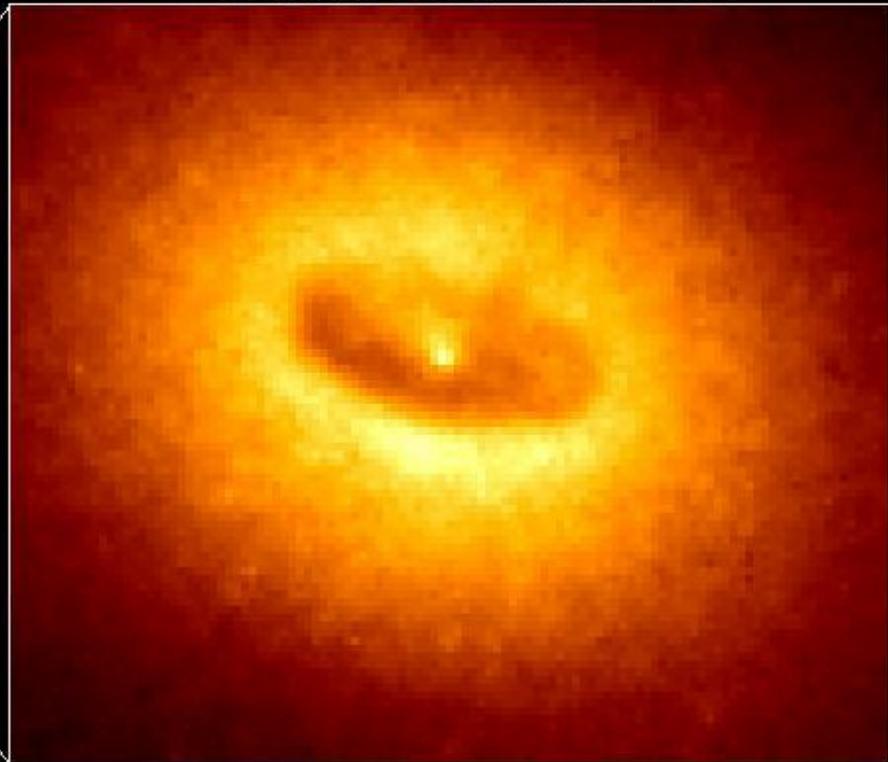
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds  
88,000 LIGHTYEARS

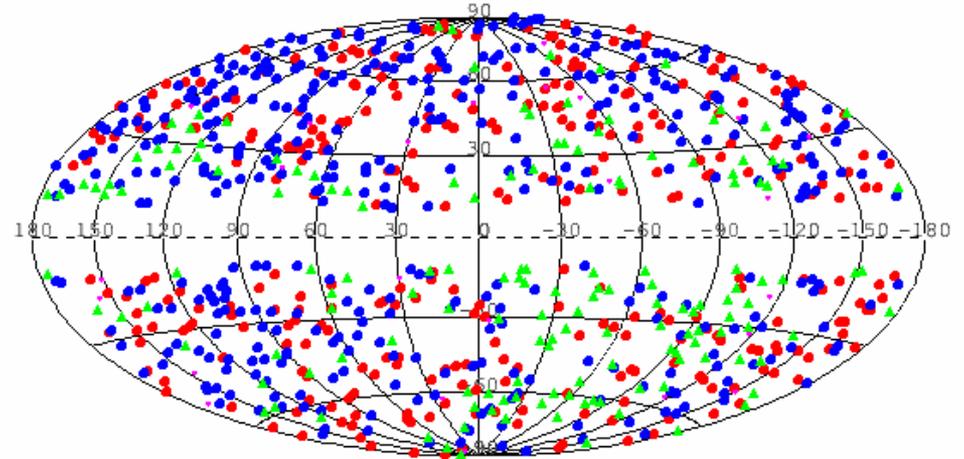
HST Image of a Gas and Dust Disk



17 Arc Seconds  
400 LIGHTYEARS

# Blazars

- Jet dirigé dans une direction proche de la ligne de visée
- grande luminosité apparente
  - variabilité rapide
  - “coeur” brillant en radio
  - émission hautement polarisée
  - mouvements superluminiques



*Rouge: FSRQs (puissants, distants)*  
*Bleu: BL Lacs (faibles, proches)*

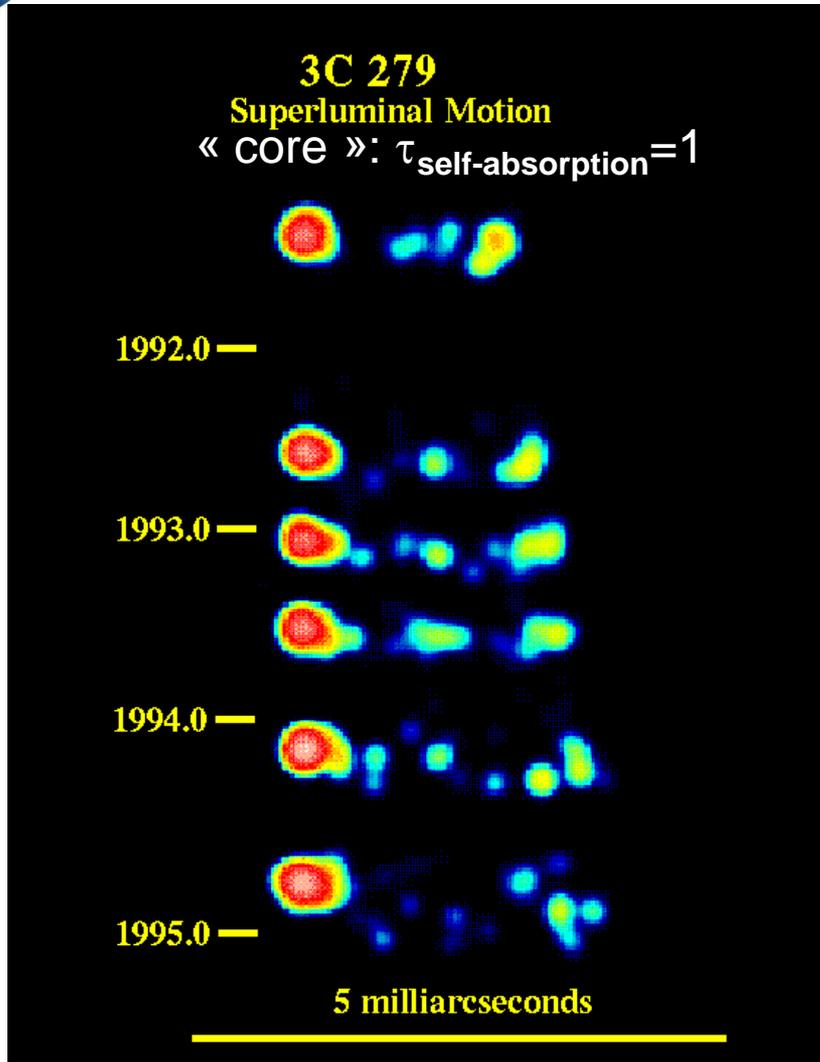
$$\Delta t_{obs} = \delta^{-1} \Delta t'$$

$$\nu = \delta \nu'$$

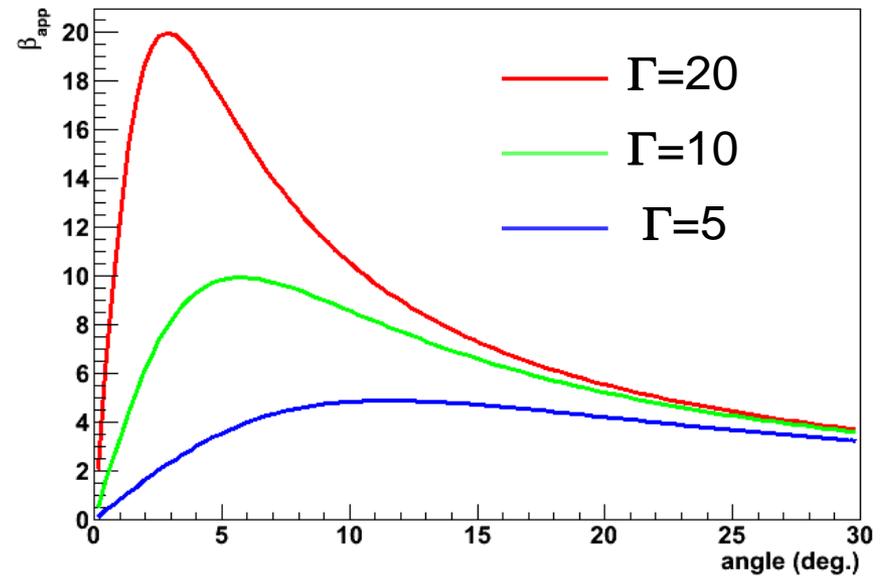
$$I(\nu) = \delta^3 I'(\nu')$$

$$I = \delta^4 I'$$

# Mouvement superlumique



Observation VLBI:  $v_{\text{app}}=4 c!$



$$\beta_{\text{app}} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}$$

Mouvement superlumique observé si  $\beta > 0.707$

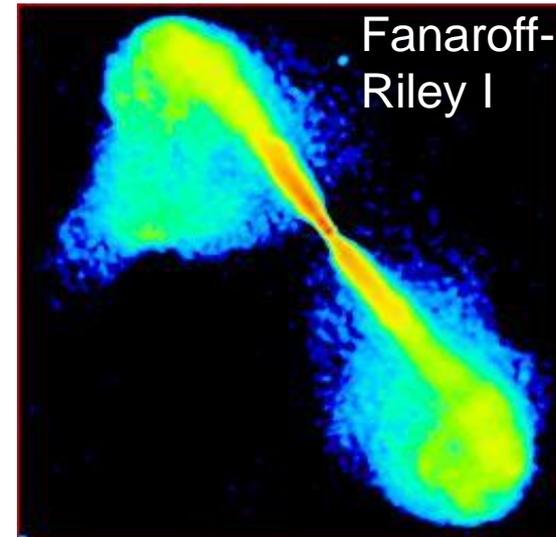
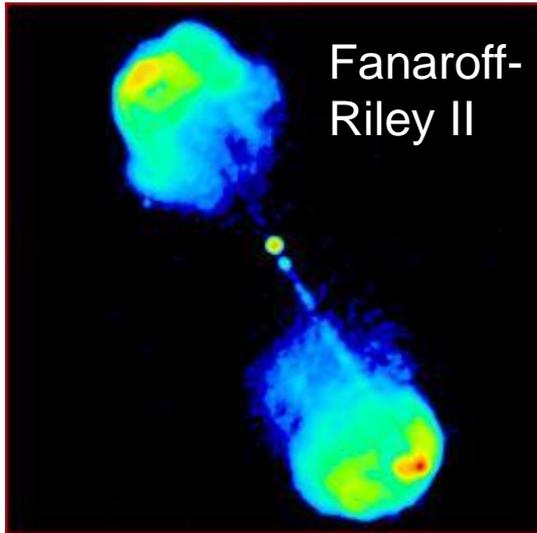
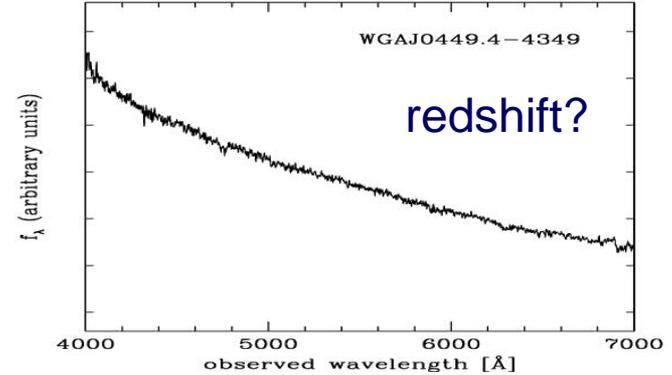
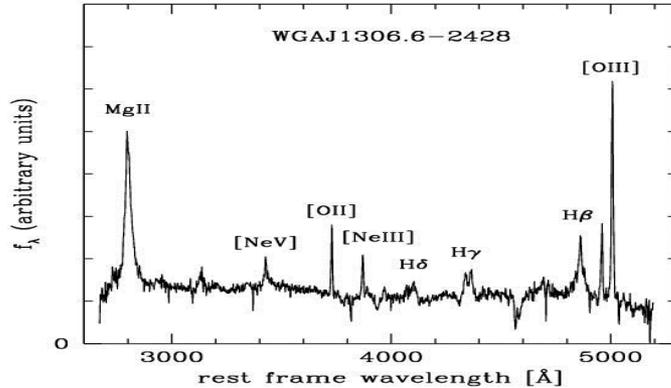
$\beta_{\text{app}}$  observé jusqu'à 50!

$\beta_{\text{app}}$  et directions variables pour une même source

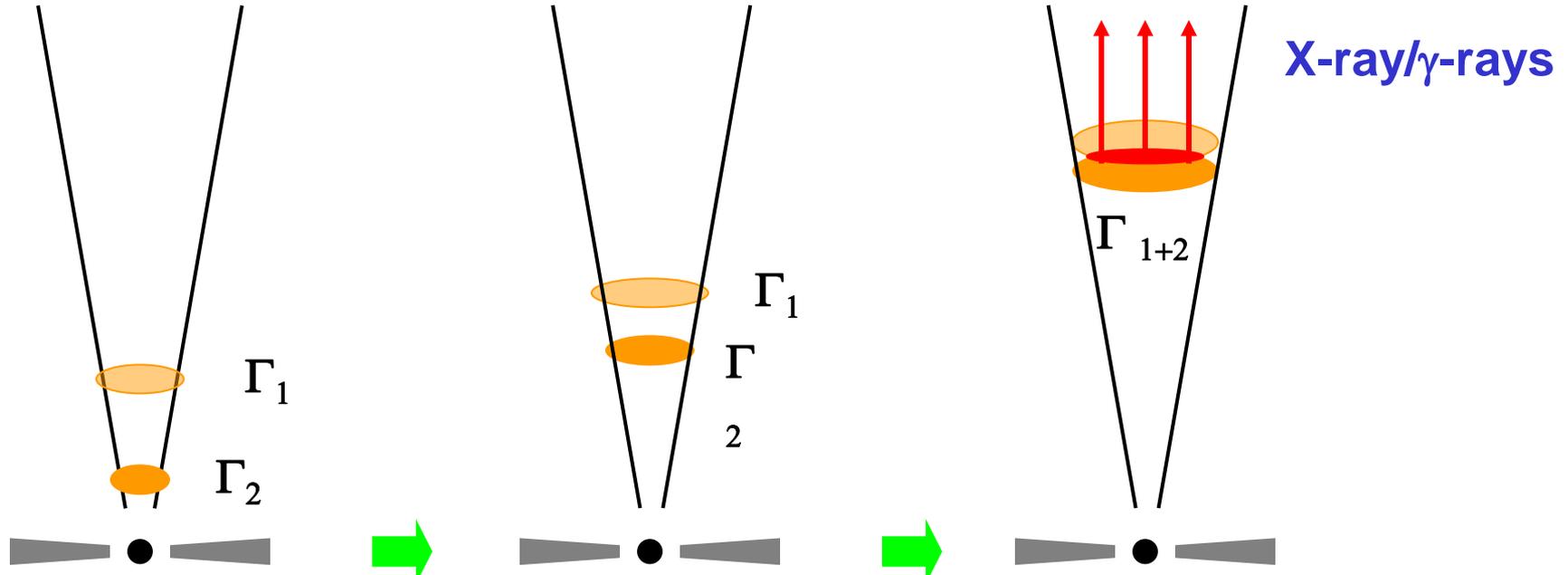
# Classes de Blazar

rouges (raies intenses), EGRET: 56 , Fermi 400

bleus (raies faibles) EGRET: 14, Fermi: 600



## Modèle de chocs internes

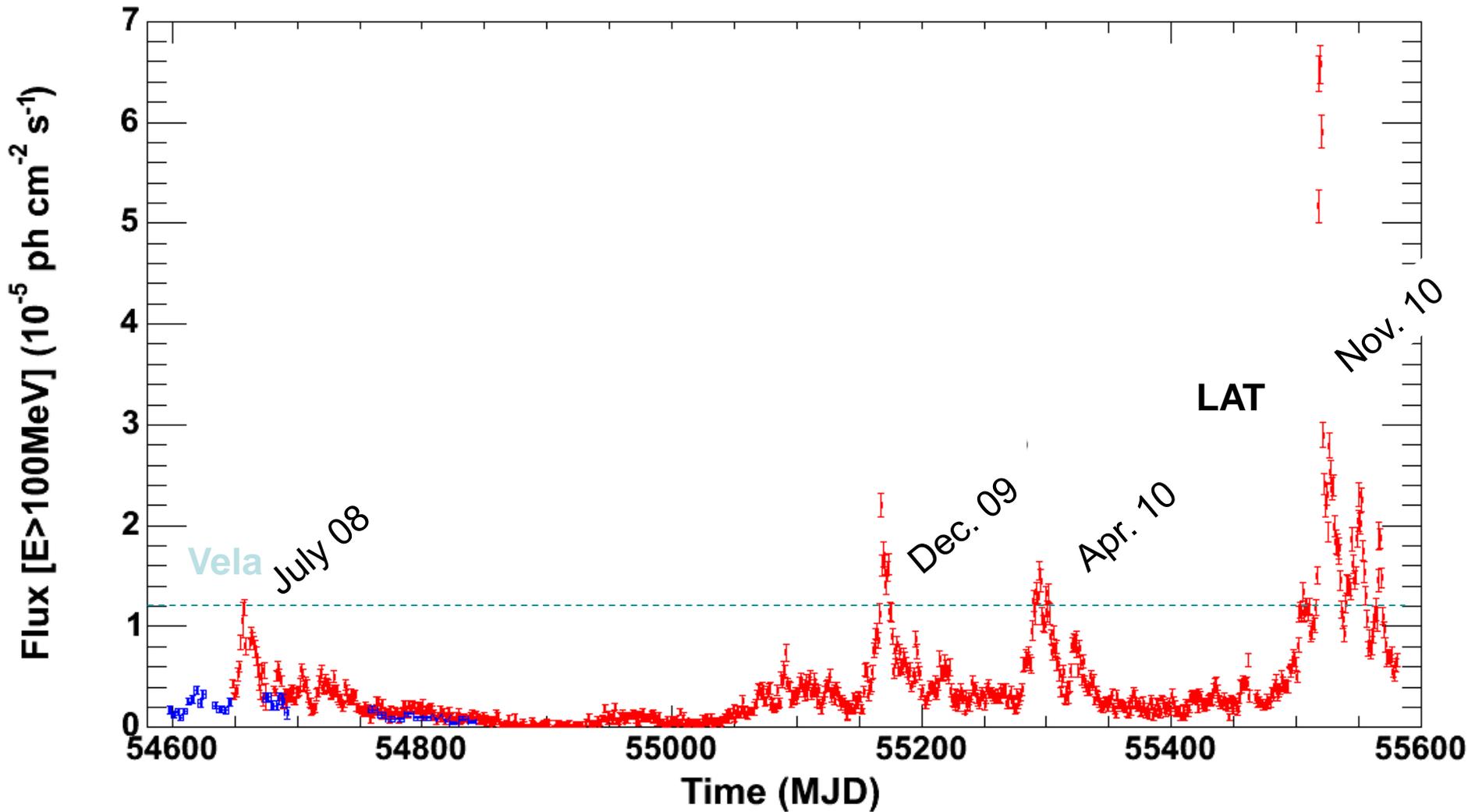


J.Kataoka

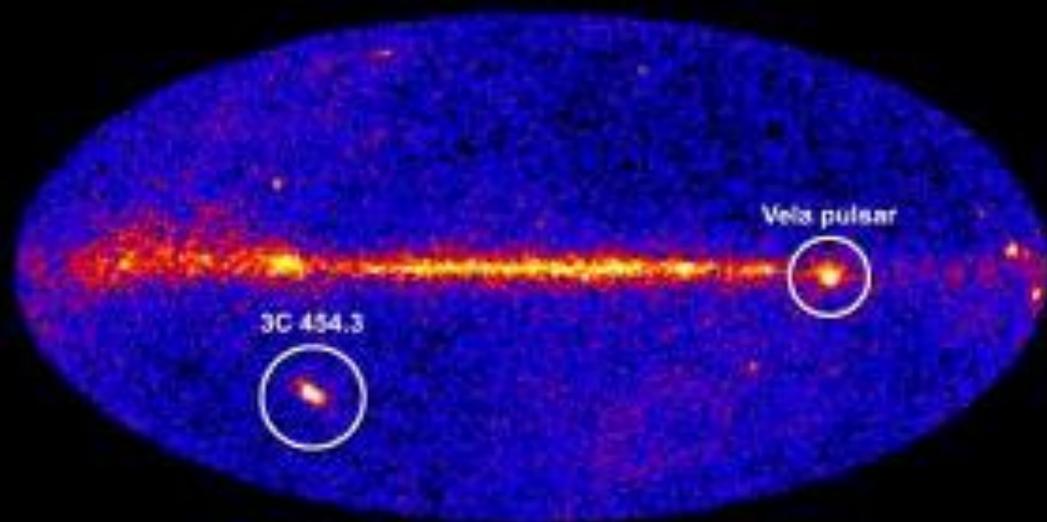
Modulation de l'éjection relativiste – le fragment rapide ( $\Gamma_1$ ) rattrape le plus lent ( $\Gamma_2$ )

$e^-e^+$  (et éventuellement quelques  $p$ ) sont accélérés dans l'onde de choc, et produisent de l'émission synchrotron et Compton-Inverse.

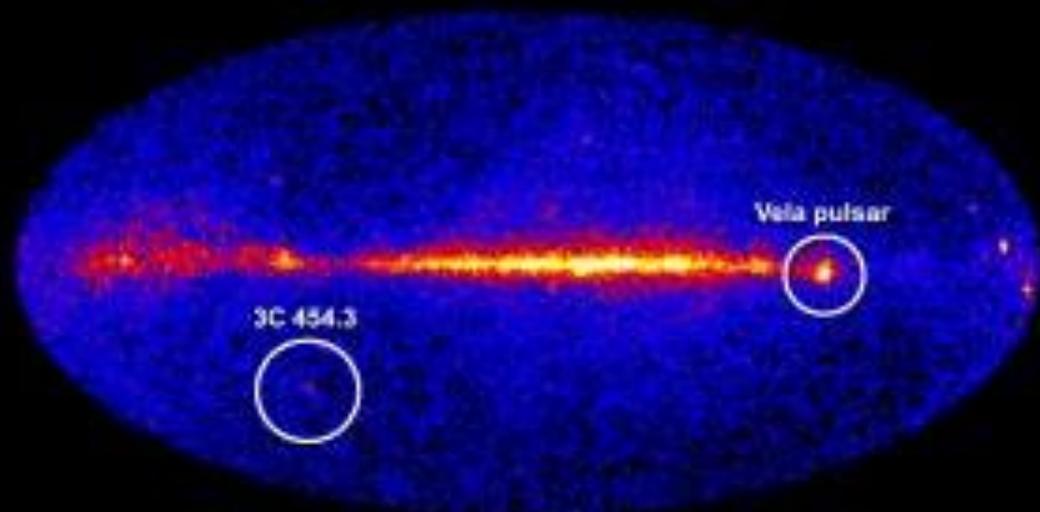
# Courbe de lumière de 3C 454.3 (z=0.859)



# Blazar 3C 454.3's Record Flare



December 2, 2009



November 3, 2009



- Fraction de protons (ions) accélérée?
- Lien évolutif entre blazars « rouges » et « bleus »?
- Alimentation en énergie du jet: disque ou trou noir?
- Connection disque-jet
- Connection AGN – environnement

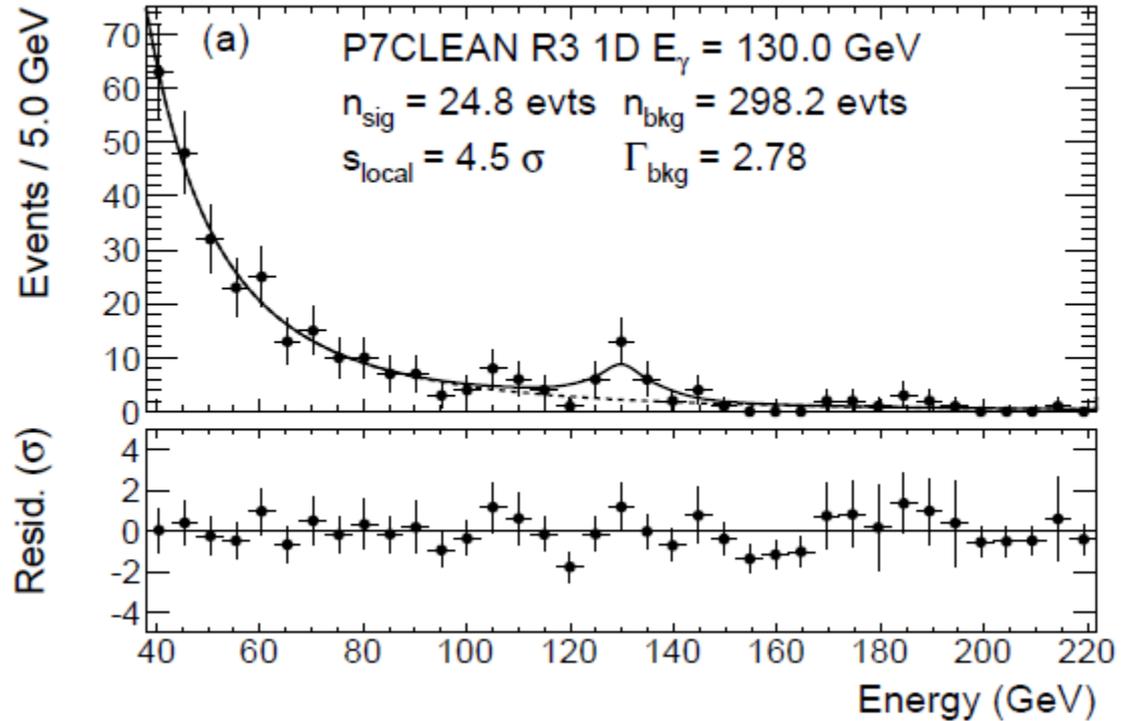
# Matière Noire



Weakly Interactive Massive Particle (WIMP)

$$\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma$$

Présence d'une raie à  $E_\gamma = M_\chi$



# *Techniques de détection*

## Spécificités instrumentales de l'Astronomie Gamma

- Peu de photons:  $N(E) \sim E^{-2}$ .  $S/N < 10^{-3}$  !
  - Photons détectés un à un, techniques de Physique des Particules
  - grande surface de collection !
- Pas de possibilité de focalisation
- Les photons n'atteignent pas le sol ( $27 X_0$ )
  - détection spatiale *ou* utilisation des gerbes électromagnétiques dans l'atmosphère.
  - **2 classes de détecteurs**
- télescopes embarqués ("GeV") grand champ de vue,  $A_{\text{eff}} \sim 1 \text{ m}^2$
- télescopes Cherenkov au sol ("TeV"), faible champ de vue ( $3^\circ$ ),  $A_{\text{eff}} \sim 10^4 \text{ m}^2$

GeV



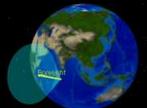
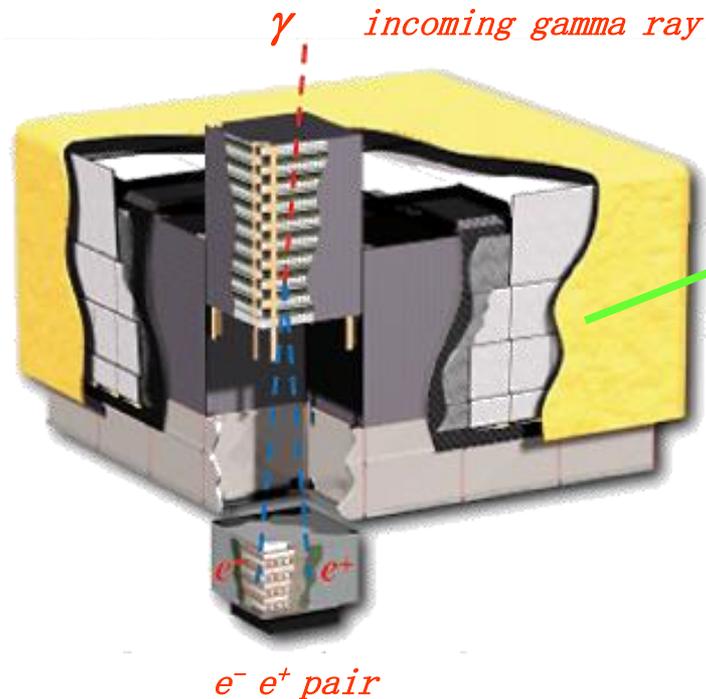
TeV



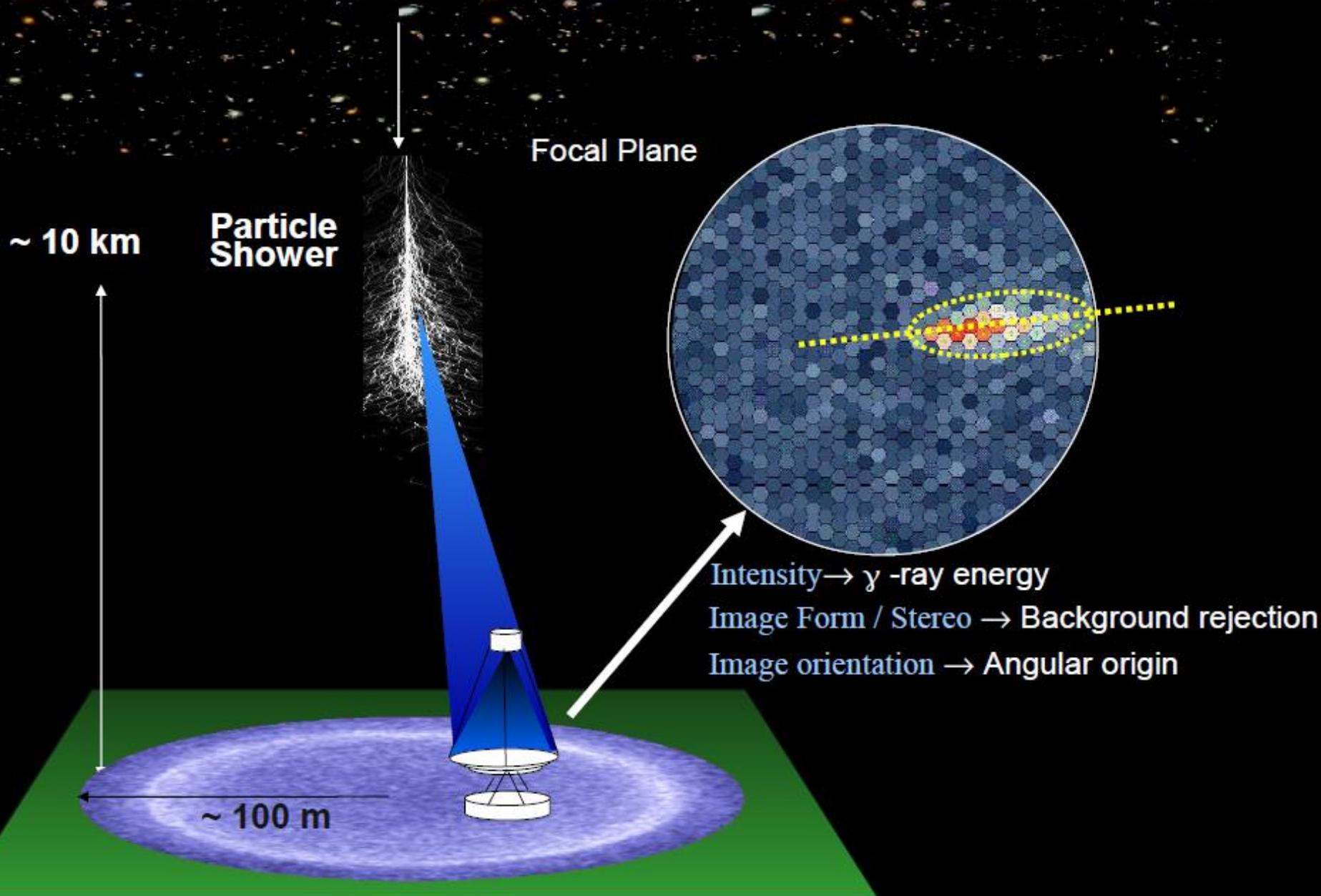


# The Large Area Telescope on board the Fermi satellite

(launch: June 11, 2008)



# Cherenkov Imaging Technique



## CTA (Cherenkov Telescope Array)



Credit: DESY/MIA Science Comm / Twitter

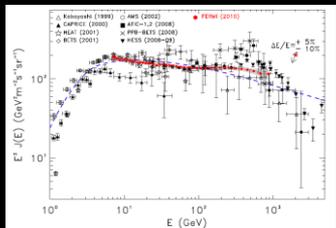
## Conclusions

---

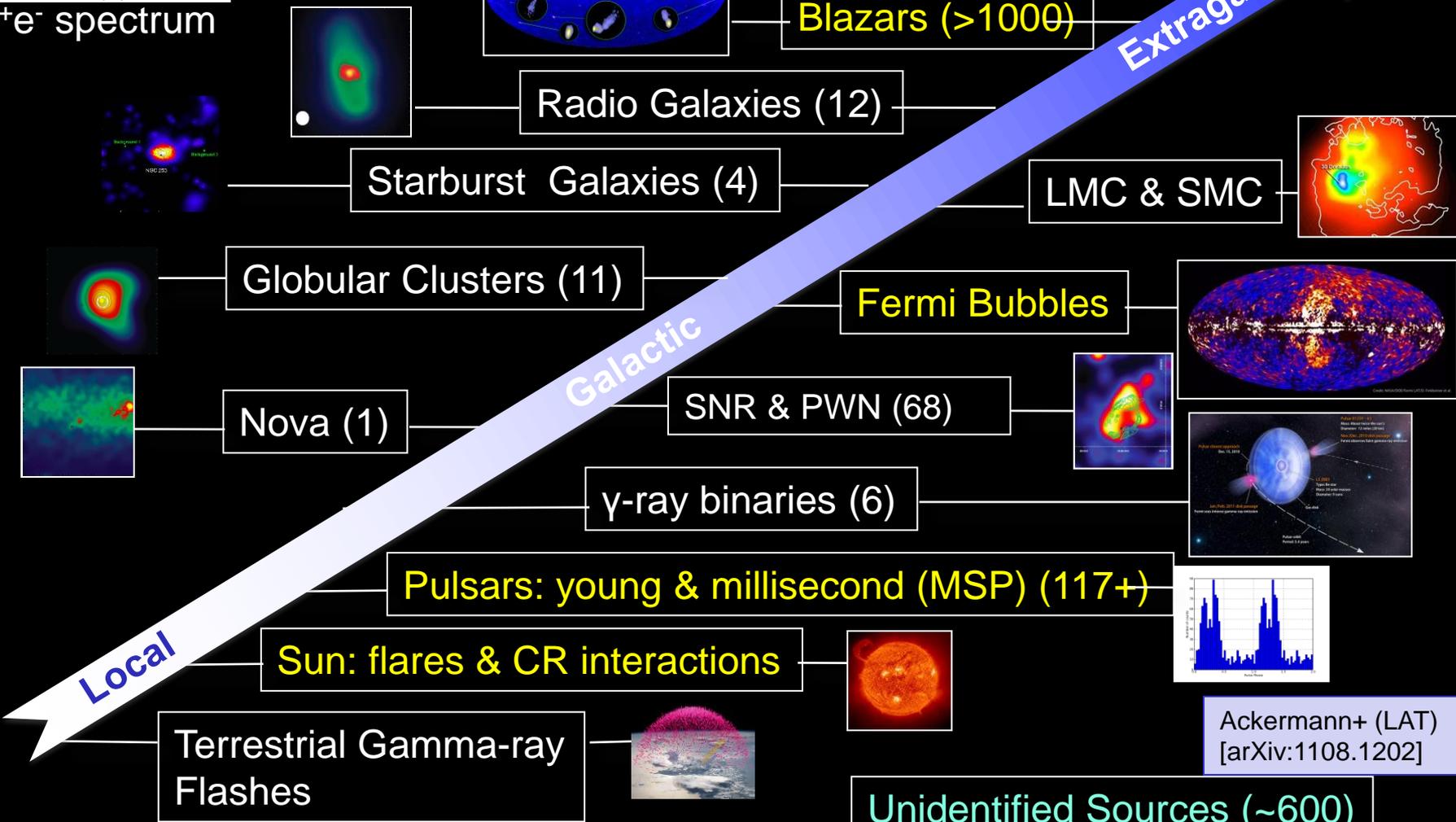
- L'Astrophysique des Hautes Energies a pour champ d'étude les accélérateurs cosmiques, dont l'existence est connue depuis la découverte des rayons cosmiques
- Les rayons gamma sont des sondes privilégiées pour les étudier mais d'autres seront disponibles dans le futur (neutrinos, ondes gravitationnelles).
- Nos connaissances sur ces accélérateurs cosmiques ont fait des progrès considérables depuis 10 ans de devraient continuer à court terme.
- Vous voulez regarder le ciel en rayons gamma par vous-même? Venez participer à l'atelier COSMAX de mercredi après-midi!

*Merci !*

# Increasing Classes of Fermi-LAT Sources



$e^+e^-$  spectrum



Ackermann+ (LAT)  
[arXiv:1108.1202]

- fraction of unassociated sources