



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

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*

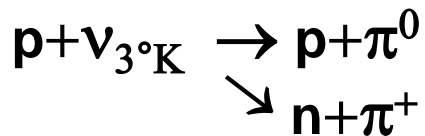
Rappels sur les Rayons Cosmiques

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: $n(\mathbf{E}) \propto \mathbf{E}^{-K}$
($K=2.71$ à basse énergie)
- 2 « structures »:

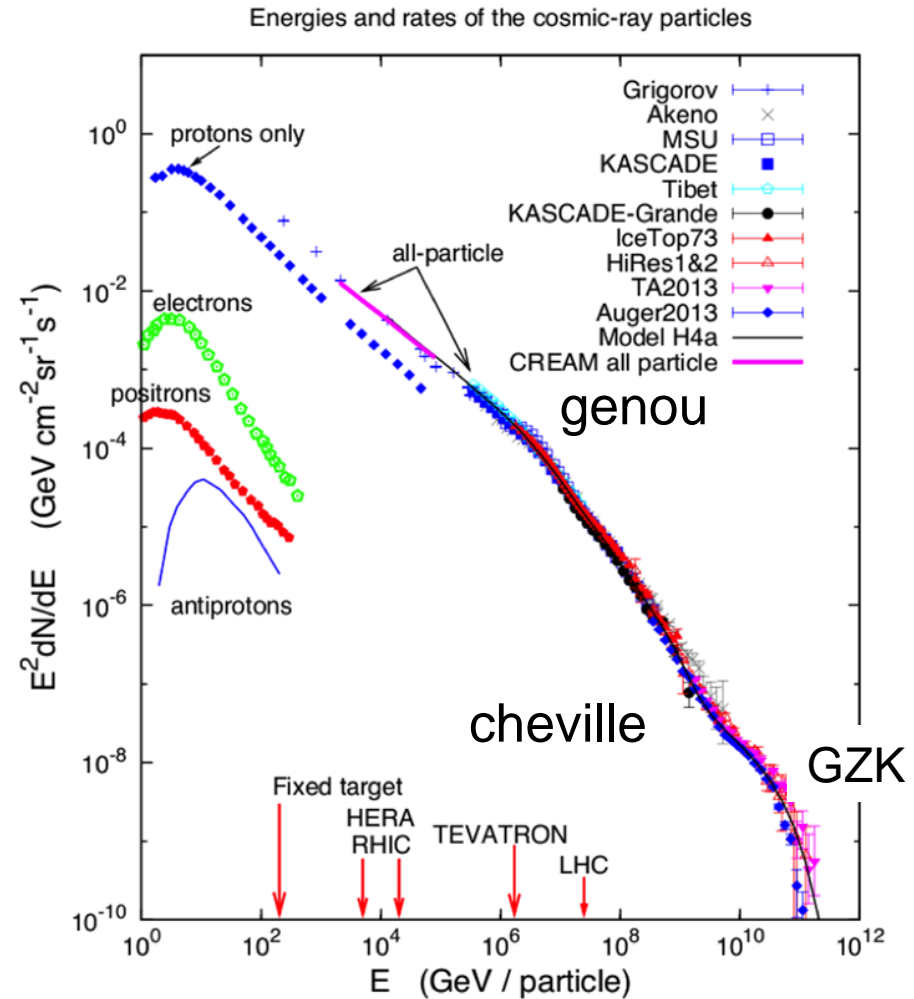
Propriétés des rayons cosmiques (2)

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



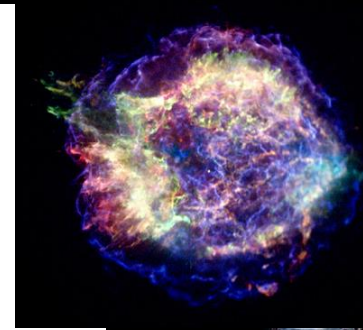
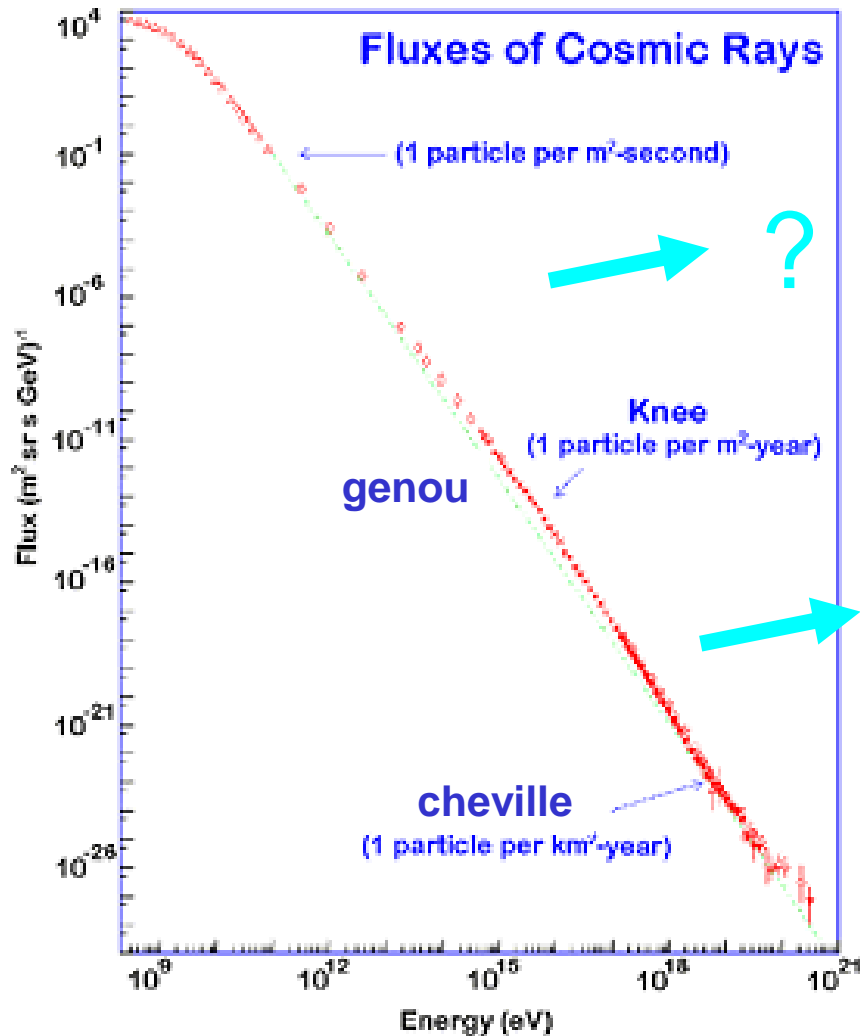
horizon ~ 50 Mpc
« directionnels »!

- 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...

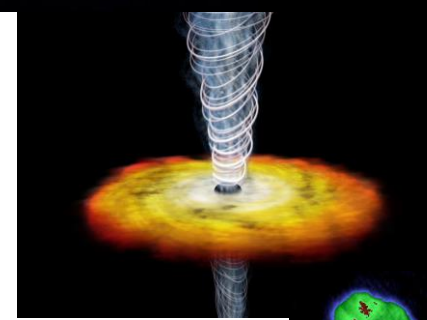


L'origine des rayons cosmiques

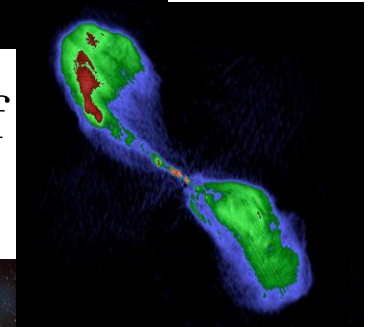
« la Grande Question »



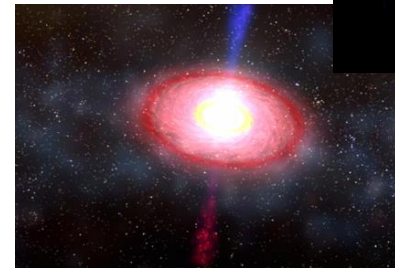
restes de
supernova



? noyaux actifs
de galaxie



sursauts
gamma



tous accélérateurs d'électrons

Fenêtres sur l'Univers de Haute Energie

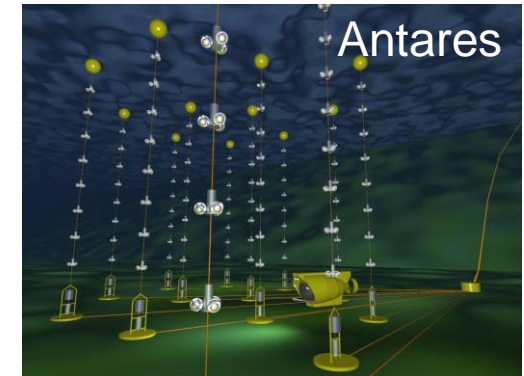
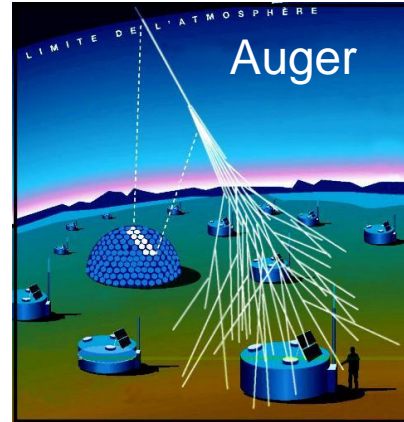
Rayons cosmiques (AMS...)

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...)

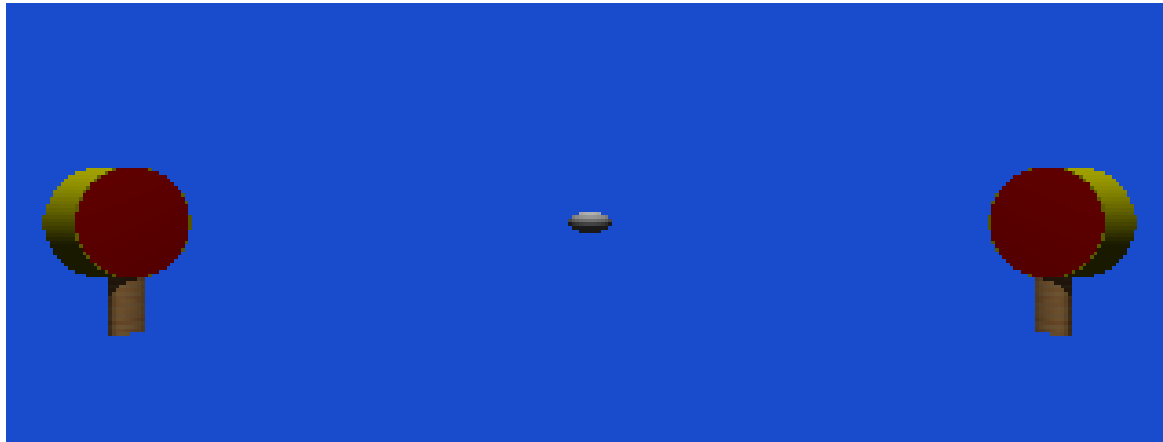


Processus d'accélération

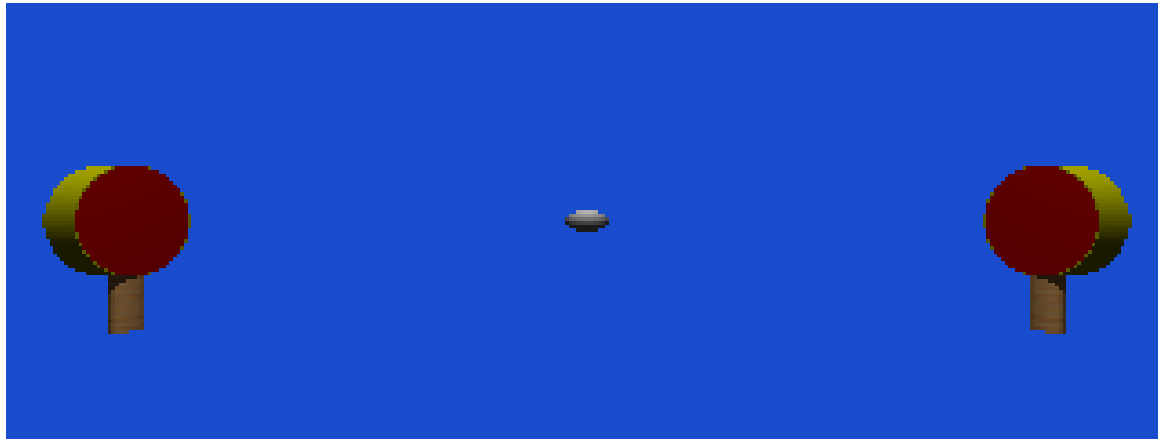
Distributions d'énergie des particules

- Lois de puissance $n(E) \propto E^{-K}$
- Rayons cosmiques $K \sim 2.71$ au niveau de la Terre, correction de ~ 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^{er} ordre

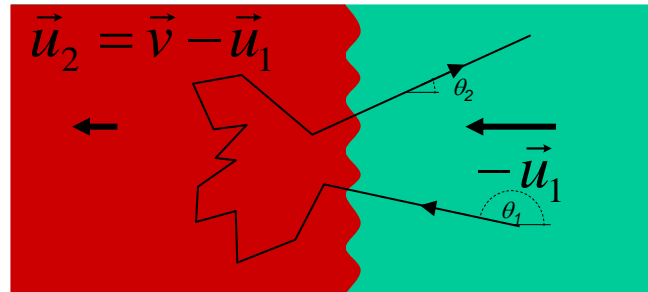
On suppose un phénomène cyclique avec $\frac{\Delta E}{E} = \xi$

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

Accélération par processus de Fermi de 1^{er} ordre

onde de choc

matériel
choqué
(« aval »)



milieu interstellaire
au repos (« amont »)

référentiel de l'observateur

Gain d'énergie!

On moyenne sur θ_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 θ_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^{er} 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



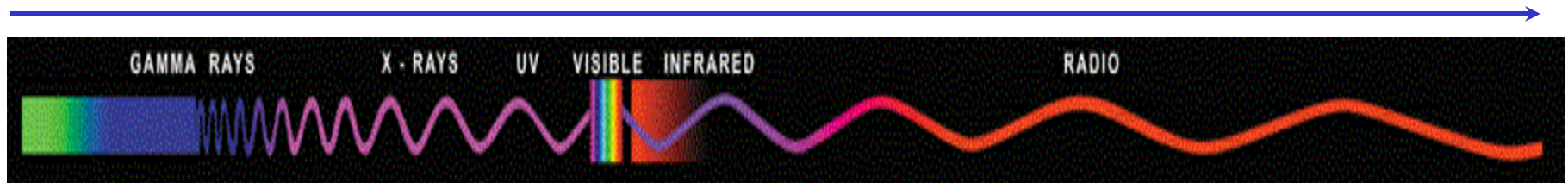
Généralités sur l'Astronomie Gamma de Haute Energie

Le spectre électromagnétique

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

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

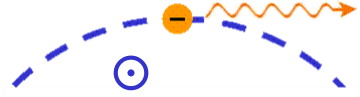
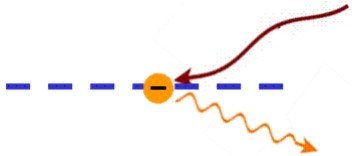
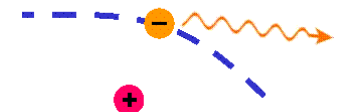
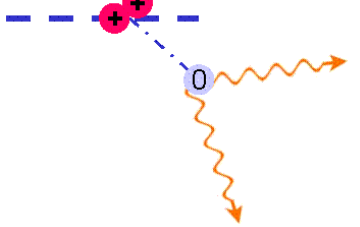
λ augmente, E et ν diminuent



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		γmc^2
matière**	production de π^0	protons		$\gamma m_{\pi^0} c^2 / 2$

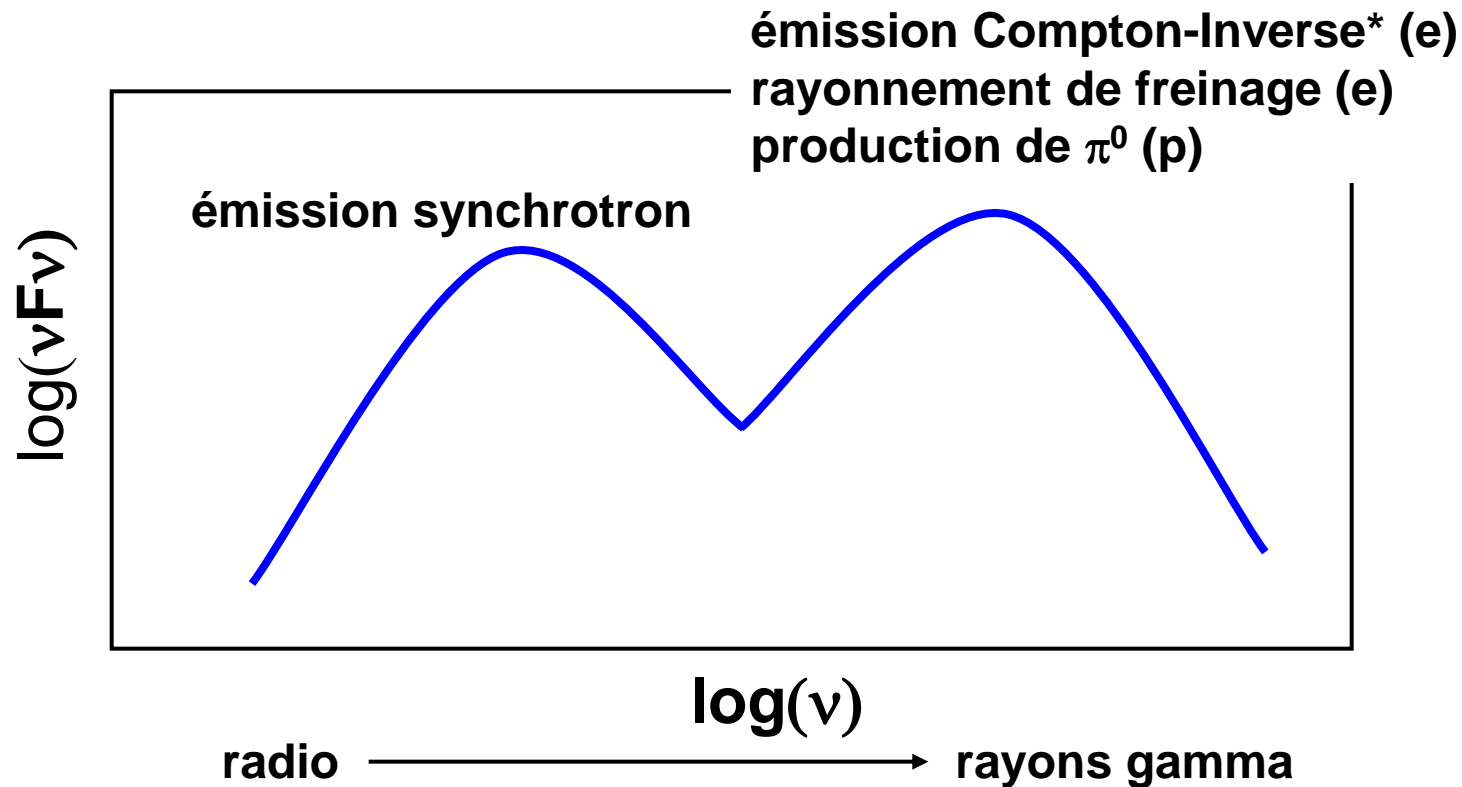
* dans le référentiel de la source

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

Distribution d'énergie des photons

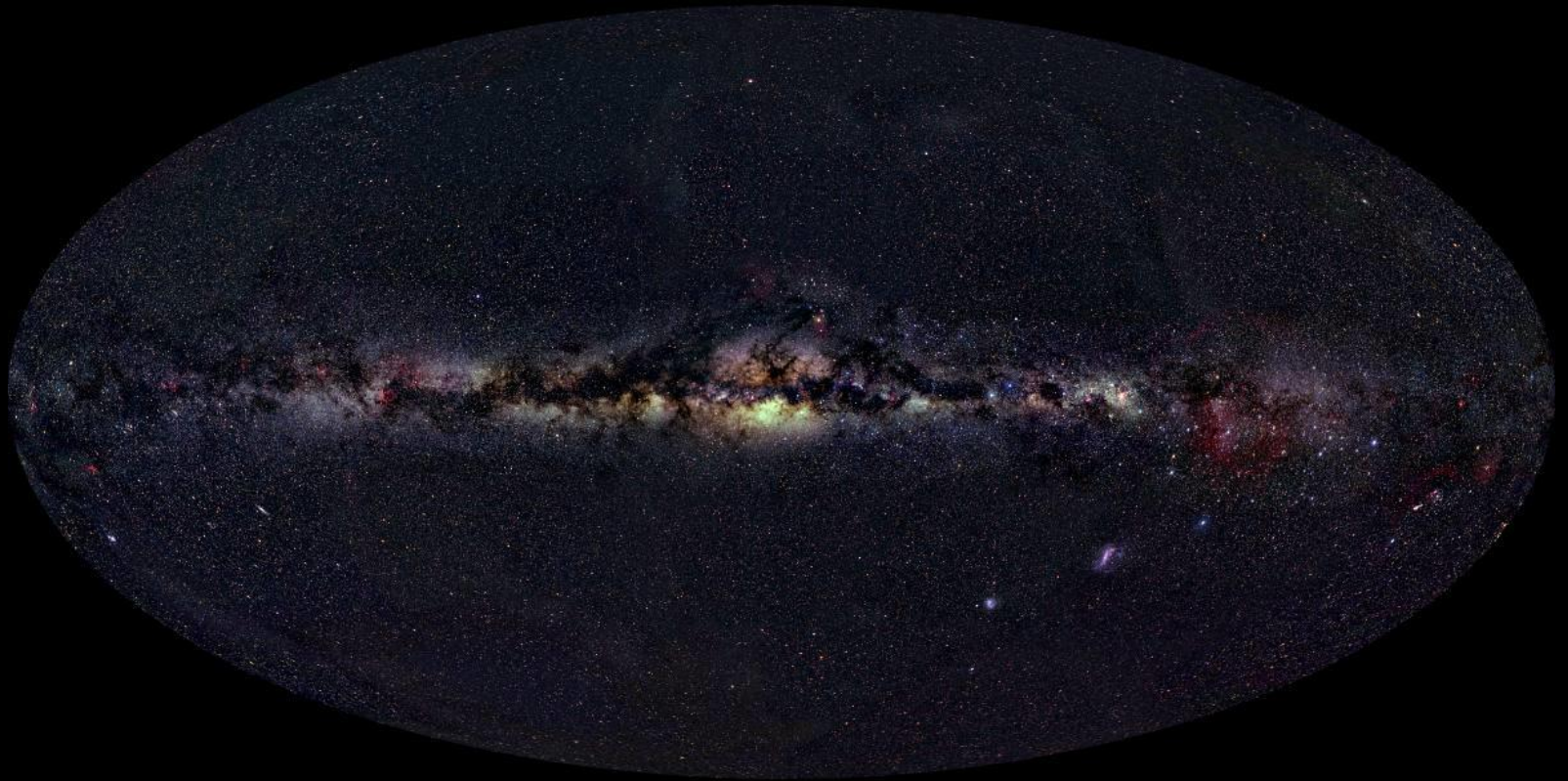
Distribution d'énergie des photons rayonnés à 2 bosses en représentation $\nu F(\nu) \propto E^2 N(E)$
puissance par unité de surface et unité d'intervalle logarithmique de fréquence.

Photons rares: 5 ph m⁻² min⁻¹ [E>100 MeV] pour Vela

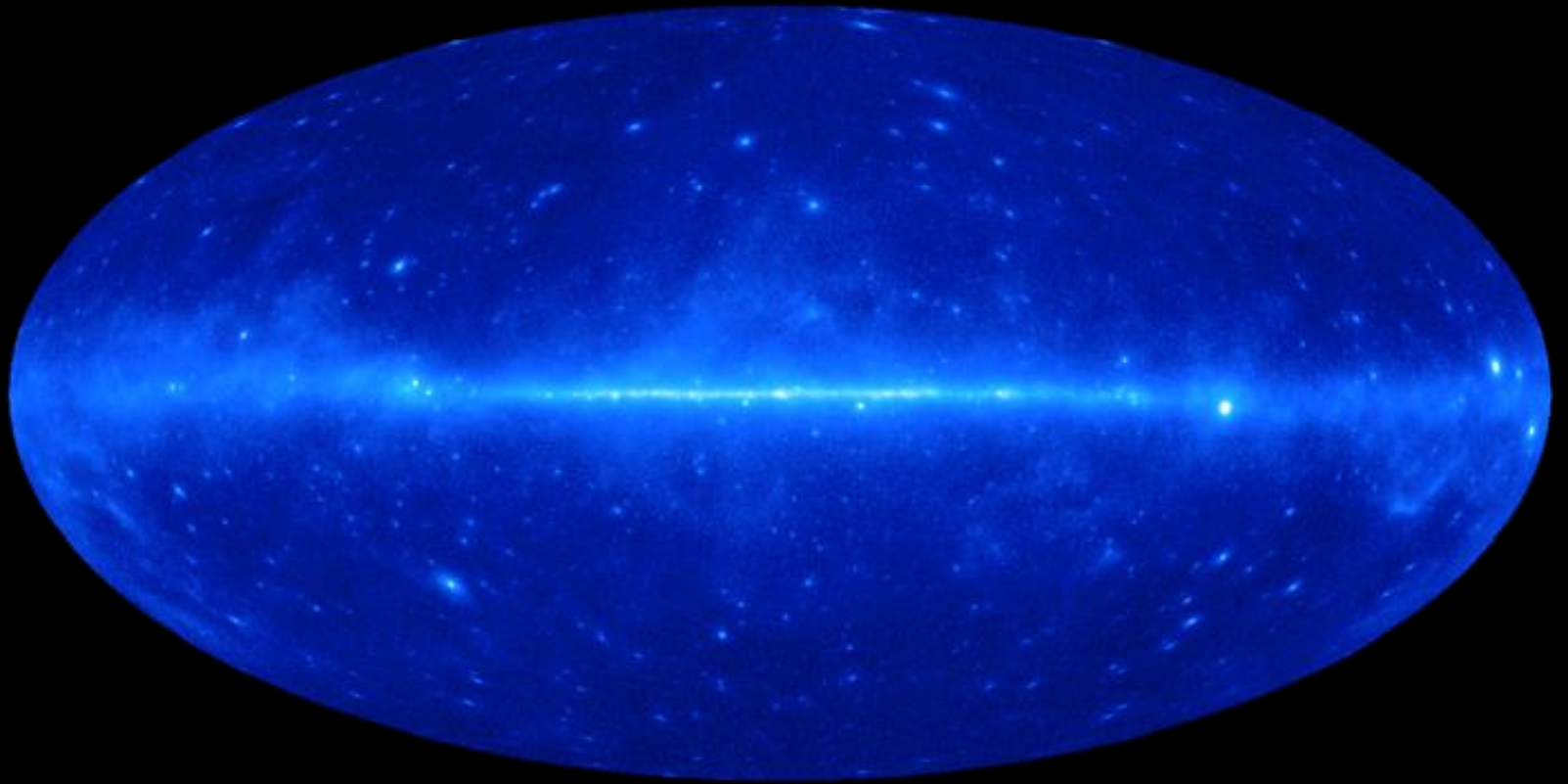


*Photons cibles: rayonnement synchrotron ou rayonnement externe

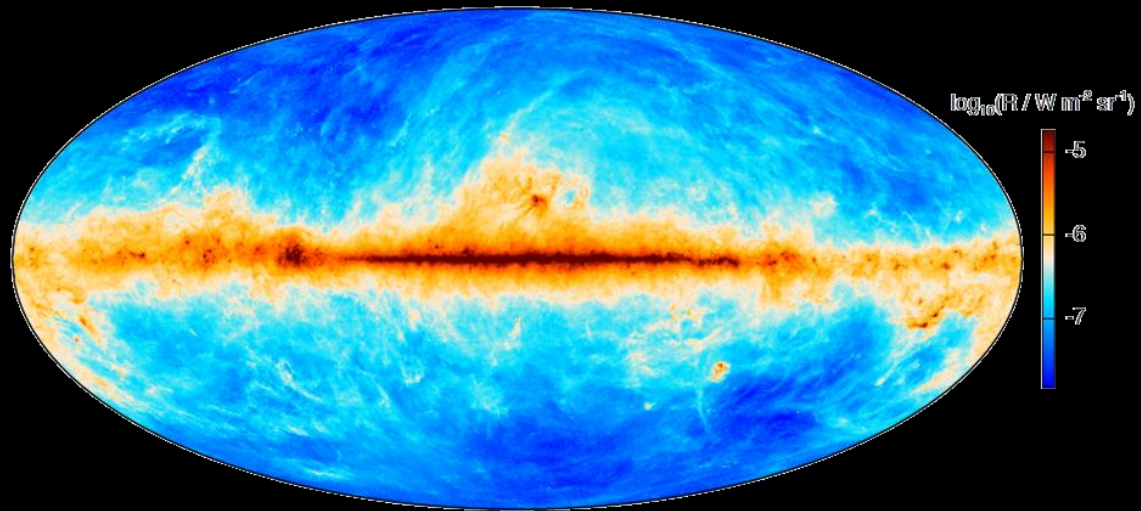
Visible



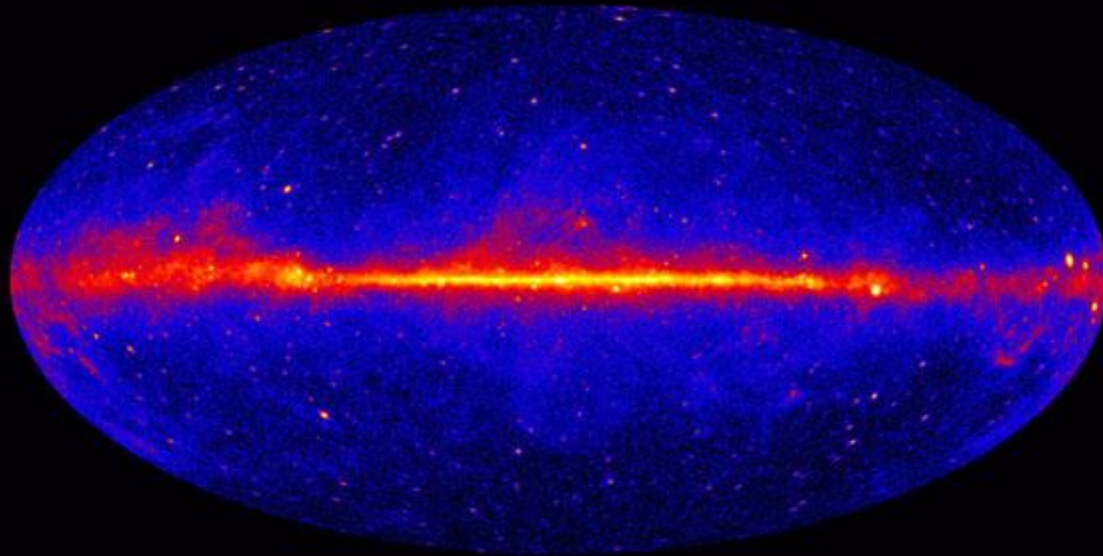
Rayons gamma $E > 100$ MeV



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

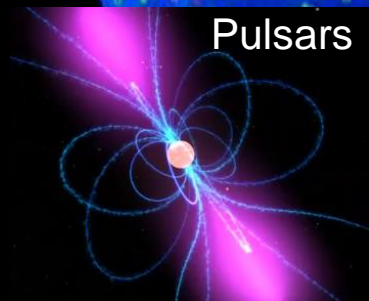
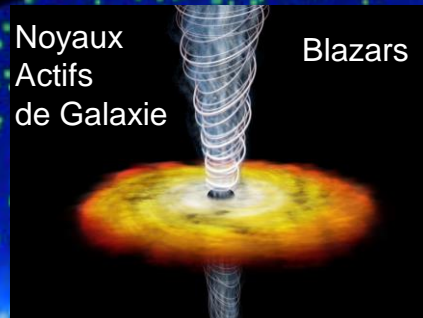
× Galaxy

* Starburst Galaxy

□ AGN-Non Blazar

◇ Radio Galaxy

+ Seyfert Galaxy



○ Unassociated

◆ PSR w/PWN

□ SNR

□ Possible Association with SNR and PWN

◇ Globular Cluster

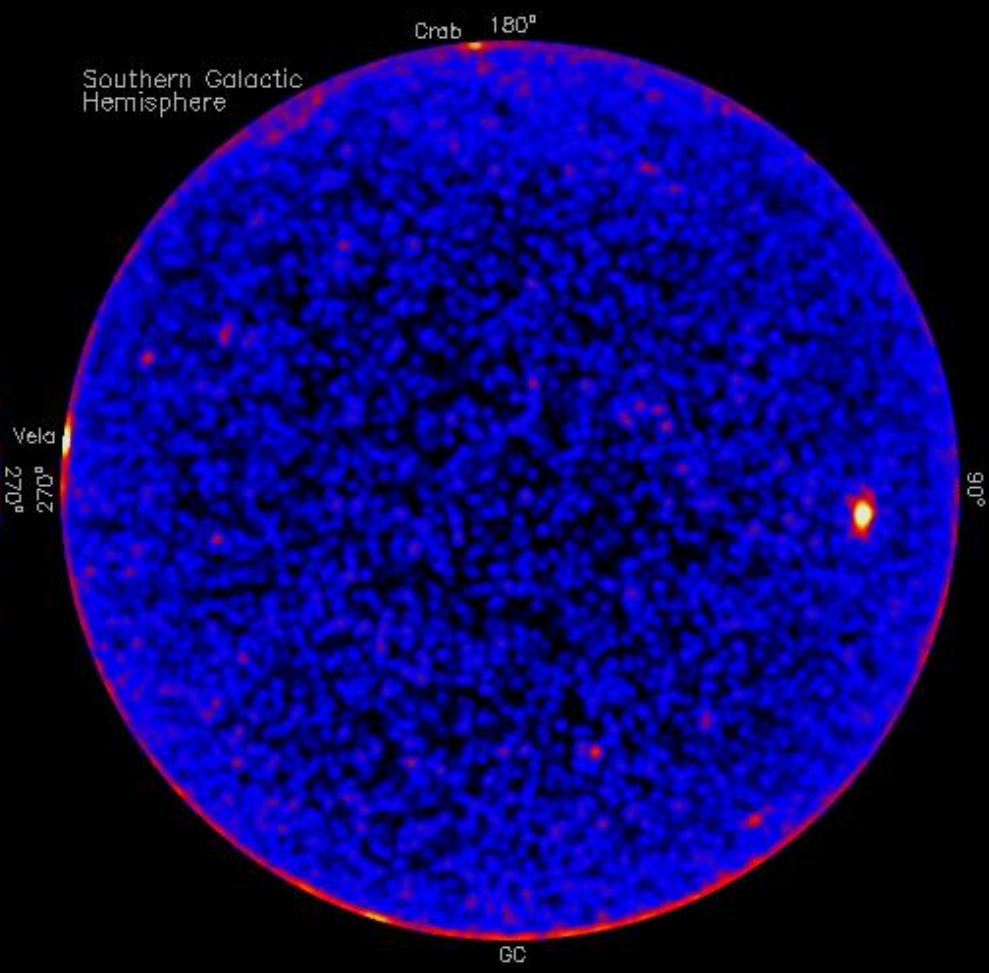
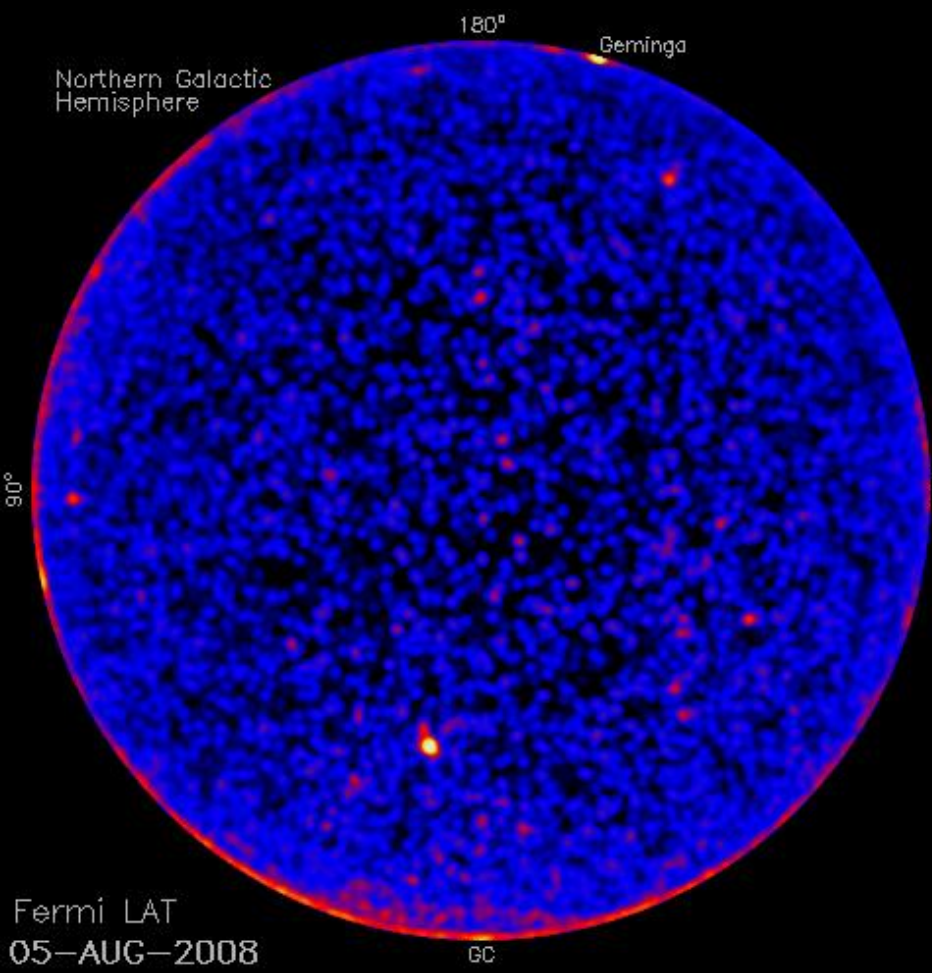
+ HMB

1873 sources with $TS > 25$

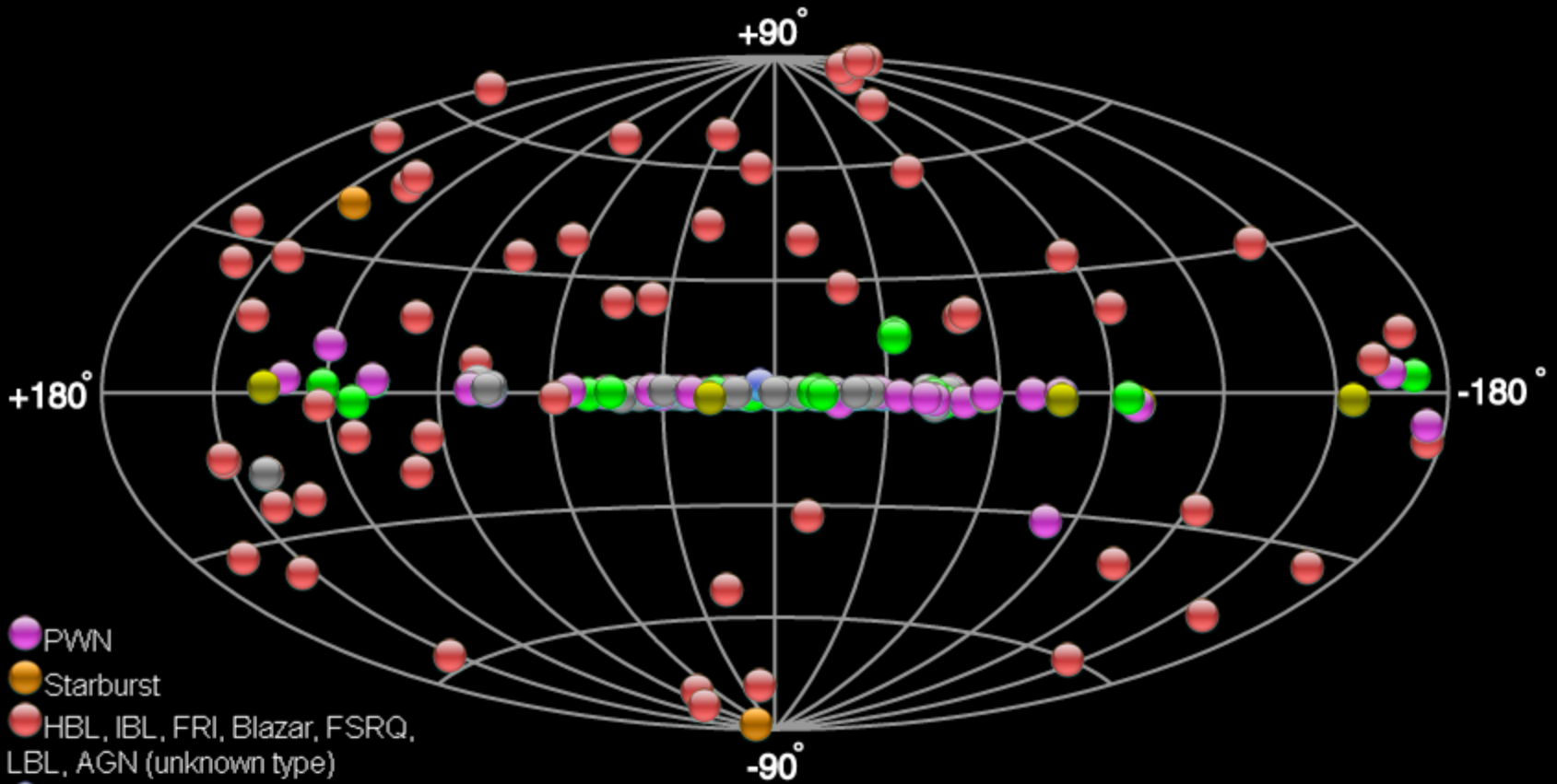
Credit: Fermi Large Area Telescope Collaboration

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

Publication de 2012 la plus citée en Astrophysique



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

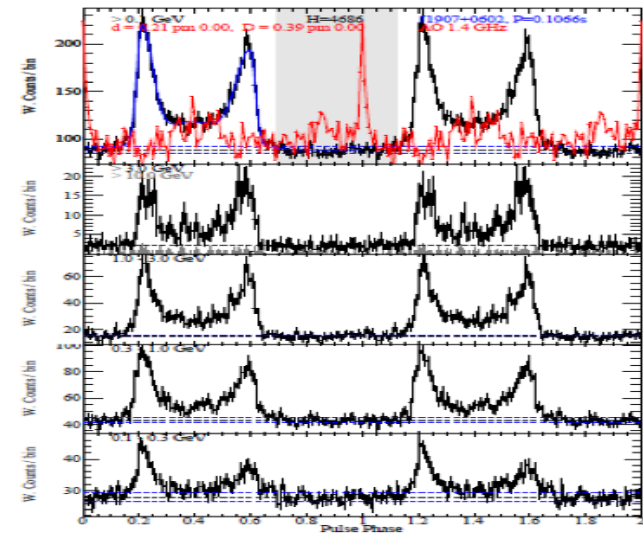
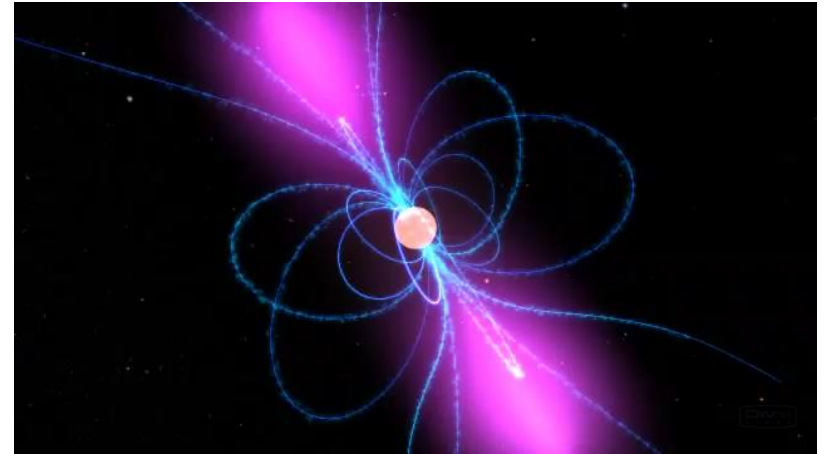
Sources Galactiques

Pulsars (1)

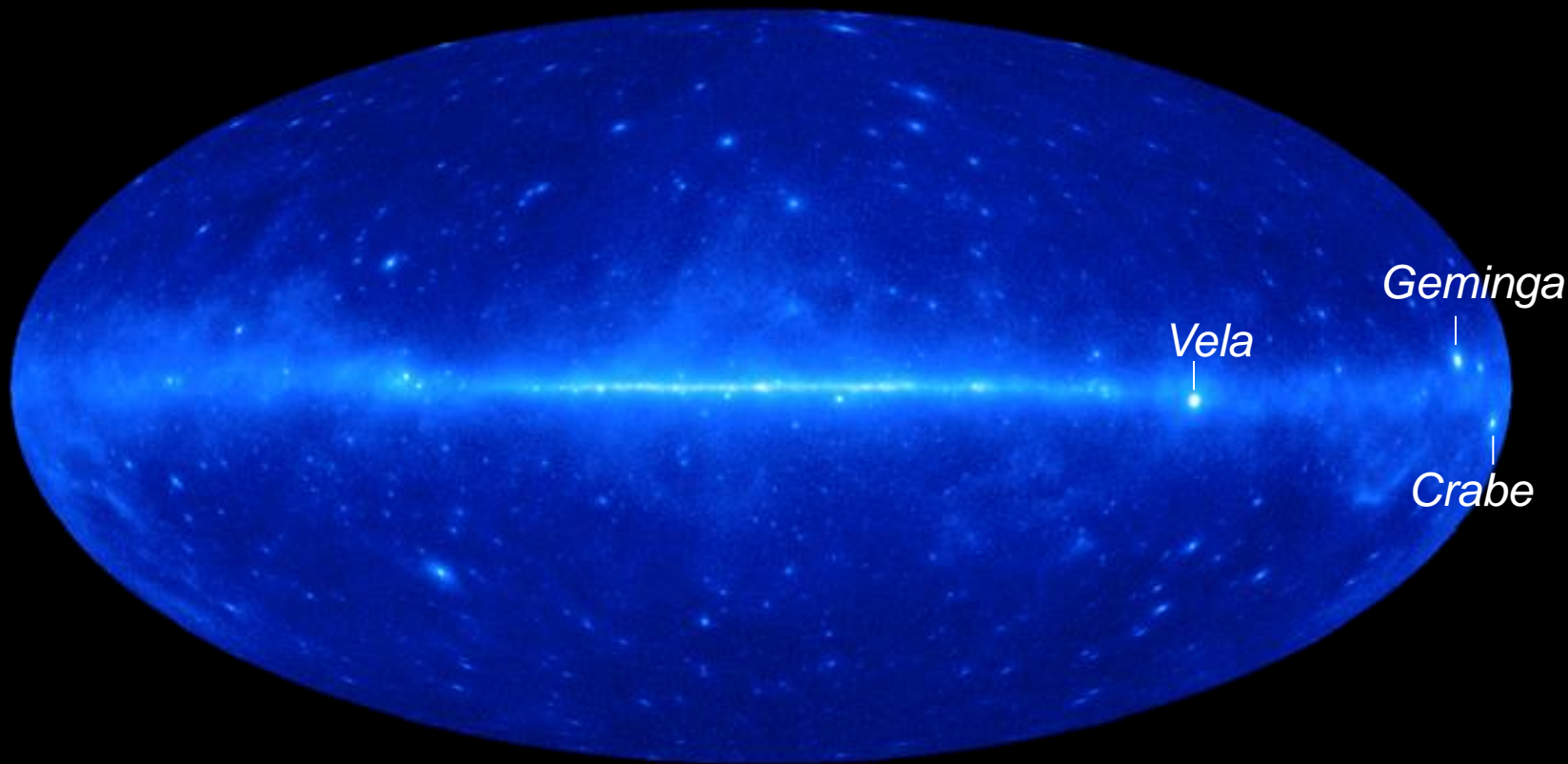
“Pulsating star” (1967, Bell & Hewish)
 étoile à neutrons en rotation
 coeur effondré d’une supernova
 pression de neutrons dégénérés

- $M \sim M_{\odot}$
- $R \sim 10 \text{ km}$
- $\rho \sim 10^{15}$
- $B \sim 10^{12} \text{ G}$
- Ω jusqu’à 30 tours/s

>2000 connus en radio,
 ~ 150 détectés par Fermi
 3 sources les plus brillantes du ciel:
 Vela, Geminga et le Crabe



Rayons gamma $E > 100$ MeV

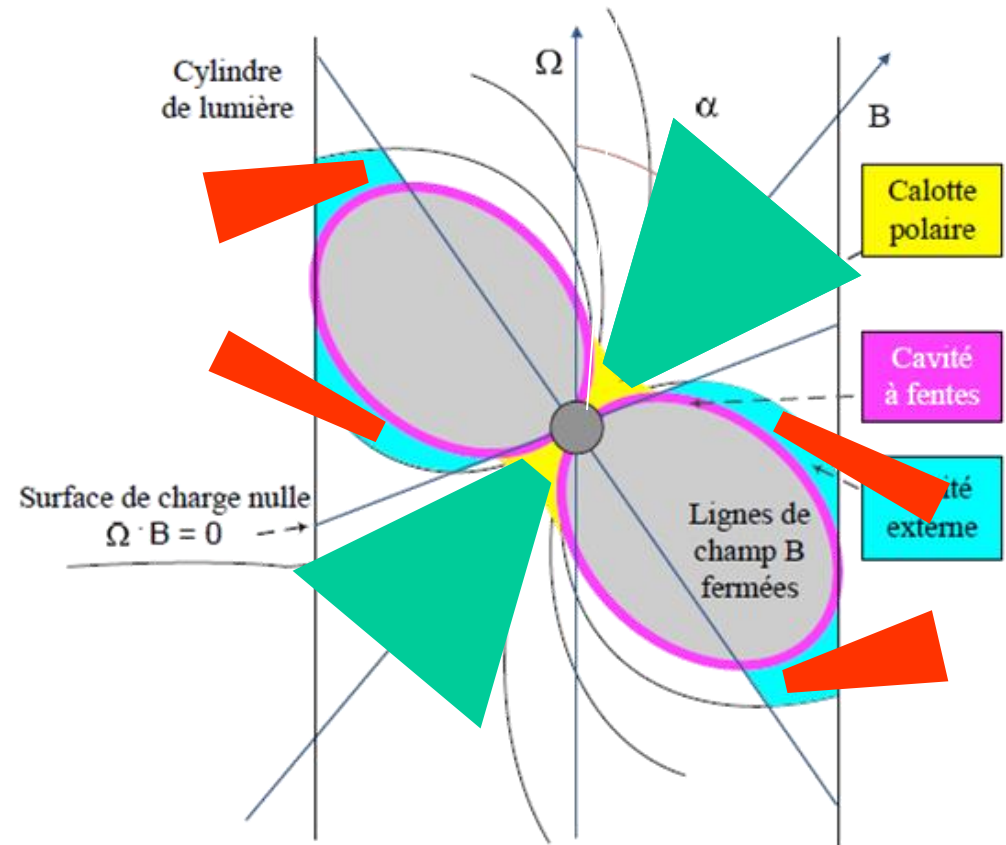


Pulsars (2)

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

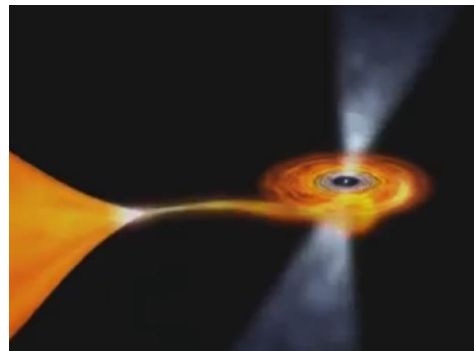
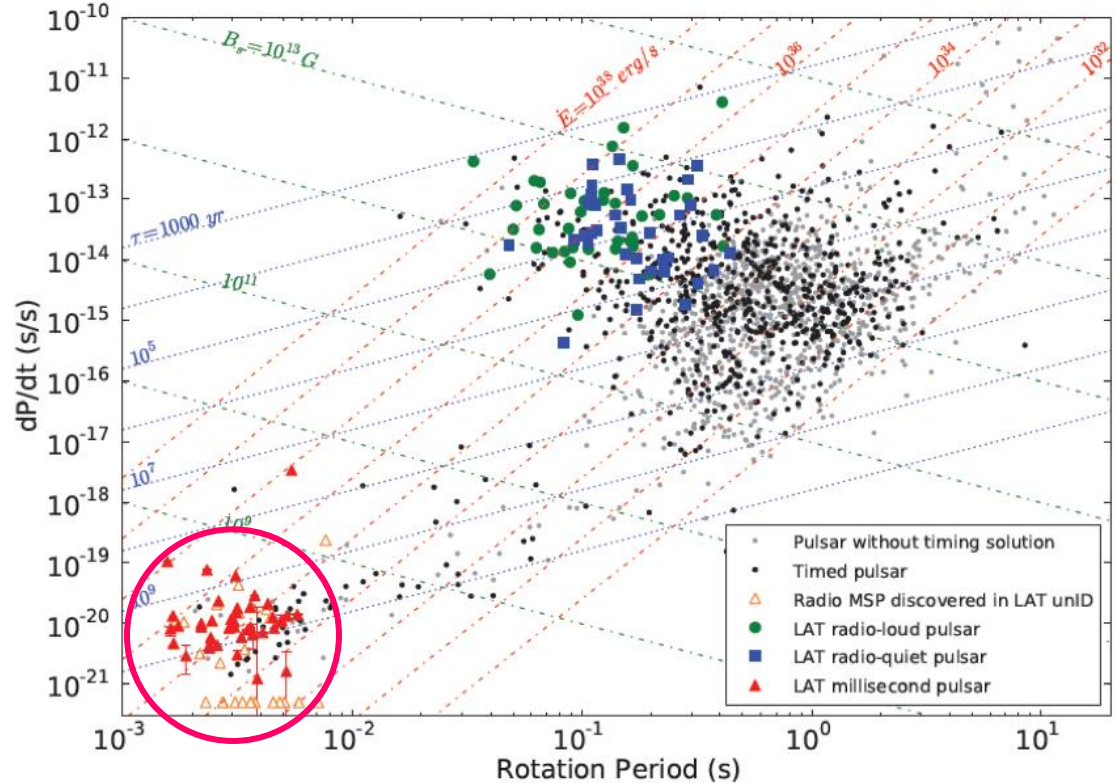
$$\dot{E} = -I\Omega\dot{\Omega}$$

Age:

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

Brillants en radio:
Éphémérides radio

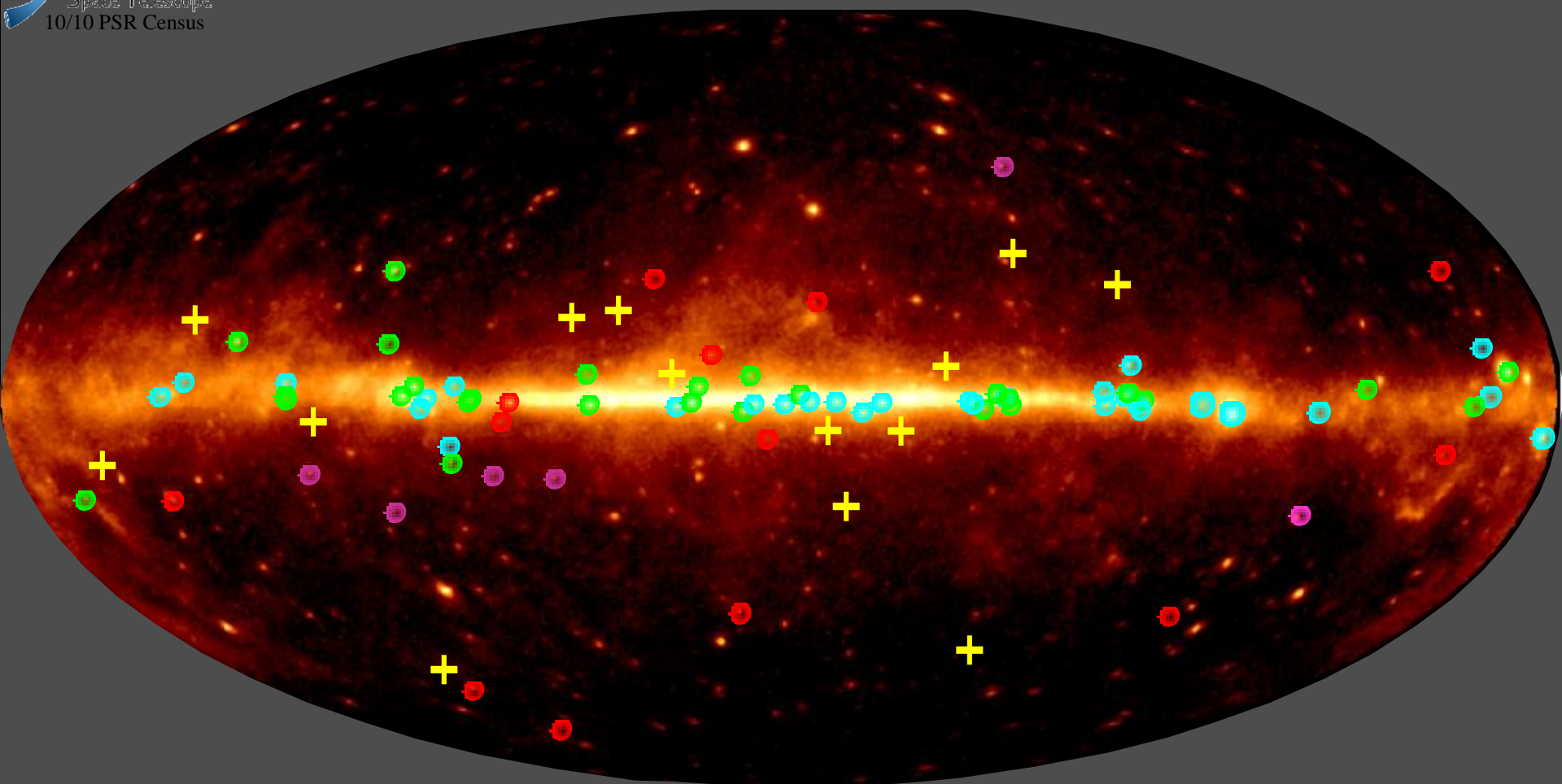
Faibles en radio:
Périodicité établis
grâce aux rayons gamma
seuls



Pulsar milliseconde
« veuve noire »

The LAT Pulsar Sky

Pulses at 1/10th
Real Rate



30 Young Radio-selected

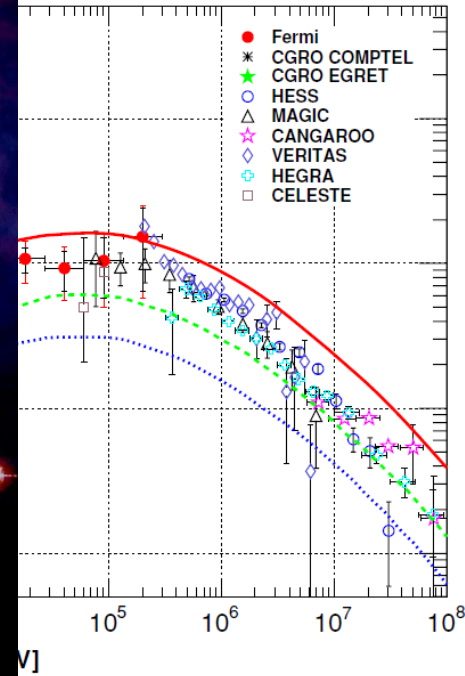
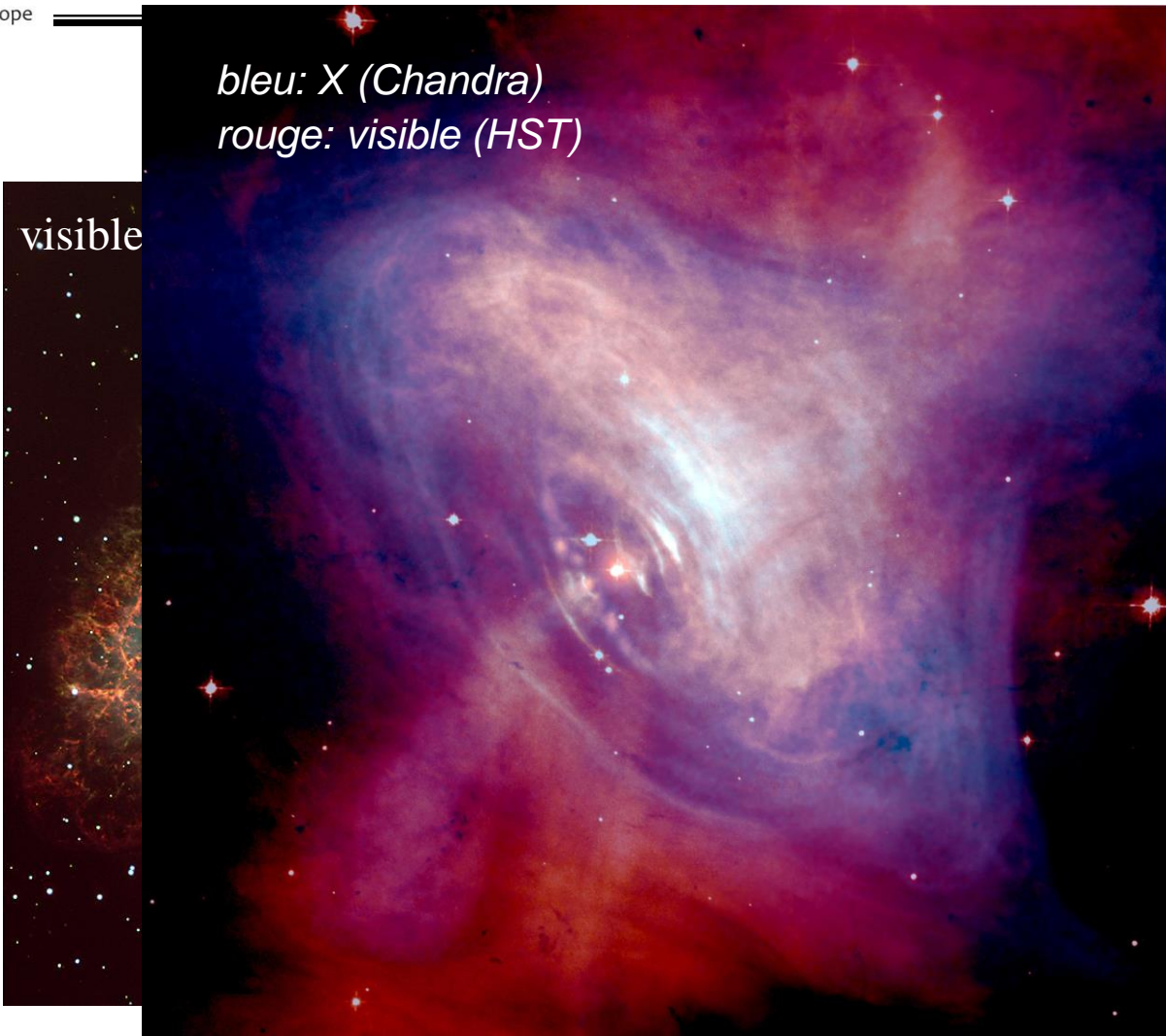
13 MSP Radio-selected

25 Young γ -selected

6 γ -sel MSP γ /R pulse

14 γ -sel MSP R pulse

La nébuleuse du Crabe (nébuleuse à vent de pulsar)

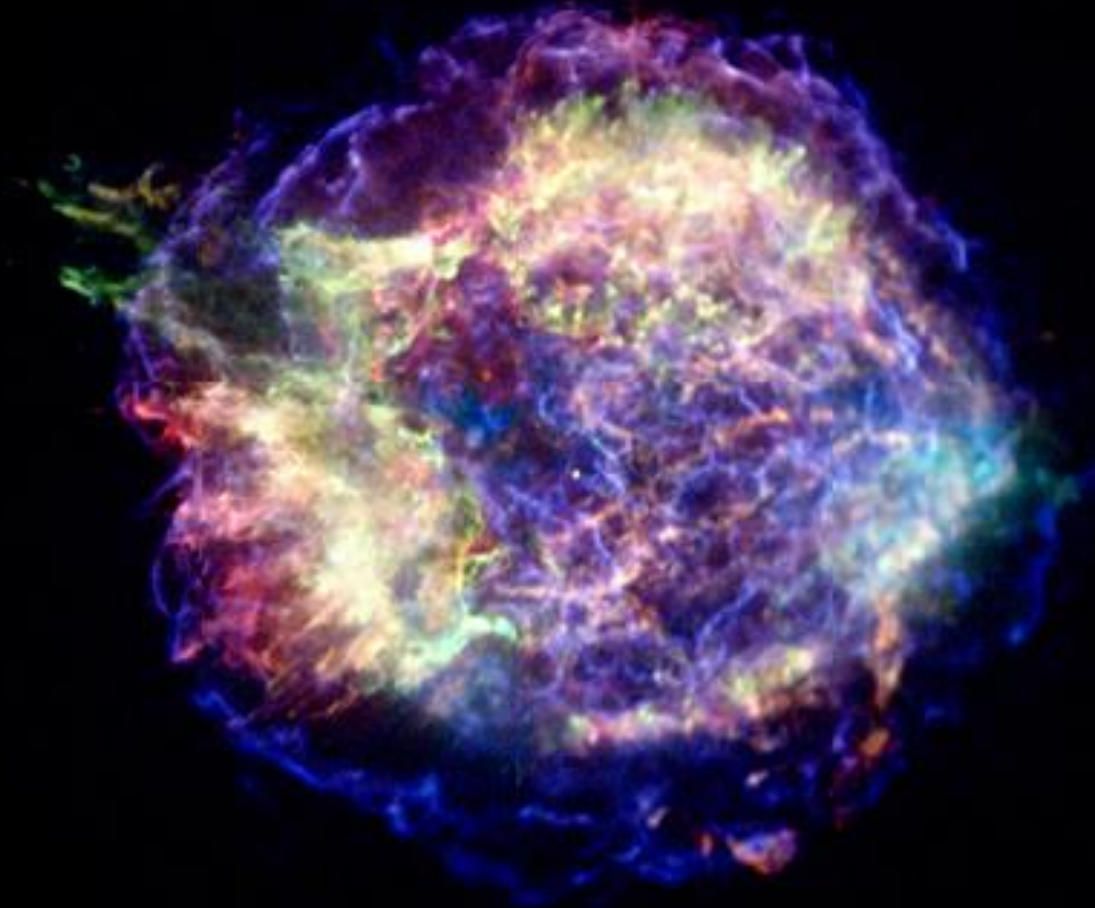


synchrotron, IR
CMB
Pevatron à électrons

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

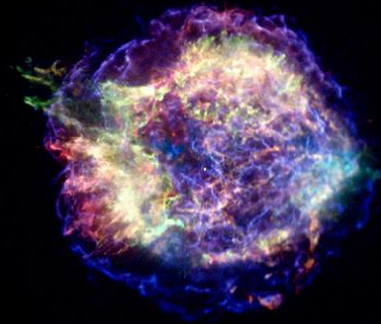
Emission de la nébuleuse variable!

Restes de supernova « en coquille »



Cassiopeia A (Chandra)

Restes de supernova « en coquille »

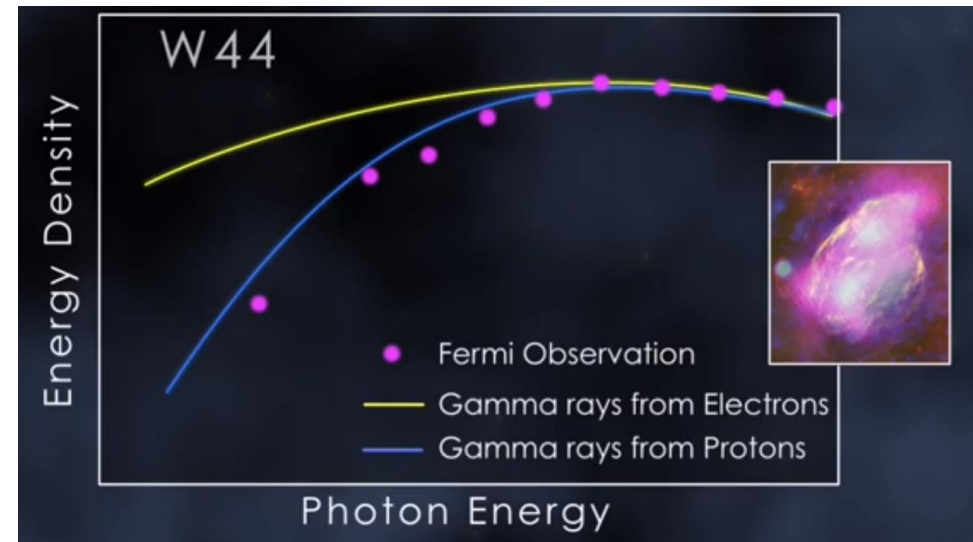
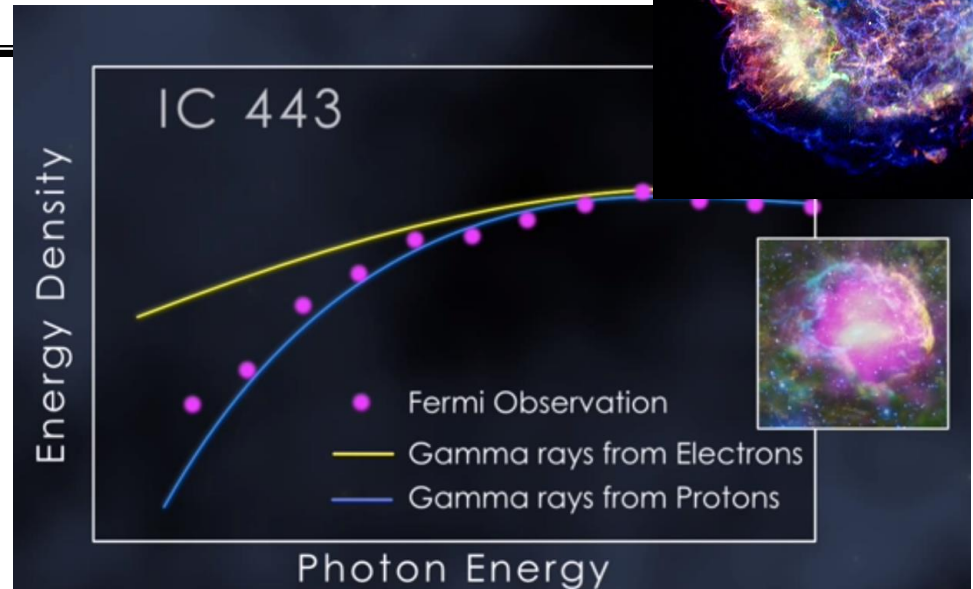


Vestiges anciens en interaction avec des nuages moléculaires: Matière « dense »: noyaux cibles pour interactions nucléaires (protons) ou rayonnement de freinage (électrons)

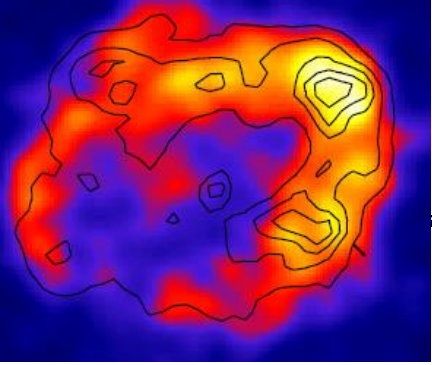
Émetteurs en rayons gamma → accélérateurs cosmiques mais d'électrons ou de protons?

Spectres gamma de Fermi → protons!

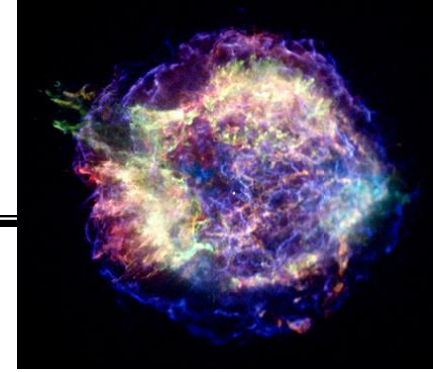
Sites confirmés d'accélération de rayons cosmiques Galactiques



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



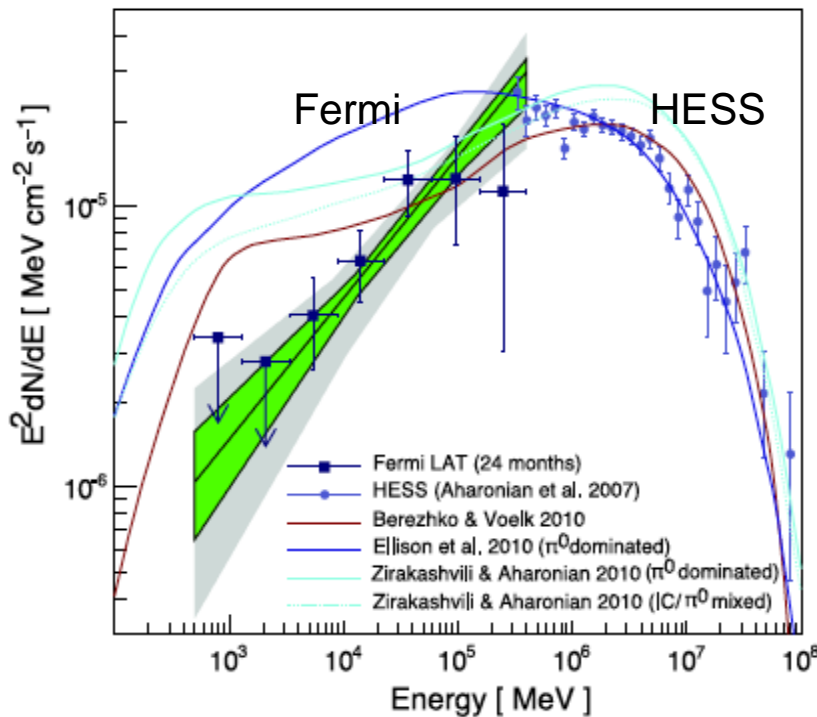
Restes de supernova « en coquille »



RX J1713.7-3946

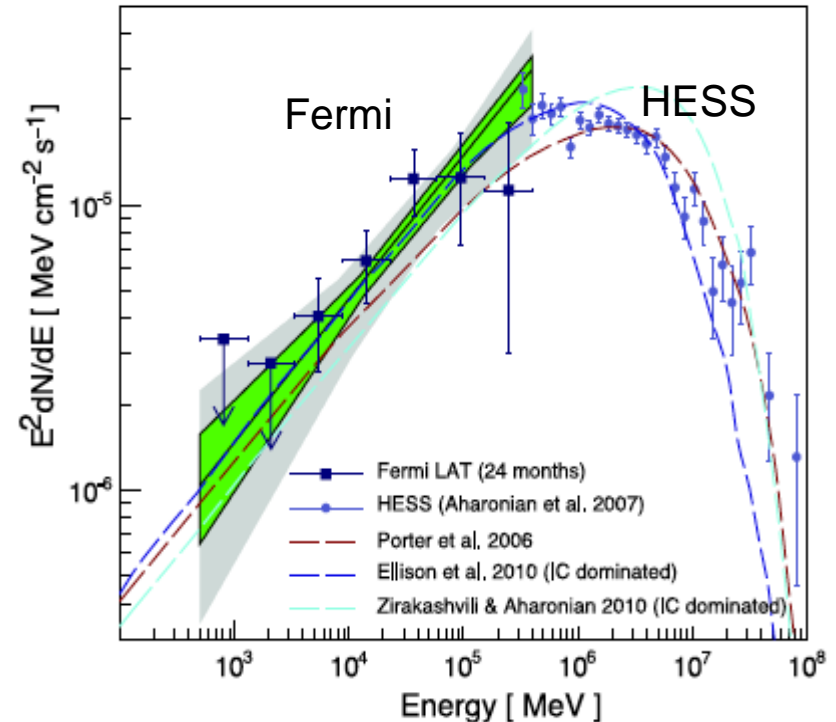
Scénario hadronique:

Interaction proton - proton



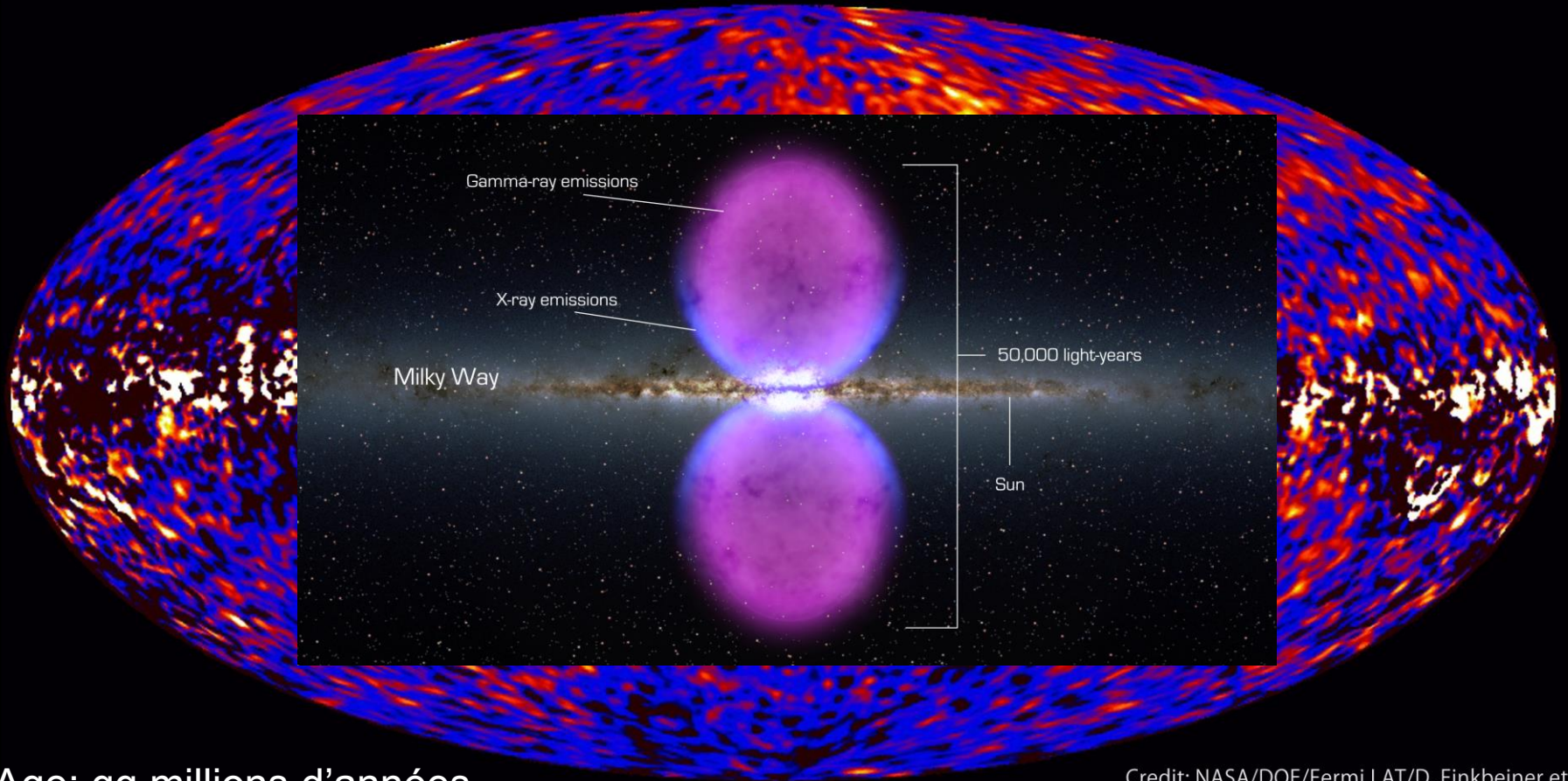
Scénario leptonique:

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?

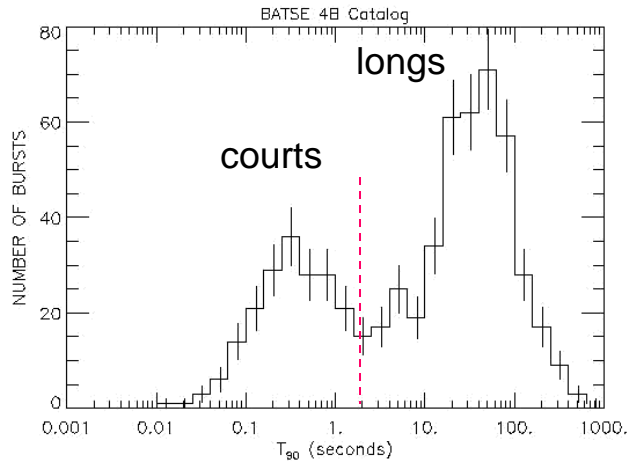
Episode intense de formation d'étoiles?

Fusion d'un trou noir secondaire?

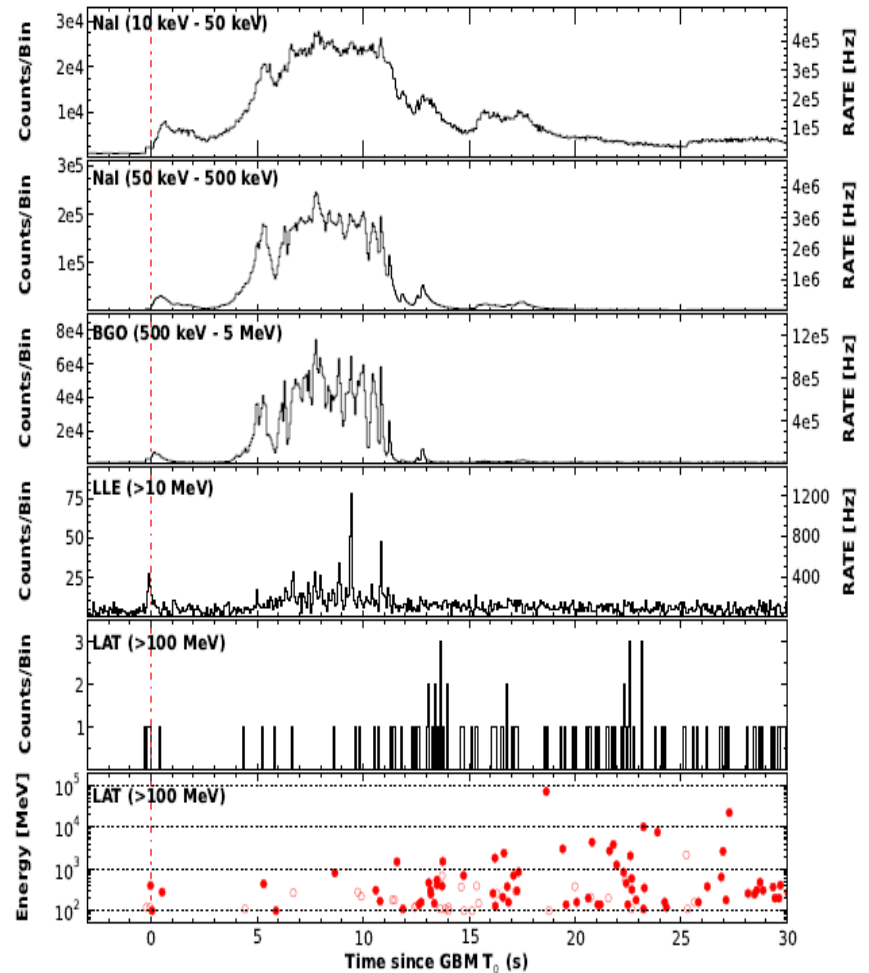
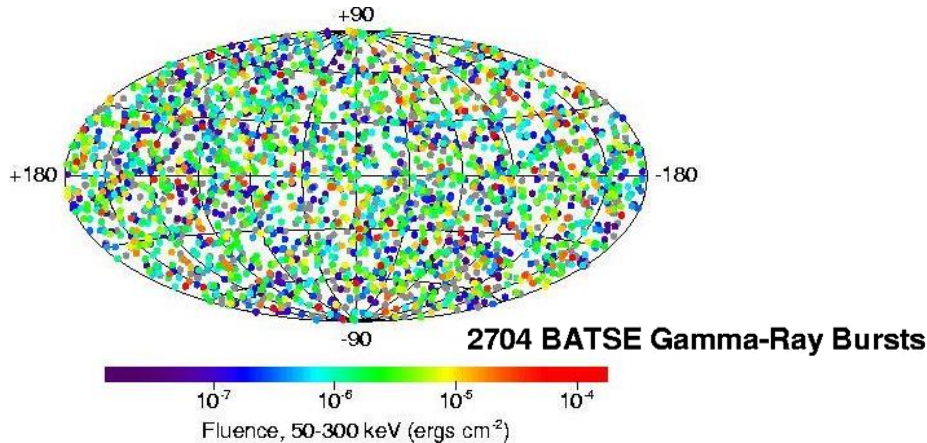
Credit: NASA/DOE/Fermi LAT/D. Finkbeiner et al.

Sources Extragalactiques

Sursauts gamma (1)

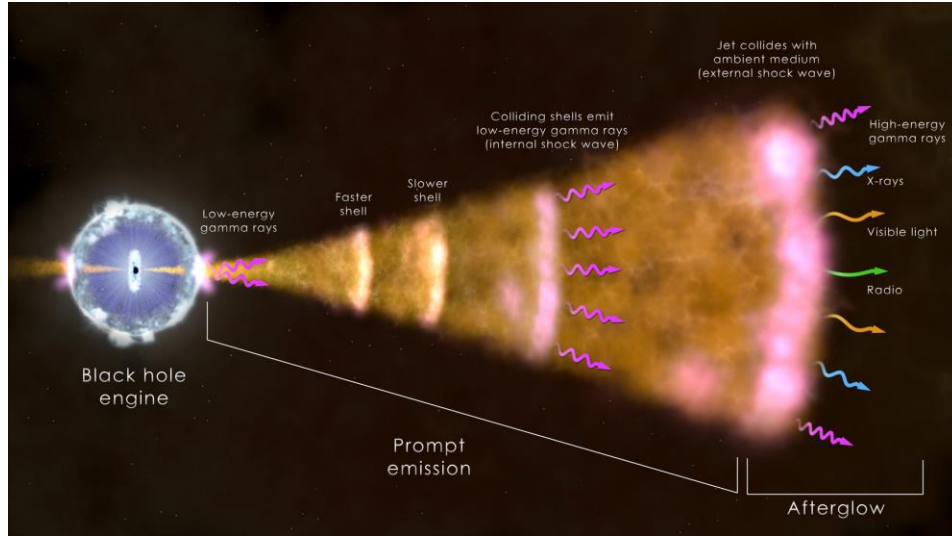


Découverts en 1967, « révélés » en 1973
 'prompt': 100 ms-100 s (sous structure ms)
 'rémanence': quelques jours
 20% avec $z > 5$, $z_{\text{max}} = 8.3$
 Explosions les plus puissantes connues
 $E_{\text{iso}} = 10^{53} - 10^{55}$ erg s $^{-1}$ ($1 M_{\odot} = 2 \times 10^{54}$ erg)



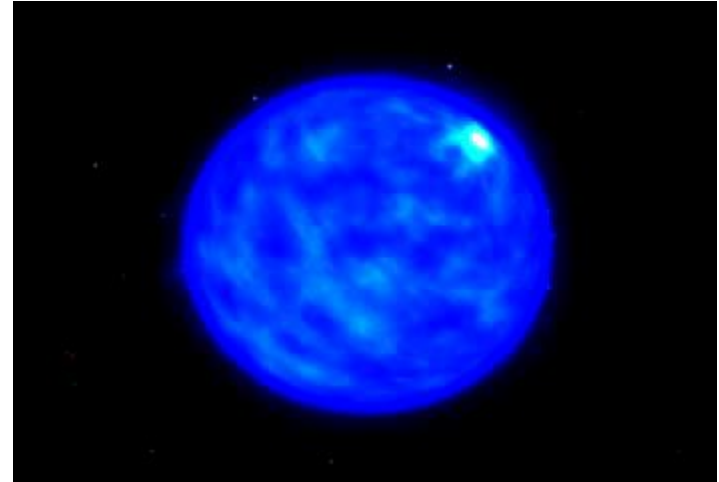
extinction de l'Ordovicien-Silurien?

Sursauts gamma (2)



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

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

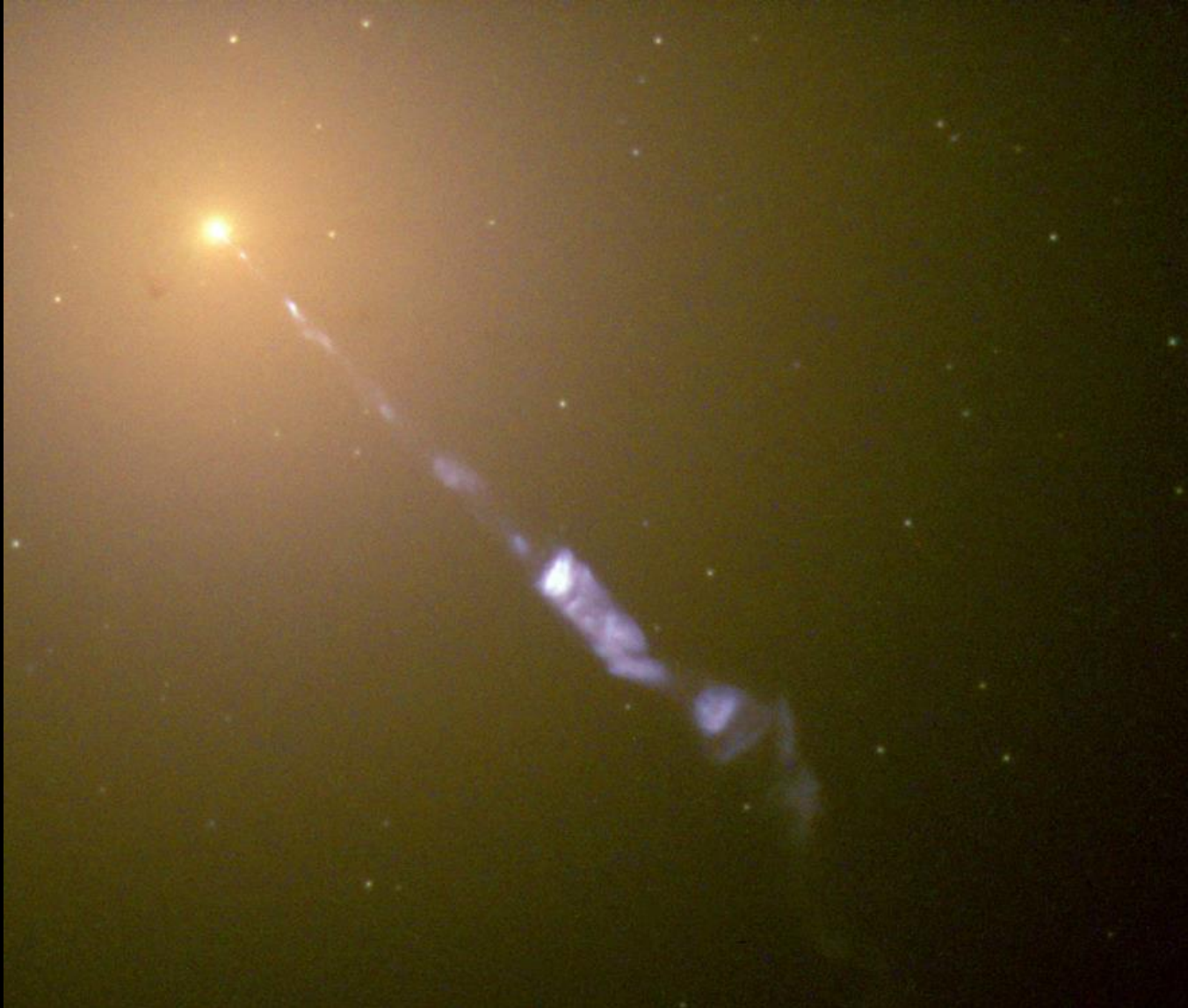


courts: coalescence d'objets compacts



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



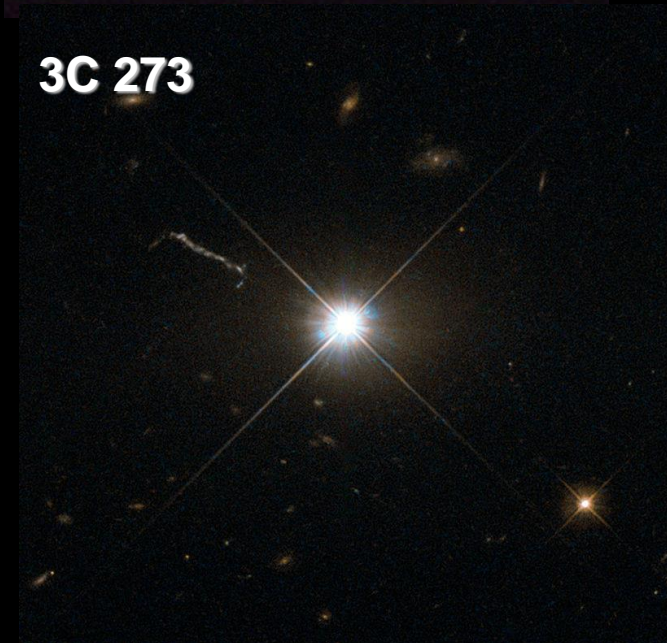
Quasars (quasi-stellar radio source)

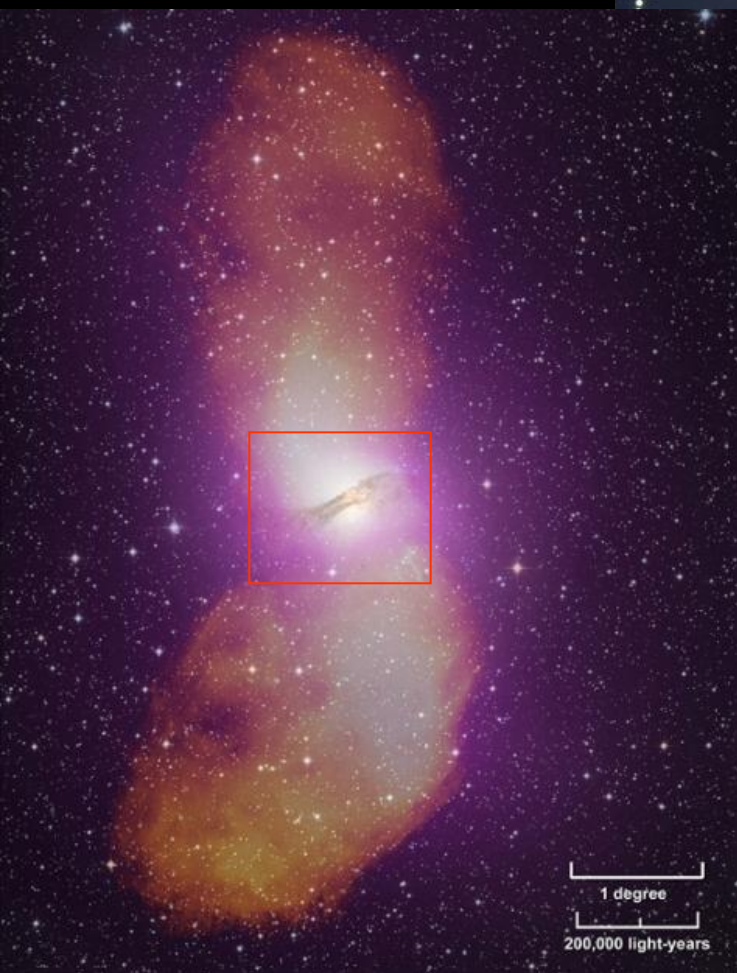
Propriétés similaires aux Seyfert

mais plus lumineux

Galaxies hôtes elliptiques

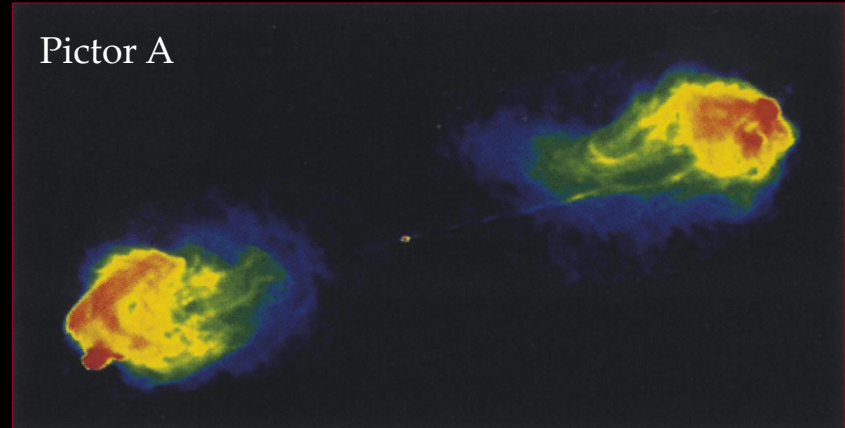
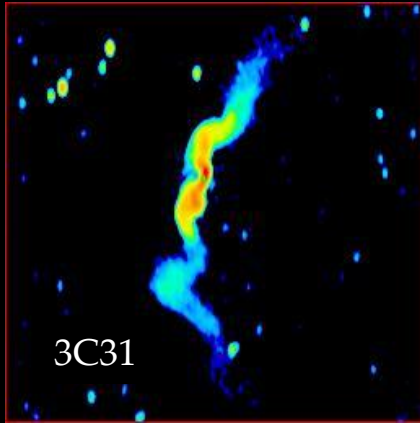
3C 273





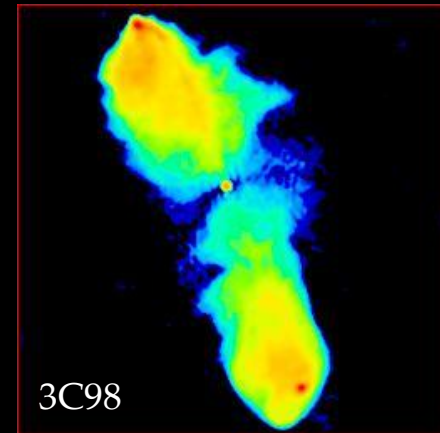
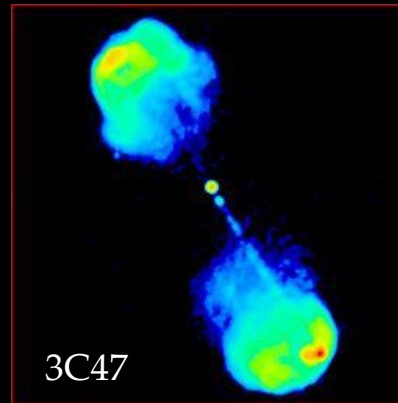
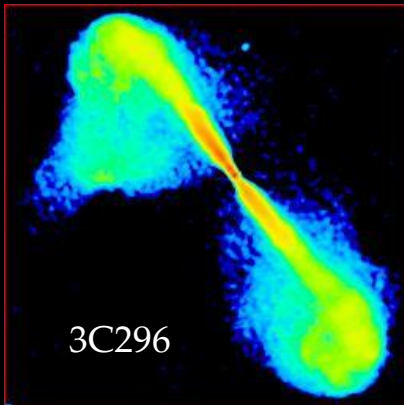
Centaurus A Radio Galaxy (VLT KUEYEN + FORS2)

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

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

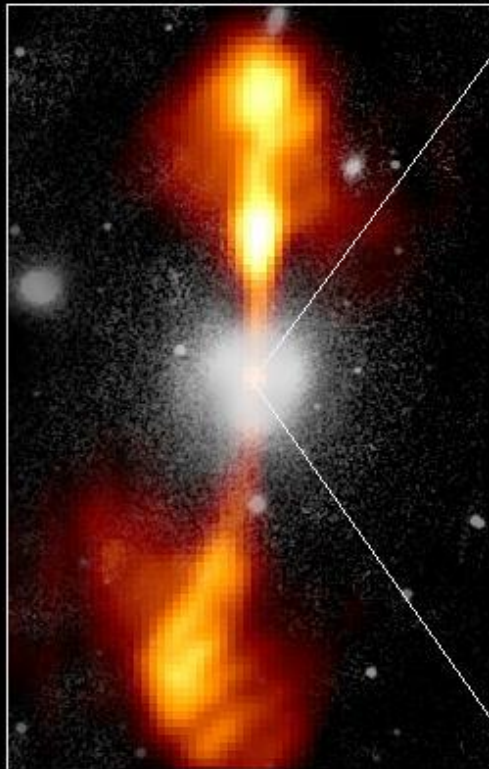


Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

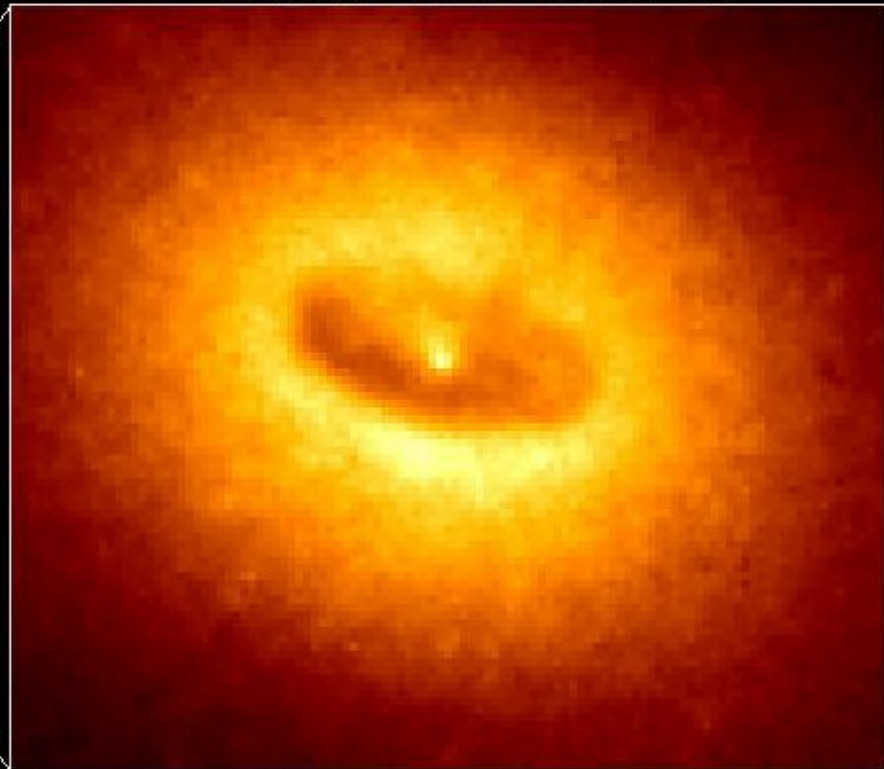
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

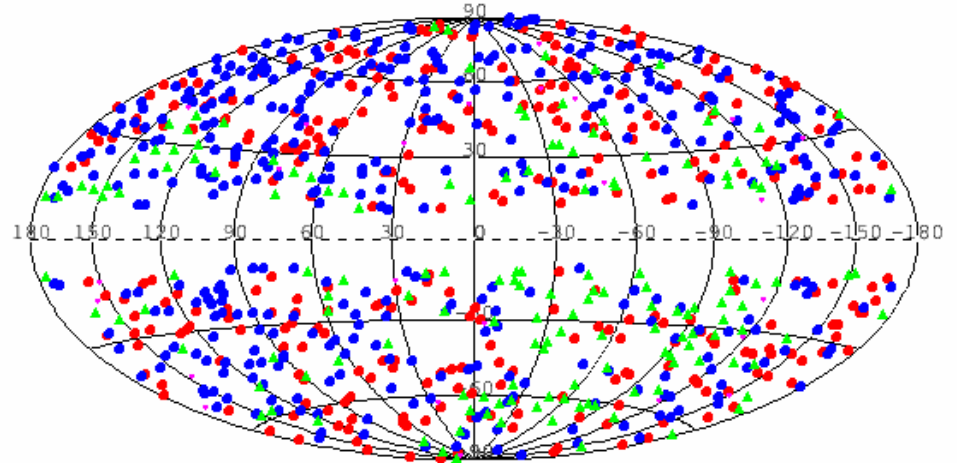
HST Image of a Gas and Dust Disk



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)

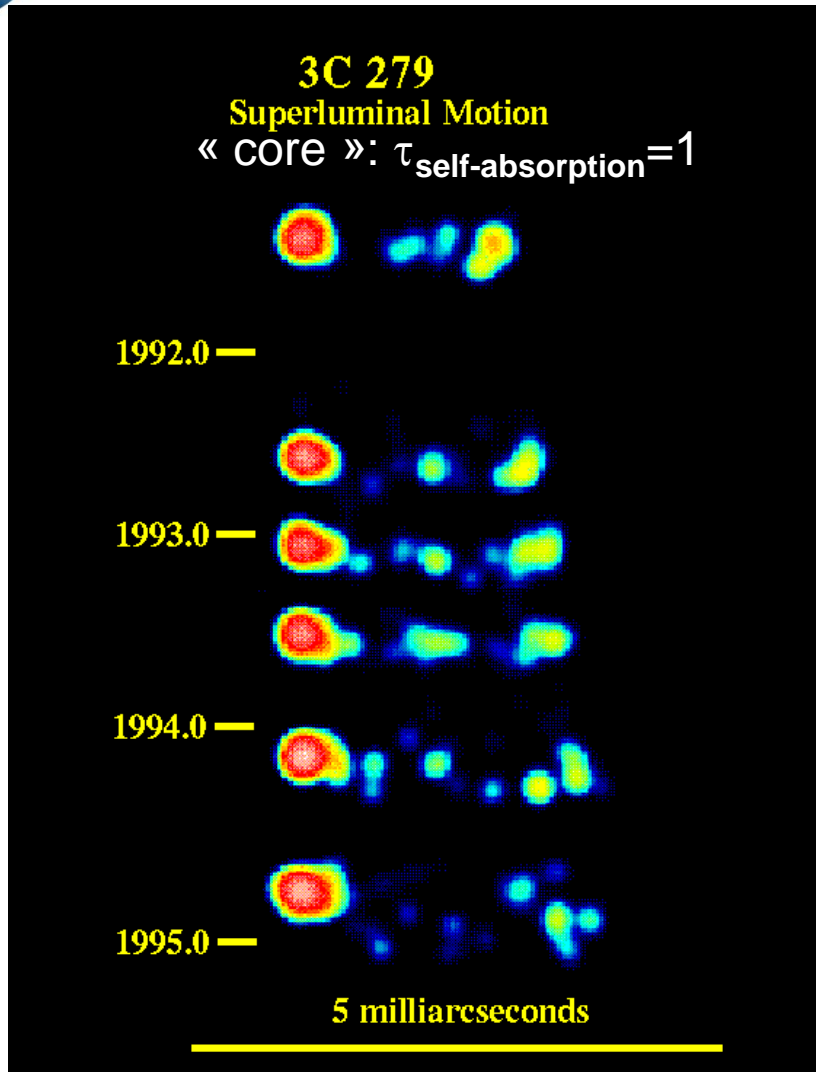
$$\Delta t_{obs} = \delta^{-1} \Delta t'$$

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

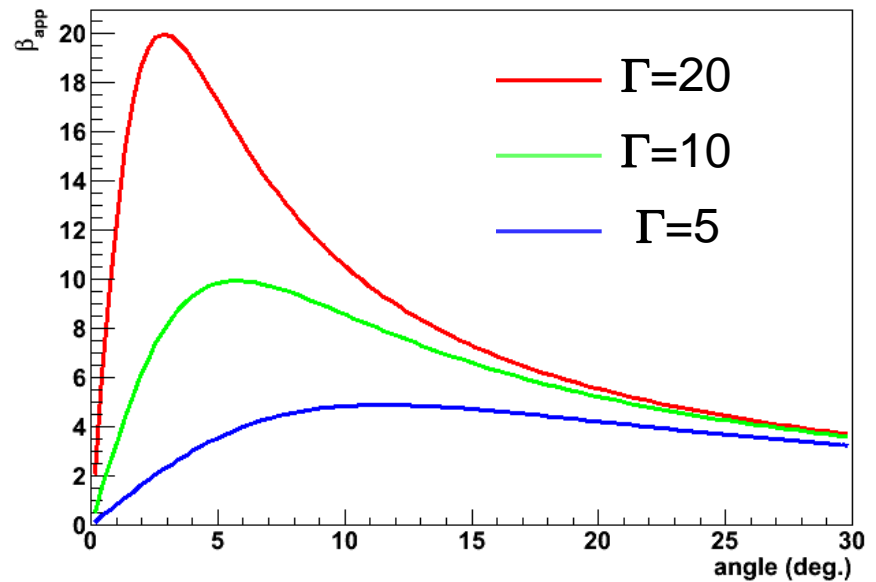
$$I(\nu) = \delta^3 I'(\nu')$$

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

Mouvement superlumique



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



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

Mouvement superlumique observé si $\beta > 0.707$

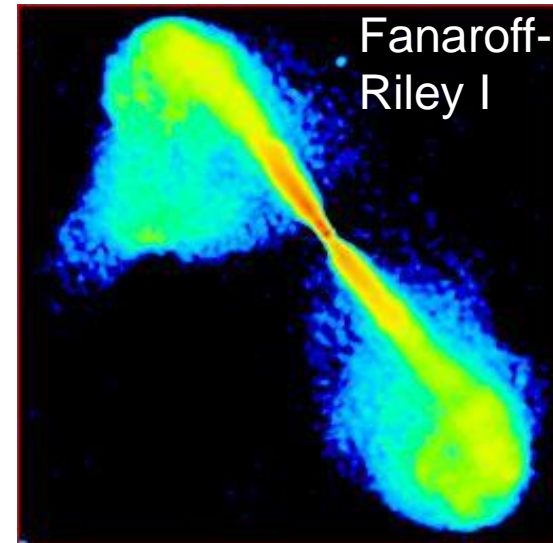
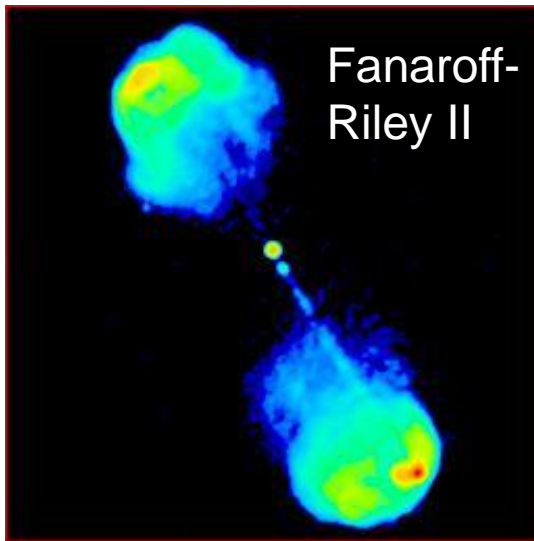
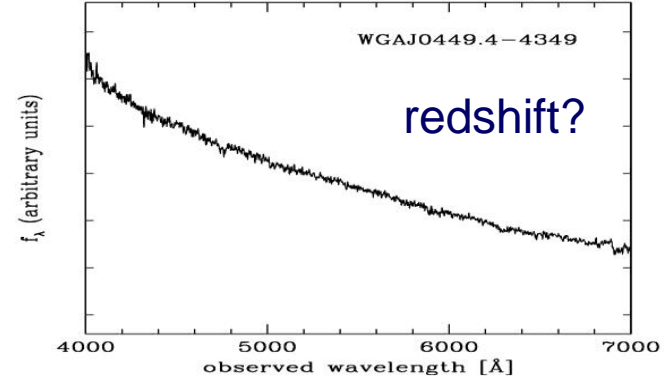
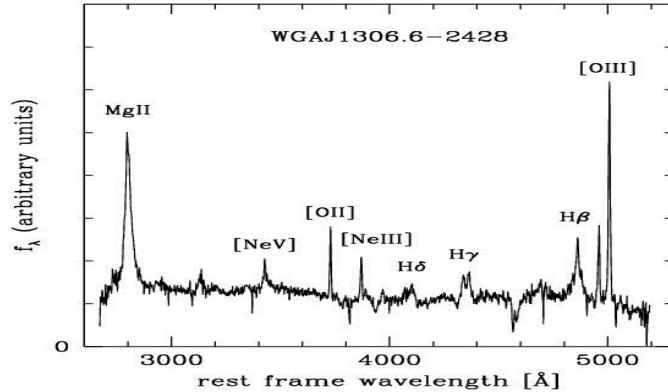
β_{app} observé jusqu'à 50!

β_{app} et directions variables pour une même source

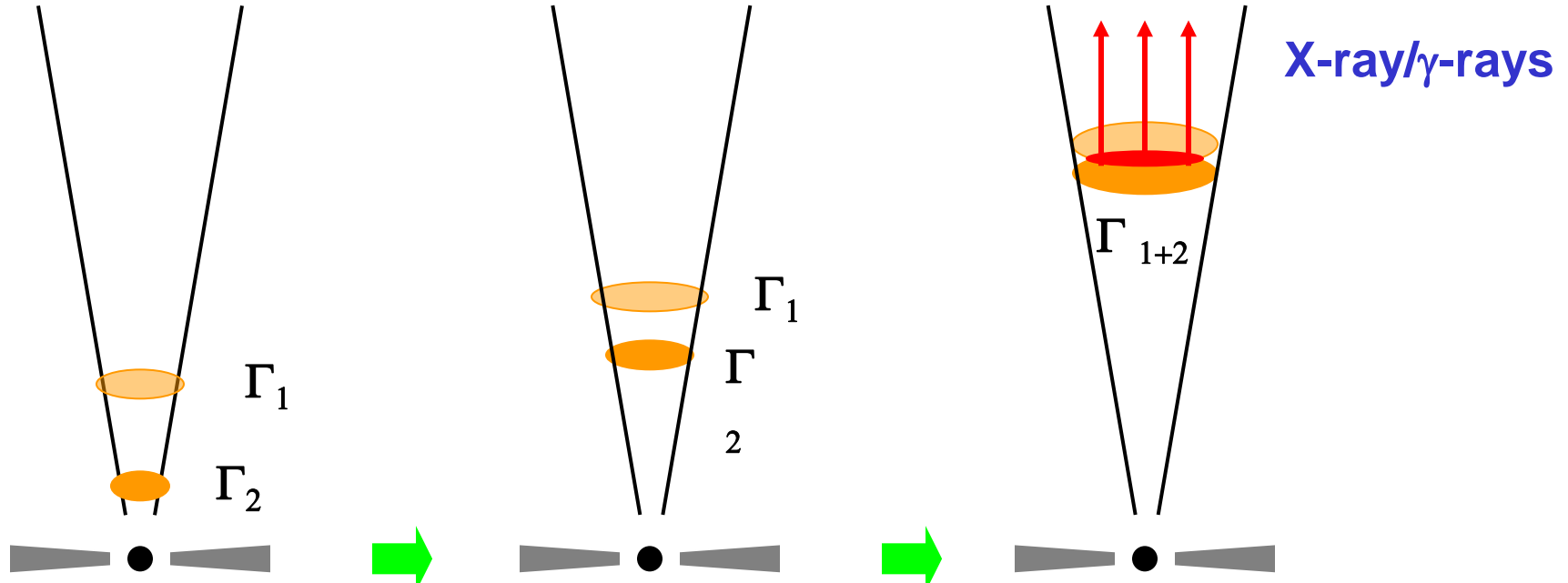
Classes de Blazar

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

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



Modèle de chocs internes

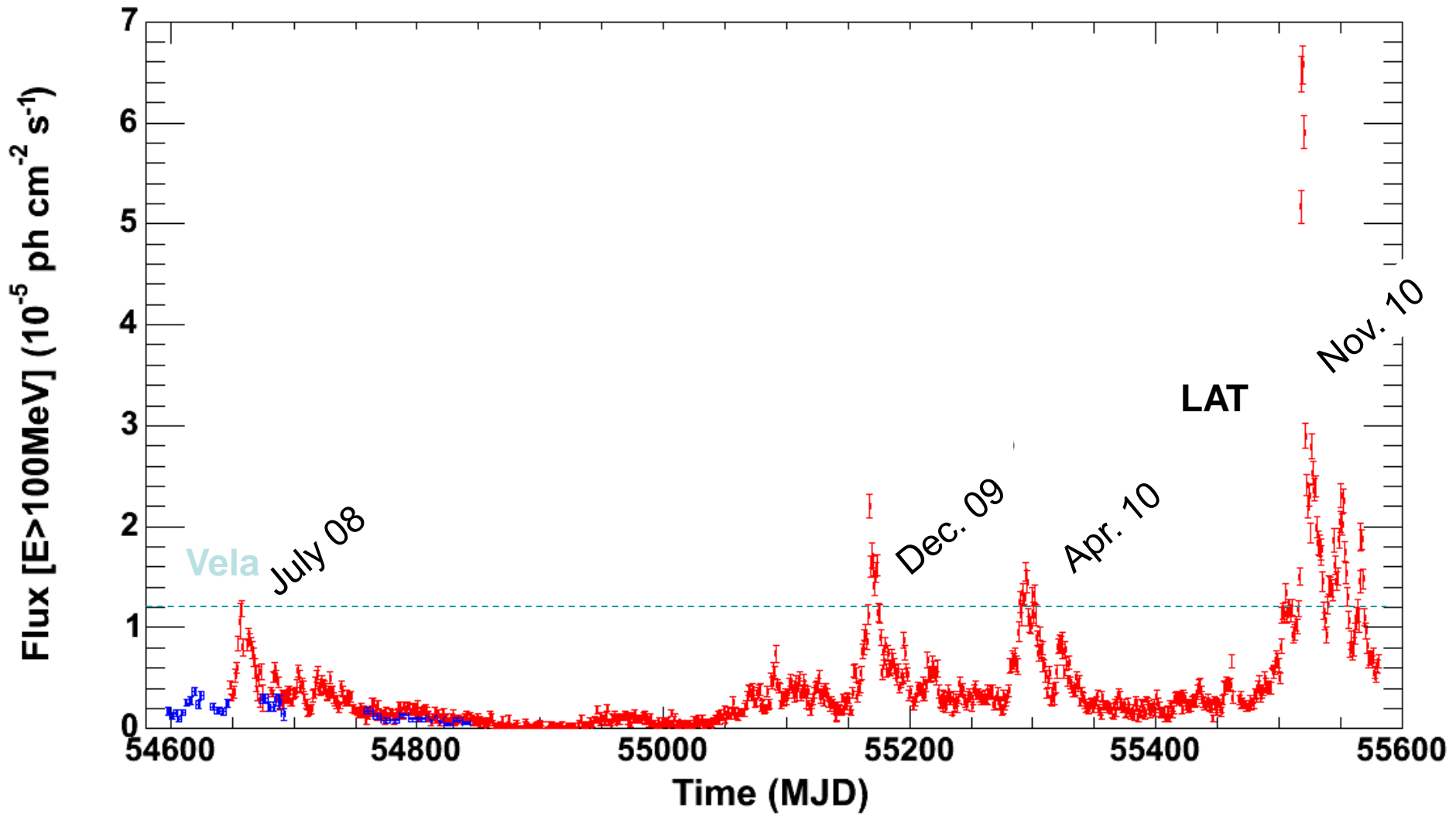


J.Kataoka

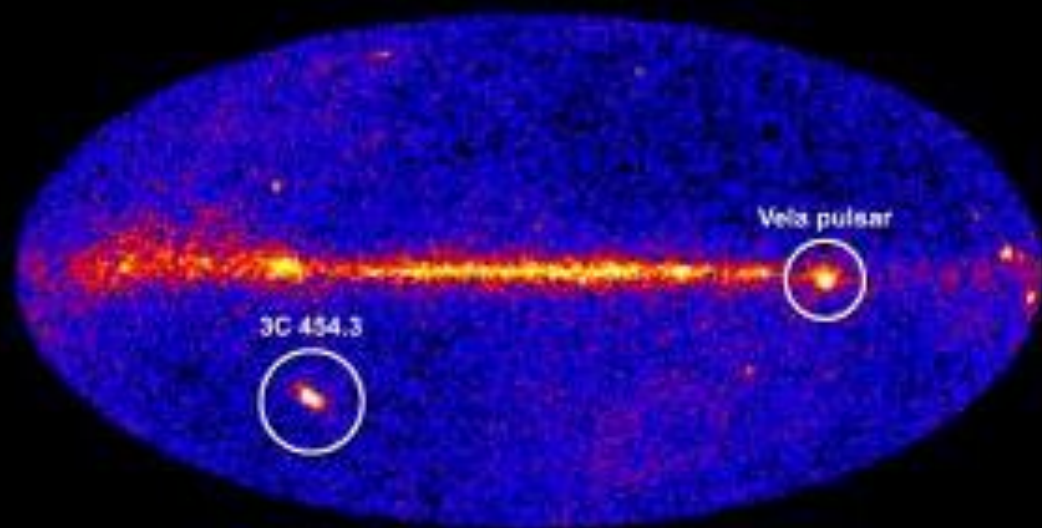
Modulation de l'éjection relativiste – le fragment rapide (Γ_1) rattrape le plus lent (Γ_2)

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

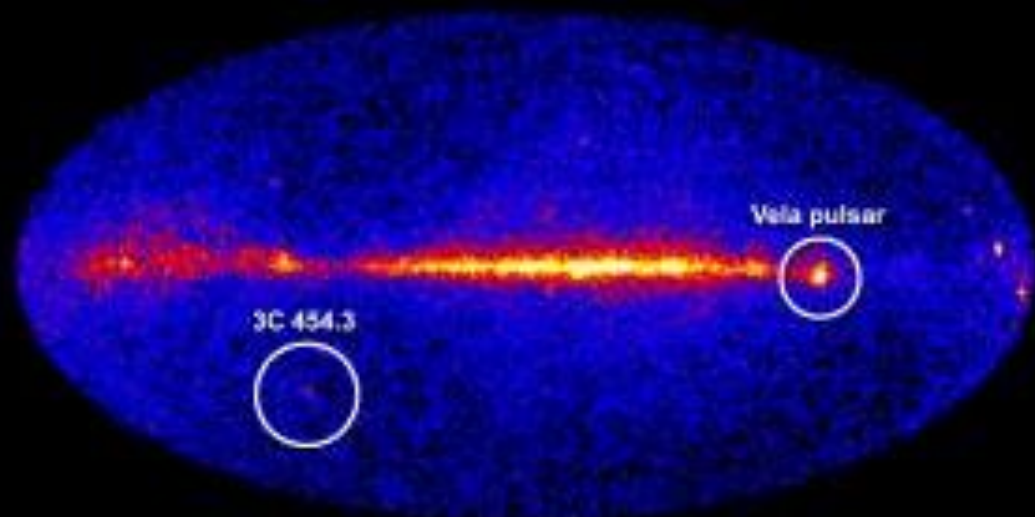
Courbe de lumière de 3C 454.3 (z=0.859)



Blazar 3C 454.3's Record Flare



December 2, 2009



November 3, 2009



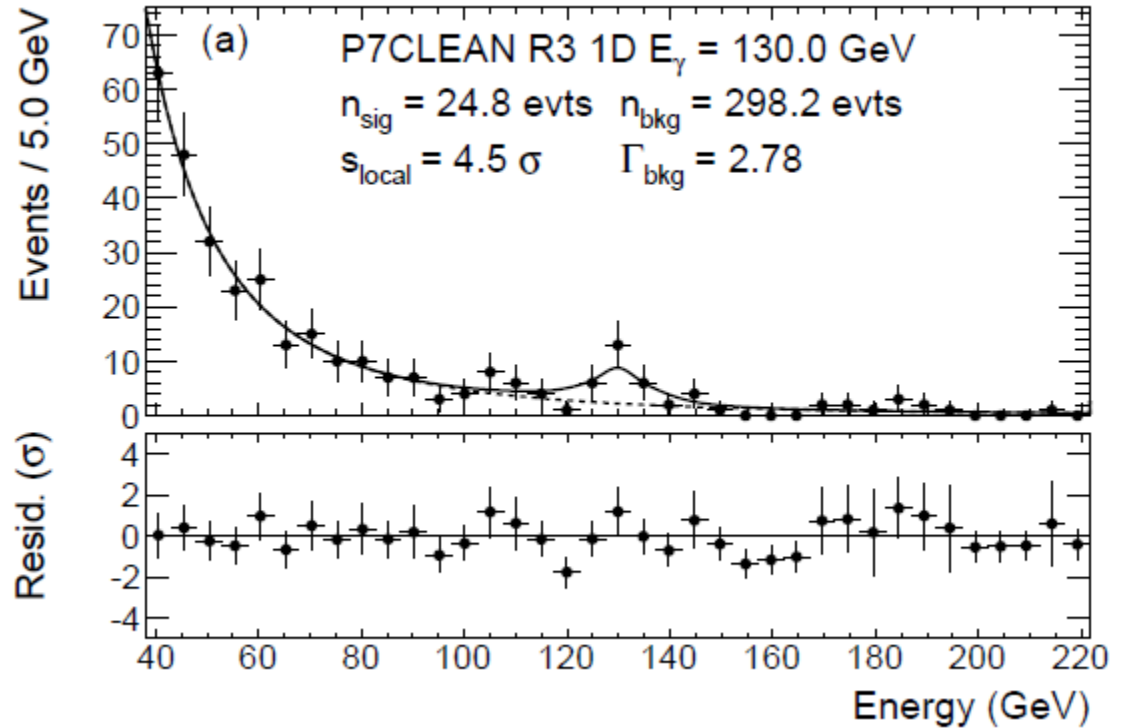
- Fraction de protons (ions) accélérée?
- Lien évolutif entre blazars « rouges » et « bleus »?
- Alimentation en énergie du jet: disque ou trou noir?
- Connection disque-jet
- Connection AGN – environnement



Weakly Interactive Massive
Particle (WIMP)



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°), $A_{\text{eff}} \sim 10^4 \text{ m}^2$

GeV



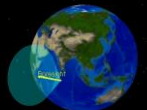
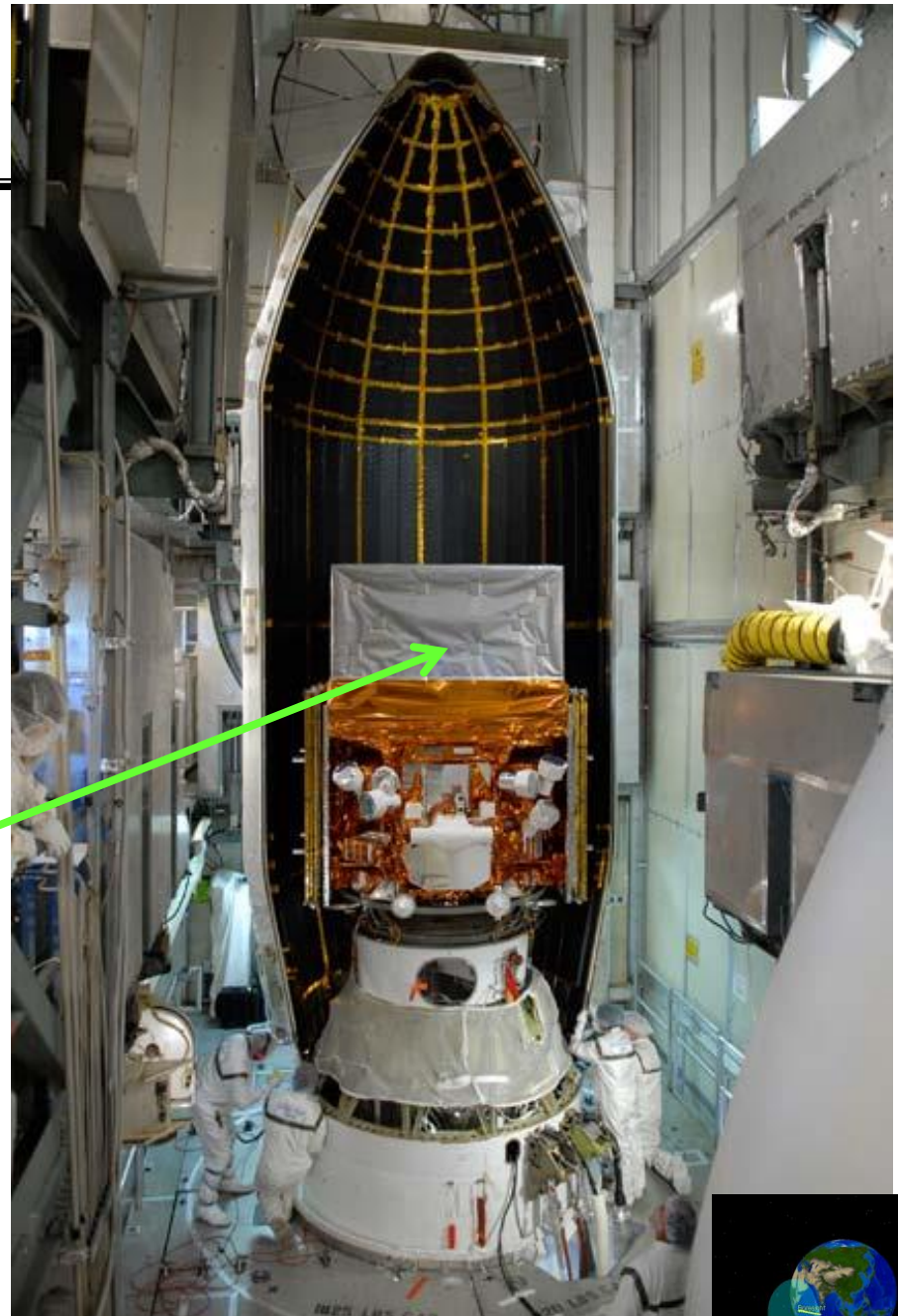
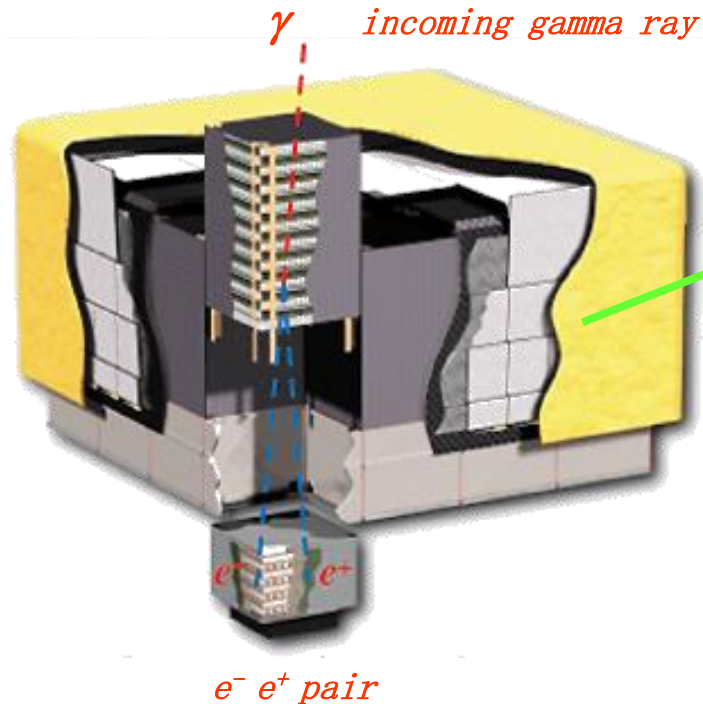
TeV



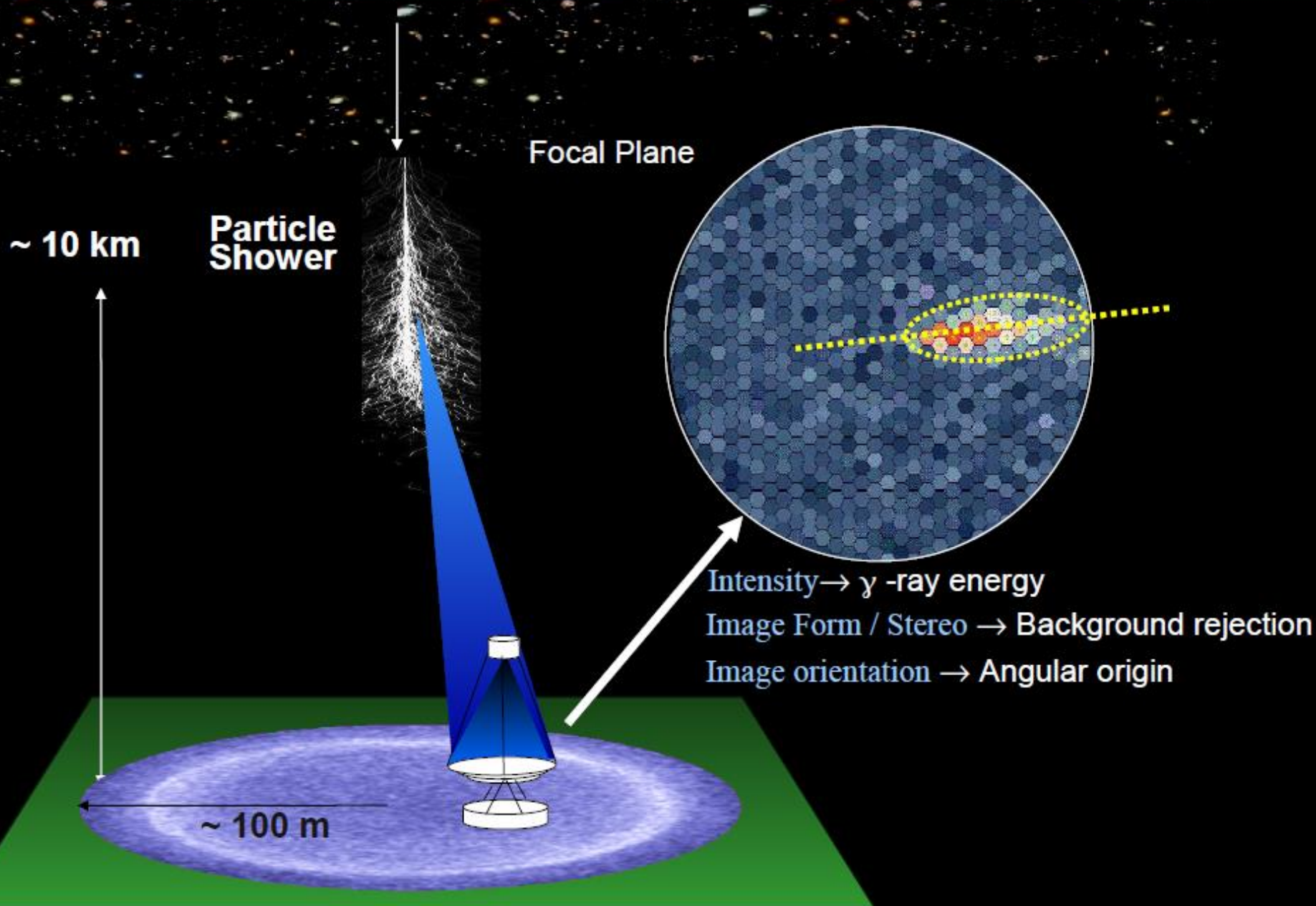


The Large Area Telescope on board the Fermi satellite

(launch: June 11, 2008)



Cherenkov Imaging Technique



CTA (Cherenkov Telescope Array)



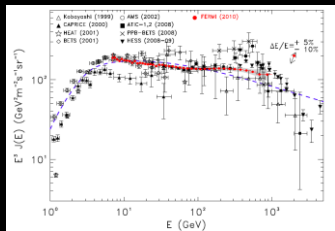
Credit: DESY/MIA Science Comm / Twitter

Conclusions

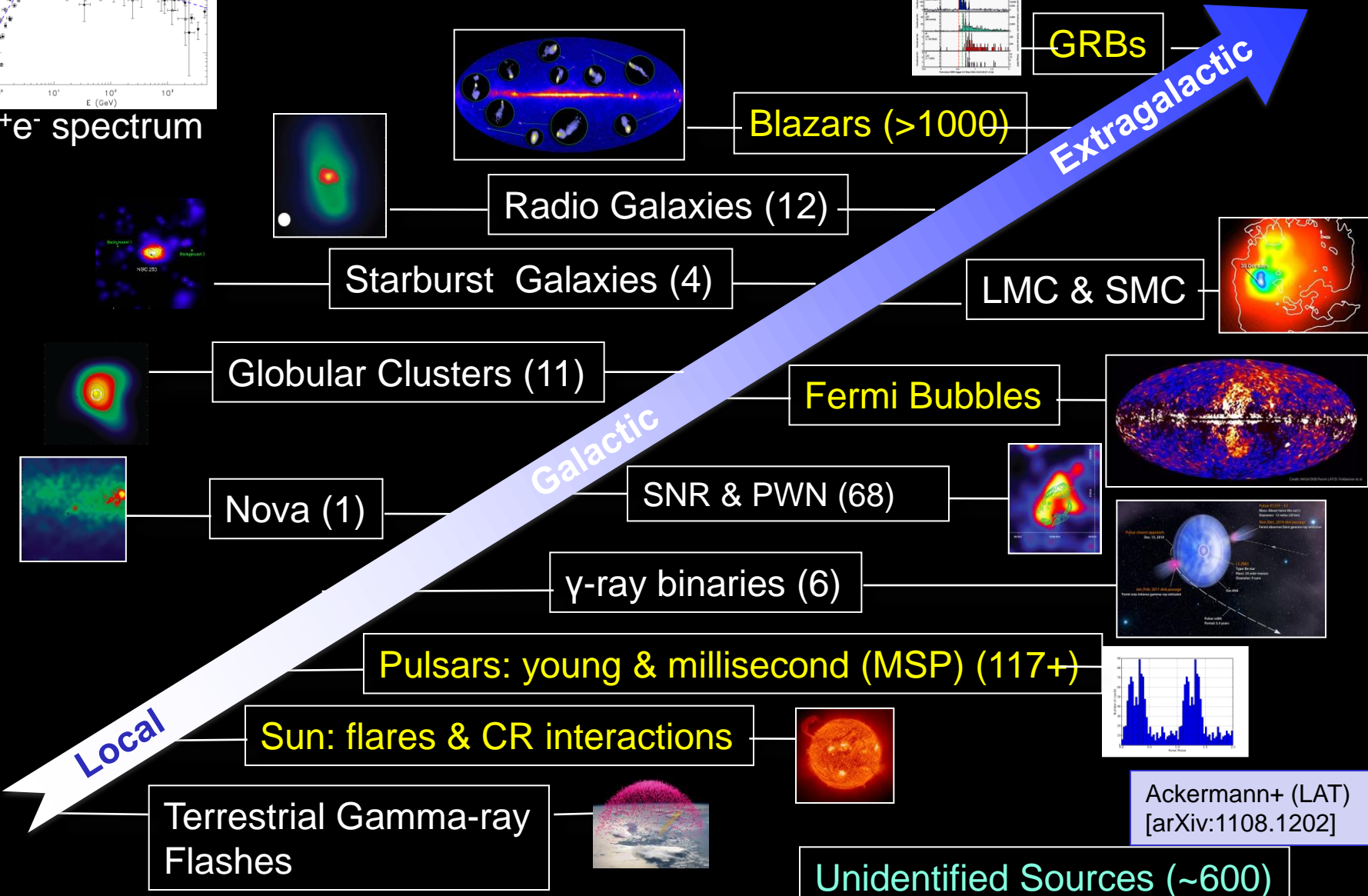
- L'Astrophysique des Hautes Energies a pour champ d'étude les accélérateurs cosmiques, dont l'existence est connue depuis la découverte des rayons cosmiques
- Les rayons gamma sont des sondes privilégiées pour les étudier mais d'autres seront disponibles dans le futur (neutrinos, ondes gravitationnelles).
- 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