

Astrofisica e particelle elementari

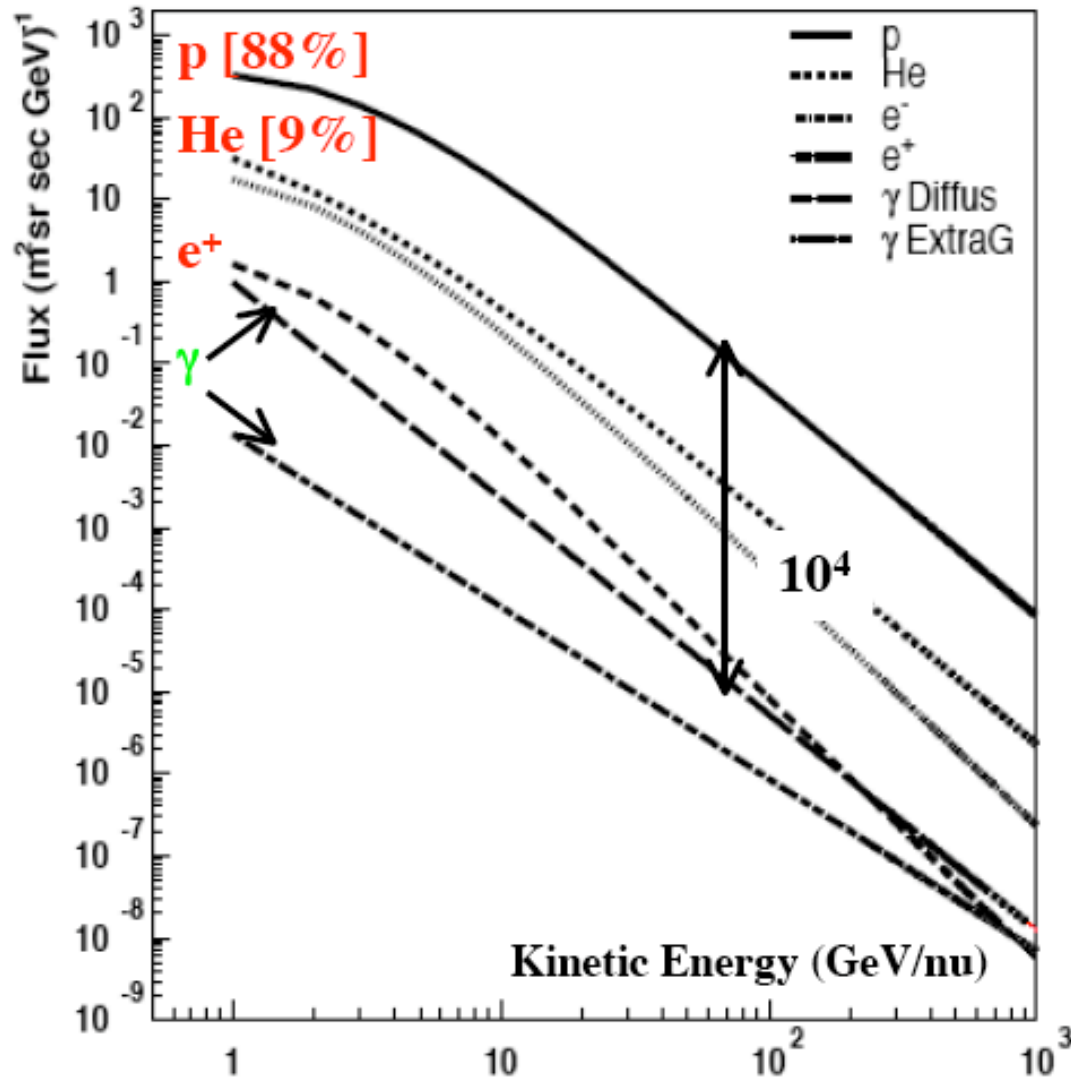
aa 2008-9

Lezione 8

- Gamma cosmici
- Assorbimento γ nello spazio e nell'atmosfera
- Origine dei γ
- Sorgenti
- Osservatori nello spazio
- Compton Gamma Observatory
- Terzo catalogo EGRET

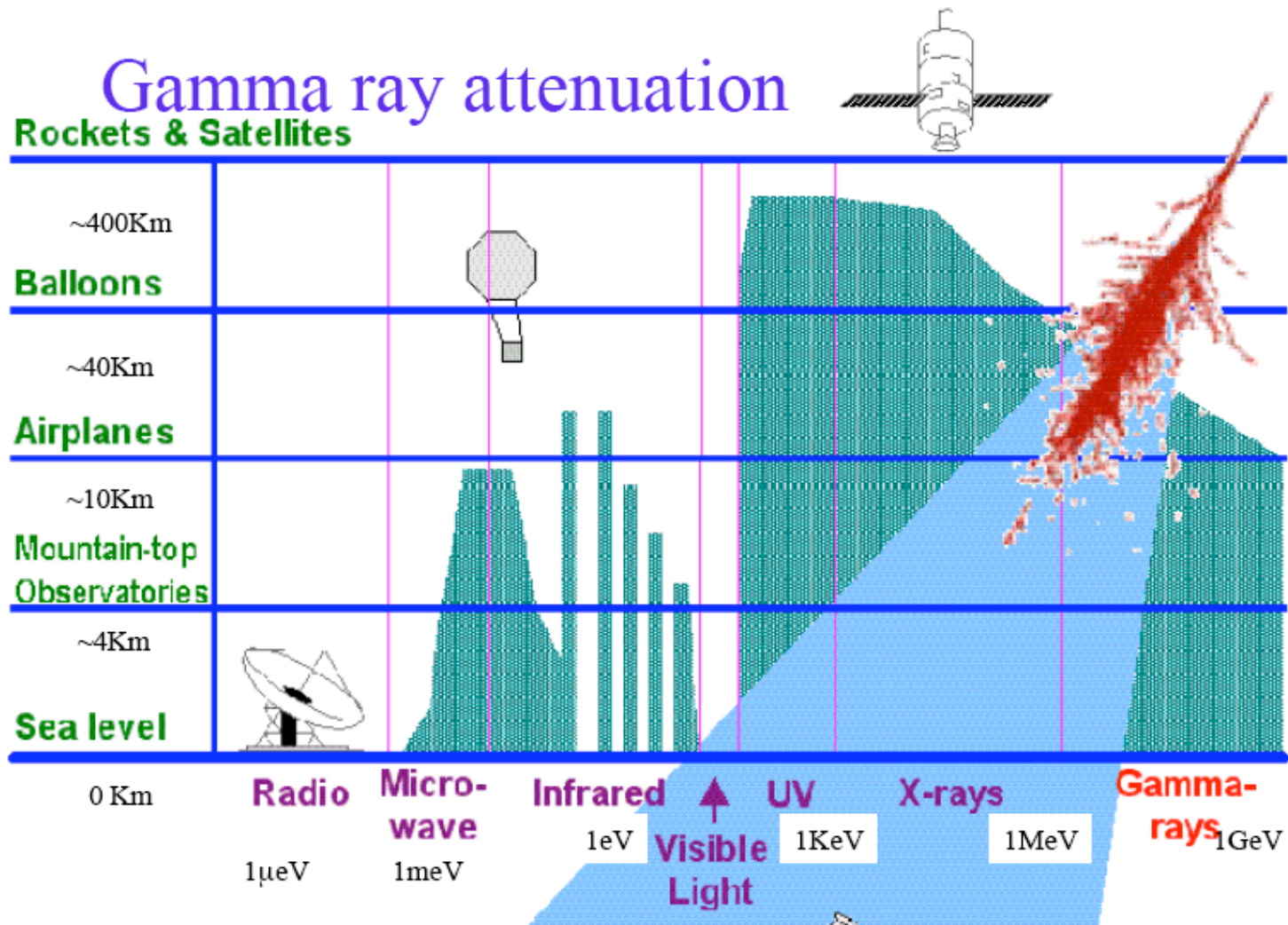
Bruno Borgia

GAMMA COSMICI



- per ottenere un rapporto fondo/segnale $\approx 1\%$ occorre raggiungere una reiezione del fondo per un fattore 10^6
- fondo per conversione coppia e⁺ e⁻: protoni + raggi δ
- fondo calorimetro em: protoni

RAGGI GAMMA



ASSORBIMENTO γ

- Assorbimento dovuto alle interazioni dei gamma con la radiazione di fondo e con l'infrarosso.

$$\gamma(k_1) + \gamma(k_2) \rightarrow e^+ + e^-;$$

se

$$E_{cm} = \sqrt{2k_1 k_2 (1 - \cos\theta)} \geq 2m_e$$

Nel rapporto $I(L)/I_0 = \exp(-k_\gamma L)$, dove L è la distanza sorgente-osservatore, alla temperatura kT , il coefficiente di assorbimento k_γ è dato da

$$k_\gamma = \frac{1}{2} \int_0^\infty \int_\theta \frac{dn_\gamma}{dk_2} \sigma_{\gamma\gamma} \sin\theta d\theta dk_2$$

e k_1 e k_2 sono le energie rispettivamente del fotone incidente e del fotone infrarosso o di microonde.

- $\sigma_{\gamma\gamma}$ è la sezione d'urto, di trasformazione di due fotoni in due elettroni;
- dn_γ/dk_2 è la distribuzione dei fotoni di bassa energia.

Lo spettro di energia del fondo di microonde è:

$$\frac{dn_\gamma}{dk_2} = \frac{1}{\hbar^3 c^3 \pi^2} \frac{k_2^2}{\exp(k_2/kT) - 1}$$

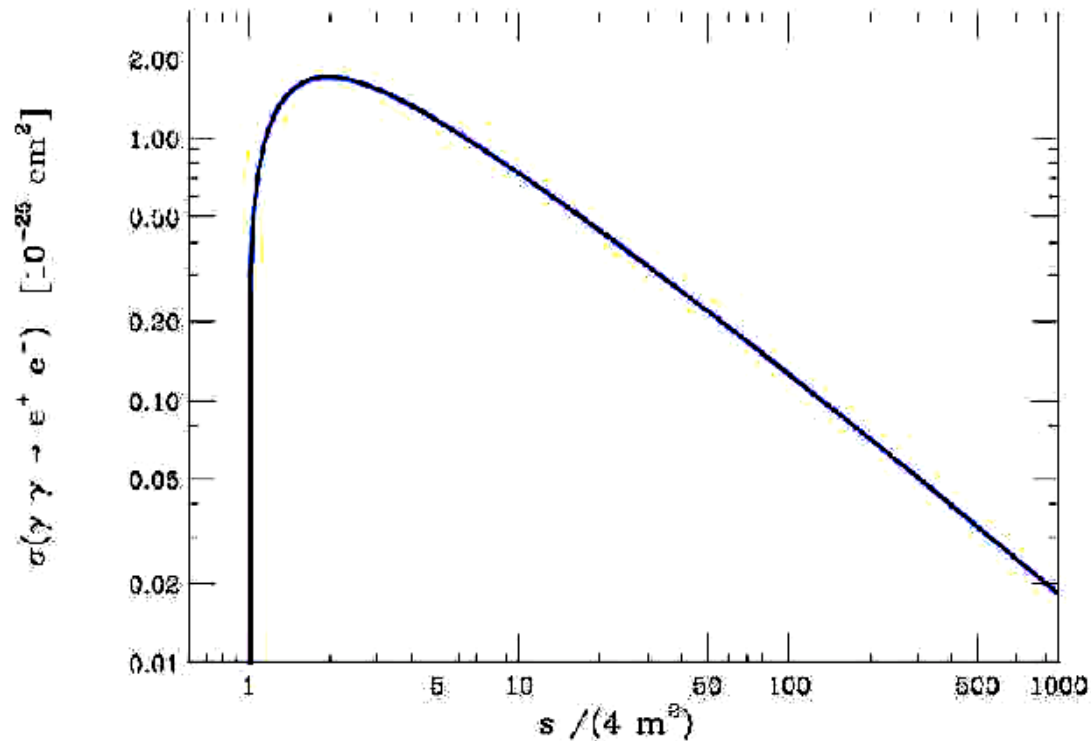
ASSORBIMENTO γ

La sezione d'urto $\gamma \rightarrow e^+e^-$ è:

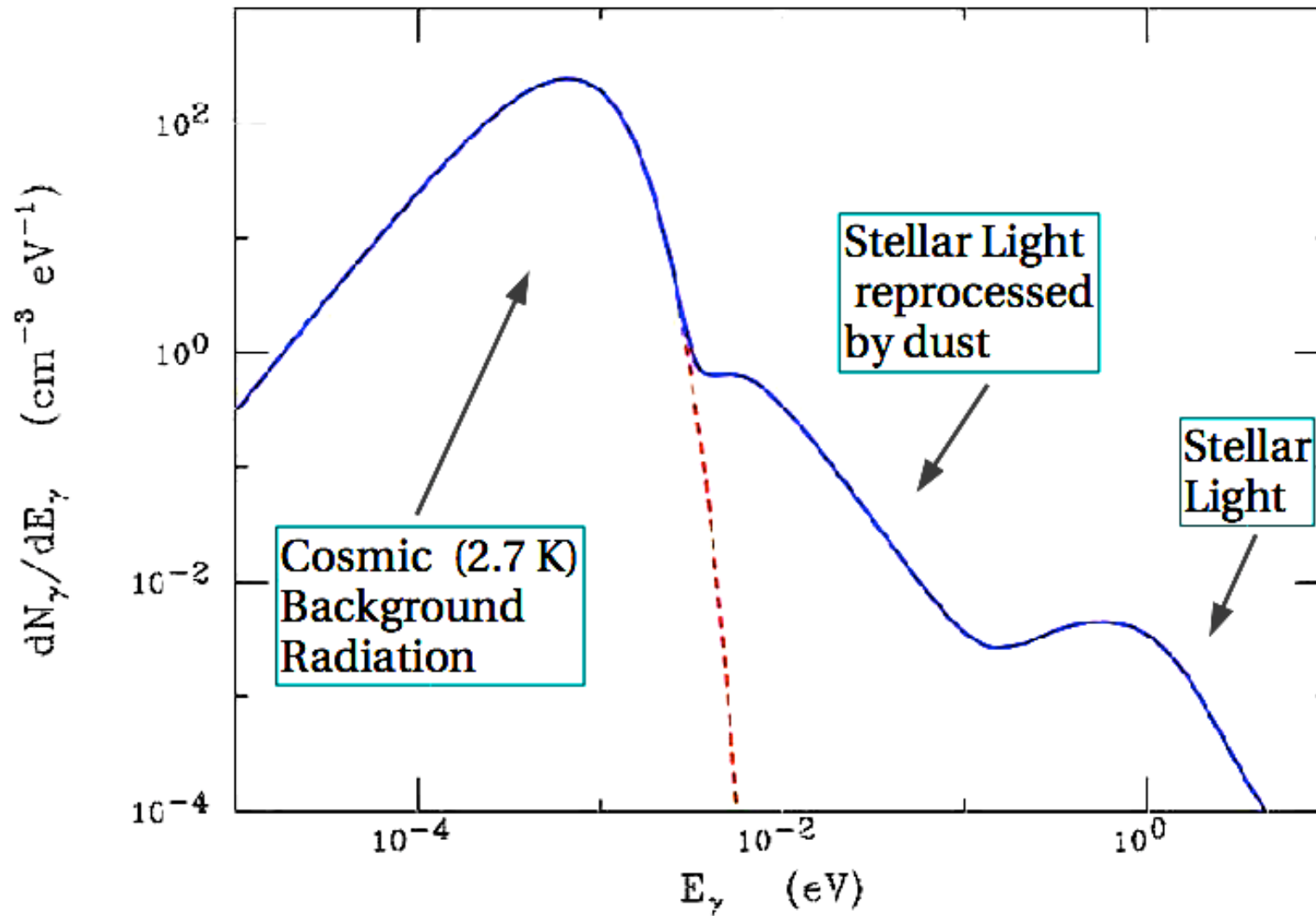
$$\sigma_{\gamma} = \frac{\pi r_e^2}{2} (1 - v^2) \left\{ (3 - v^4) \ln \left(\frac{1 + v}{1 - v} \right) - 2v(2 - v^2) \right\}$$

dove

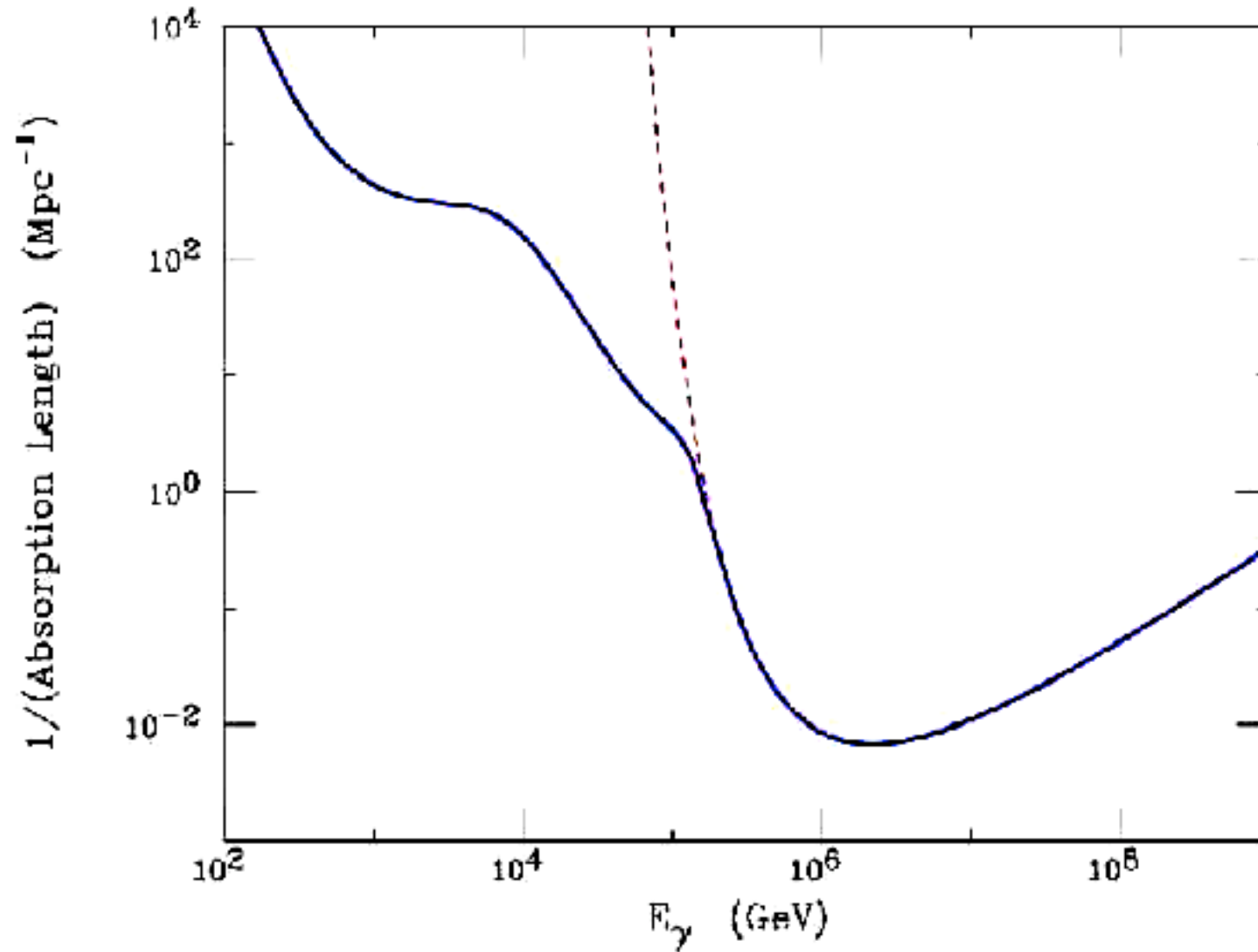
$$v = \sqrt{1 - \frac{4m_e^2}{2k_1k_2(1 - \cos\theta)}}$$



DENSITA' FOTONI/UNIVERSO



LUNGHEZZA DI ASSORBIMENTO



ORIGINE DEI GAMMA COSMICI

Le sorgenti dei gamma cosmici non possono essere di origine termica in quanto richiederebbero temperature al di sopra di 10^9 K, ovvero $kT > 1$ MeV.

1. *Bremsstrahlung*. I gamma possono essere emessi da elettroni relativistici nel campo coulombiano di particelle cariche. L'energia persa dagli elettroni è per unità di materia attraversata (ρx , grammi/cm²) $dE/d\rho x = -E/X_0$ dove X_0 è la lunghezza di radiazione. La radiazione è emessa predominantemente in un intervallo angolare $m_e c^2/E$.

2. *Scattering Compton inverso*. Un elettrone relativistico può trasferire una parte considerevole della sua energia a fotoni di bassa energia. Fotoni di energia media E_γ ricevono in media un'energia

$$E_\gamma \approx E_e \gamma (E / m_e c^2)^2$$

Ad esempio un elettrone di 60 GeV/c può trasformare un fotone del CMB di 6×10^{-4} eV in un gamma di 10 MeV.

3. *Collisioni anelastiche* $p + p \rightarrow \pi^0 + X$. Protoni al di sopra della soglia di energia possono produrre pioni neutri che decadono in 2×10^{-16} s in due gamma con energia nel c.m. di $m_\pi/2$.

4. *Annichilazione* $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$.

5. *Radiazione di sincrotrone*. Emessa da elettroni relativistici in campo magnetico. Questo processo è importante nelle pulsar che hanno un campo magnetico molto elevato dell'ordine di $10^6 - 10^8$ T. La potenza irradiata dagli elettroni è $P \propto (B_\perp \beta \gamma)^2$ dove B_\perp è il campo magnetico, $\beta=v/c$, $\gamma=E/m_e$ dell'elettrone. Lo spettro di emissione ha un massimo per

$$\nu_m = 0.29(3/4\pi)eB_\perp \gamma^2 / m_e$$

6. *Linee spettrali nucleari*. Transizioni tra livelli nucleari emessi nei decadimenti radioattivi o in seguito all'eccitazione dei nuclei da parte di particelle energetiche.

RADIAZIONE EM

- Cosmic microwave background: radiazione *fossile* dal disaccoppiamento materia-radiazione
- Radiazione diffusa dalla galassia: onde radio, $\lambda = \text{cm-km}$
intensità radio/ottico
 - Via Lattea $< 1\%$
 - radio-galassie $\gg 1$
- Quasar (Quasi-stellar object): in genere sorgenti intense di onde radio a grandi z ; associate a buchi neri massivi; radiazione di sincrotrone.
- Raggi γ :
 - $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$
 - Pulsar, spettro $E \propto 1/E$; sorgenti “stazionarie” periodiche con segnali di breve durata e periodo $\approx 1 \text{ ms} - 300 \text{ ms}$
 - GRB (Gamma Ray Burst): eventi saltuari, durata variabile $10 \text{ ms} - 1000 \text{ s}$; isotropi.

AGN

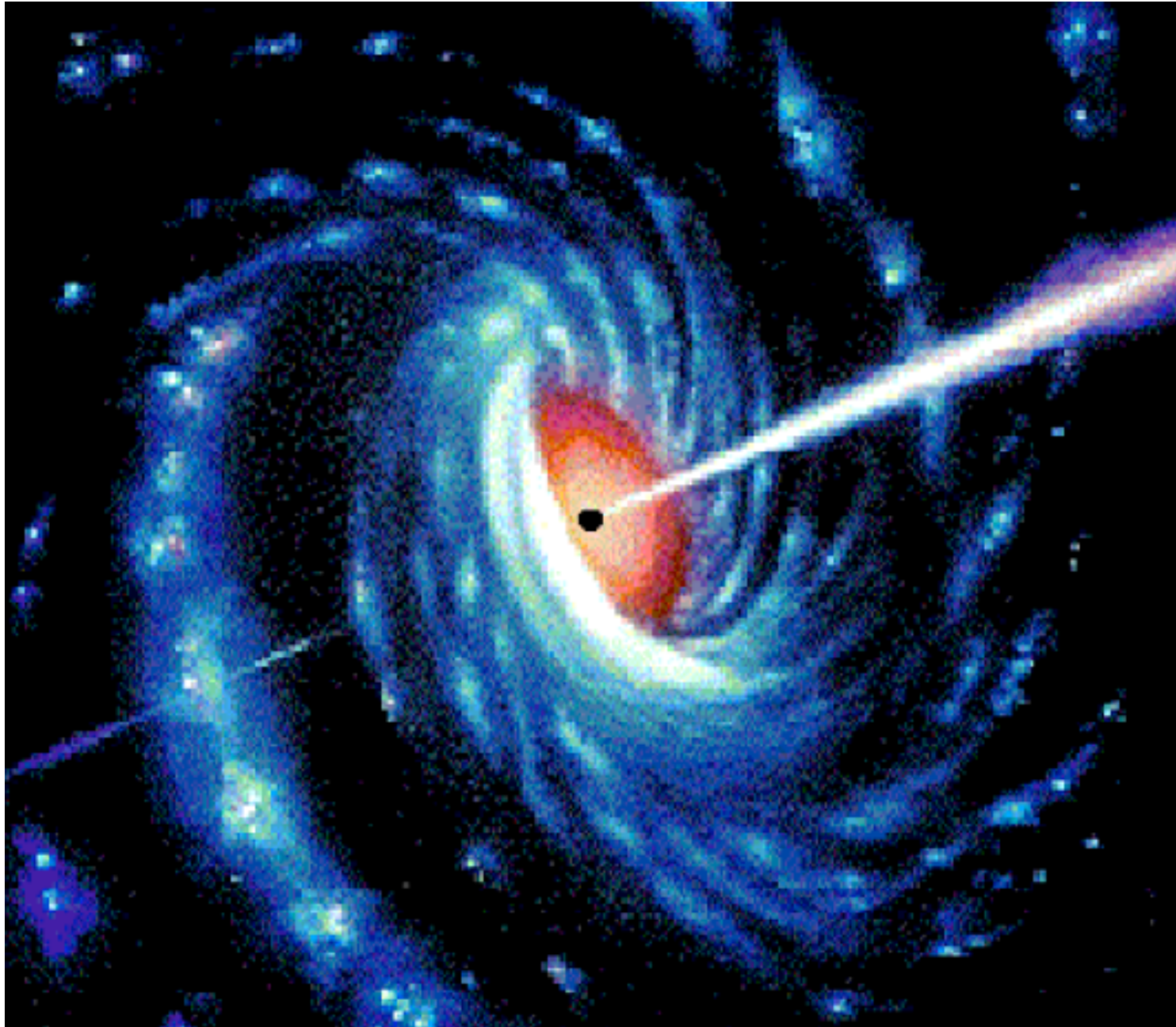
L'osservazione dei nuclei delle galassie mostra che esistono somiglianze tali da supporre che i fenomeni abbiano una origine comune, anche se le attività differiscono quantitativamente. Le caratteristiche delle attività dei nuclei, AGN, sono:

- presenza di un nucleo compatto brillante
- spettro continuo di radiazione dall'infrarosso alla regione X
- emissione di righe spettrali
- emissione radio non-termica
- variabilità del continuo o delle linee di emissione.

Il modello consiste dei seguenti elementi:

1. al centro una black hole con $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$
2. un disco di accrescimento "piccolo" intorno alla black hole che emette nel continuo
3. nuvole di gas ionizzato intorno alla black hole che emette righe
4. toro di gas e polvere nel piano della galassia opaco alla radiazione ottica che emette nell'infrarosso
5. due jet molto stretti emessi dalla regione centrale lungo la direzione dell'asse di rotazione. Questi jet emettono radiazione di sincrotrone.

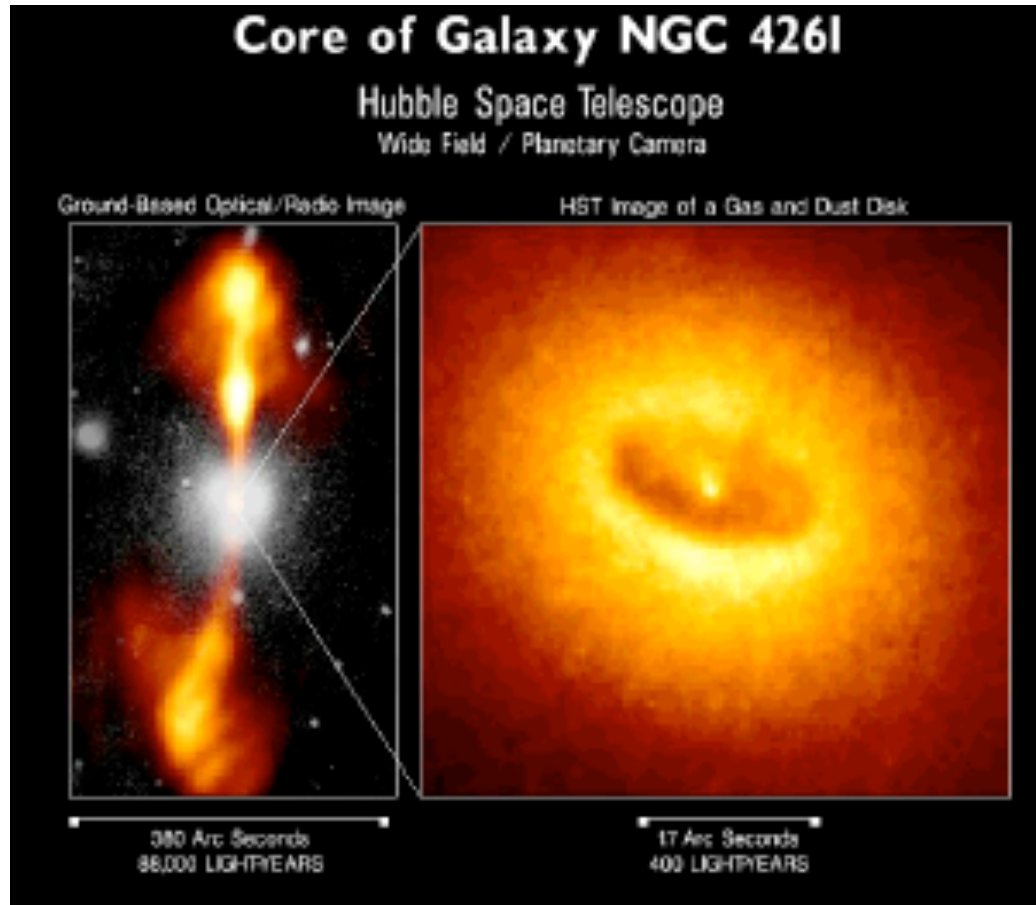
AGN



AGN

Active Galactic Nucleus

- Black hole al centro, disco di accrescimento
- Jet alimentati da accrescimento o da energia di rotazione
- Accelerazione di protoni o elettroni da onda d'urto
- Generazione di fotoni di alta energia da radiazione di sincrotrone o da scattering Compton
- Se il jet punta verso la terra: BLAZAR

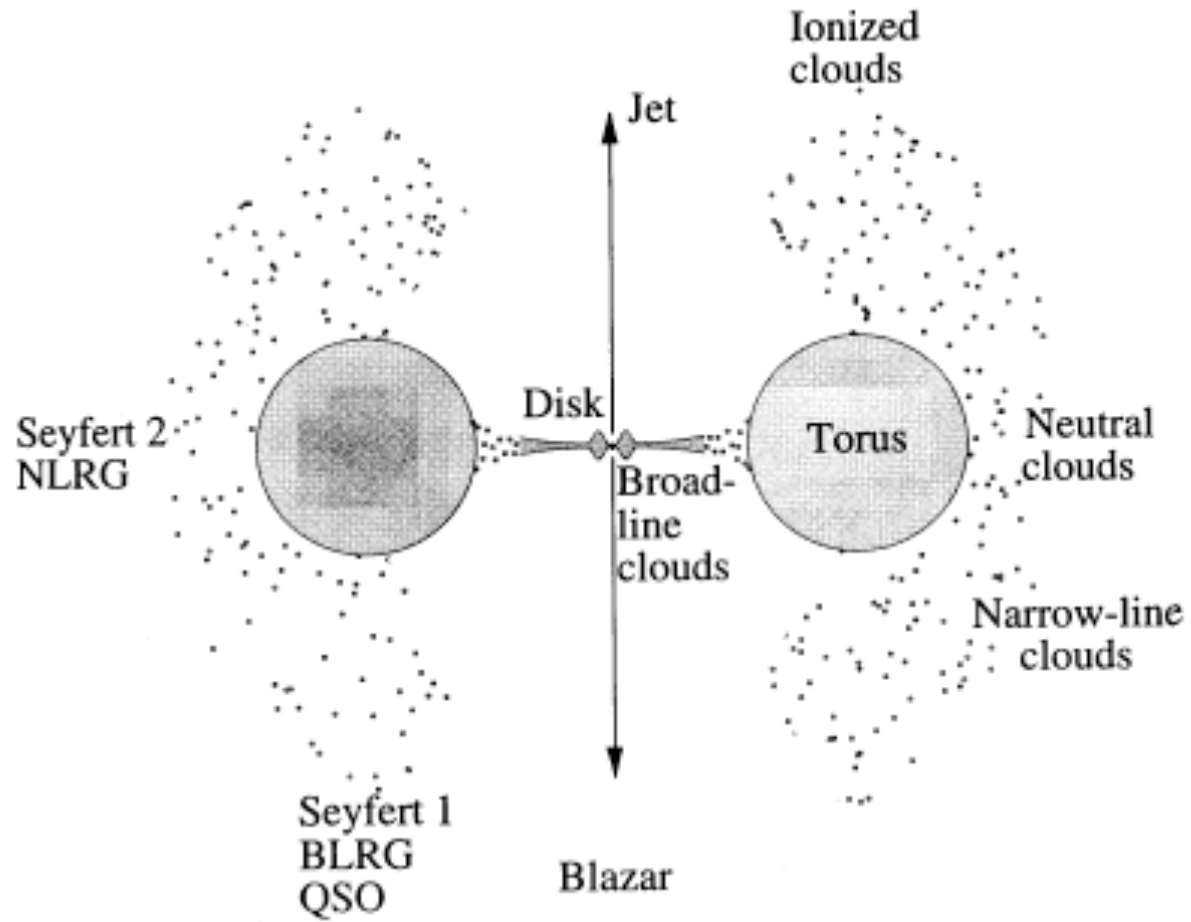


Ground optical/radio

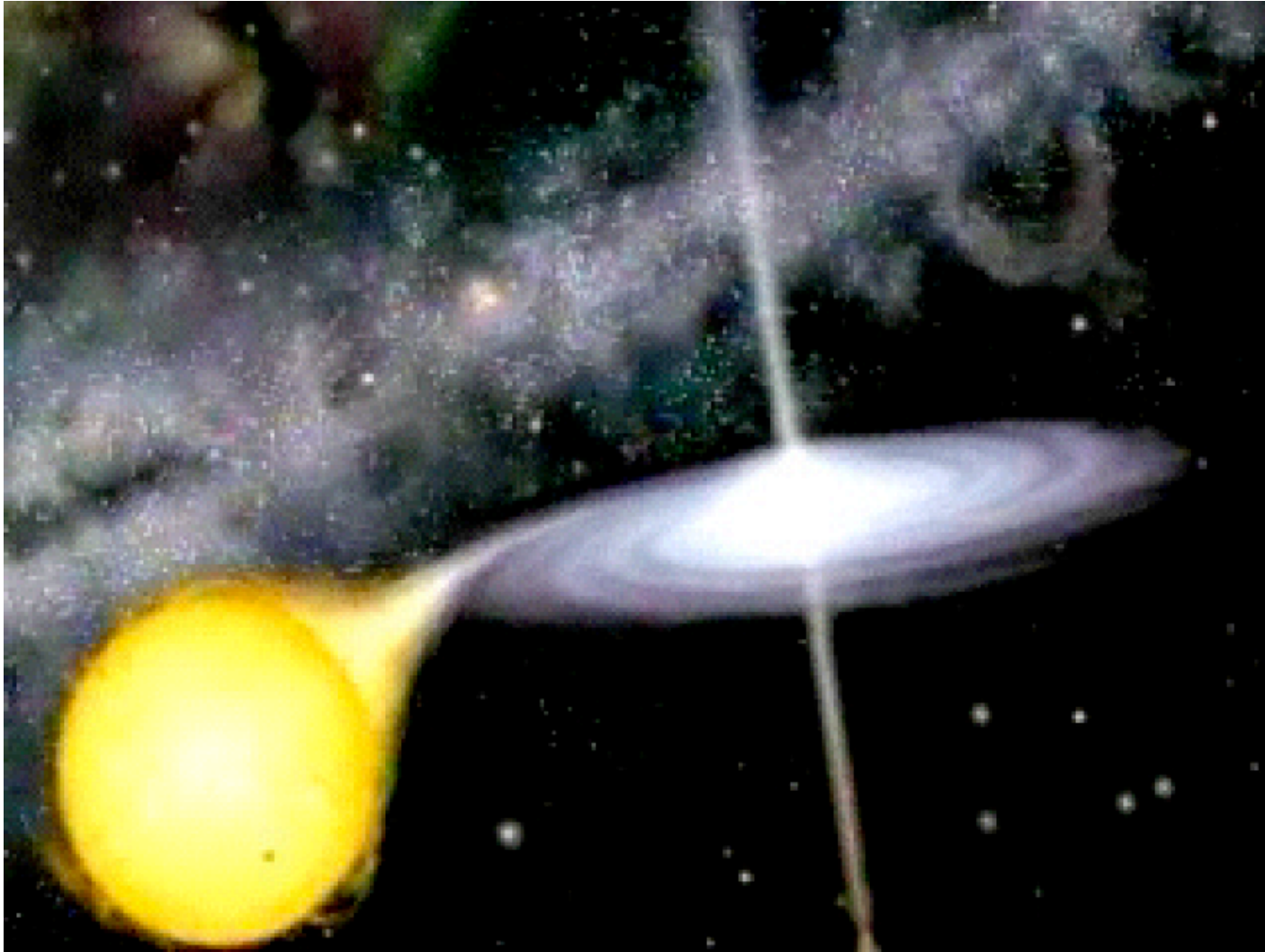
Hubble ST

AGN

Carroll & Ostlie 1996



BLACK HOLE + STELLA



QUASAR

Oggetti di brillantezza superficiale elevata a grandi distanze, $z \approx 5$. Fenomeni avvenuti in stadi primitivi delle galassie. Associati a black hole di $10^6 - 10^8 M_{\odot}$. Il buco nero sarebbe circondato da un disco di materiale galattico di accrescimento che alimenta la sua crescita. In questo processo il materiale subisce violente oscillazioni e le particelle cariche sono accelerate ad altissime energie e sfuggono sotto forma di due jet lungo l'asse minore del disco. Poiché ai jet di particelle è associato un campo magnetico, gli elettroni emettono radiazione di sincrotrone.

La magnitudo visibile dei quasar sorpassa quella delle galassie giganti per un fattore anche fino a 100.

La distribuzione spettrale ha una forma di potenza, con il flusso grossolanamente

$$F \propto \nu^{-\alpha}$$

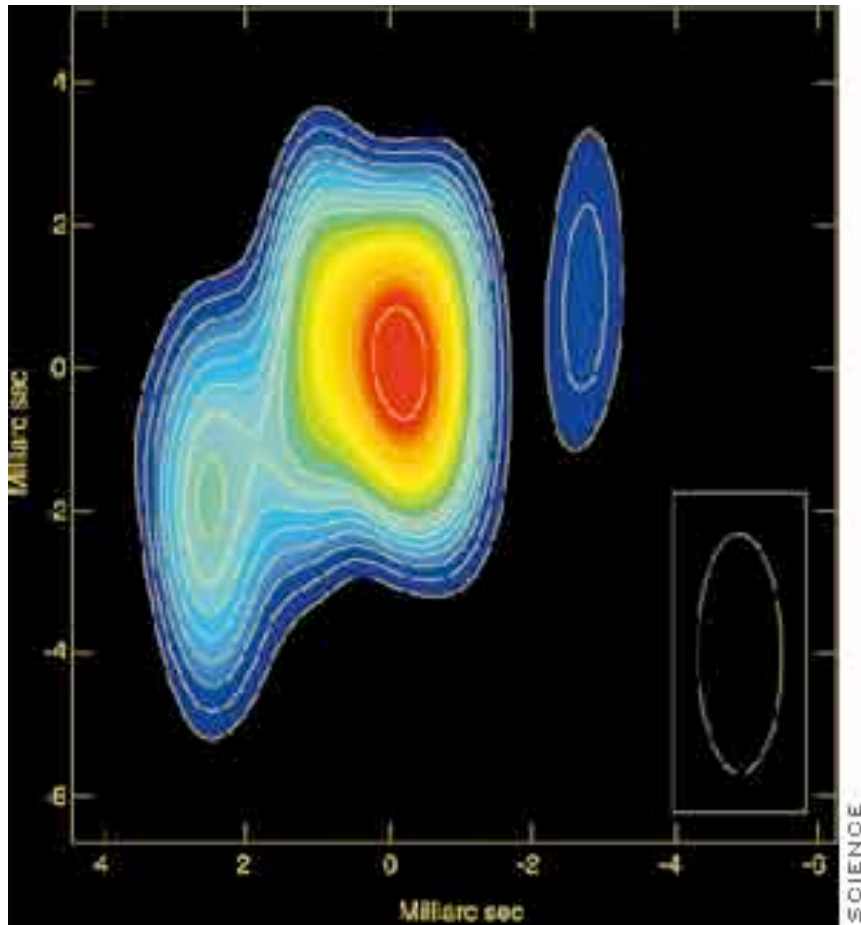
con $\alpha \approx 1$

Lo spettro ha sostanzialmente due zone, una parte di radiazione termica ed una parte non-termica nella regione delle radiofrequenze, dei raggi X e raggi gamma. I fotoni energetici X e gamma non sono di origine di radiazione di sincrotrone ma provengono dal Compton inverso di fotoni meno energetici su elettroni di alta energia.

La struttura dei quasar, osservata dai radiotelescopi, mostra che la maggior parte è composta di due o più oggetti, usualmente una zona centrale compatta ed una più estesa lunga e sottile.

L'energia totale può essere stimata dalla radiazione termica del disco di accrescimento e dalla radiazione di sincrotrone. In totale si trova un'energia caratteristica di 10^{55} J, che corrisponde ad una massa relativistica Mc^2 di diverse $10^8 M_{\odot}$. L'emissione tipica di un quasar è circa 4×10^{40} W, per cui la riserva di energia può durare al più $10^7 - 10^8$ anni.

MICROQUASAR



Mappa dell'emissione radio da un microquasar in cui un buco nero "succhia" una stella compagna.

I "microquasar", alcuni dei quali relativamente vicino alla Terra, sono una versione più piccola dei quasar, che si trovano usualmente al centro delle galassie.

I microquasar emettono luce nel visibile, onde radio, raggi X, gamma e jet di materia lunghi 2-3 miliardi di km.

Il "motore" dei microquasar dovrebbe essere o un piccolo buco nero, $\approx 2 M_{\odot}$ o una stella di neutroni che risucchia materia da una stella vicina.

I buchi neri usualmente hanno una emissione intensa di raggi X, ma i microquasar hanno una emissione modesta di raggi X.

I microquasar potrebbero essere le sorgenti dominanti delle particelle di alta energia e dei fotoni prodotti nella nostra galassia.

La stessa area dove si trovano i microquasar produce emissione persistente di gamma che sono stati rivelati da EGRET.

EGRET ha individuato più di 100 oggetti emettitori di gamma non identificati.

PULSAR

Scoperte nel 1967 con radiotelescopio. Emettono segnali brevi, periodici con periodo T tra 1 ms a 8 s. La durata del segnale è circa $3\%T$.

Crab Nebula emette segnali nell'ottico, X e gamma con $T=33.2$ ms. Si è formata nel 1054 AD nell'esplosione di una supernova. La stella "residua" (remnant) è una stella di neutroni che pulsa con periodo T .

Nella regione dei poli magnetici viene emesso plasma che ruota con la stella raggiungendo velocità c in un cilindro di raggio $R=cT/2\pi$, cilindro luce. Nella Crab $R=1580$ km. Il raggio delle stelle di neutroni è ≈ 10 km.

Se una stella come il Sole che ha inizialmente $T=25d$ collassa in una stella di neutroni, assumendo che conservi totalmente il momento angolare, il periodo diverrebbe $T=1$ ms.

Se inizialmente $B \approx 5 \times 10^{-4}$ T, le linee di forza sono compresse con un rapporto pari \approx al rapporto delle superfici e $B \approx 10^6$ T. Per emettere radiazione gamma col meccanismo della radiazione di sincrotrone occorrono campi $\approx 10^8$ T.

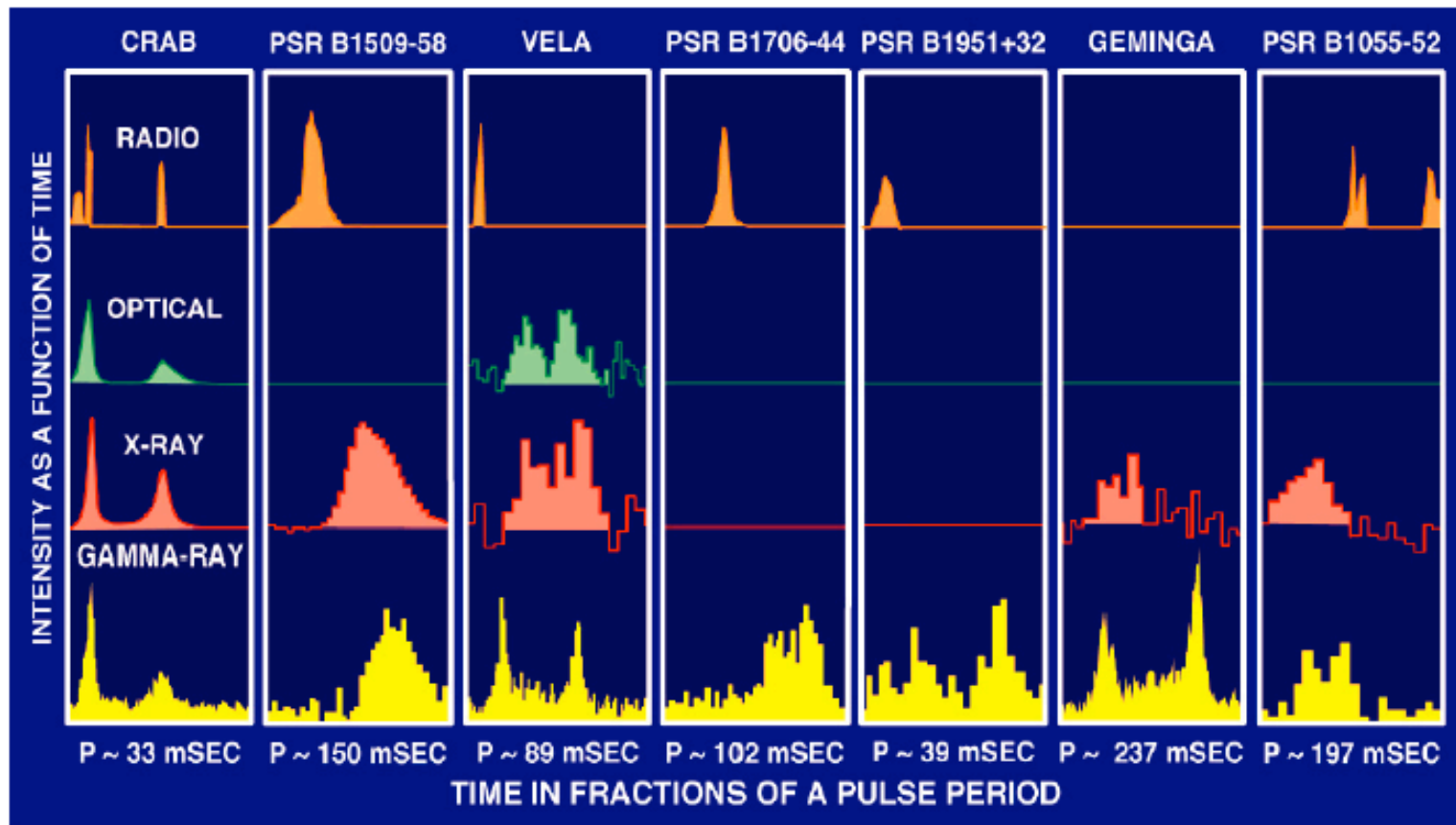
Storicamente le pulsar sono chiamate radio pulsar perché scoperte con i radiotelescopi. In realtà le misure nella regione dei gamma ha mostrato che la potenza emessa dalle pulsar in radiazione gamma è maggiore che nella regione radio per parecchi ordini di grandezza.

Sostanzialmente esistono due modelli di emissione:

- "polar cap": la regione di emissione è intorno ai poli entro qualche raggio stellare
- "outer gap": la regione di emissione è nella zona di linee di forza del dipolo più chiuse.

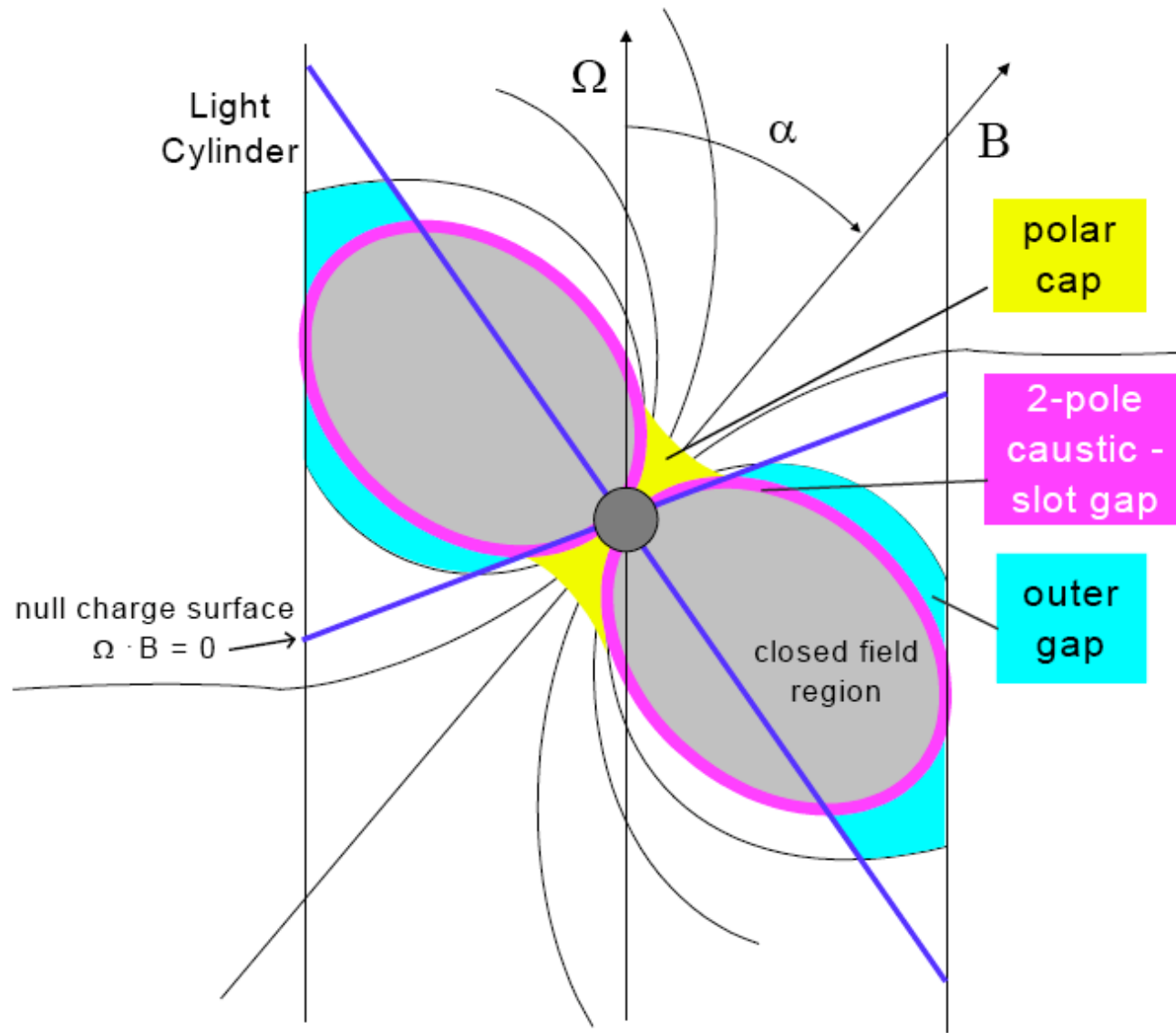
RADIAZIONE EM DA PULSAR

P
U
L
S
A
R
S

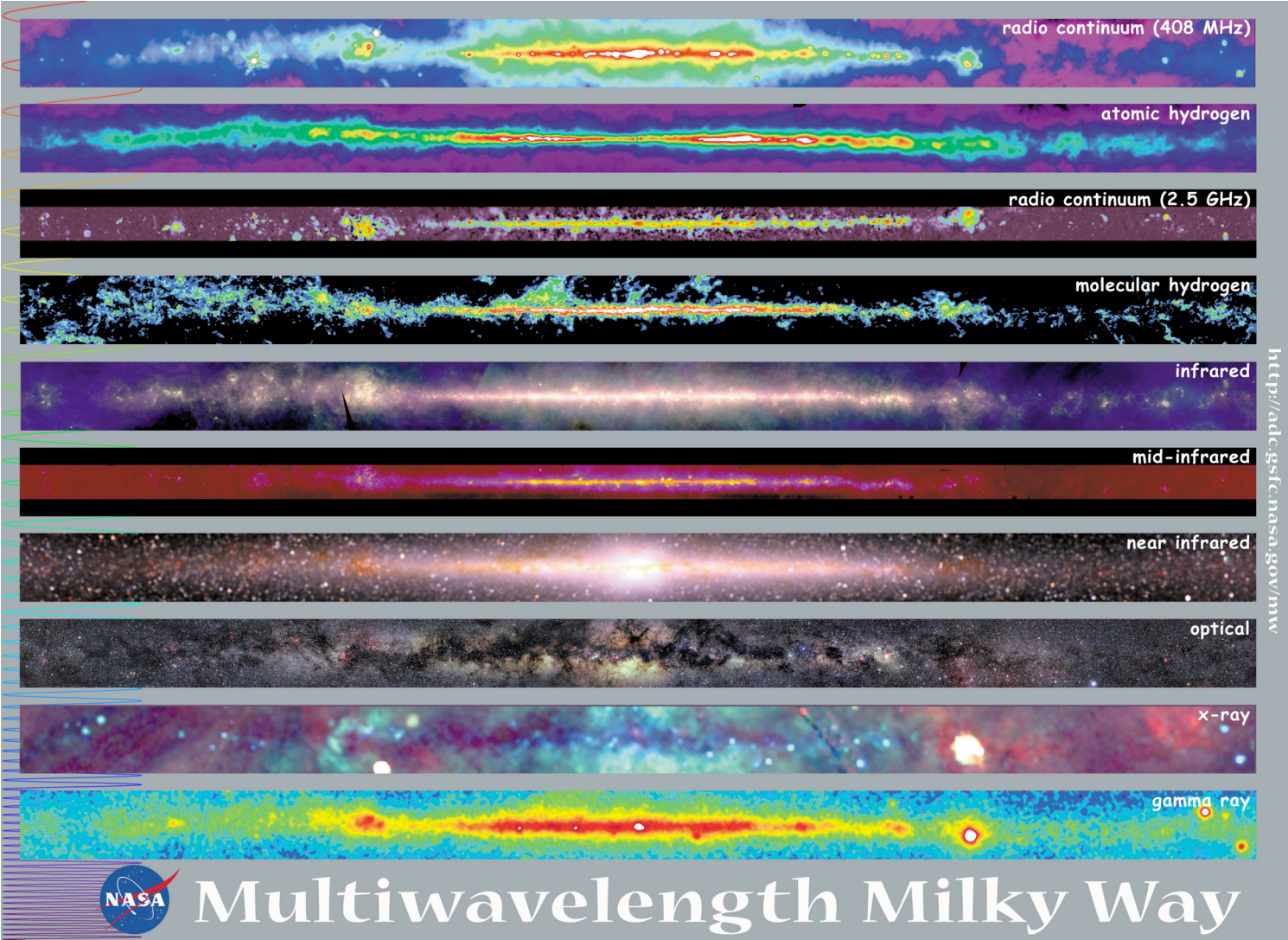


Multiwavelength light curves of the seven pulsars detected by GRO.

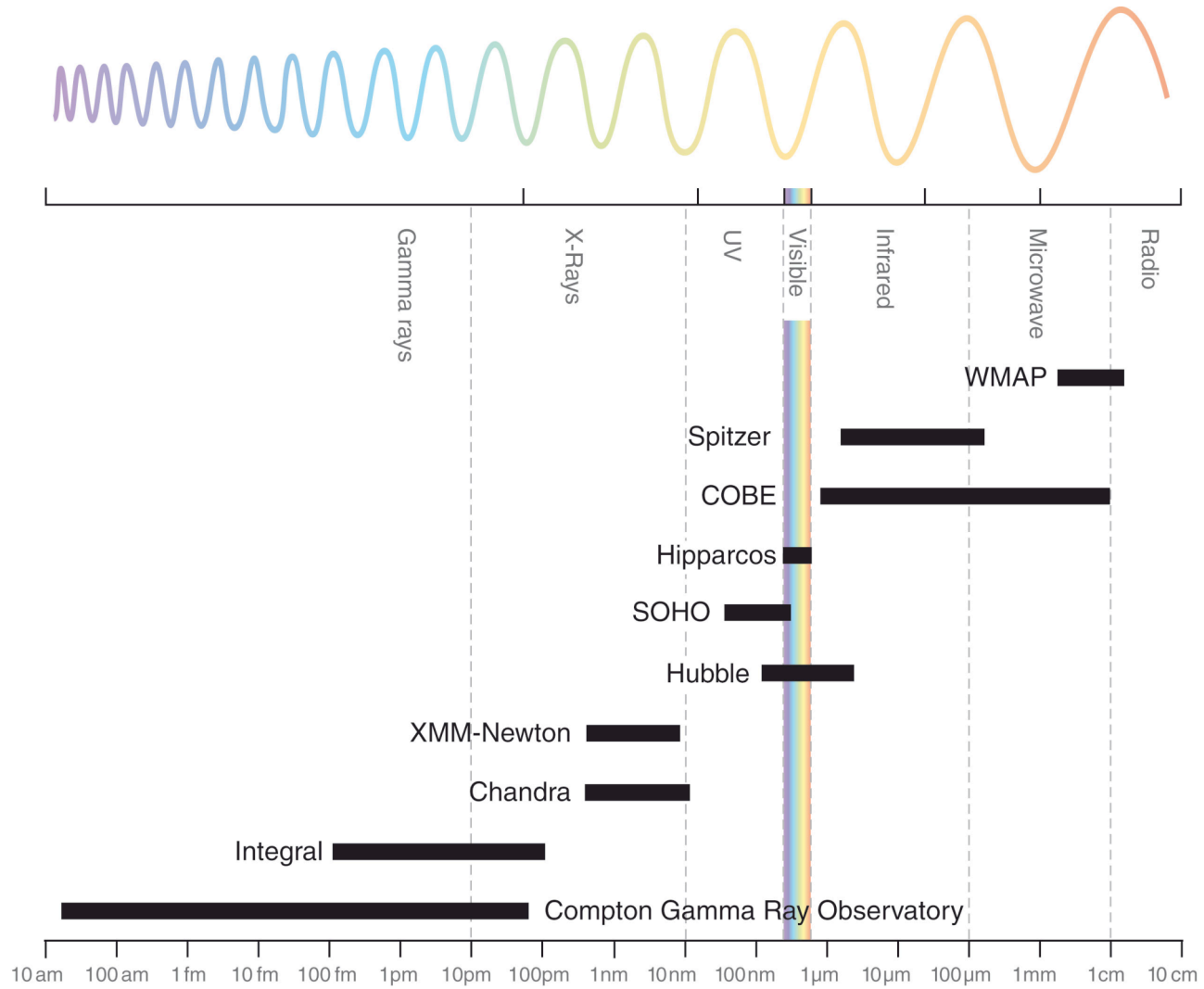
PULSAR: MODELLI EMISSIONE



The Galaxy – I



Space Observatories

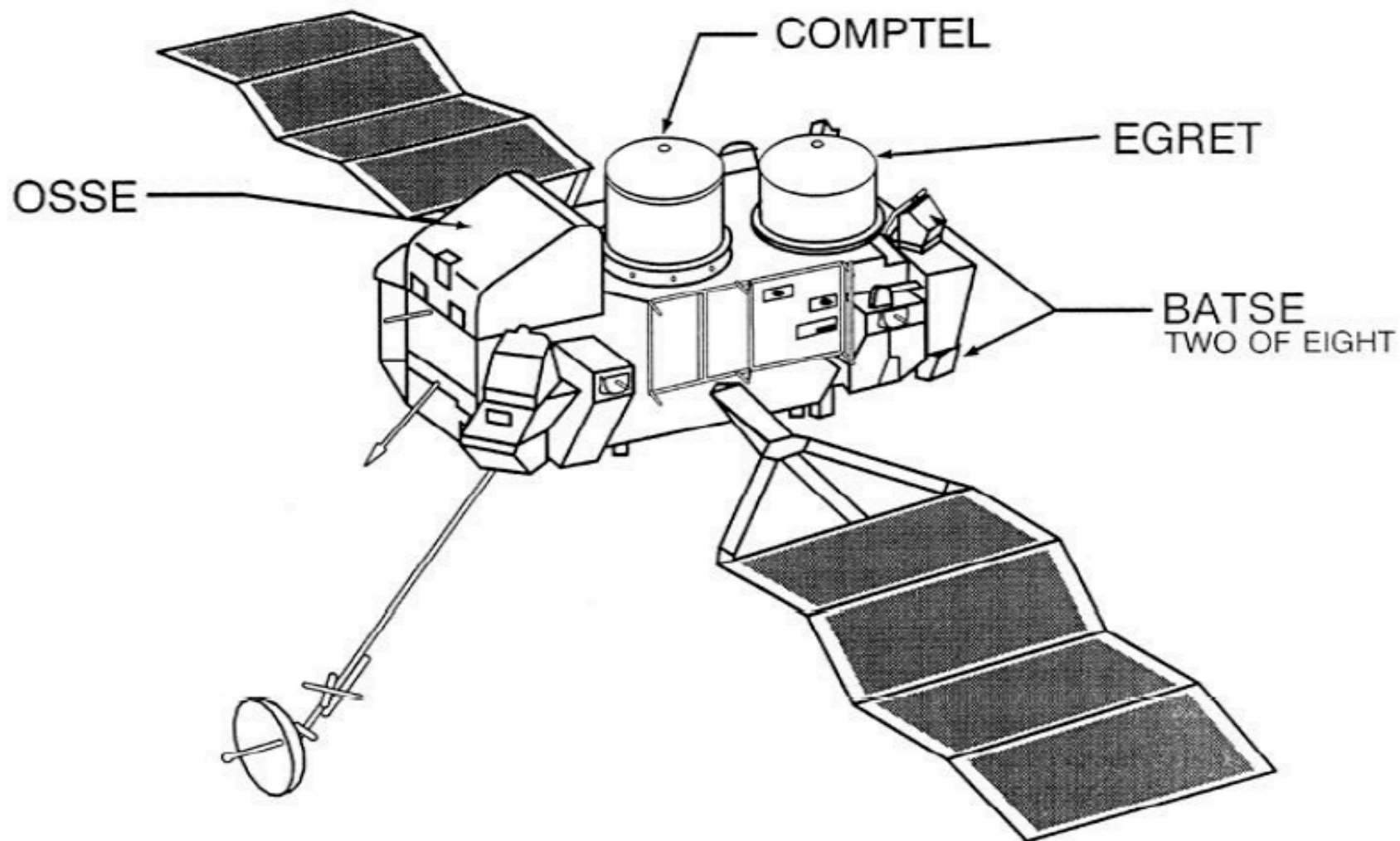


Compton Observatory CGRO

- Compton aveva 4 sistemi strumentali per la rivelazione di radiazione elettromagnetica da 30 keV a 30 GeV. Nell'ordine crescente di copertura dello spettro elettromagnetico, gli strumenti sono:
- Burst And Transient Source Experiment ([BATSE](#))
- Oriented Scintillation Spectrometer Experiment ([OSSE](#))
- Imaging Compton Telescope ([COMPTEL](#))
- Energetic Gamma Ray Experiment Telescope ([EGRET](#))
- CGRO è stato lanciato nel 1991 ed è stato rimosso nel 2000

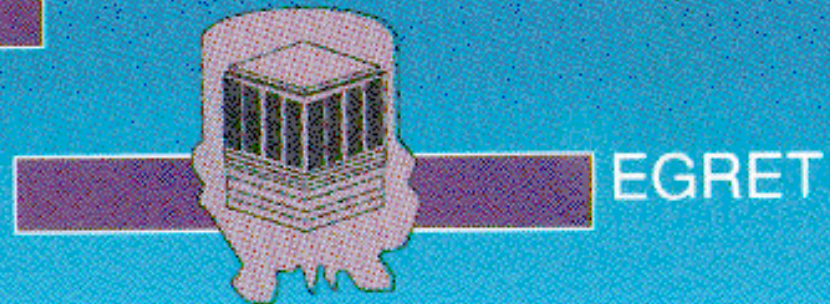
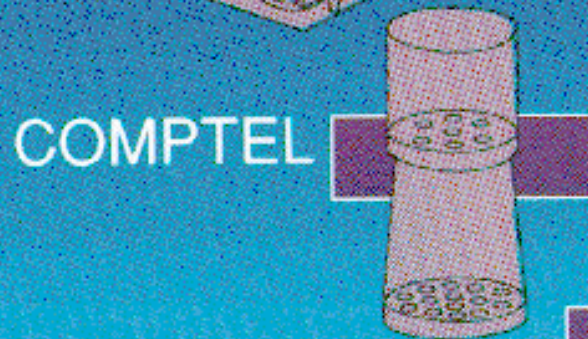
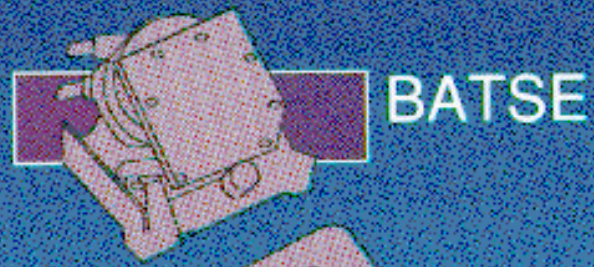
GAMMA RAY OBSERVATORY

COMPTON OBSERVATORY INSTRUMENTS



GRO Instruments-Energy Ranges

10keV 100keV 1MeV 10MeV 100MeV 1GeV 10Gev 100Gev

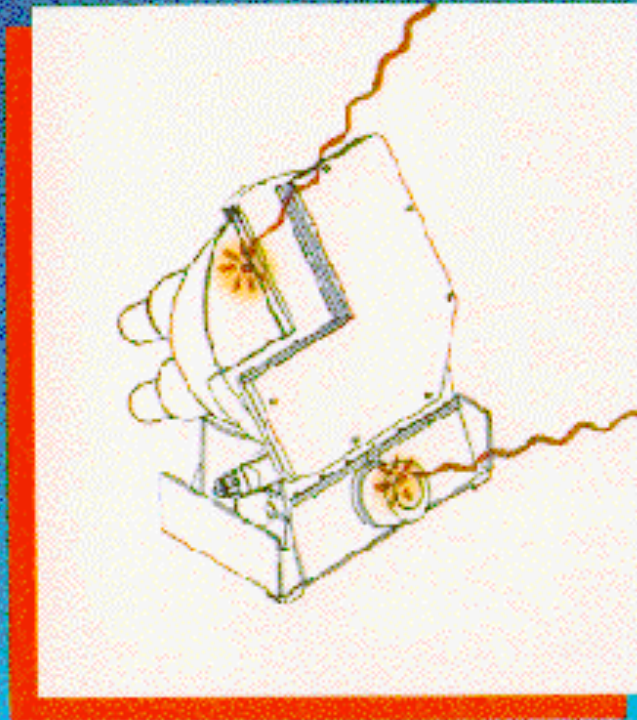
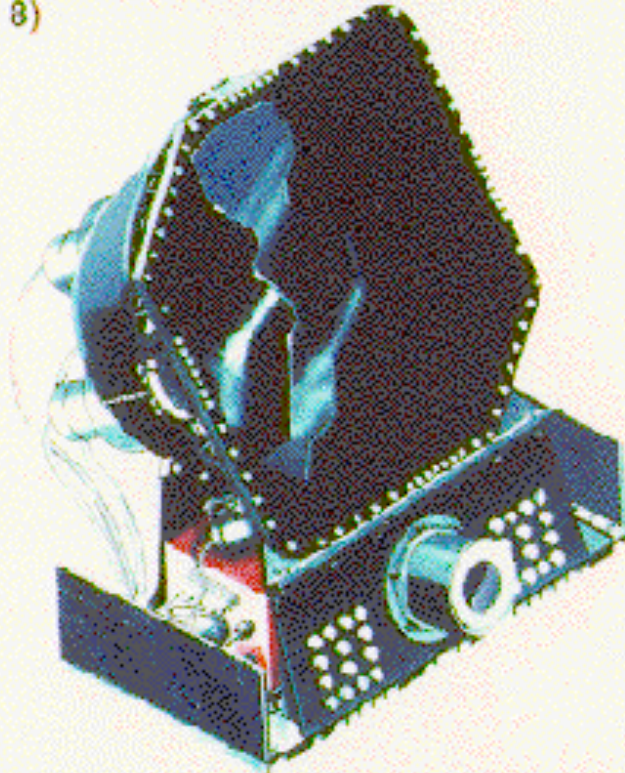


Sommario caratteristiche CGRO

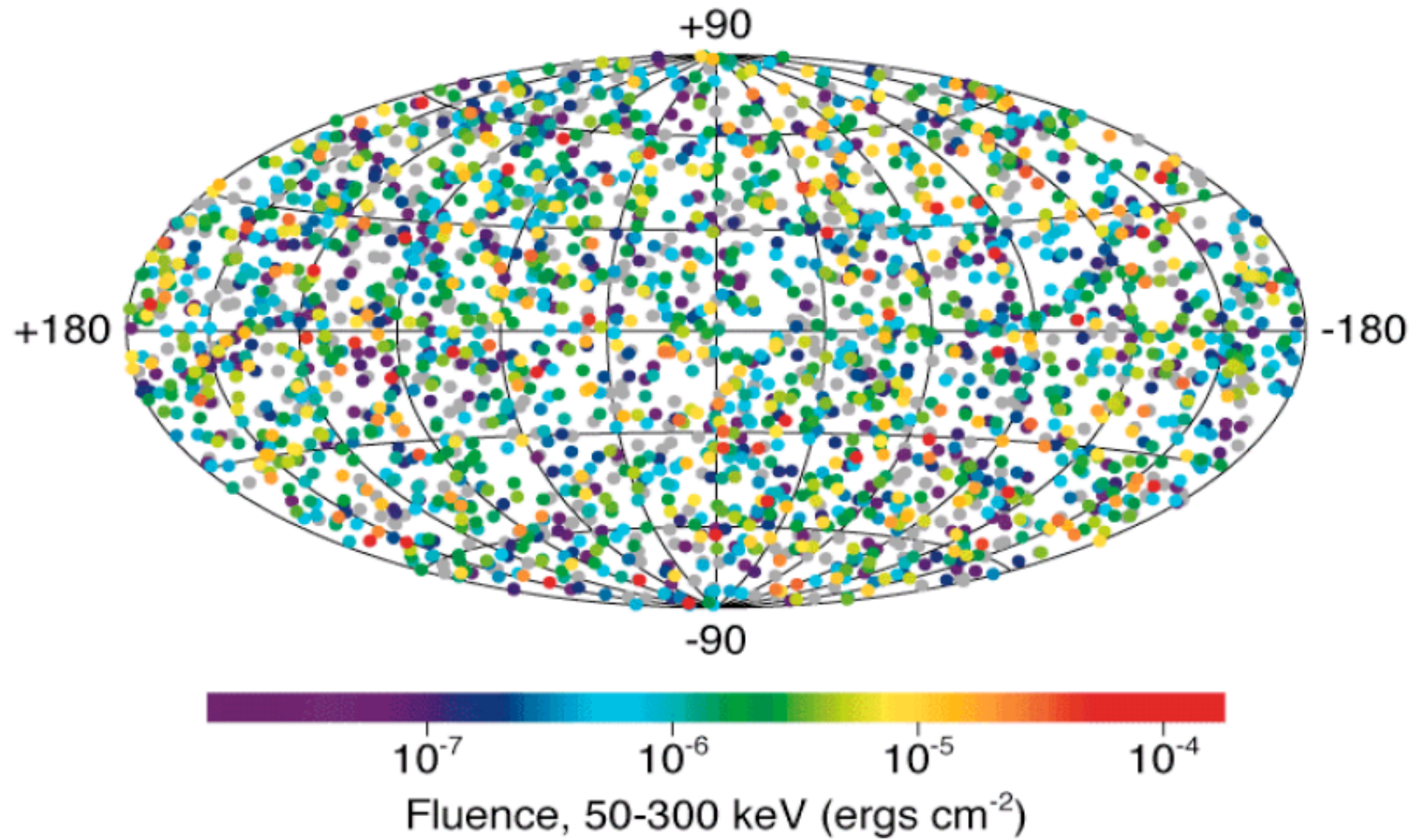
| | OSSE | COMPTEL | EGRET | BATSE | BATSE |
|--|---|--|---|--|---|
| | | | | LARGE AREA | SPECTROSCOPY |
| ENERGY RANGE (MeV) | 0.06 to 10.0 | 0.8 to 30.0 | 20 to 3×10^4 | 0.03 to 1.9 | 0.015 to 110 |
| ENERGY RESOLUTION (FWHM) | 12.5% at 0.2 MeV 6.8% at 1.0 MeV 4.0% at 5.0 MeV | 8.8% at 1.27 MeV 6.5% at 2.75 MeV 6.3% at 4.43 MeV | ~20% 100 to 2000 MeV | 32% at 0.06 MeV 27% at 0.09 MeV 20% at 0.66 MeV | 8.2% at 0.09 MeV 7.2% at 0.66 MeV 5.8% at 1.17 MeV |
| EFFECTIVE AREA (cm ²) | 2013 at 0.2 MeV 1480 at 1.0 MeV 569 at 5.0 MeV | 25.8 at 1.27 MeV 29.3 at 2.75 MeV 29.4 at 4.43 MeV | 1200 at 100 MeV 1600 at 500 MeV 1400 at 3000 MeV | 1000 ea. at 0.03 MeV 1800 ea. at 0.1 MeV 550 ea. at 0.66 MeV | 100 ea. at 0.3 MeV 127 ea. at 0.2 MeV 52 ea. at 3 MeV |
| POSITION LOCALIZATION (STRONG SOURCE) | 10 arc min square error box (special mode; 0.1 x Crab spectrum) | 0.5 - 1.0 deg (90% confidence 0.2 x Crab spectrum) | 5 to 10 arc min (1s radius; 0.2 x Crab spectrum) | 3_ (strong burst) | — |
| FIELD OF VIEW | 3.8_ x 11.4_ | ~ 64_ | ~ 0.6 sr | 4 π sr | 4 π sr |
| MAXIMUM EFFECTIVE GEOMETRIC FACTOR (cm ² sr) | 13 | 30 | 1050 (~ 500 MeV) | 15000 | 5000 |
| ESTIMATED SOURCE SENSITIVITY (5 x 10 ⁵ sec; on source, off Galactic Plane) | LINE (3-8) x 10 ⁻⁵ cm ⁻² s ⁻¹ CONTINUUM 3 x 10 ⁻⁷ cm ⁻² s ⁻¹ keV ⁻¹ (@1 MeV) | 1.5 x 10 ⁻⁵ to 6 x 10 ⁻⁵ cm ⁻² s ⁻¹ 1.6 x 10 ⁻⁴ cm ⁻² s ⁻¹ (3 s detection, 1-30 MeV) | 7 x 10 ⁻⁸ cm ⁻² s ⁻¹ (> 100 MeV) 2 x 10 ⁻⁸ cm ⁻² s ⁻¹ (> 1000 MeV) | 3 x 10 ⁻⁸ erg cm ⁻² (1 sec-burst) | 0.4% equivalent width (5 sec integration) |

Burst and Transient Source Experiment (BATSE)

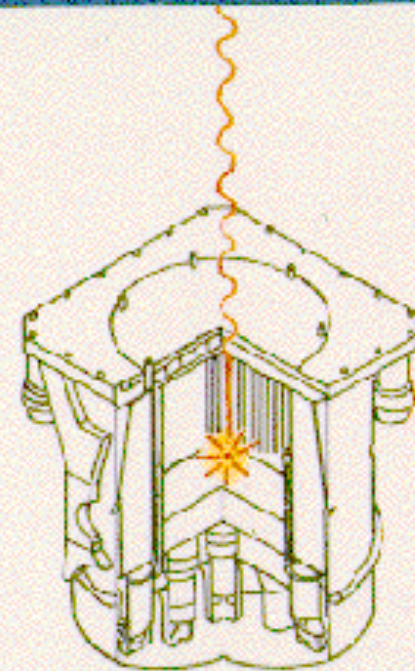
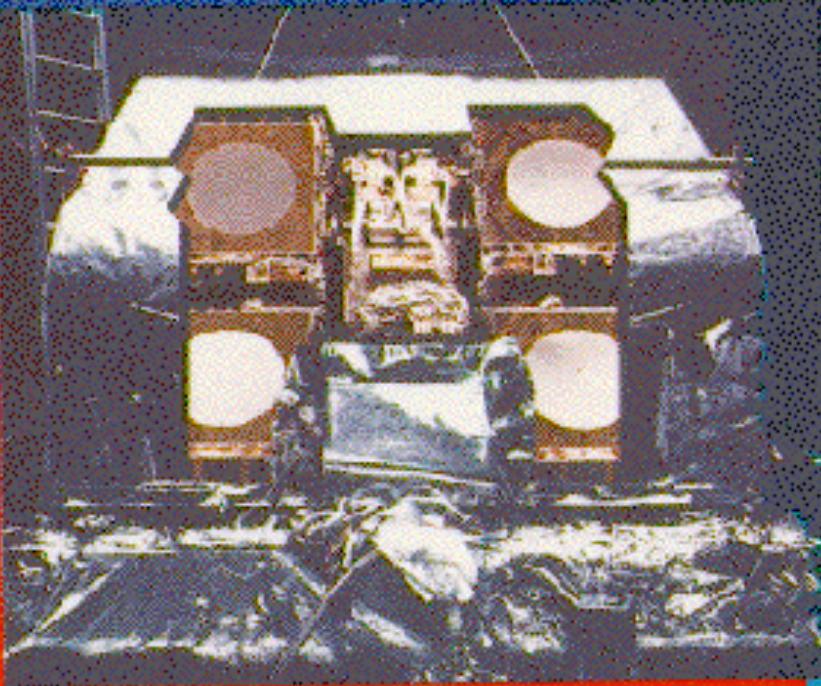
BATSE
DETECTOR MODULE
(1 OF 8)



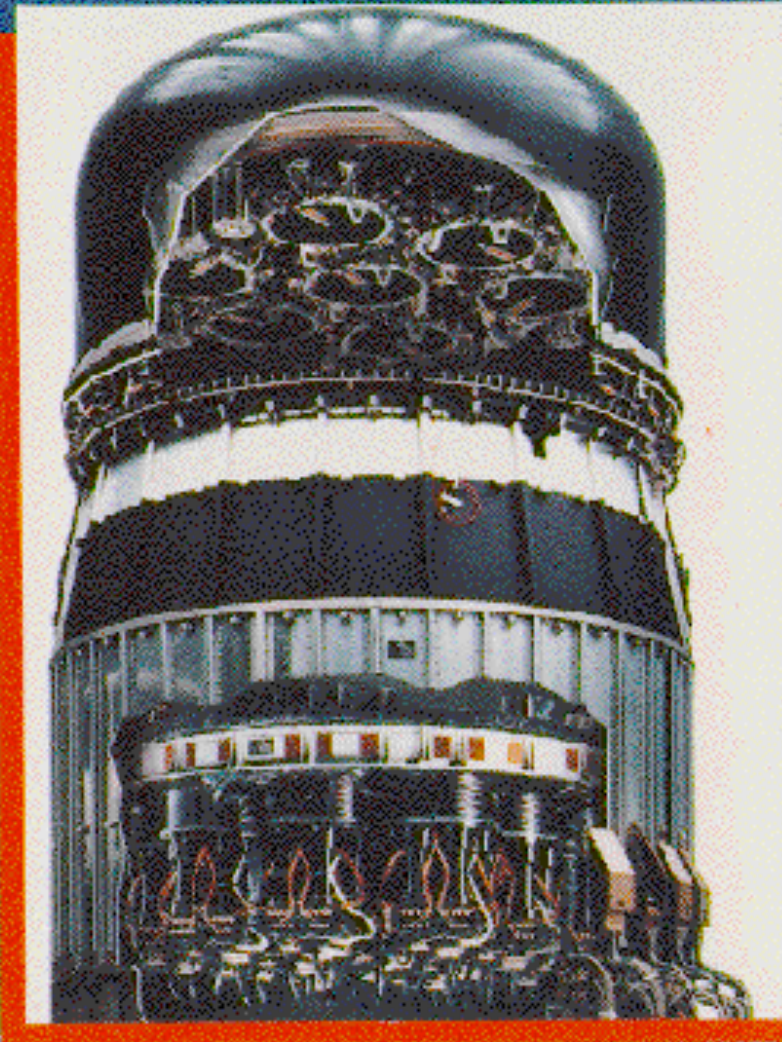
BATSE: 2512 GRB



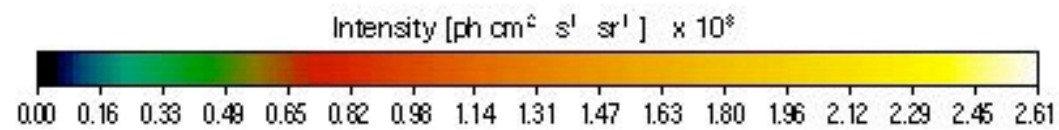
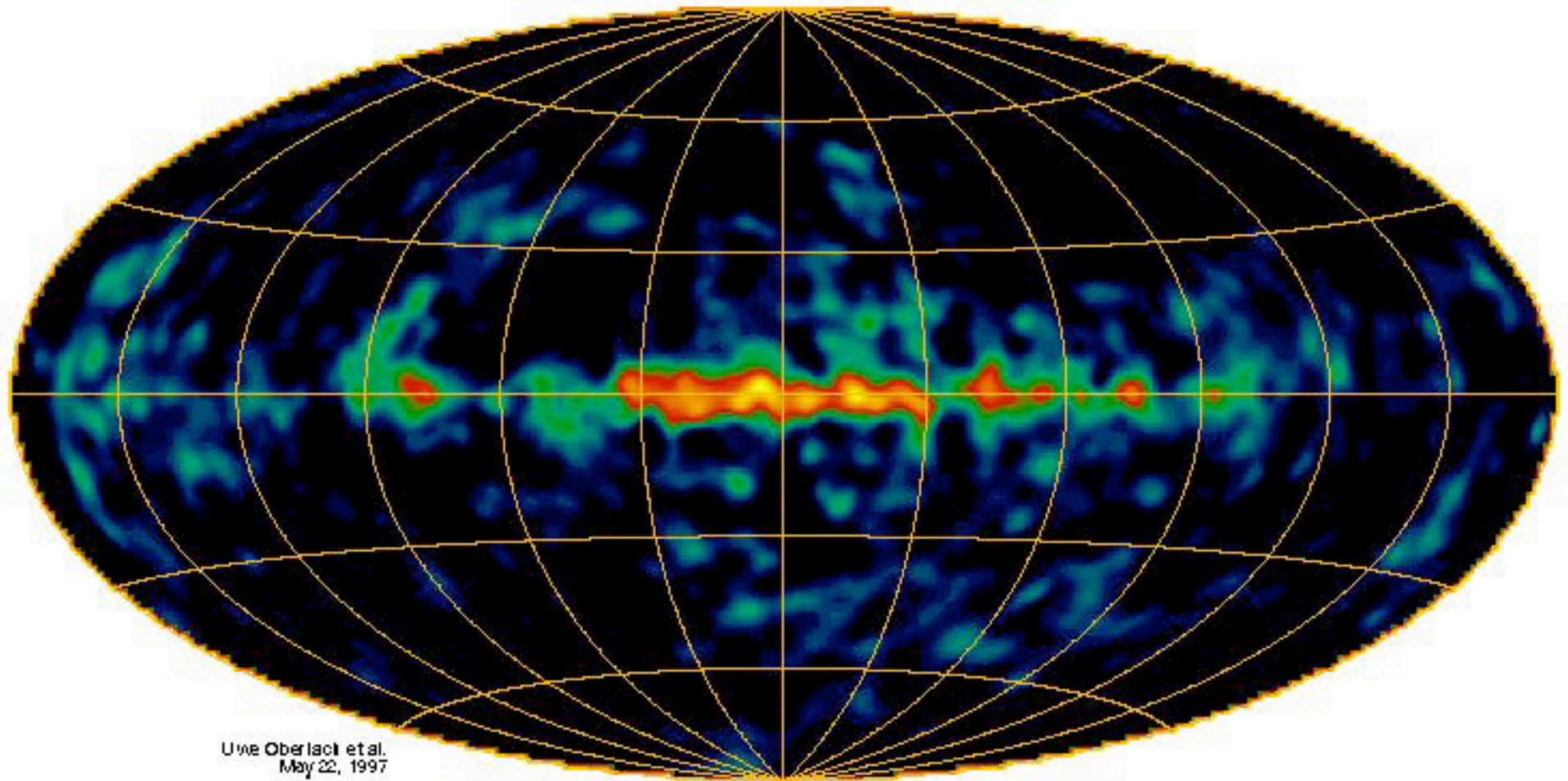
Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (OSSE)



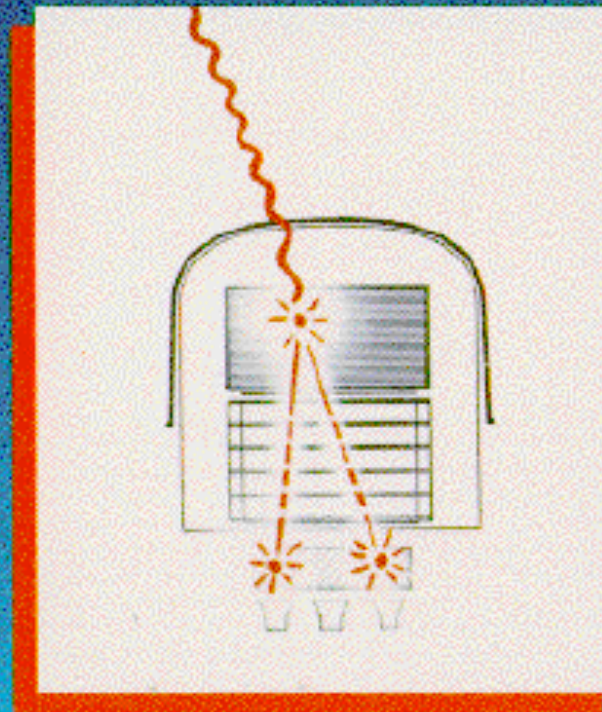
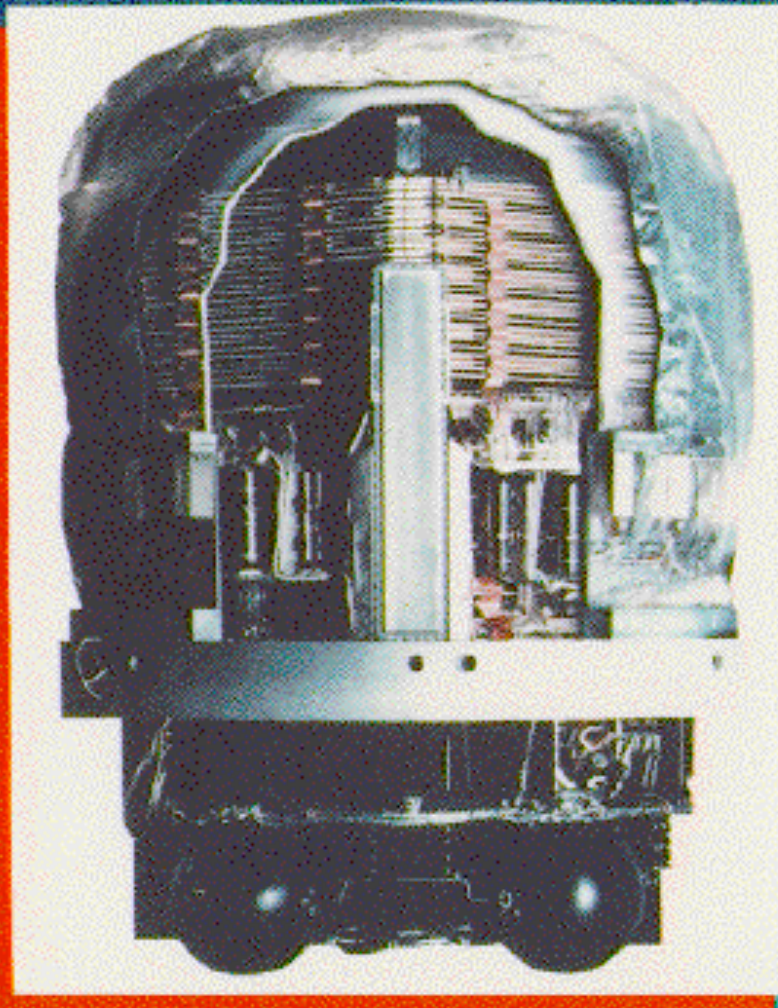
Imaging Compton Telescope (COMPTEL)



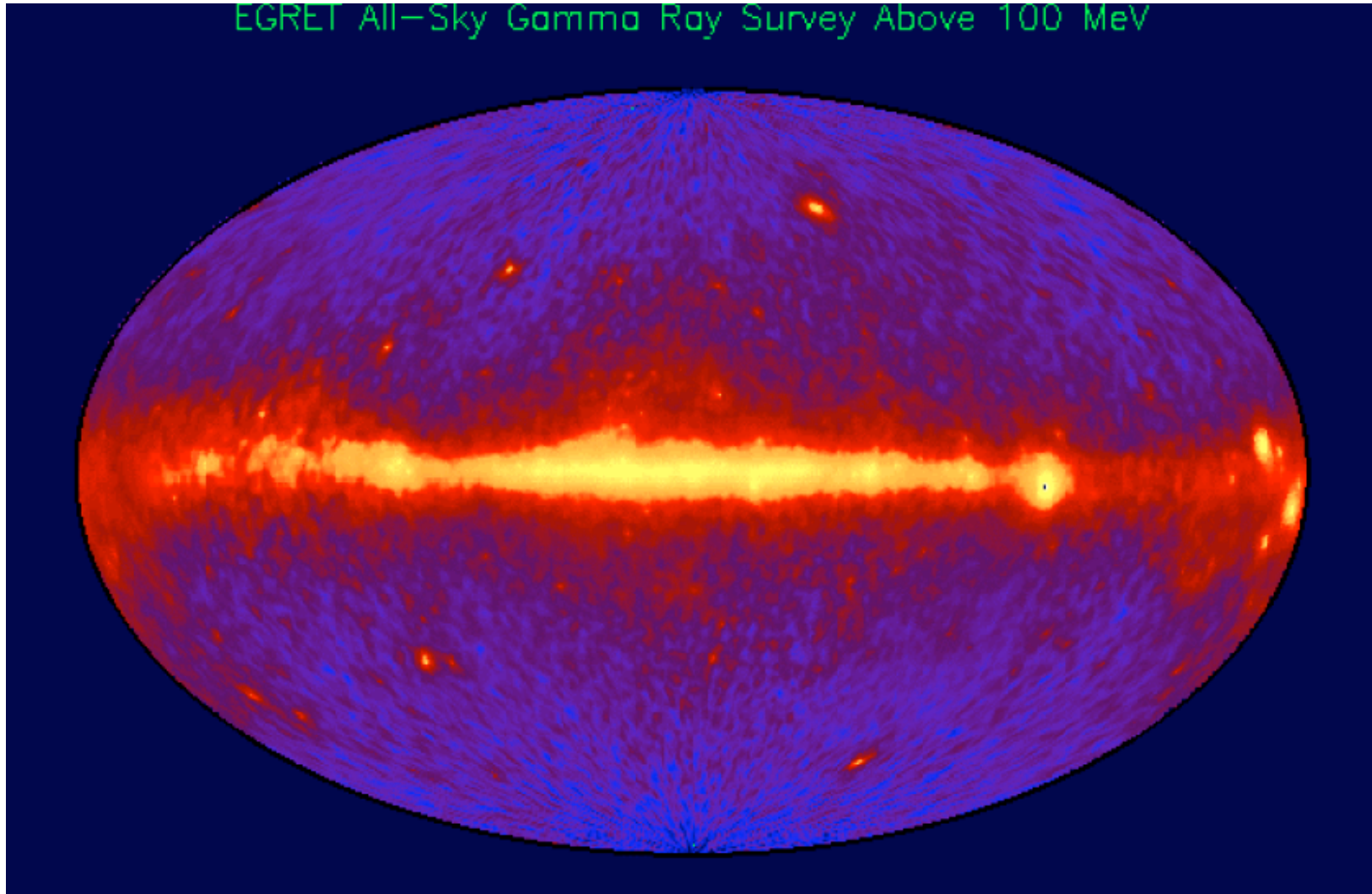
CGRO / COMPTEL 1.8 MeV, 5 Years Observing Time



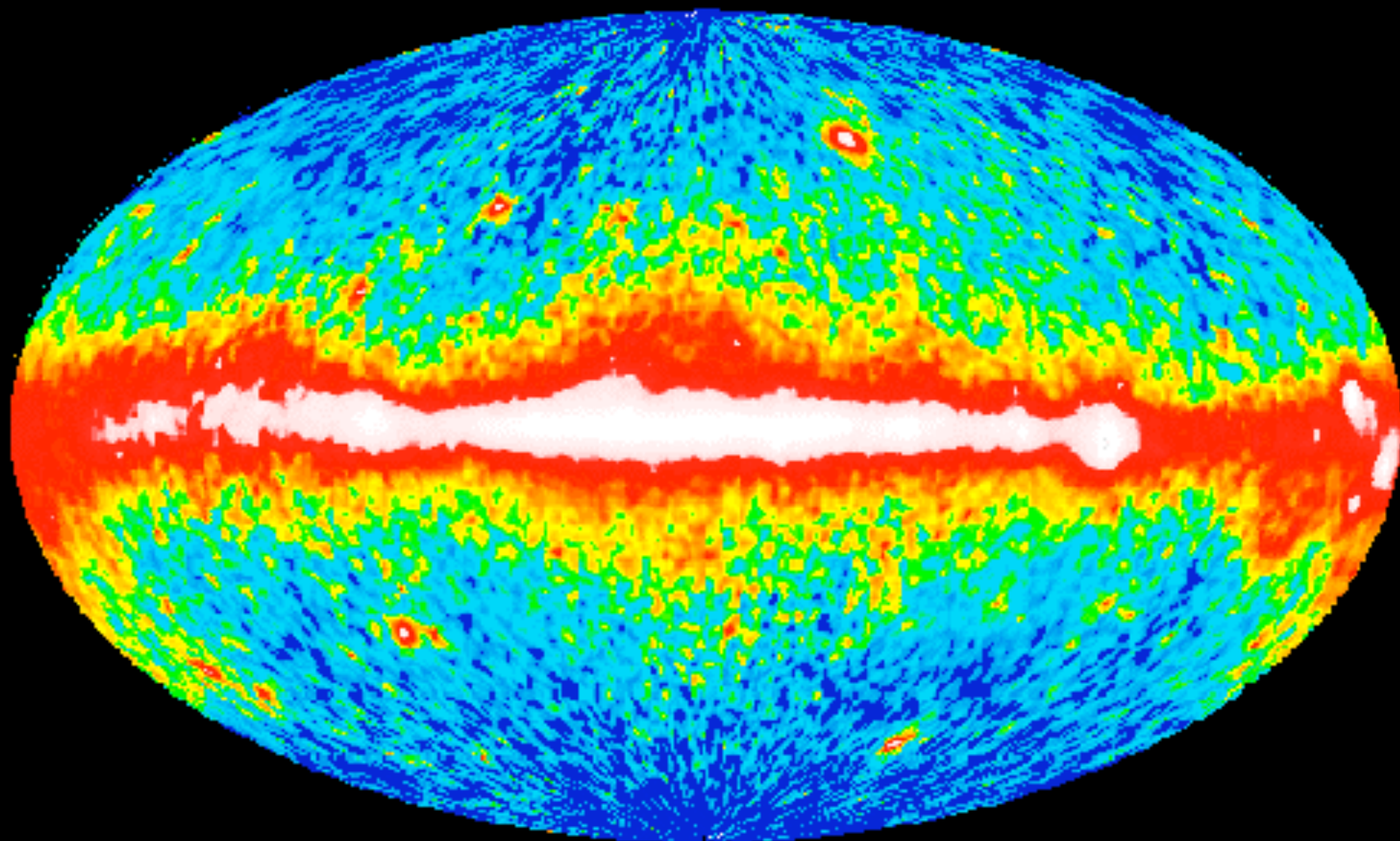
Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)



EGRET γ SURVEY $E_\gamma > 100$ MeV



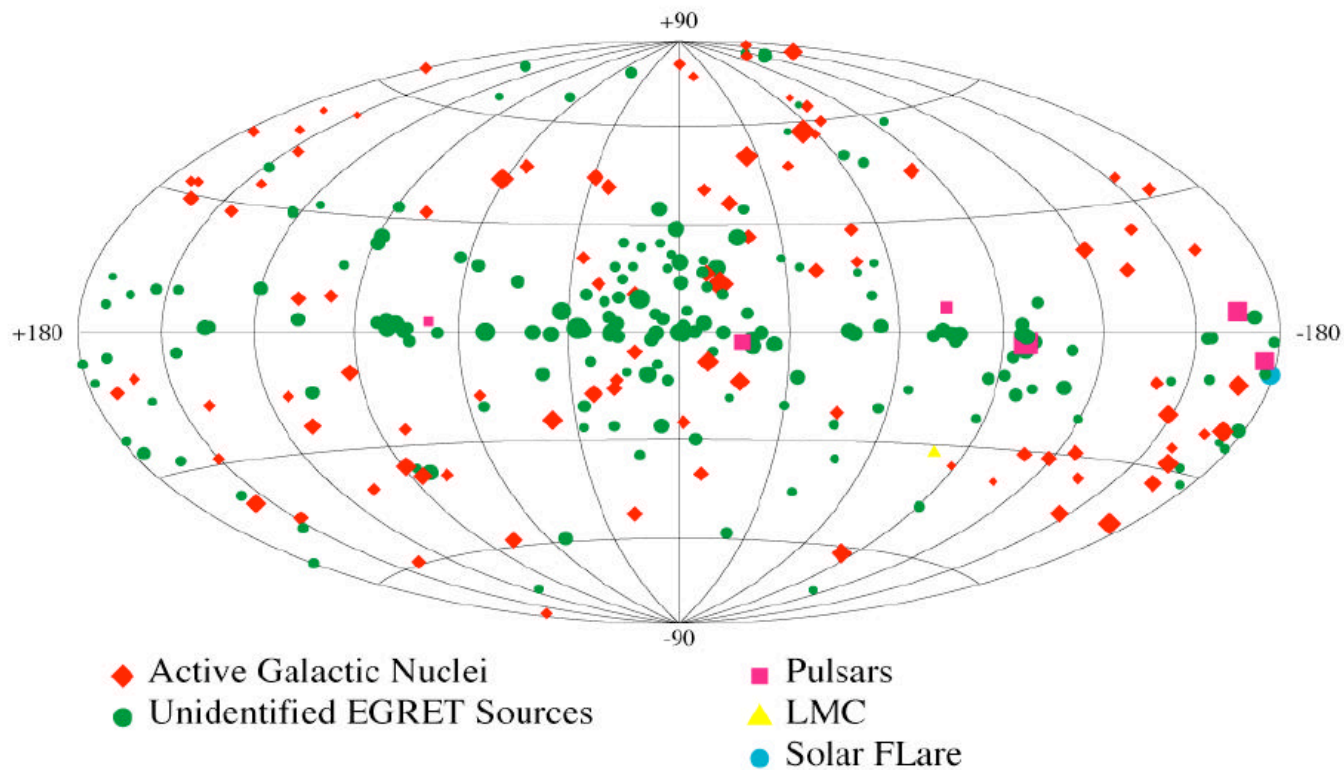
EGRET All-Sky Gamma Ray Survey Above 100 MeV



SORGENTI GAMMA

Third EGRET Catalog

$E > 100 \text{ MeV}$



LMC: Large Magellano Clouds