

Astrofisica e particelle elementari

aa 2010-11

Lezione 6

- Origine dei gamma cosmici
- Sorgenti
- Osservatori nello spazio
- Compton Gamma Ray Observatory
- Terzo catalogo EGRET
- Beppo-SAX

Bruno Borgia

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 $E_i \gamma$ ricevono in media un'energia

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

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, $\beta=v/c$, $\gamma=E/m$ 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.

(*) $z = \Delta \lambda / \lambda$; red shift per effetto Doppler; $\lambda' = \lambda[(1+\beta)/(1-\beta)]^{1/2} = \lambda (1+z)$

AGN

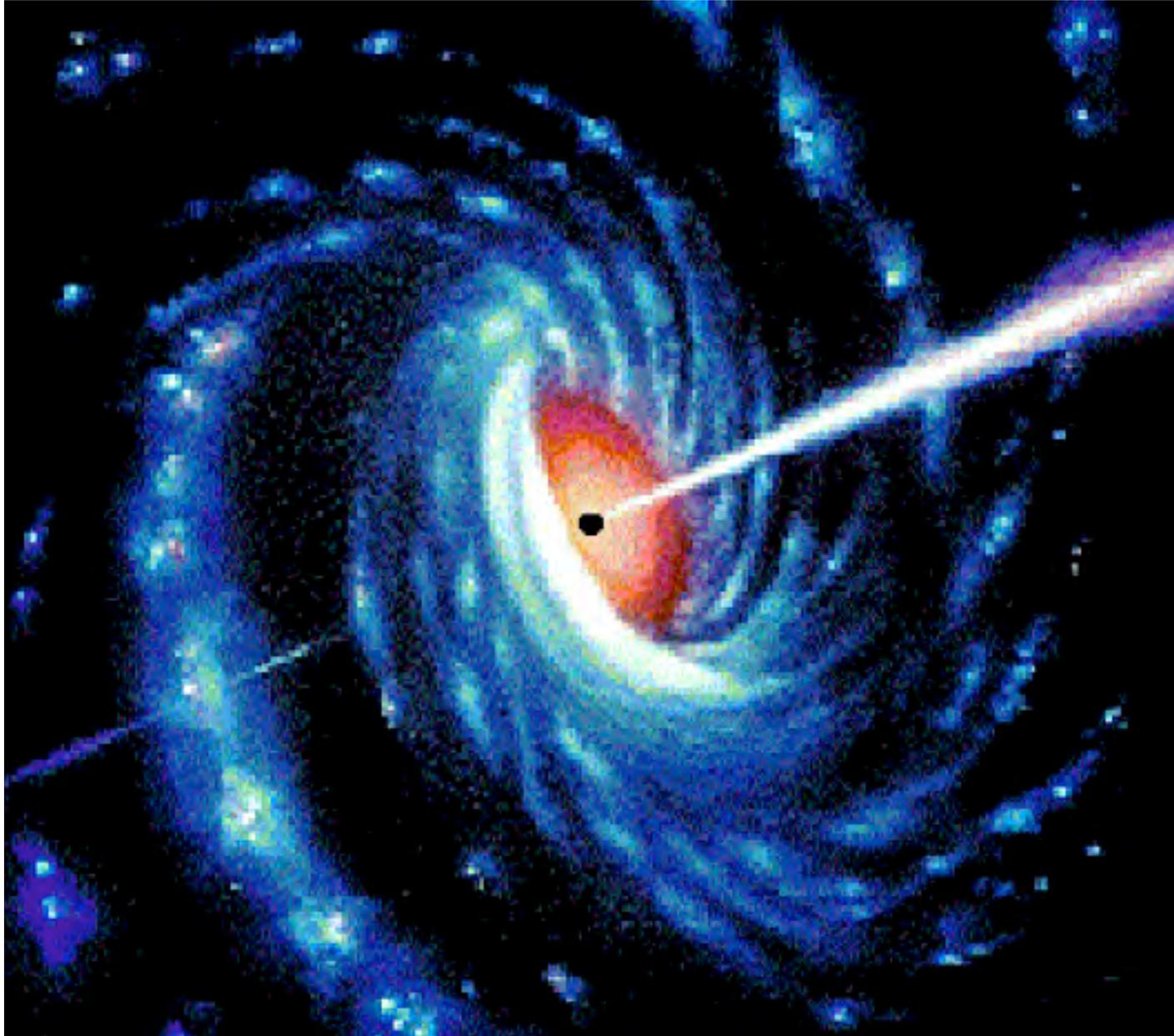
L'osservazione dei nuclei delle galassie mostra che esistono somiglianze tali da supporre che i fenomeni abbiano una origine comune, anche se le attività differiscono quantitativamente. Le caratteristiche delle attività dei nuclei, AGN, sono:

- 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.

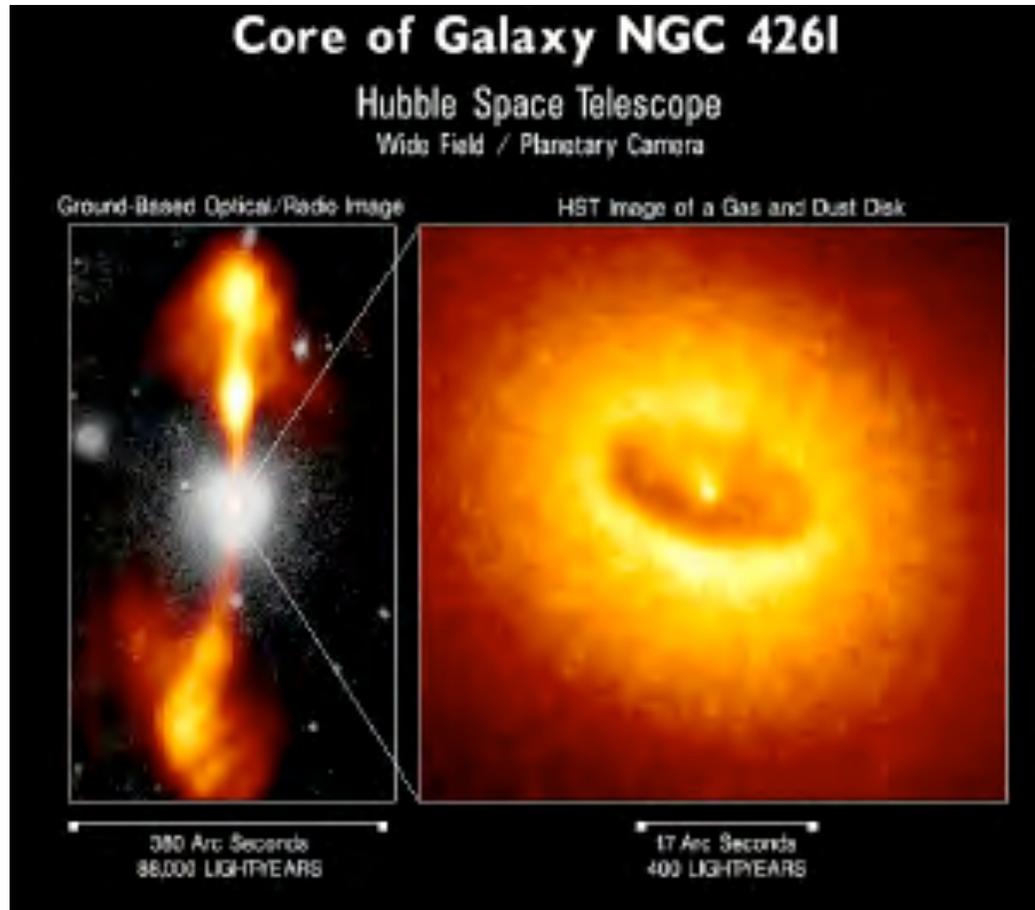
AGN



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

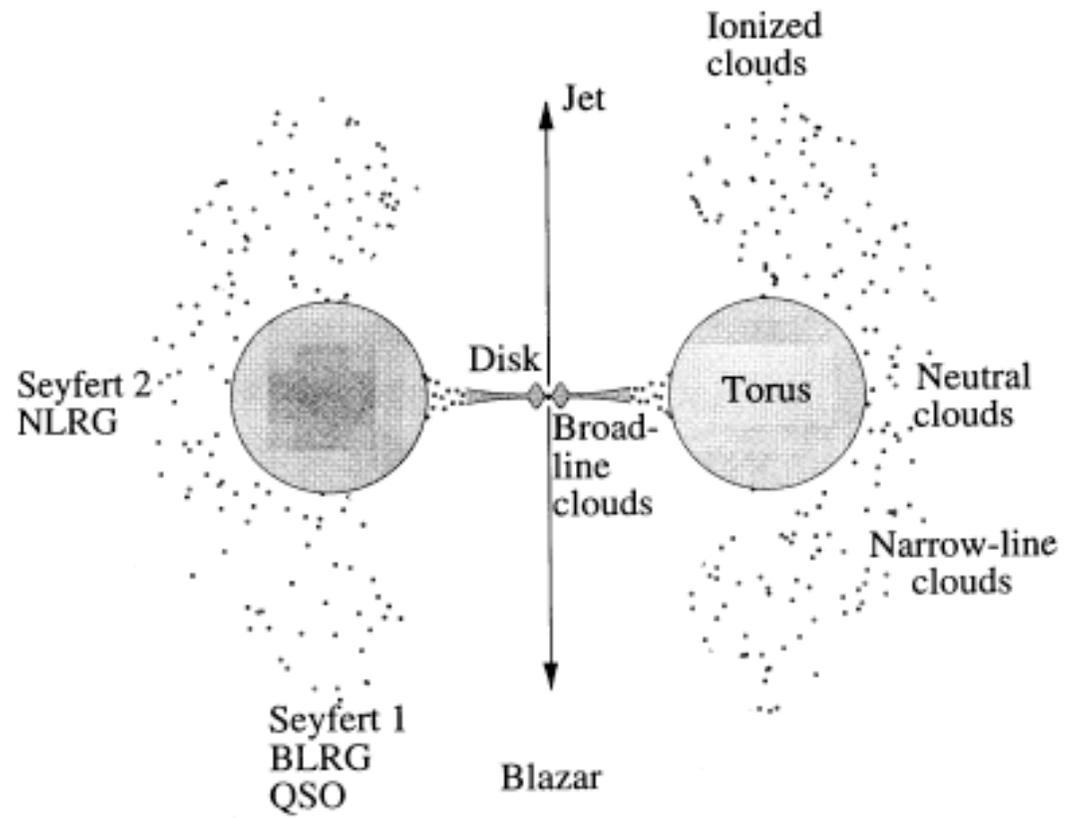


Ground optical/radio

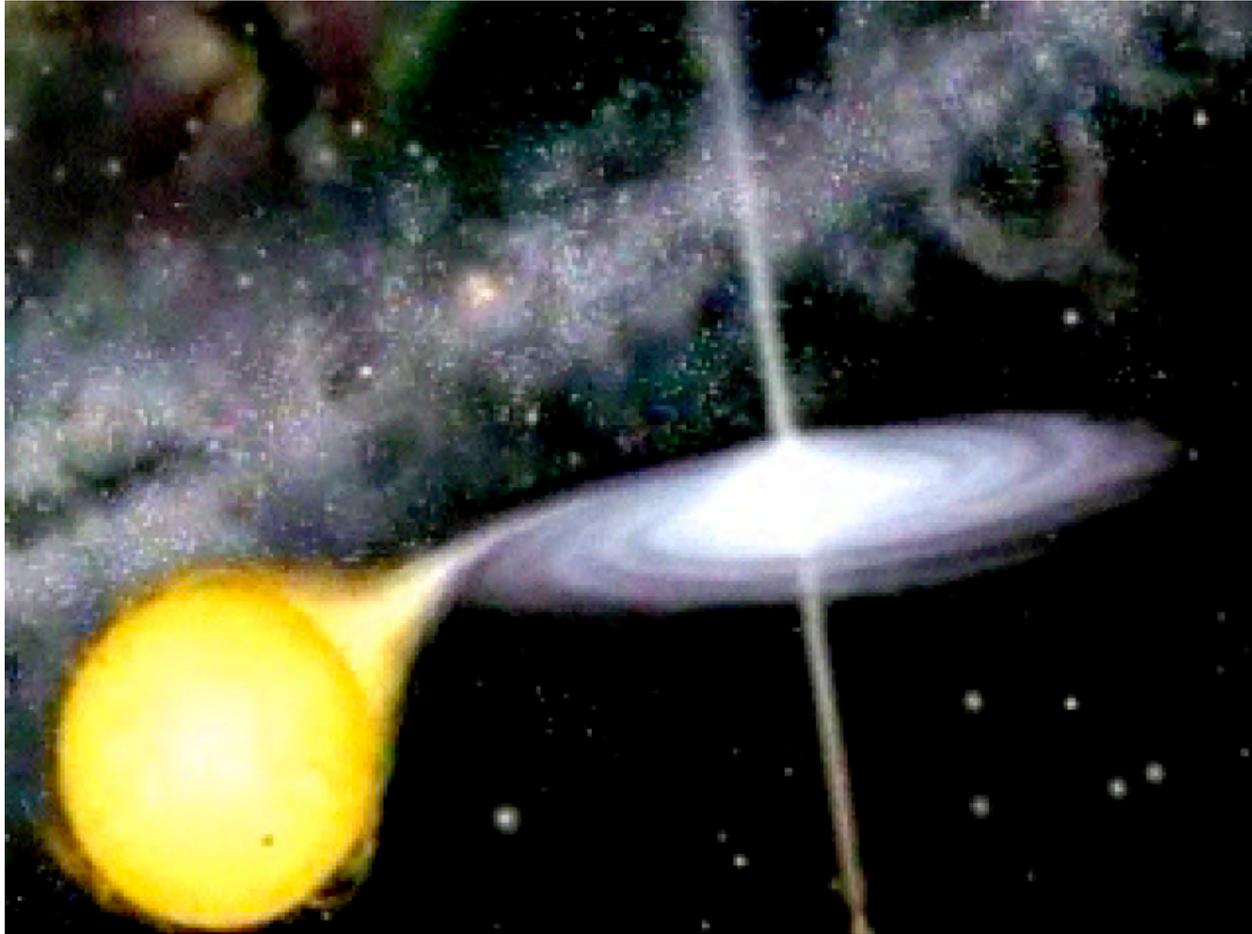
Hubble ST

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

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

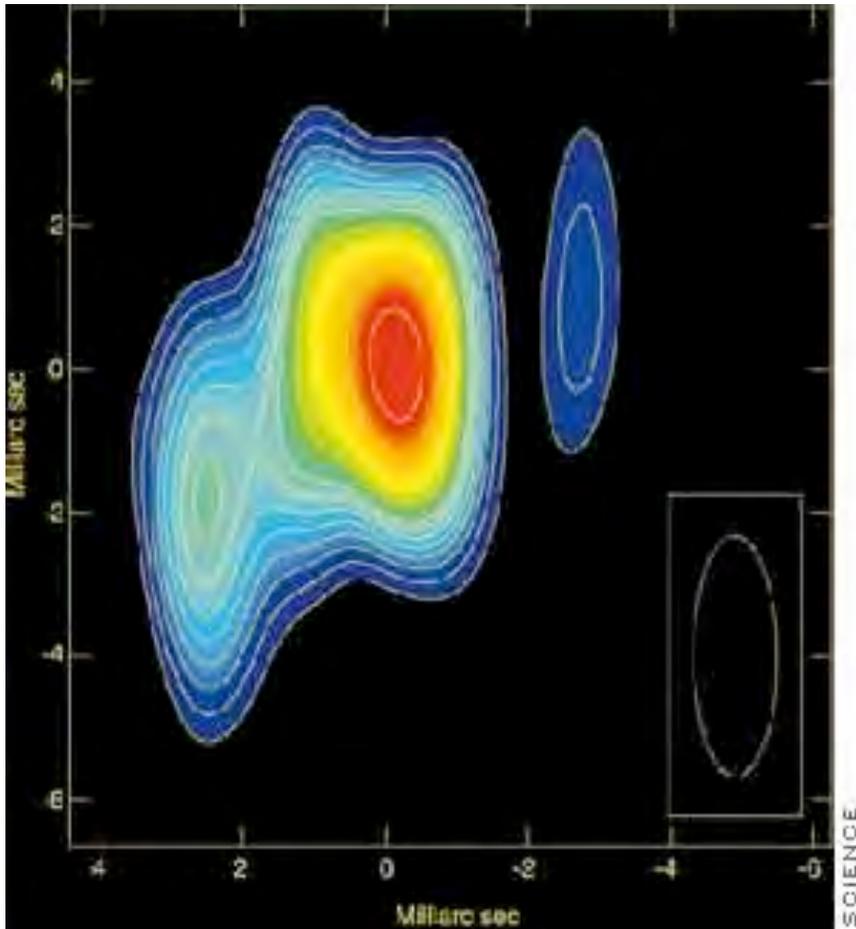
con $\alpha \approx 1$

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.

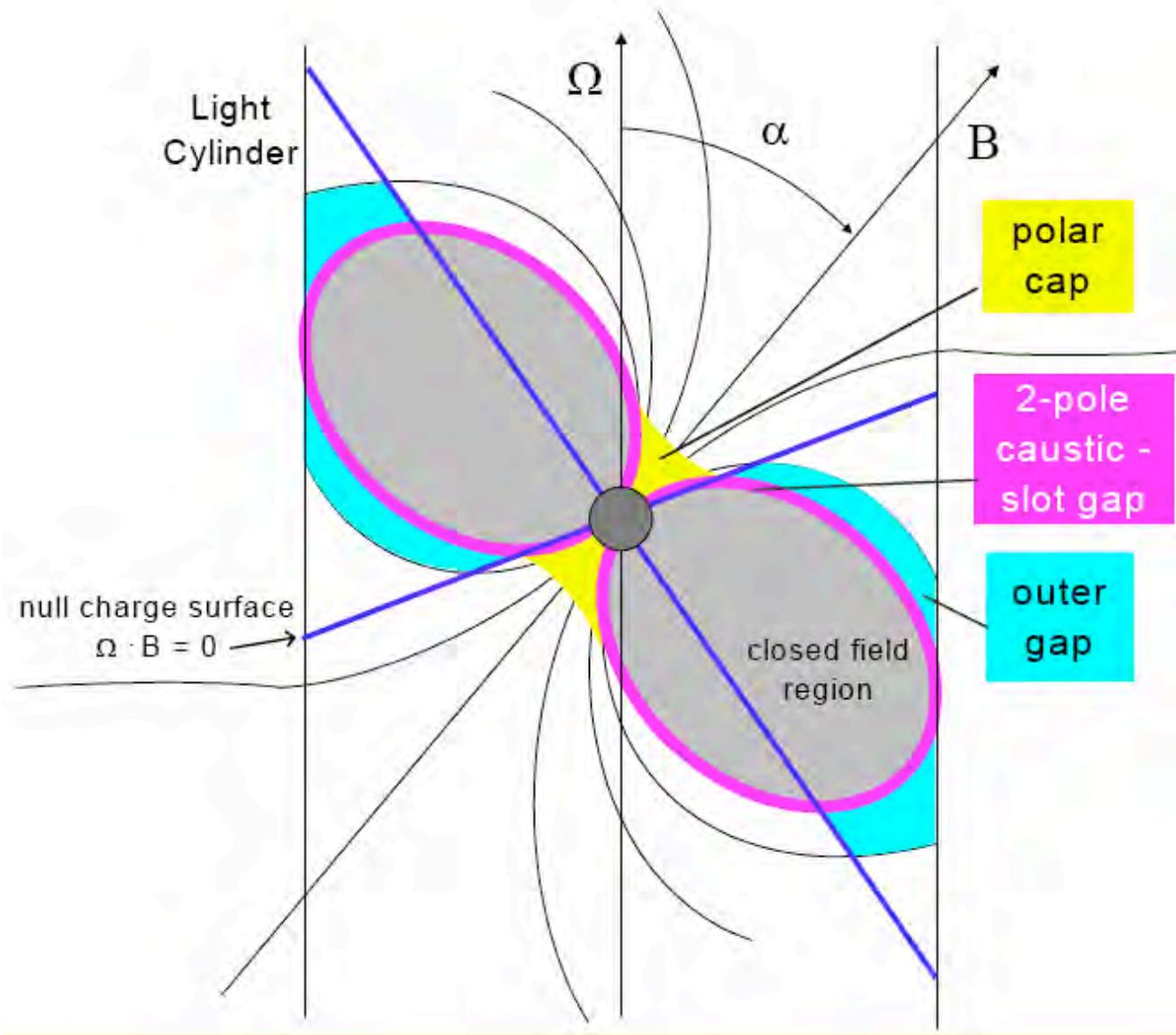
Se inizialmente $B \approx 5 \times 10^{-4}$ T, le linee di forza sono compresse con un rapporto pari \approx al rapporto delle superfici e $B \approx 10^6$ T. Per emettere radiazione gamma col meccanismo della radiazione di sincrotrone occorrono campi $\approx 10^8$ T.

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:

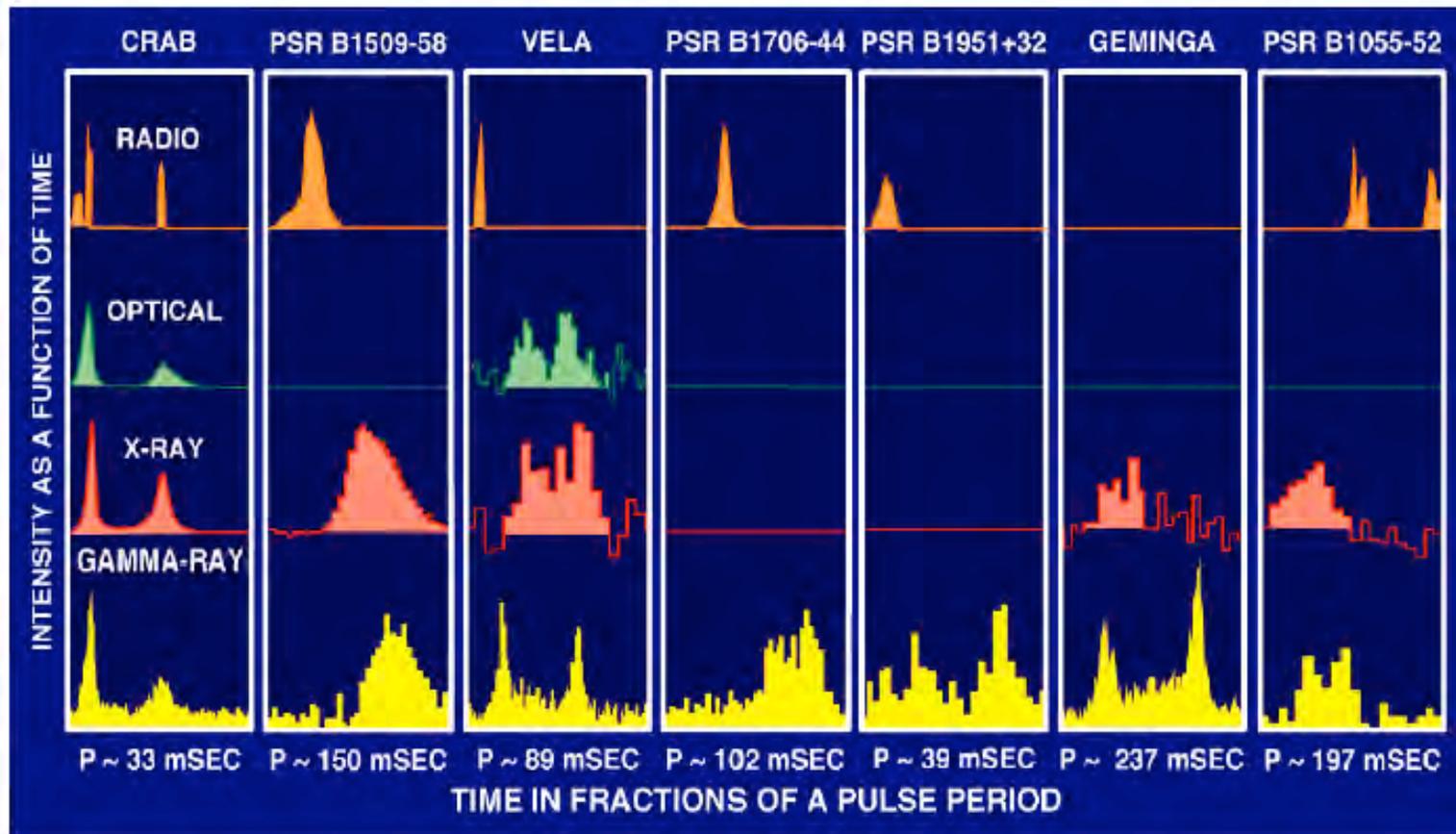
- "polar cap": la regione di emissione è intorno ai poli entro qualche raggio stellare
- "outer gap": la regione di emissione è nella zona di linee di forza del dipolo più chiuse.

PULSAR: MODELLI EMISSIONE



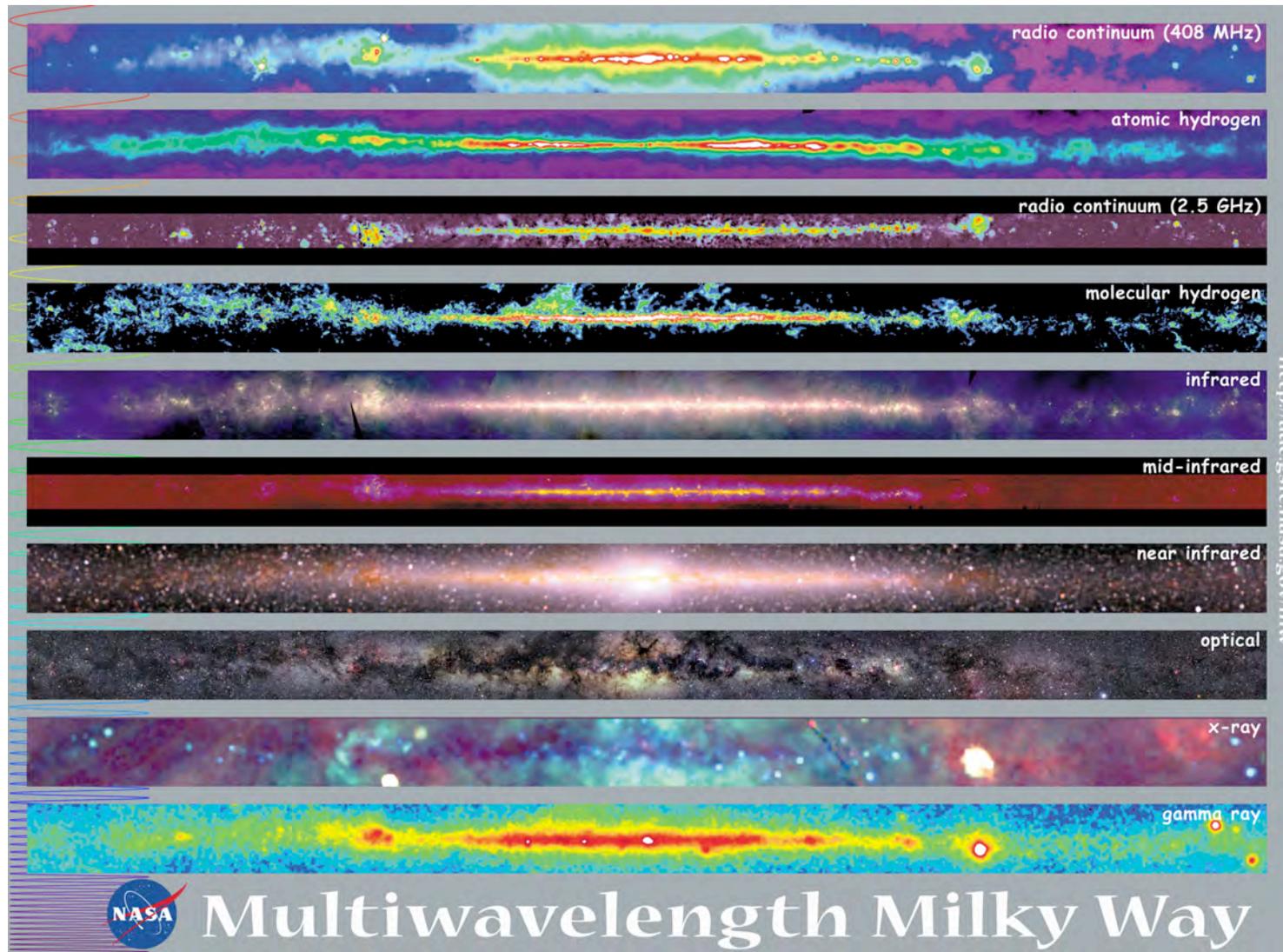
RADIAZIONE EM DA PULSAR

P
U
L
S
A
R
S



Multiwavelength light curves of the seven pulsars detected by GRO.

The Galaxy – I

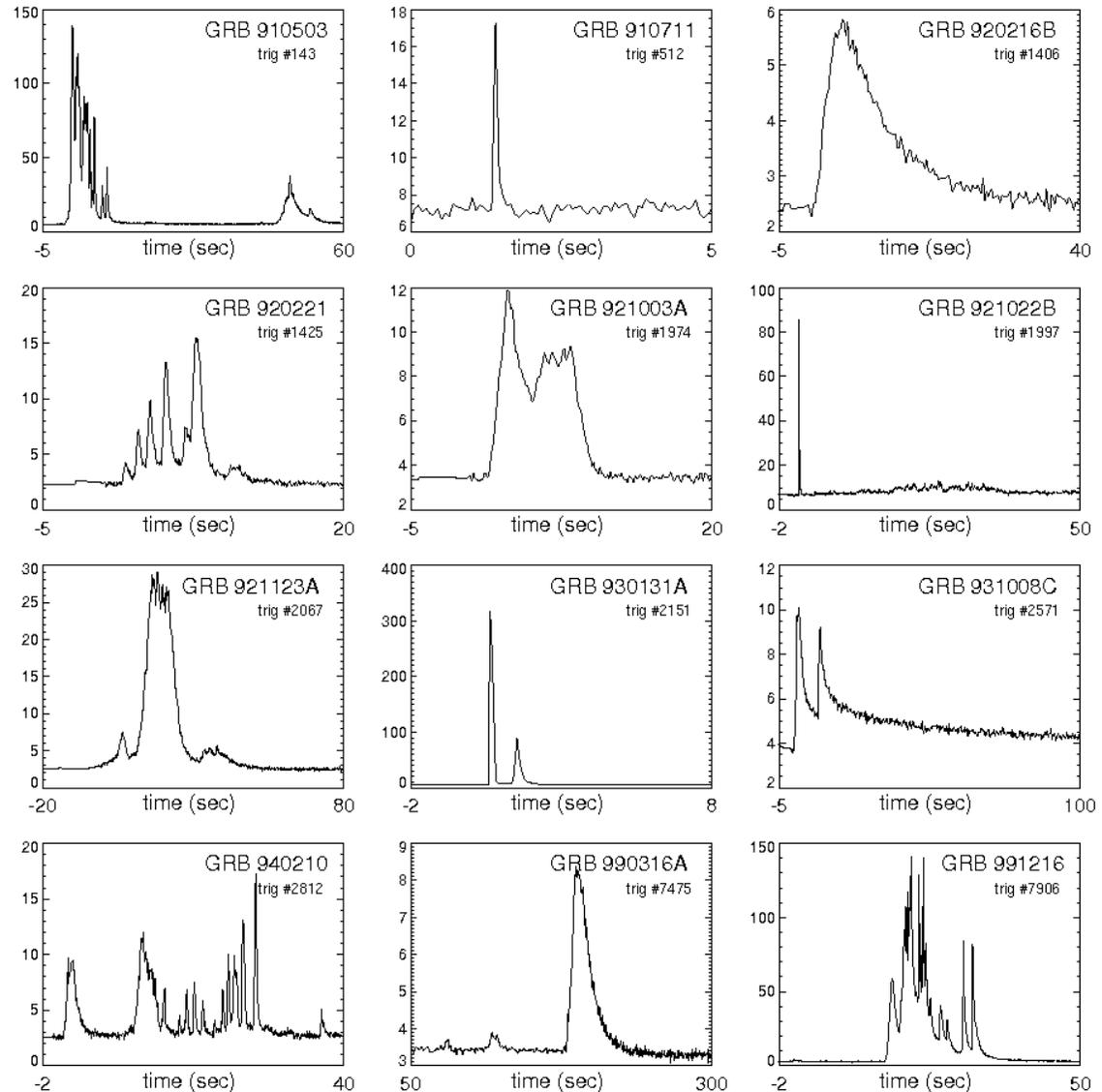


GAMMA RAY BURST

- I Gamma Ray Burst, GRB, sono improvvisi e intensi lampi di raggi gamma principalmente nella regione del MeV che per pochi secondi si manifestano in un cielo generalmente poco illuminato da gamma. Sono osservati ad una frequenza di circa uno al giorno e mentre sono attivi, sono più intensi di ogni altra sorgente di gamma nel cielo compreso il Sole.
- I GRB furono osservati per la prima volta dal 1969 al 1971 dai satelliti militari Vela lanciati per monitorare le esplosioni nucleari come verifica del Trattato per il Bando dei Test Nucleari (NTBT). Nel 1973 i dati furono resi pubblici dopo aver concluso che l'origine non era terrestre.
- Il satellite Beppo-SAX con l'allerta agli osservatori terrestri permise l'osservazione ottica del fenomeno e quindi la misura del red shift. Le sorgenti dei GRB sono a distanze cosmologiche dell'ordine di miliardi di anni luce.

GRB vs T

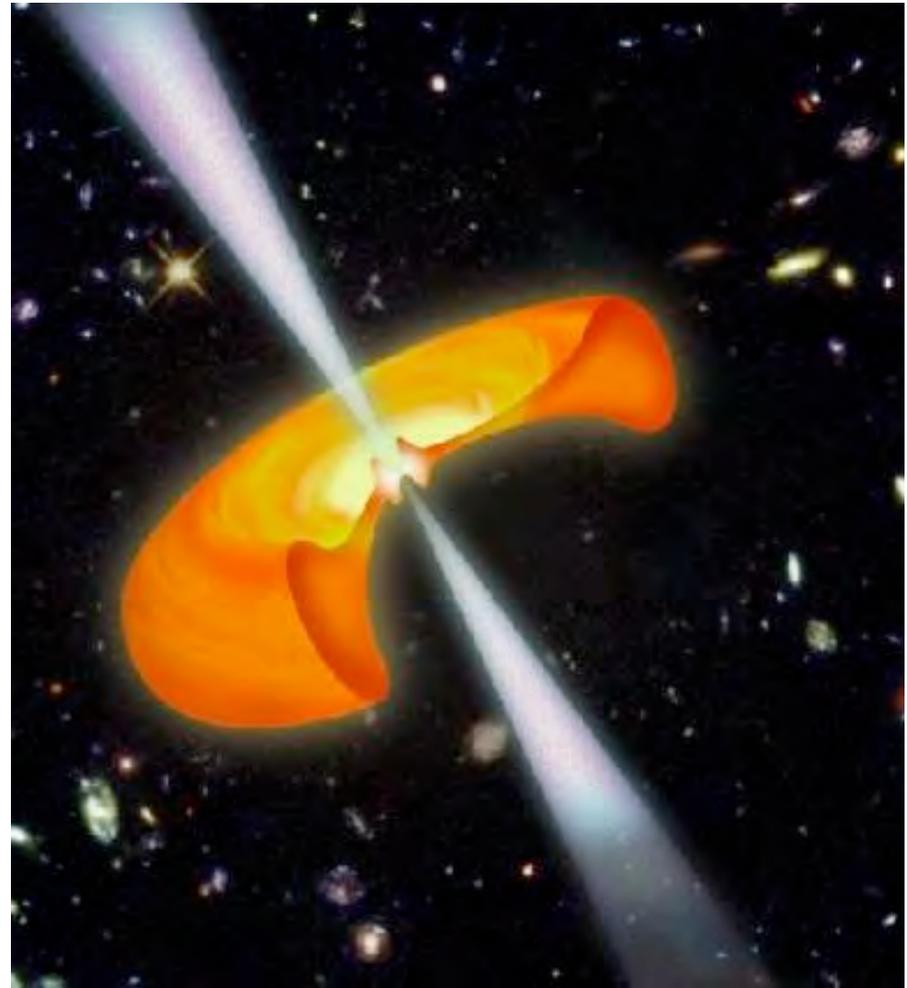
- I lampi hanno durata variabile e generalmente cadono in due classi, burst di breve durata < 1 s e burst di lunga durata > 10 s.
- I primi eventi probabilmente sono dovuti alla fusione di due stelle binarie di neutroni mentre i GRB lunghi sarebbero originati dal collasso di stelle massive (Iperнове).



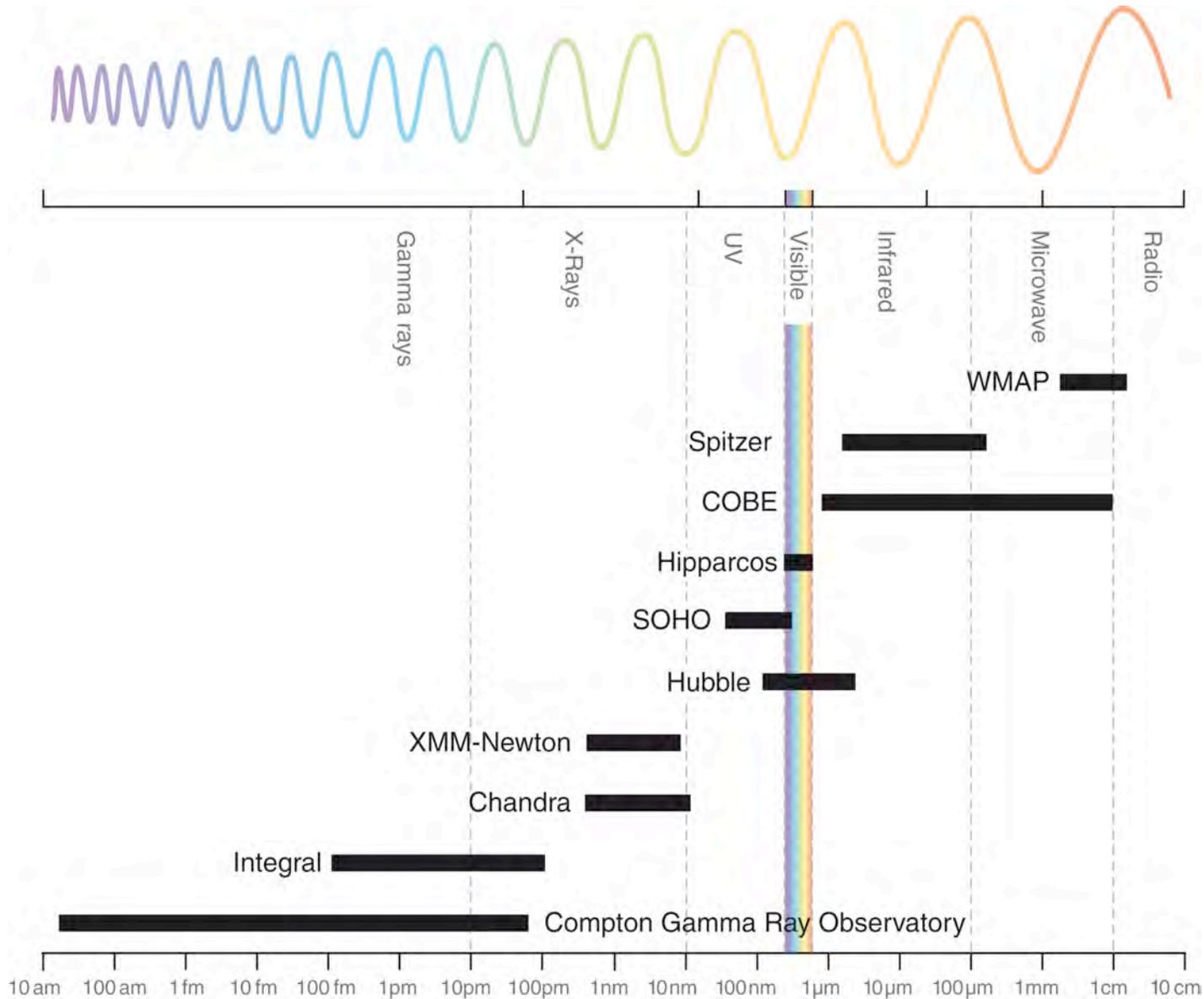
GRB



- Il rilascio di energia corrisponderebbe a circa la massa solare se distribuita isotropicamente mentre se il rilascio è in due getti opposti, l'energia corrisponde a circa 10^{-3} masse solari, dell'ordine di 10^{44} J.



SPACE OBSERVATORIES

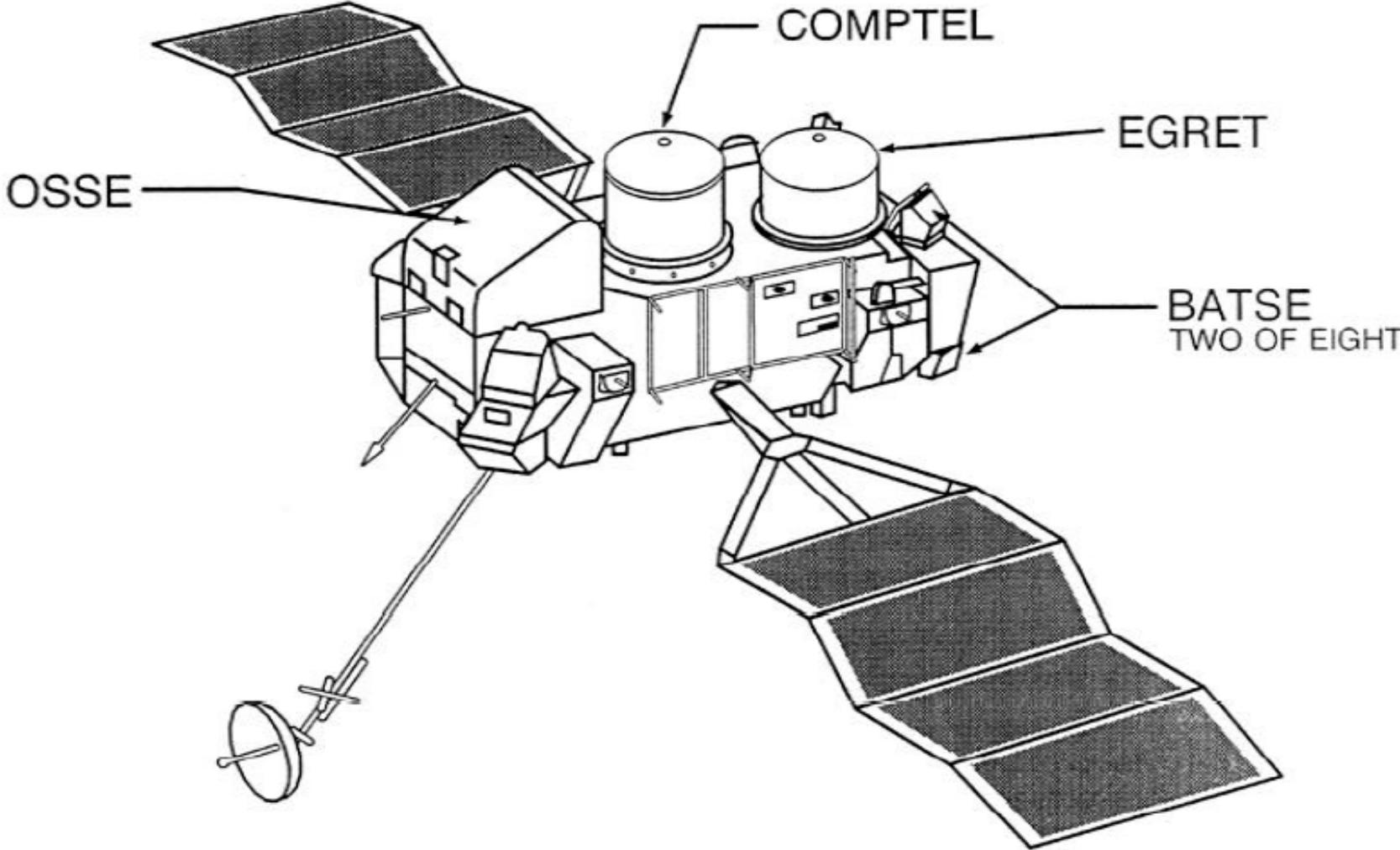


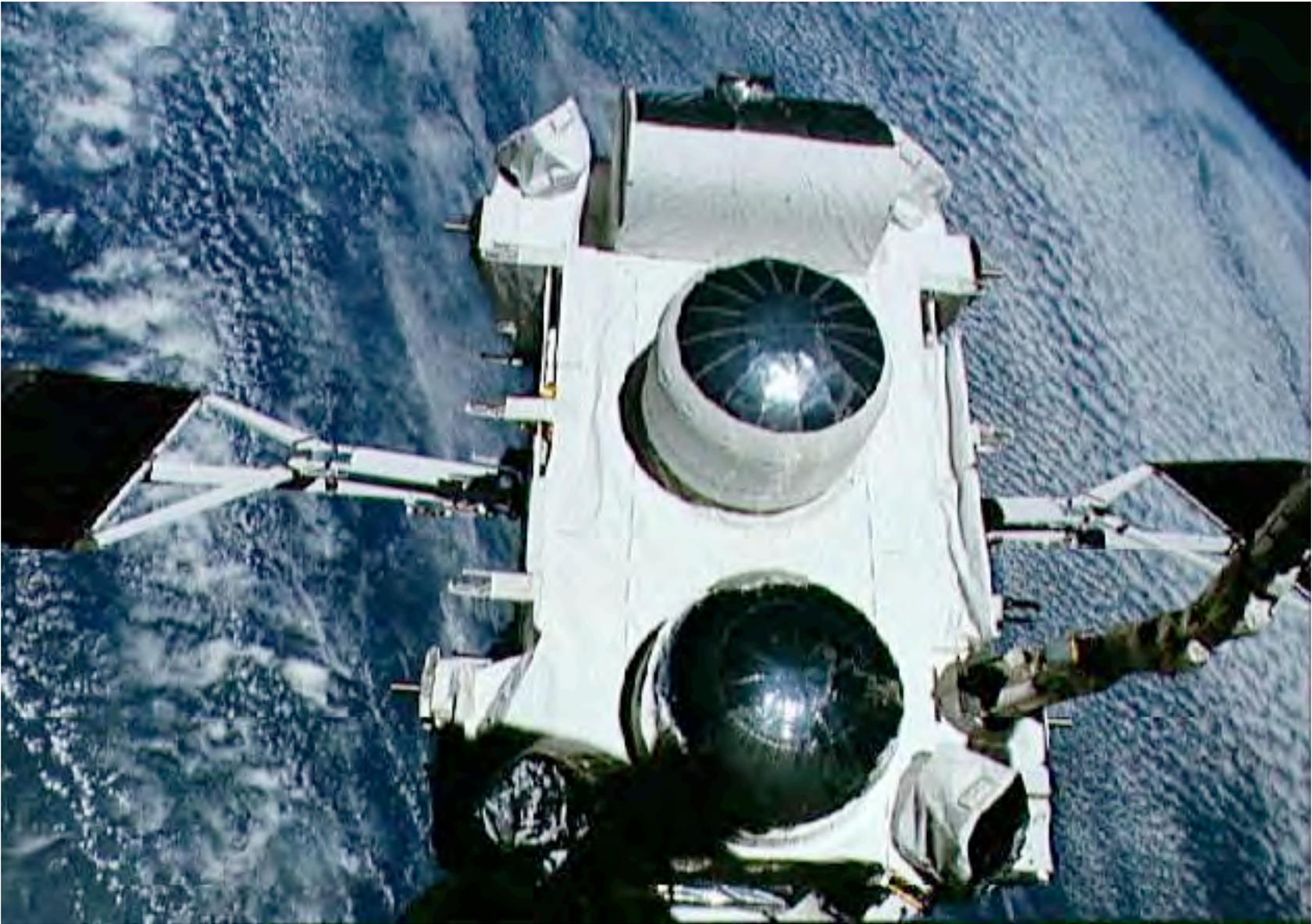
Compton Observatory CGRO

- 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](#))
- Massa totale 17 tonnellate
- CGRO è stato lanciato nel 1991 ed è stato rimosso nel 2000

GAMMA RAY OBSERVATORY

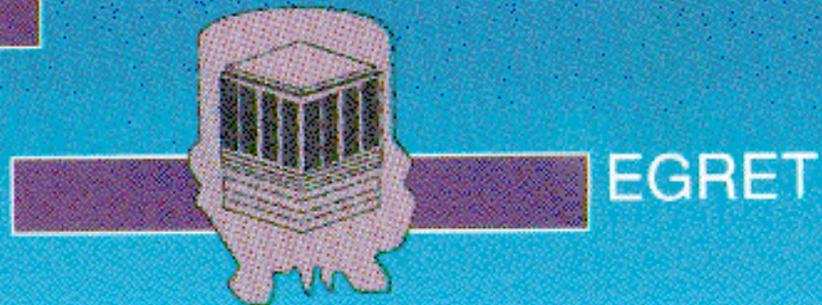
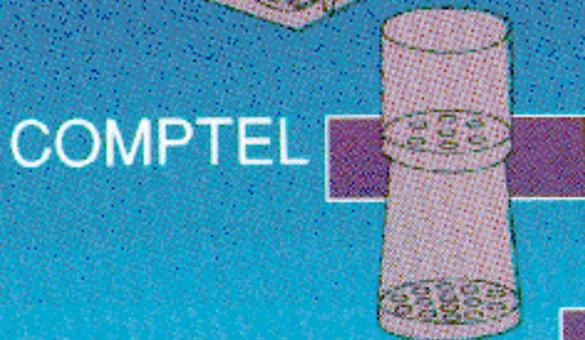
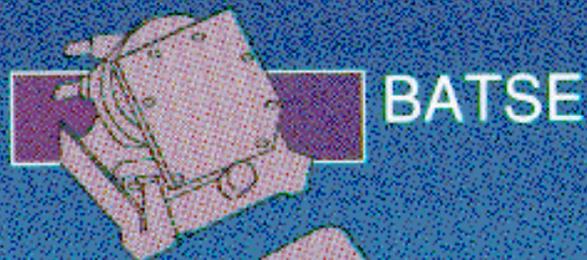
COMPTON OBSERVATORY INSTRUMENTS





GRO Instruments-Energy Ranges

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

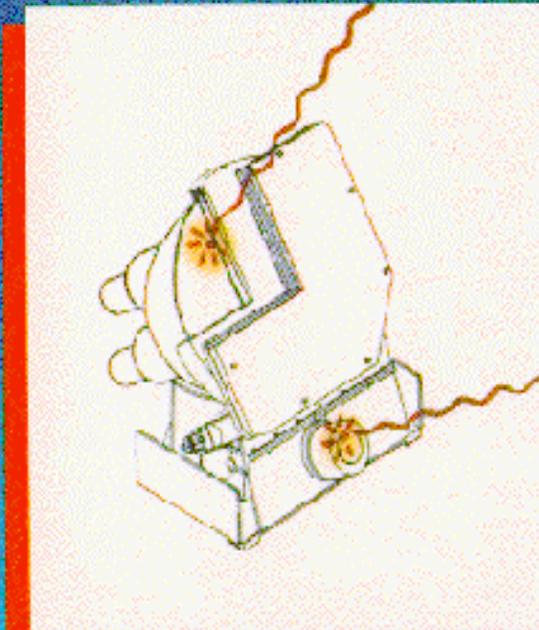
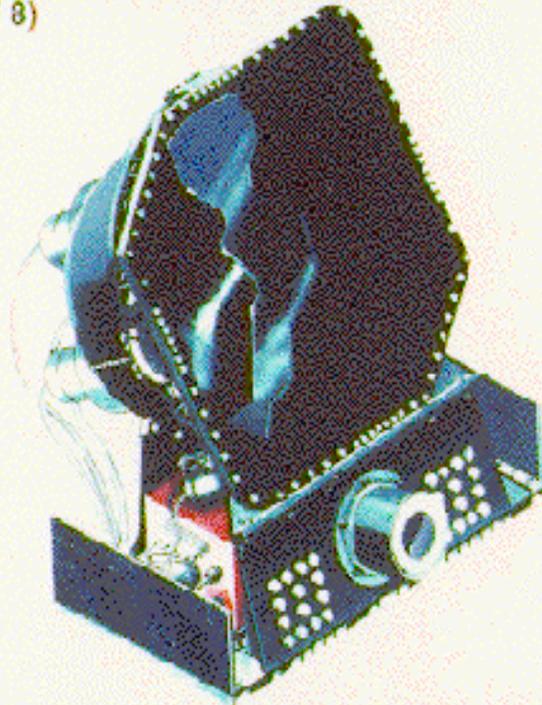


Sommario caratteristiche CGRO

	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)

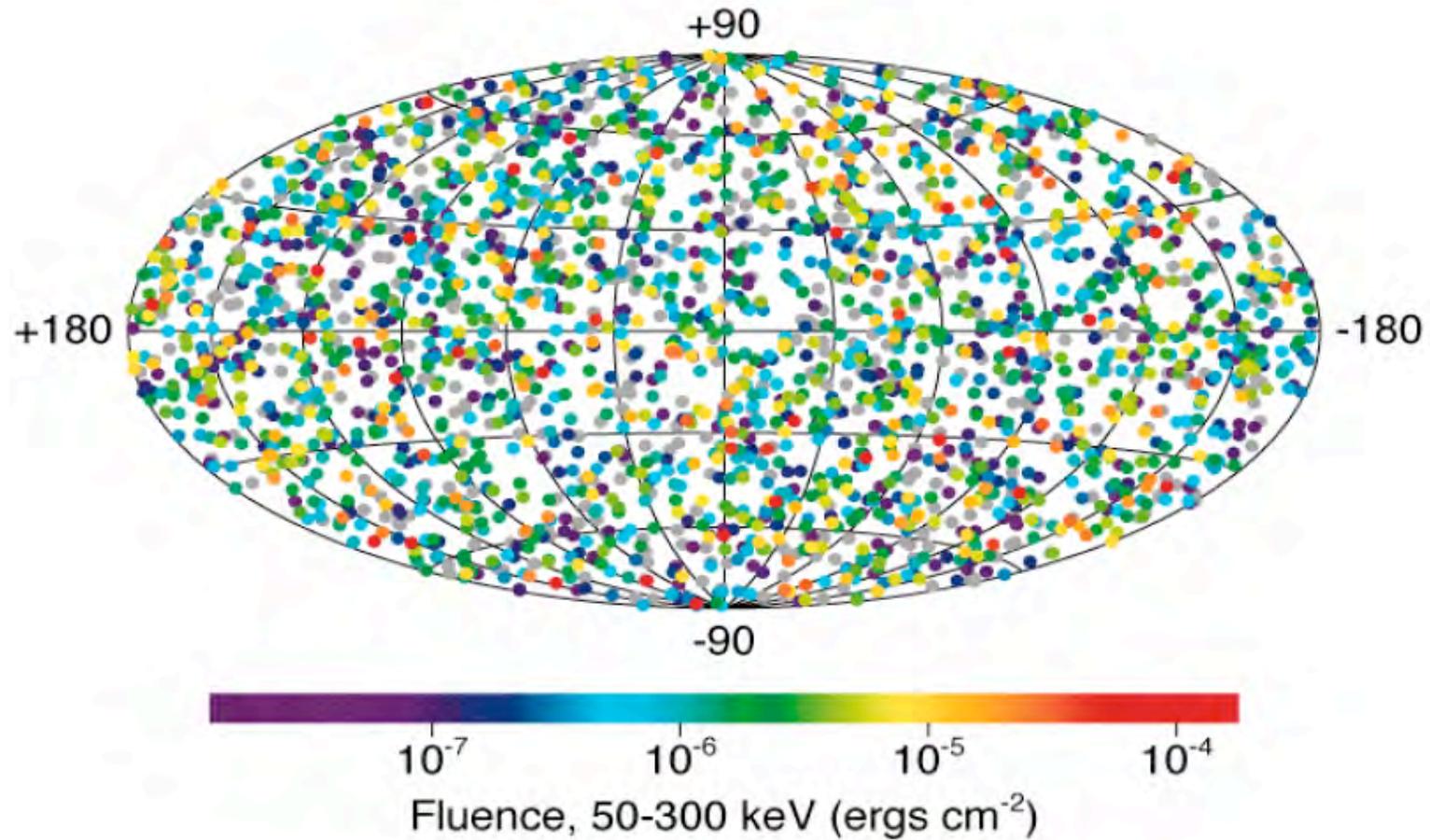
Burst and Transient Source Experiment (BATSE)

BATSE
DETECTOR MODULE
(1 OF 8)

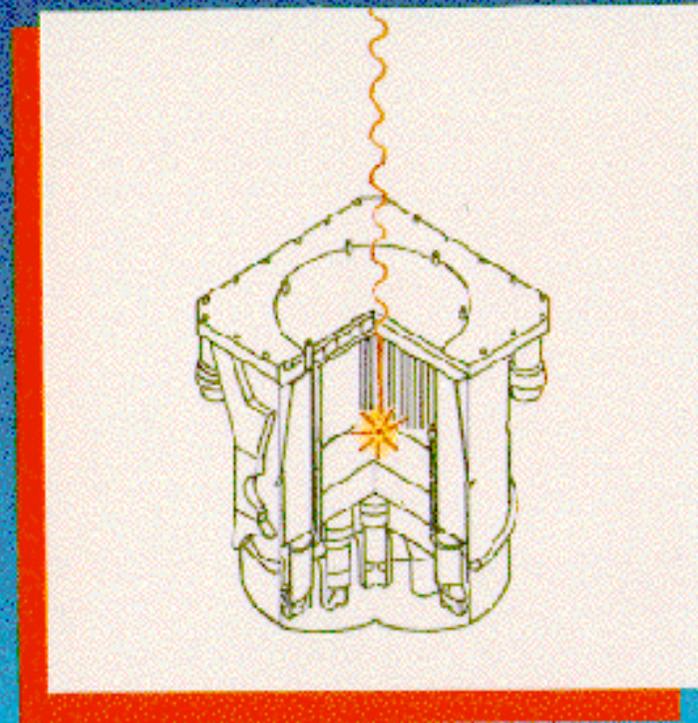
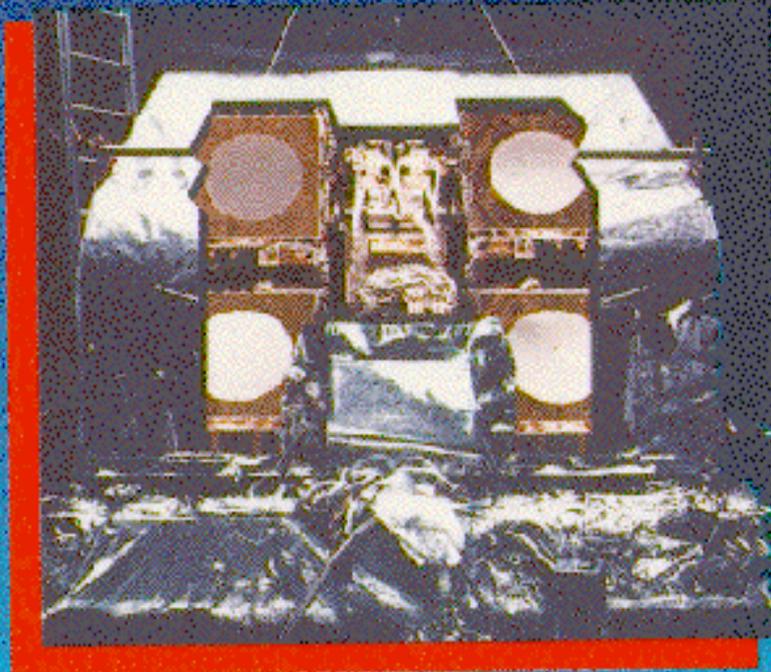


Cristalli di NaI E: 30 keV - 1.9 MeV (15 keV - 110 MeV); gamma ray burst

BATSE: 2512 GRB

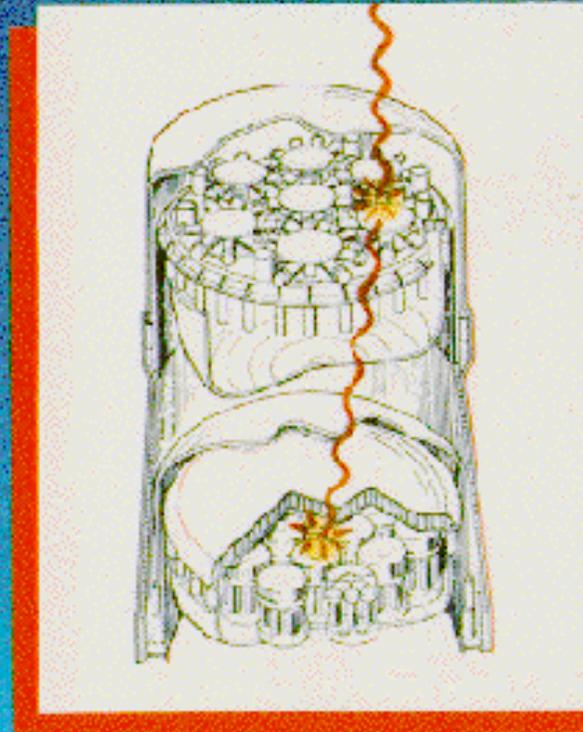
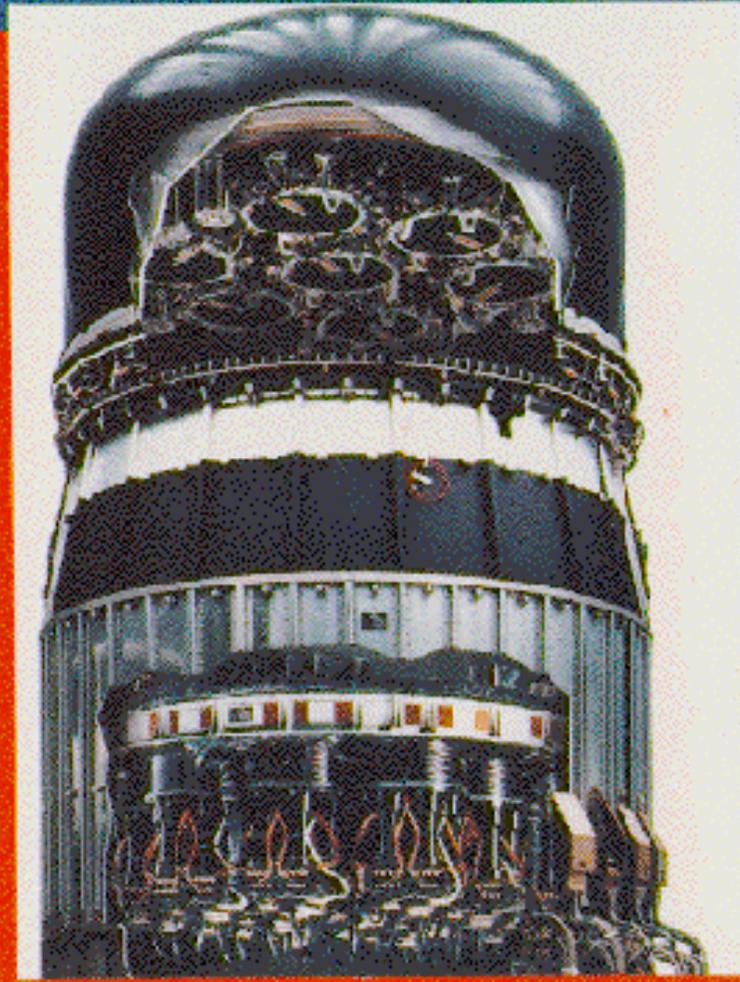


Oriented Scintillation Spectrometer Experiment (OSSE)



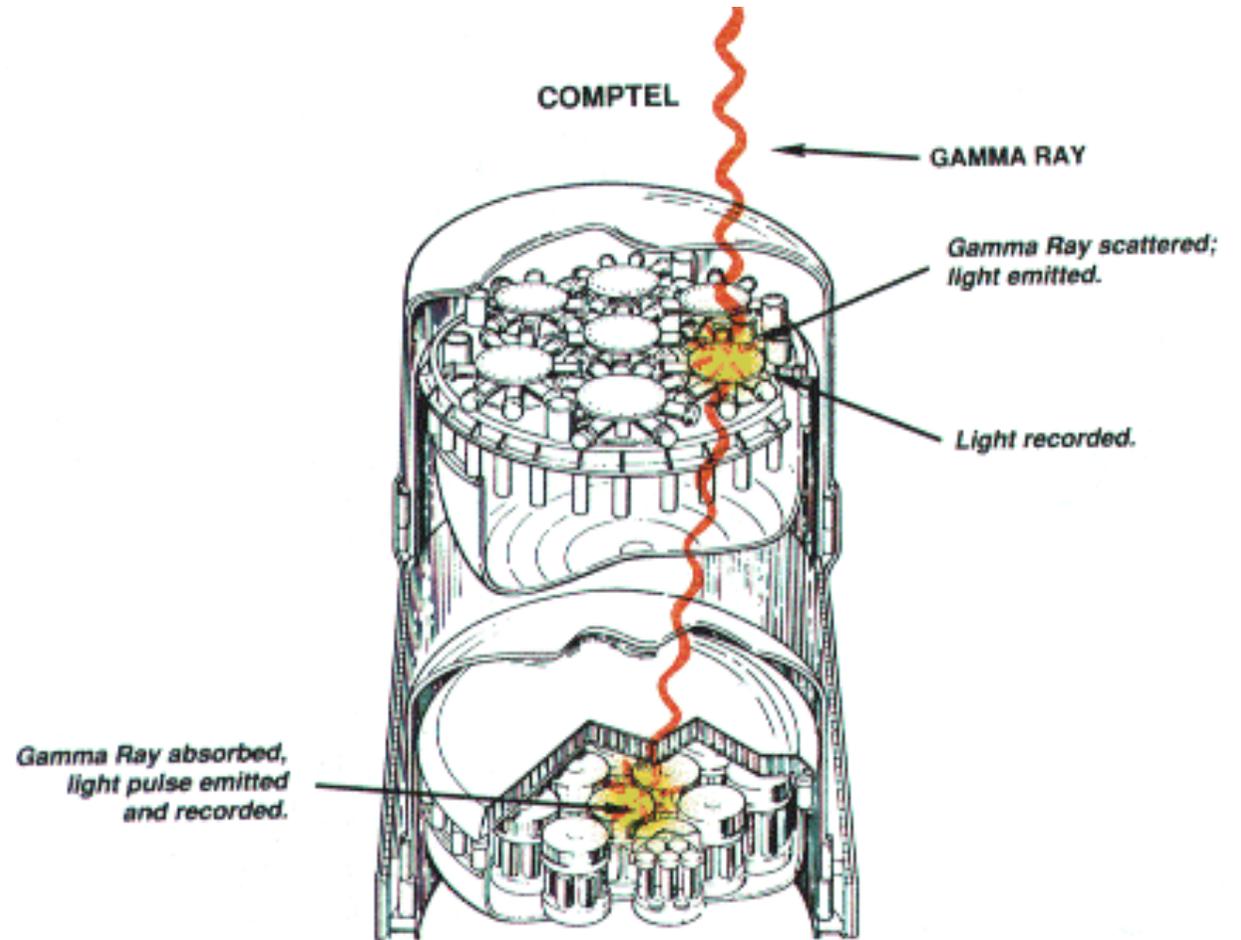
4 cristalli di NaI E: 60 keV - 10 MeV ; flare solari

Imaging Compton Telescope (COMPTEL)



top: scintillatore liquido (effetto Compton); bottom: cristalli di NaI; $E: 0.8 - 30 \text{ MeV}$

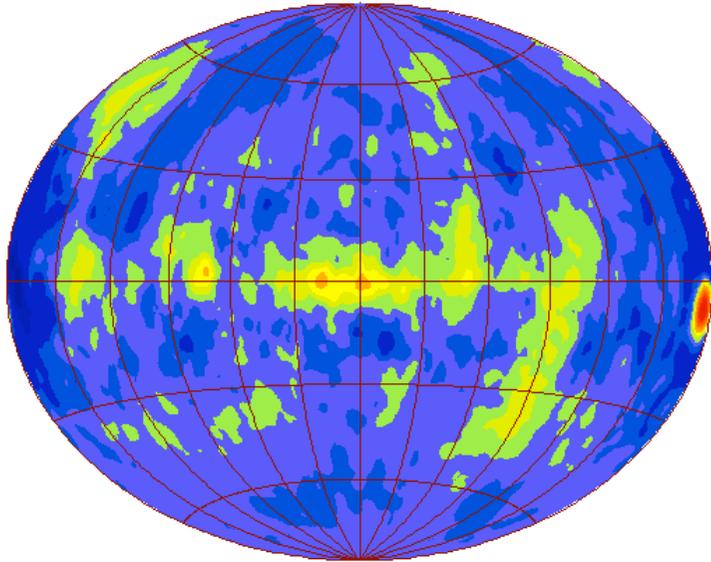
COMPTEL



COMPTEL MAPS

Comptel All-Sky Map

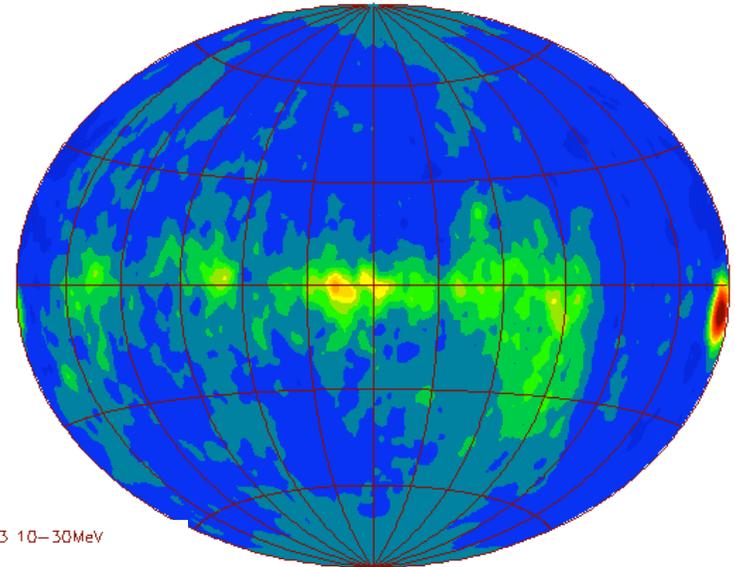
Phase 1+2+3 1-3MeV



1-3 MeV

Comptel All-Sky Map

Phase 1+2+3 3-10MeV

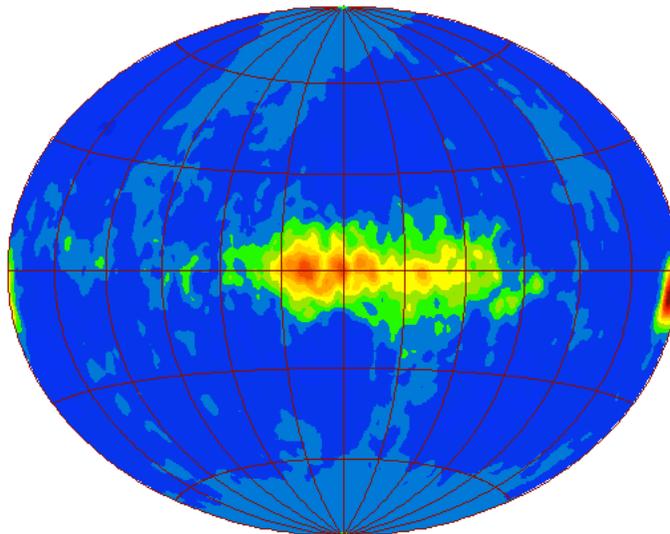


3-10 MeV

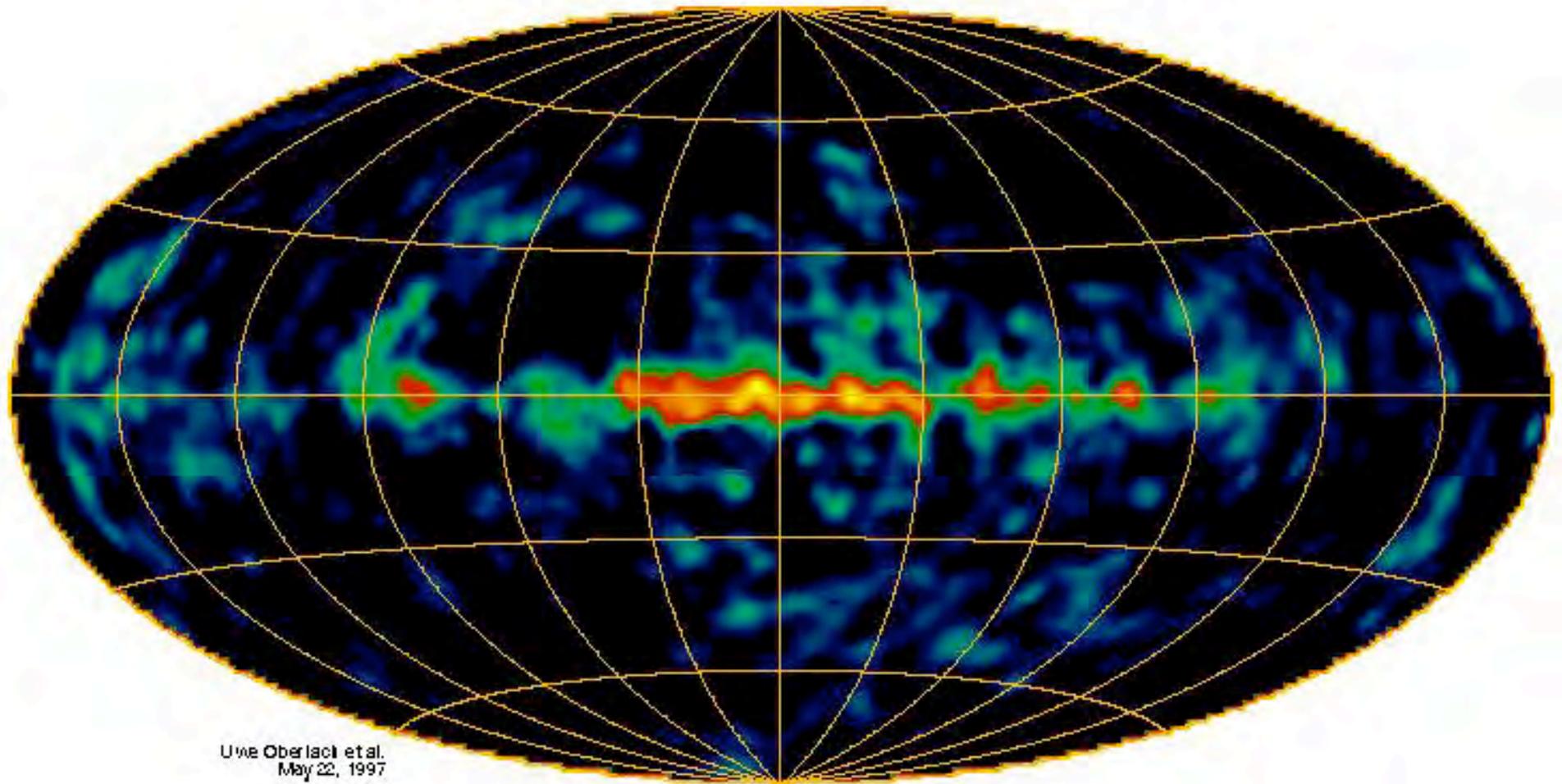
10-30 MeV

Sky Map

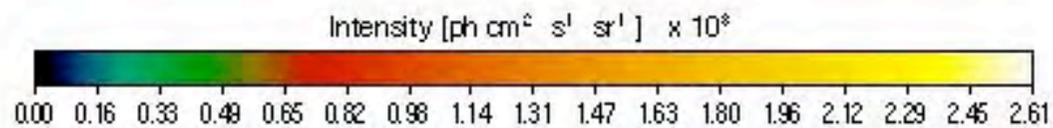
Phase 1+2+3 10-30MeV



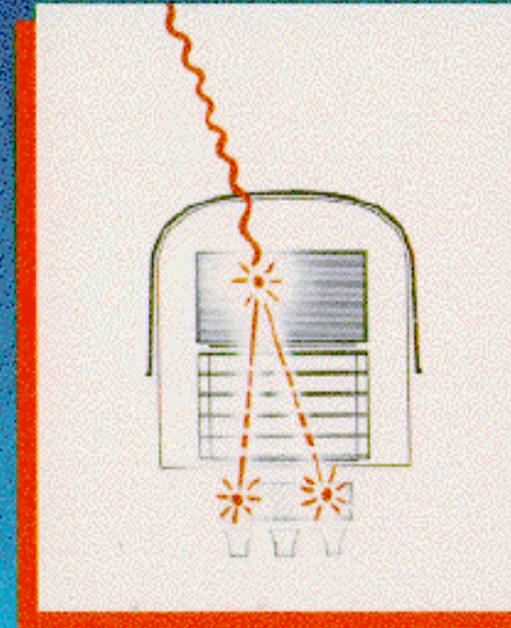
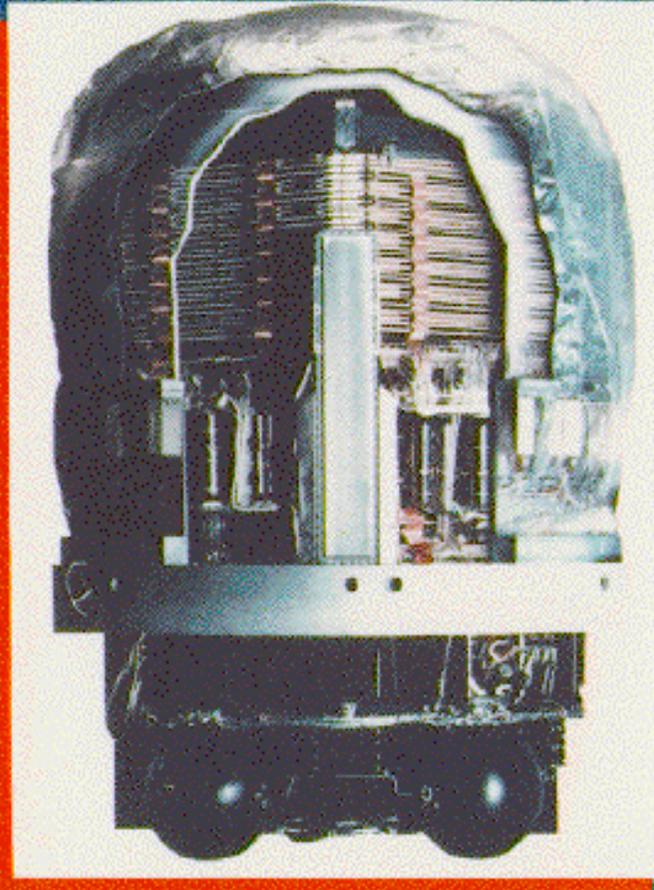
CGRO / COMPTEL 1.8 MeV, 5 Years Observing Time



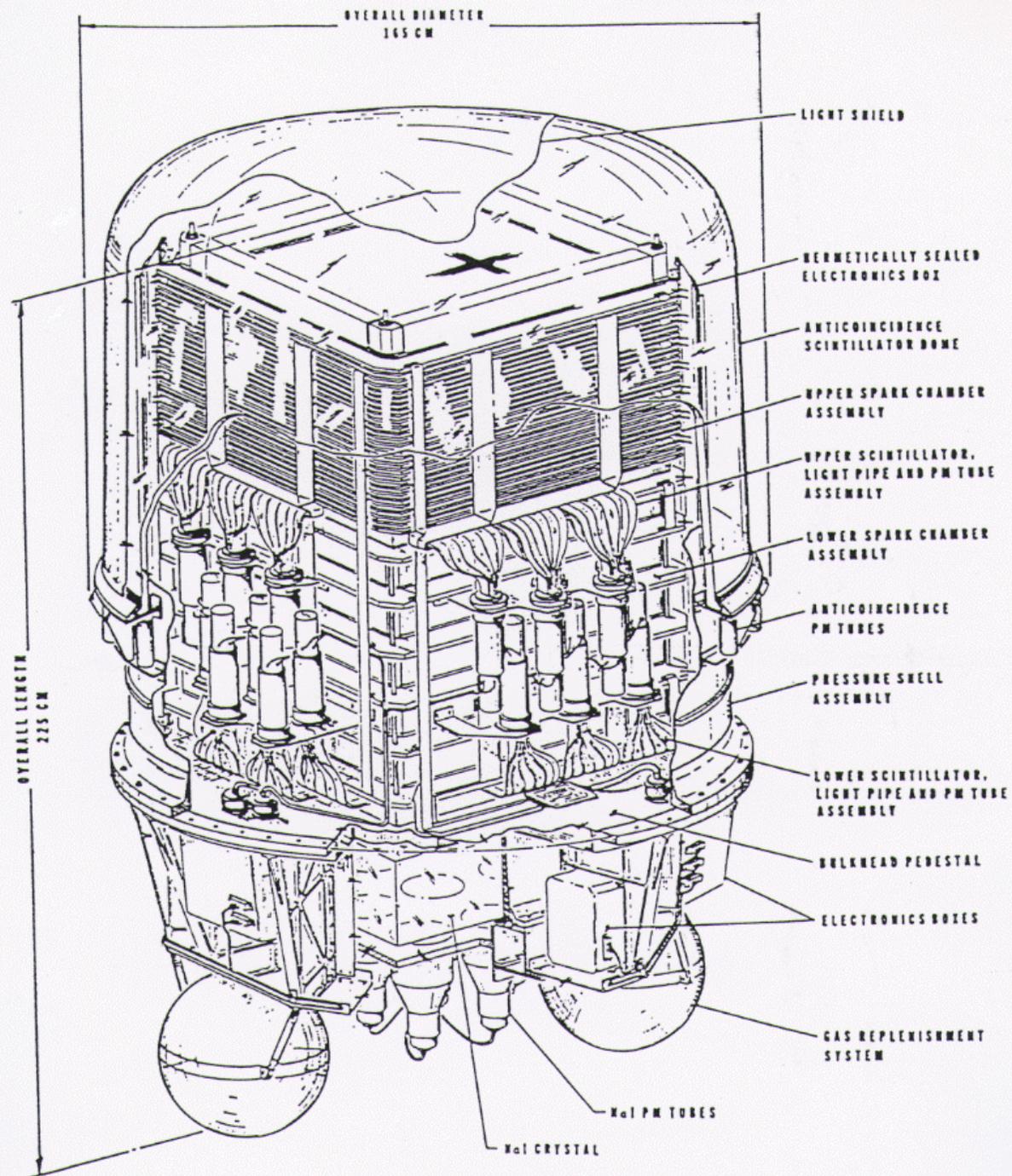
Uwe Oberlack et al.
May 22, 1997



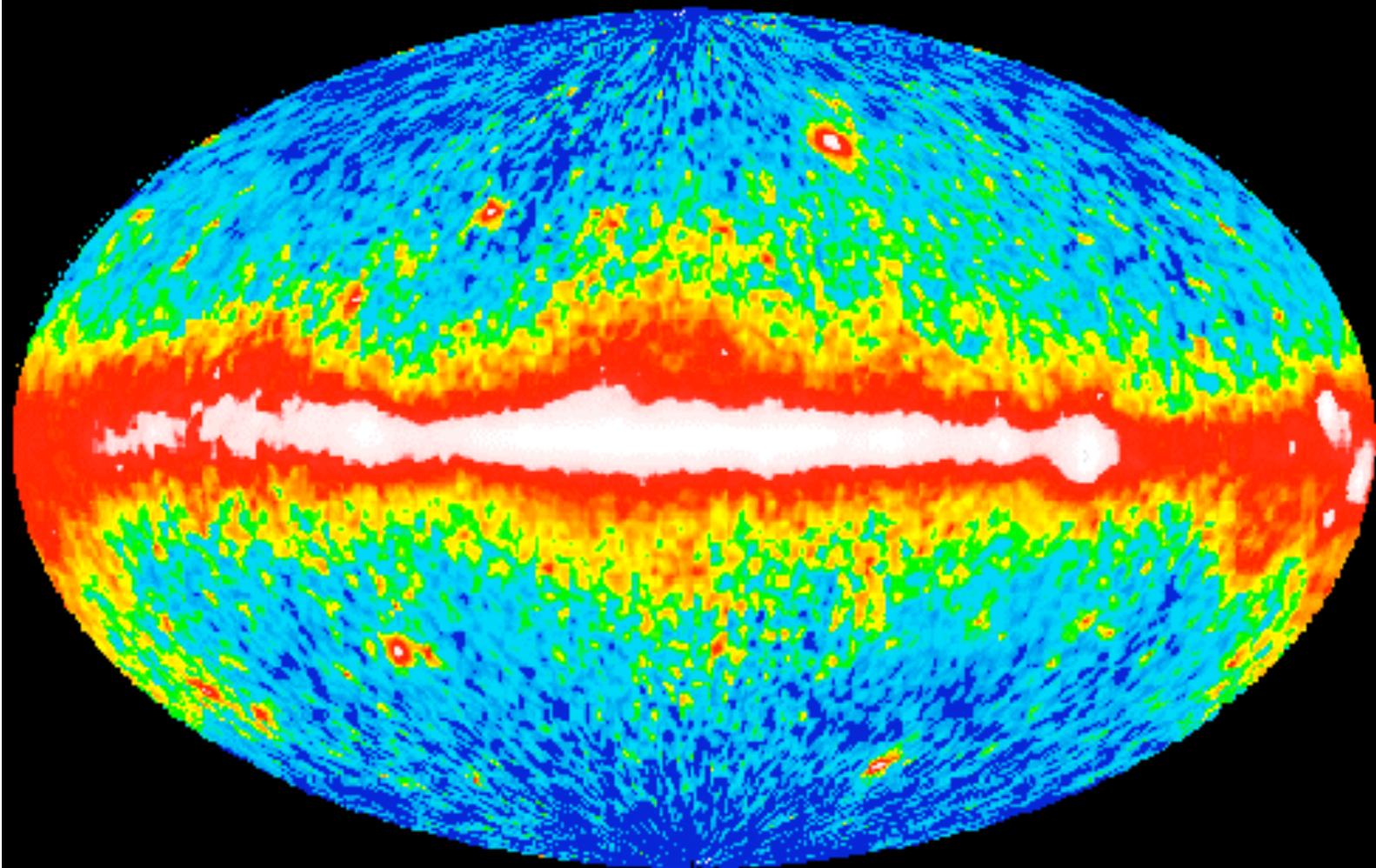
Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)



Camera a scintilla con piani di tantalio, cristalli di NaI con $8 X_0$; E: 20 MeV - 30 GeV

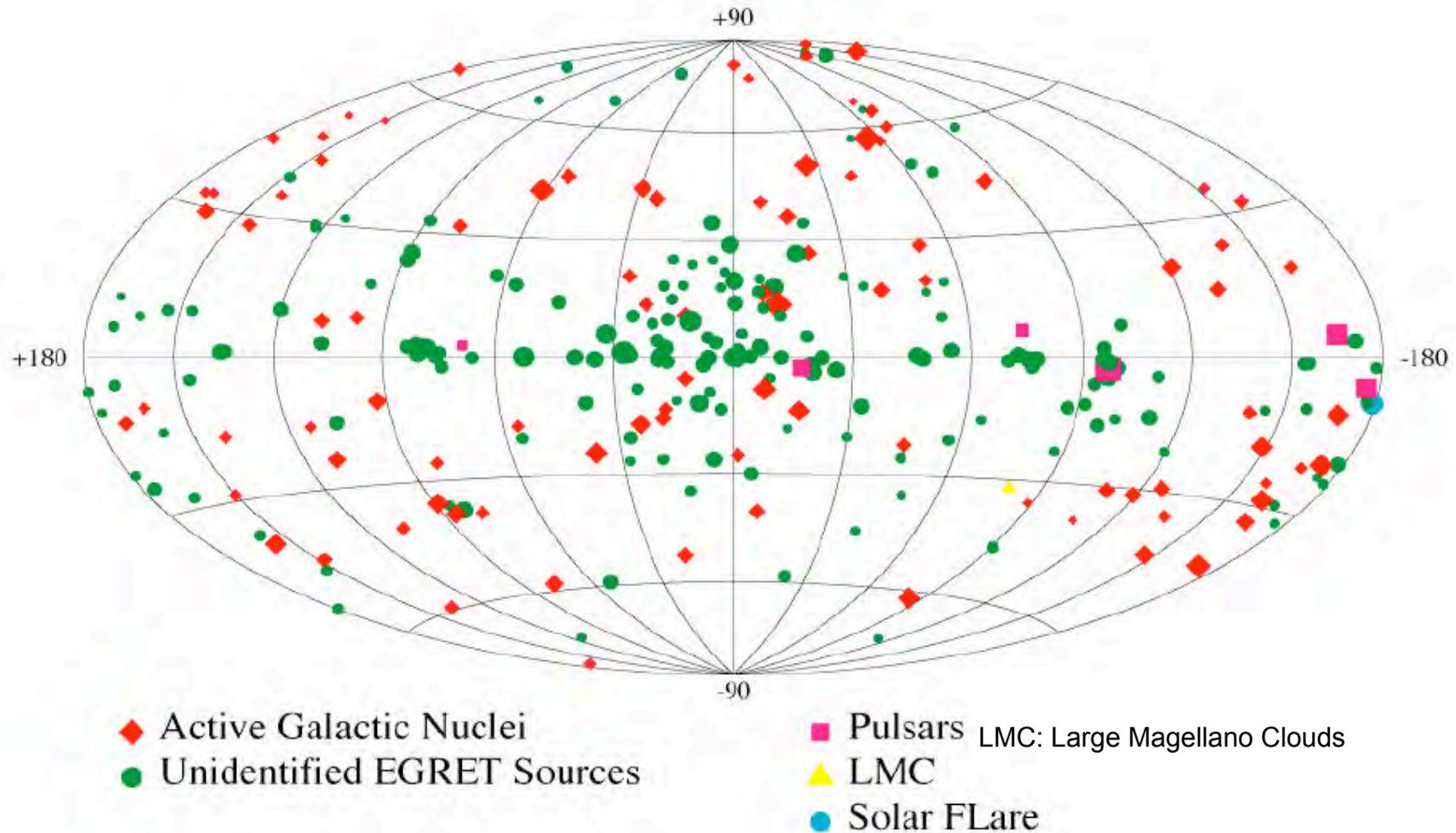


EGRET All-Sky Gamma Ray Survey Above 100 MeV



Third EGRET Catalog

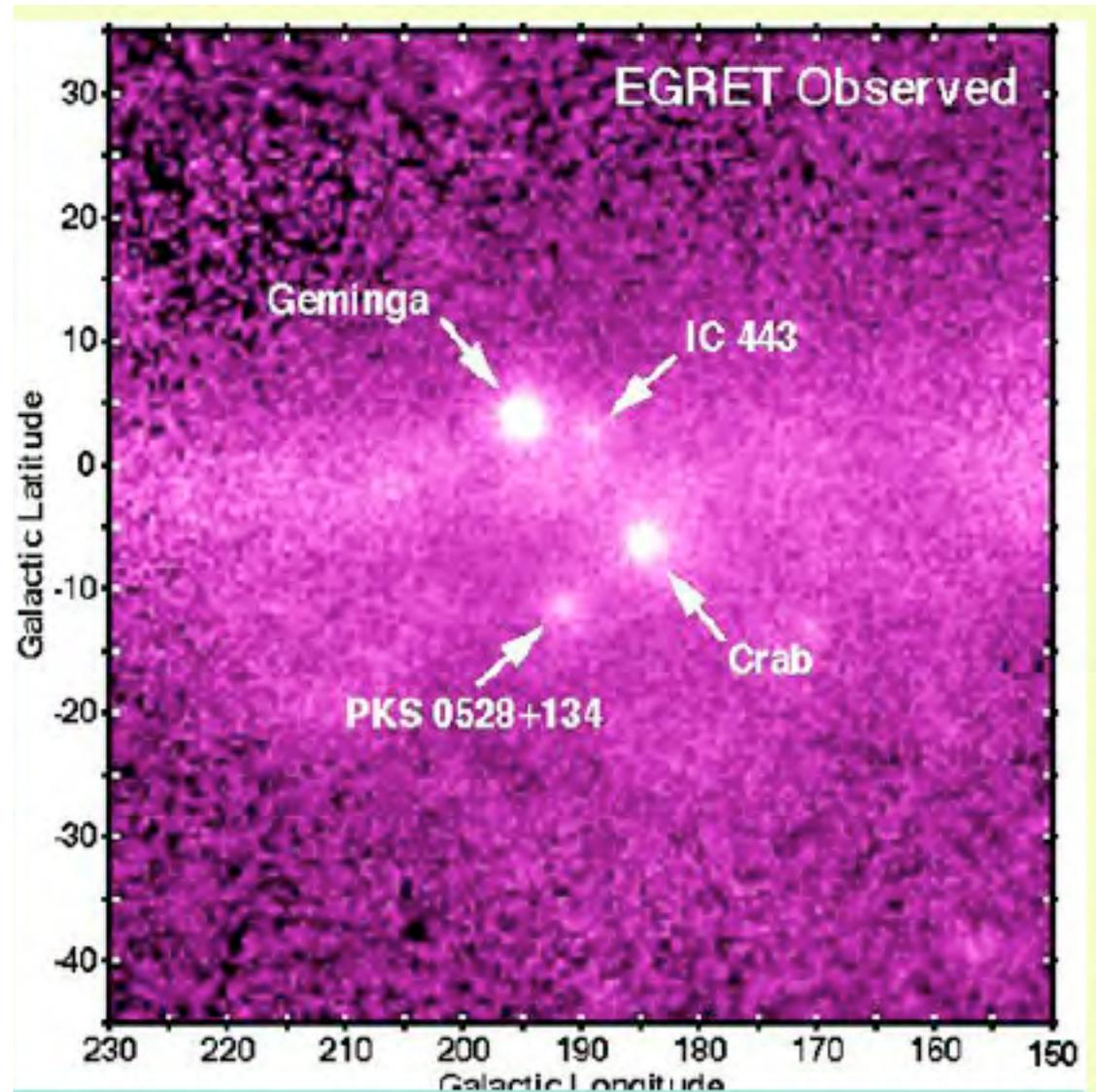
$E > 100 \text{ MeV}$



The Third EGRET Catalog consists of 271 sources: 5 pulsars, 1 solar flare, 66 high-confidence blazar identifications, 27 possible blazar identifications, 1 likely radio galaxy (Cen A), 1 normal galaxy (LMC), and 170 unidentified sources. A sixth EGRET pulsar is shown in the figure for completeness (at $l=69, b=3$), but is seen only in pulsed data, and so is not included in the catalog.

EGRET

L'immagine di EGRET mostra Geminga e Crab, sorgenti di raggi X e gamma. Ambedue contengono pulsar. Geminga emette principalmente gamma e raggi X. Crab genera impulsi anche nell'ottico e nelle onde radio.



CATALOGO EGRET revisionato

10

Jean-Marc Casandjian and Isabelle A. Grenier: A revised catalogue of EGRET γ -ray sources

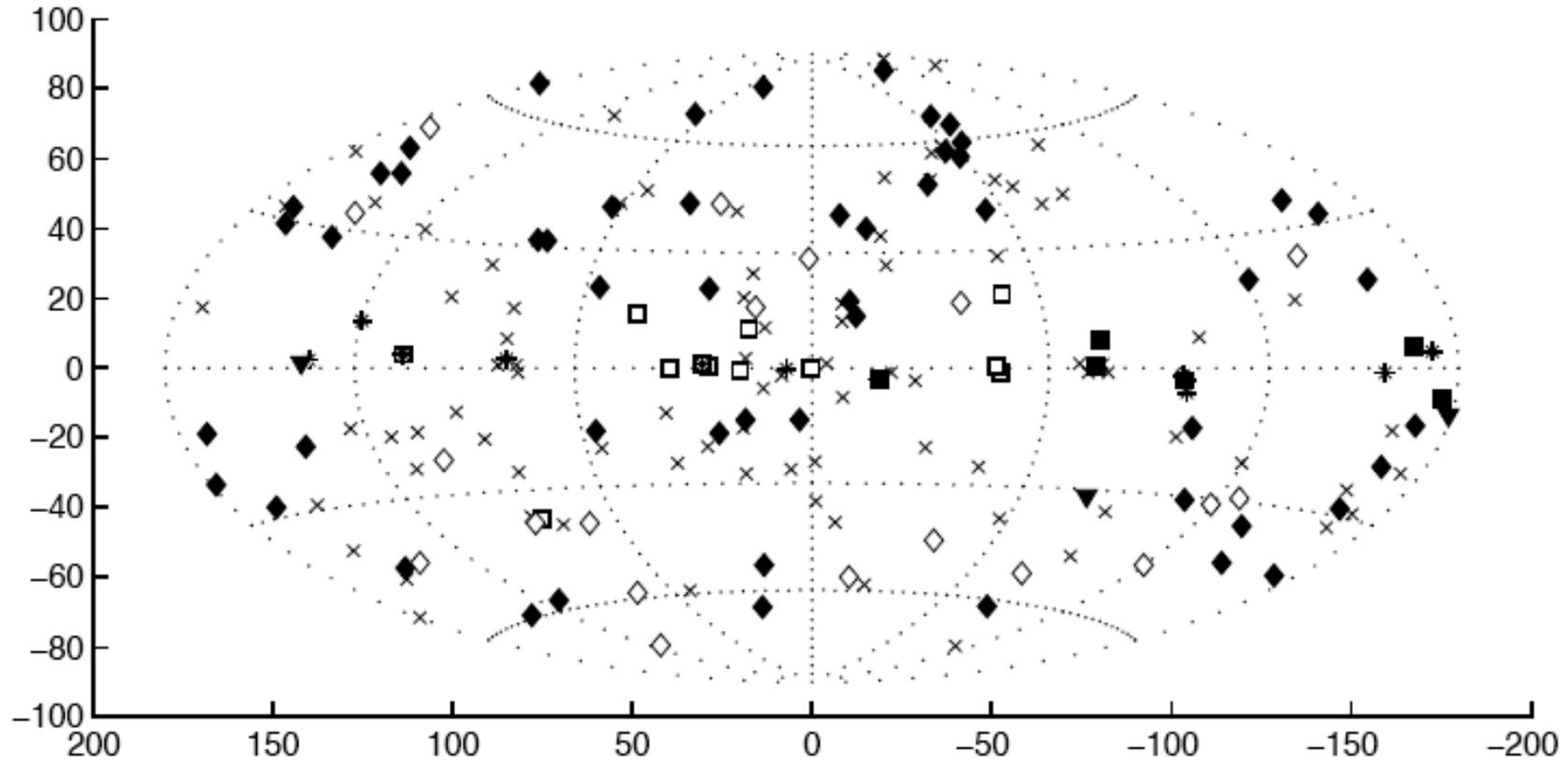


Fig. 13. The revised EGRET source catalog, shown in Galactic coordinates. The symbols indicate the counterpart types found in the error box: identified pulsars as black squares; other ATNF pulsars as open squares; LSI +61 303, LMC, and solar flare as black triangles; ASDC and CGRaBS blazar candidates as black diamonds; other flat-spectrum radio-sources from CRATES as open diamonds; supernova remnants from the Green catalogue as stars; no counterpart as crosses.

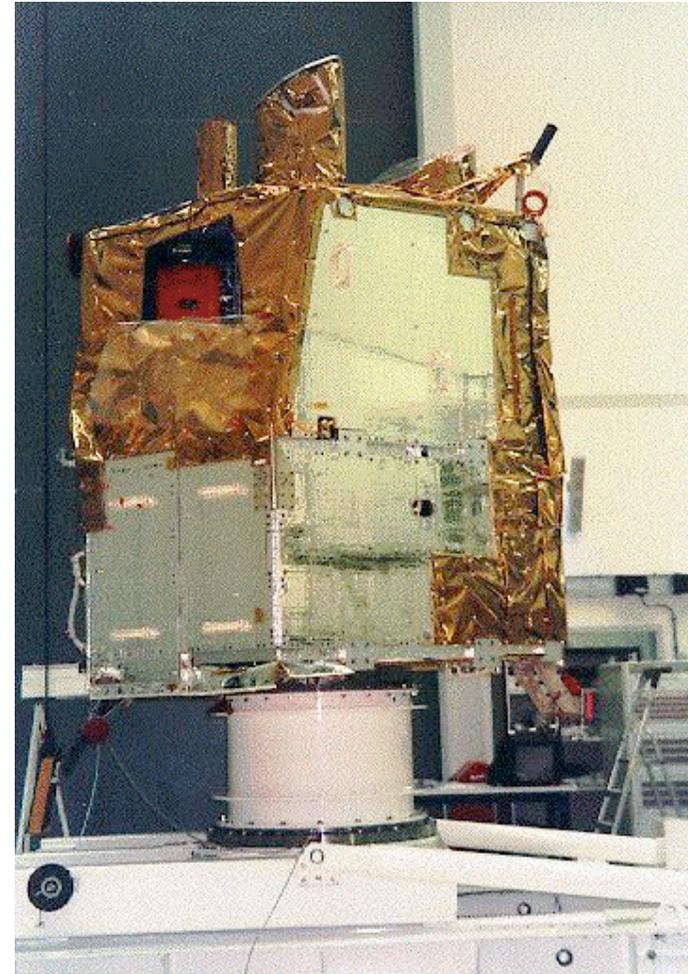
BEPPPO-SAX (1996-2003)

Il satellite per l'astronomia a raggi X, *BeppoSAX* (Satellite per Astronomia X, "Beppo" in onore di Giuseppe Occhialini), è un progetto dell'Agenzia Spaziale Italiana, ASI, con la partecipazione della Agenzia Olandese per i Programmi Aerospaziali, NIVR.

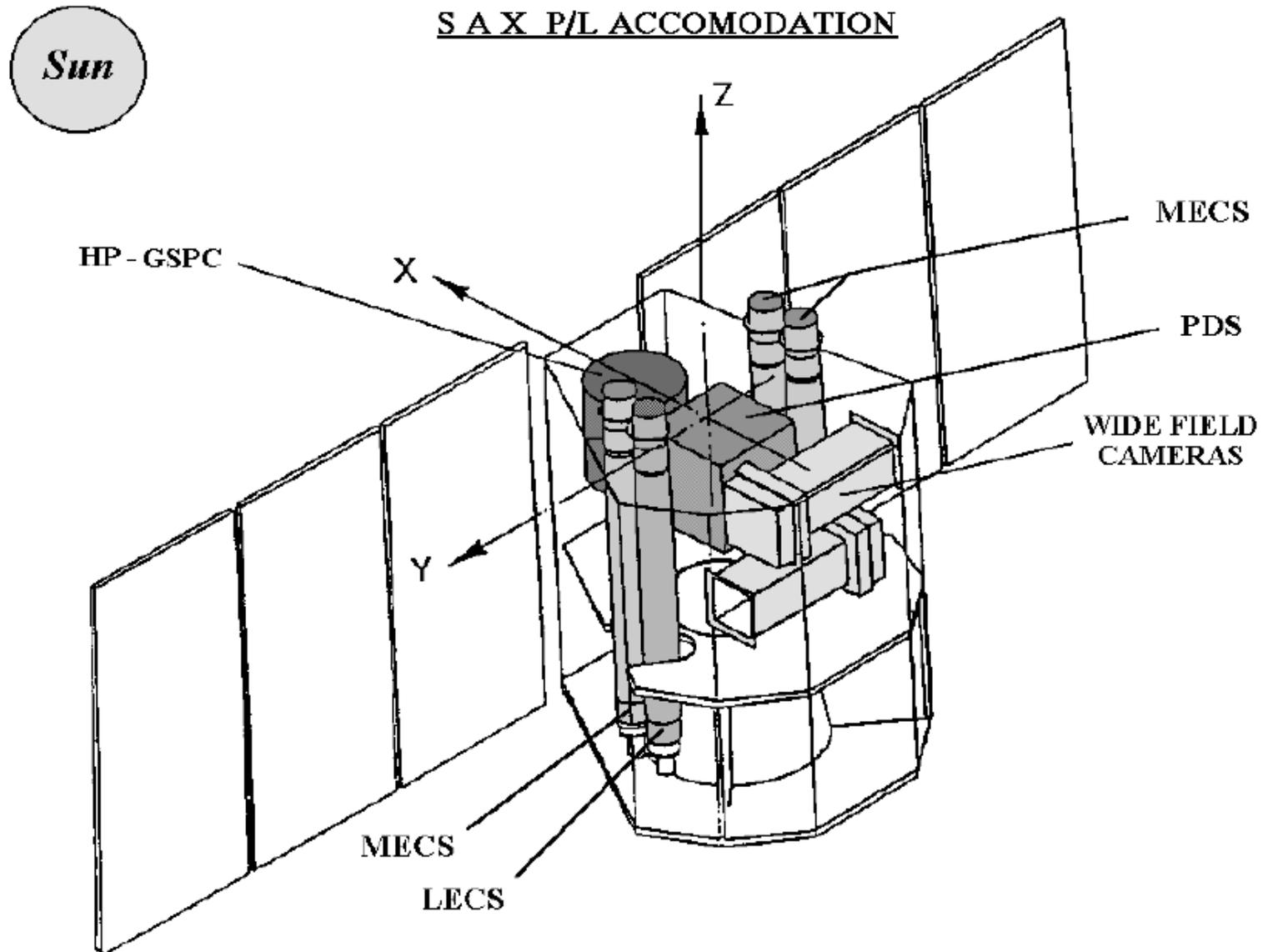
La caratteristica principale della missione Beppo-SAX è l'ampia copertura spettrale da 0.1 a 200 keV.

Gli strumenti a bordo:

- 1 LECS, telescopio per basse energie
- 3 MECS telescopi per energie intermedie
- 1 HPGSPC contatore proporzionale a Xe
- 1 PSD Phoswich, scintillatore a NaI/CsI
- 2 WFC contatori proporzionali



Beppo-SAX



Energy (keV)

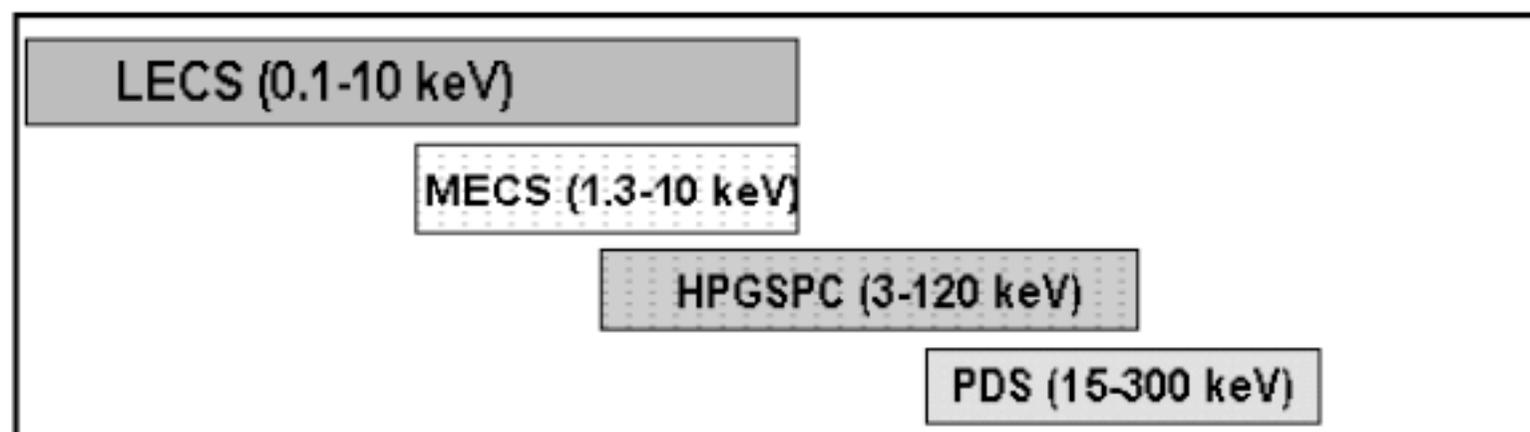
0.1

1.0

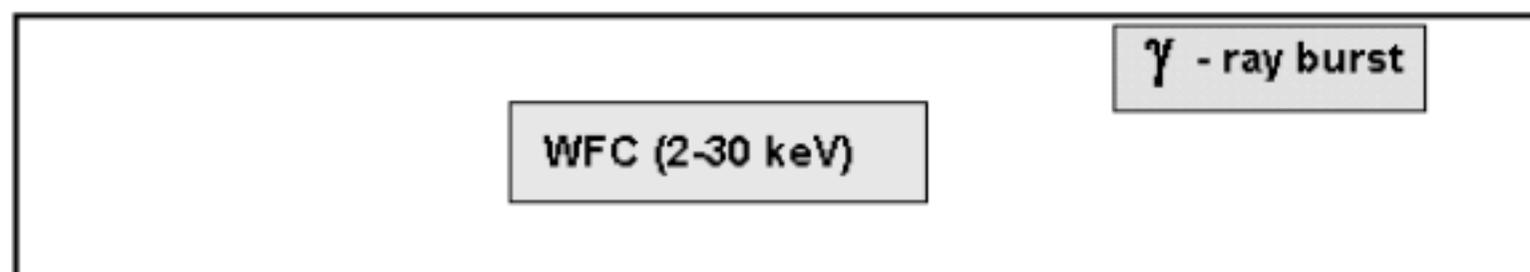
10

100

600



;



0.1

1.0

10

100

600