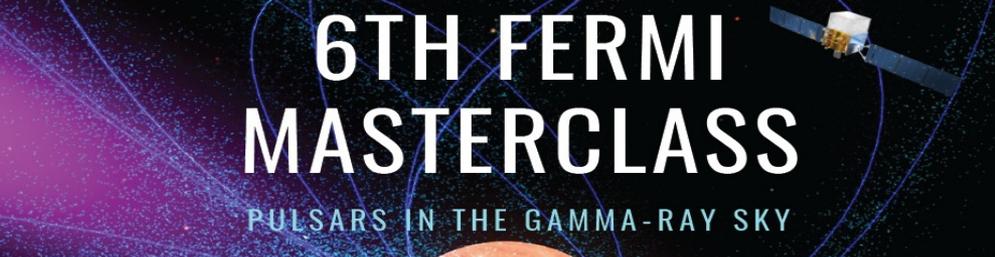


INFN 
BARI - PERUGIA - ROMA - TORINO - TRIESTE
Sesta edizione in totale e quarta in presenza in Italia
A Roma Tor Vergata è la seconda edizione in presenza (dopo quella 2019)

6TH FERMI MASTERCLASS

PULSARS IN THE GAMMA-RAY SKY



Gamma-ray pulsars

Stefano Ciprini

1. INFN Sezione di Roma Tor Vergata
2. ASI Space Science Data Center (SSDC), Roma

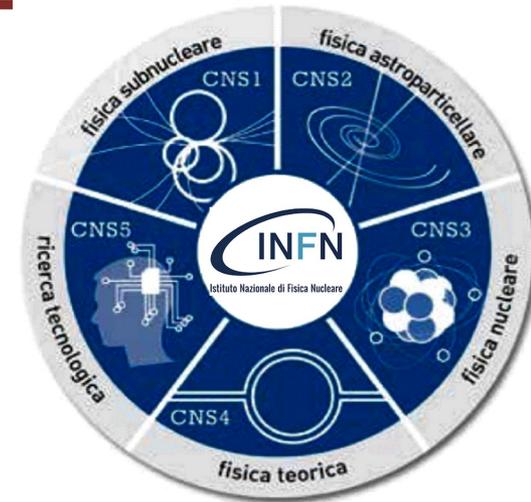


Quarta edizione in presenza della MasterClass di Fermi
Dip. di Fisica & INFN Roma Tor Vergata 5 Aprile 2023

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

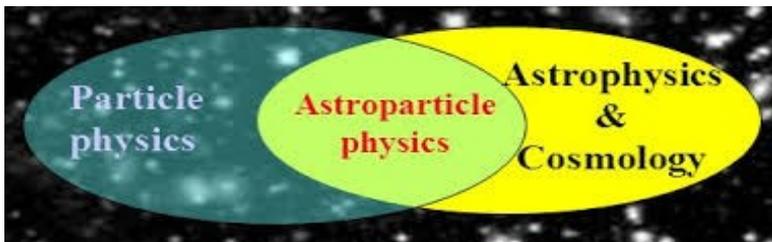
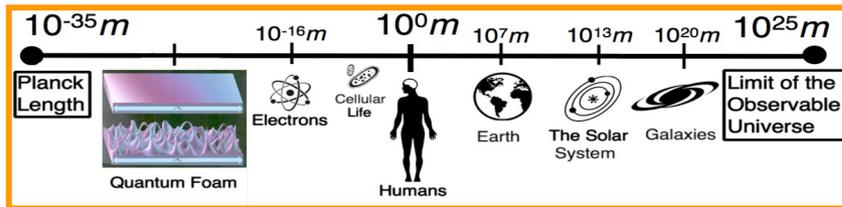
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.): ente nazionale pubblico di ricerca, istituito nel 1951 per sviluppare la tradizione scientifica iniziata da Enrico Fermi negli anni '30, dedicato allo studio dei costituenti fondamentali della materia e delle leggi fisiche che li governano;

- ❑ Svolge **ricerca sperimentale e teorica pura**, di base, nel campo della **fisica nucleare, subnucleare, ed astro-particellare**, favorendo anche l'**innovazione** ed il trasferimento tecnologico e di conoscenza al mondo produttivo.
- ❑ Opera in grandi **collaborazioni internazionali** ed è fortemente presente sul **territorio nazionale**: 20 Sezioni INFN; 6 Gruppi collegati presso le Università; 4 grandi Laboratori Nazionali INFN (Catania, Frascati, Legnaro, Gran Sasso), 3 tra consorzi e centri nazionali (EGO, CNAF, TIFPA). Collaborazione con varie **regioni italiane** (protocollo d'intesa, progetti a regia).

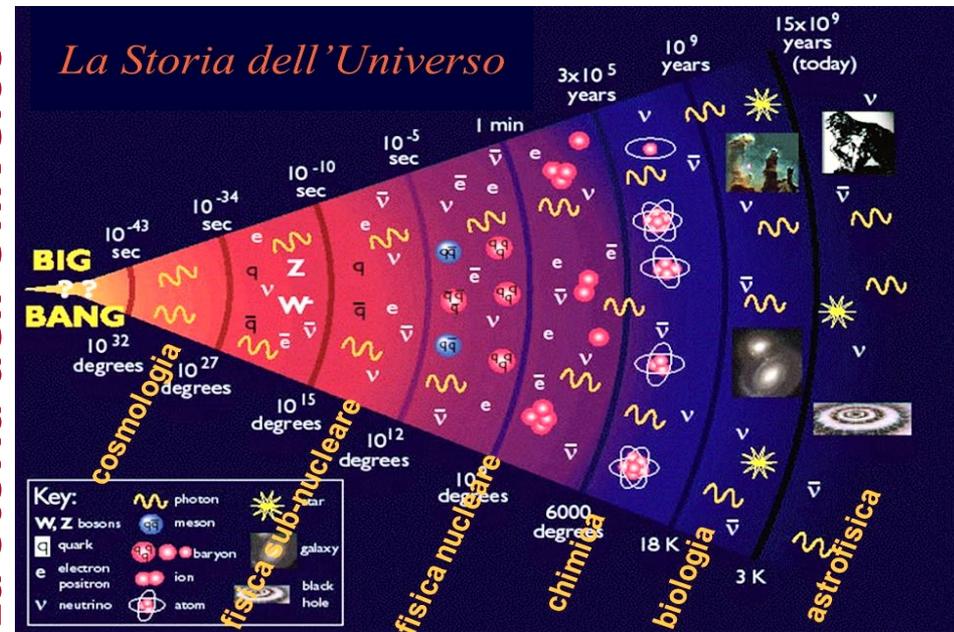


Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

- Forte presenza nel Lazio: Lab. Naz. Frascati (LNF), Sez. Roma (1, c/o La Sapienza), Sez. Roma Tor Vergata, Sez. Roma Tre, Presidenza (Roma), Ammin. Centrale (Frascati).
- Attività in ambito di competizione internazionale e in collaborazione con il mondo universitario. Contributo ricercatori e tecnici INFN riconosciuto internazionalmente nei laboratori europei e in centri di ricerca mondiali.

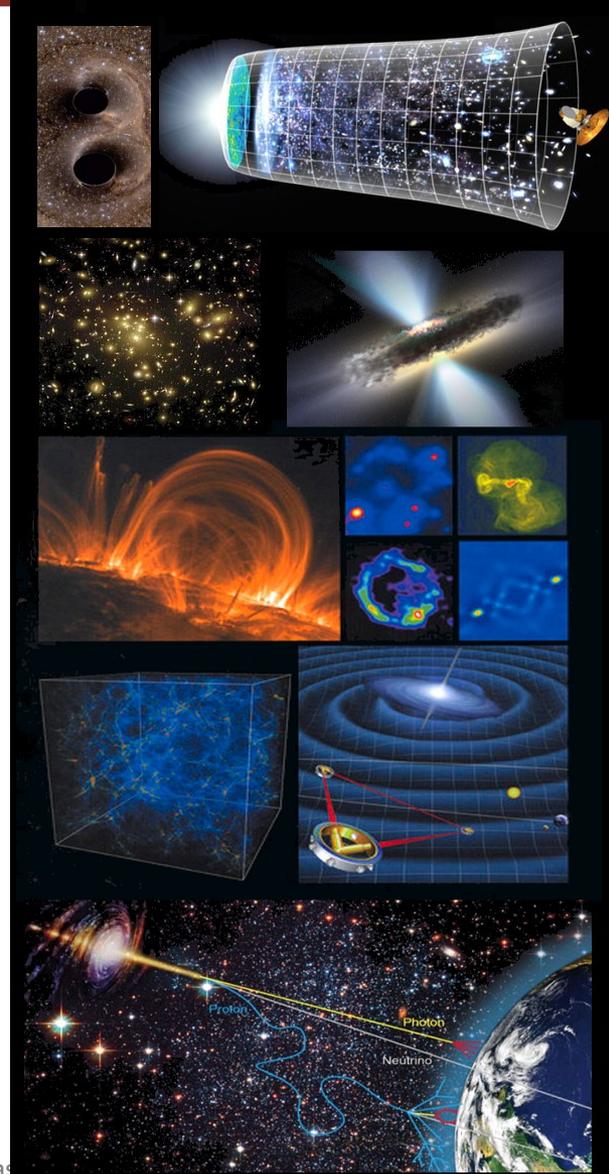


La Storia dell'Universo



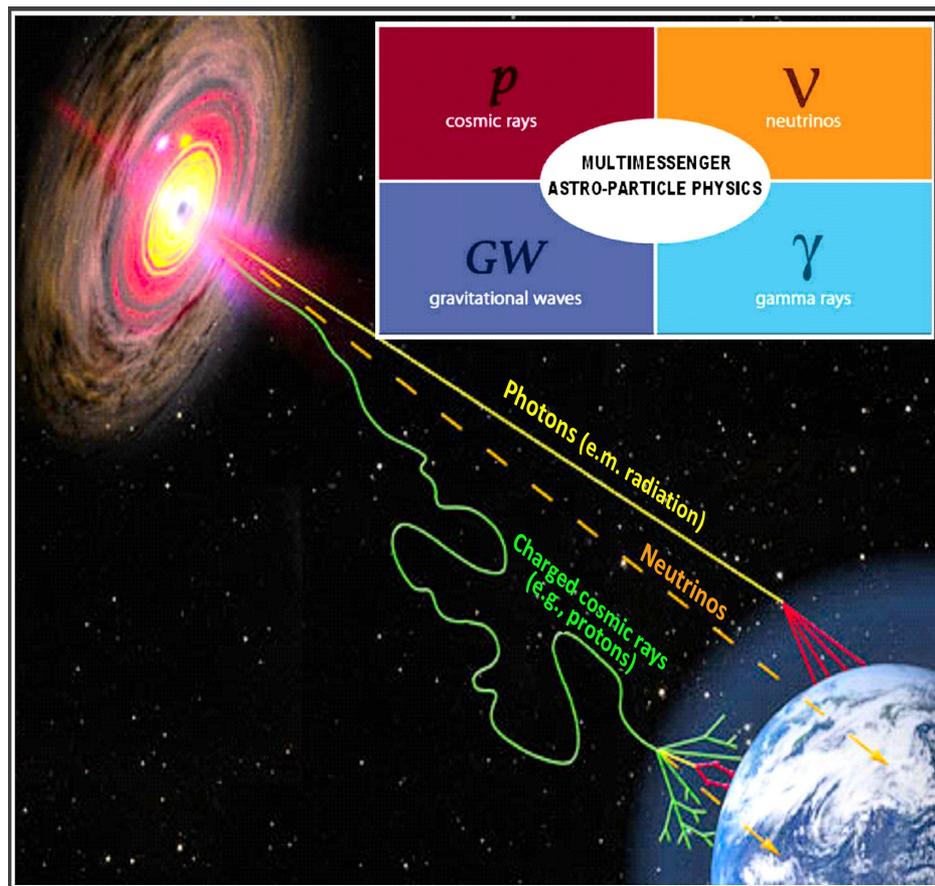
Fisica delle astro-particelle

- ❑ **Astronomia:** (stella-legge) osservazione e spiegazione dei corpi celesti (stelle, galassie etc.) ed eventi dell'universo; studio origini ed evoluzione fisica/chimica degli oggetti e dell'intero universo (**cosmologia**).
- ❑ **Astrofisica:** studio delle **proprietà fisiche** e dei **fenomeni fisici** riguardanti la materia con cui sono formati gli oggetti del cosmo. Studio basato anche sulla fisica da esperimenti di laboratorio.
→ **Astrofisica multi-frequenza** (studio della **radiazione elettromagnetica** cioè **fotoni**, osservati nelle onde radio, microonde, infrarosso, luce ottica, ultravioletto, raggi-X, raggi gamma).
- ❑ **Fisica delle astroparticelle:** è la **fisica fondamentale** nello spazio (rivelatori di particelle posti su **satelliti**, **sonde spaziali**, **stazioni spaziali**, **palloni d'alta quota**) cioè la **fisica delle particelle elementari** che usa l' **Universo** come **laboratorio**) ma anche la fisica in **laboratori di superficie**, **laboratori sotterranei** (es. i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'INFN), **laboratori sottomarini**, e **d'alta quota**.
→ **Fisica delle astroparticelle multi-messaggero** (raggi cosmici, fotoni e soprattutto fotoni ad alta energia chiamati raggi-gamma, neutrini, onde gravitazionali, processi fisici rari).



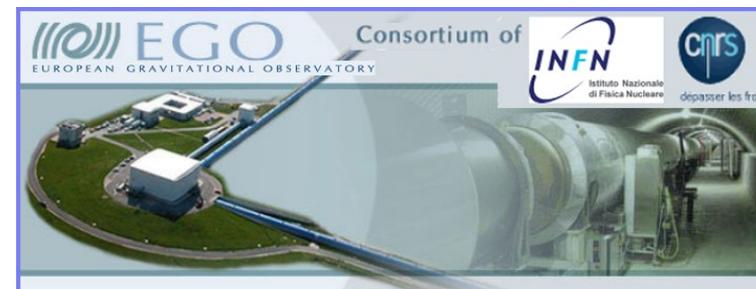
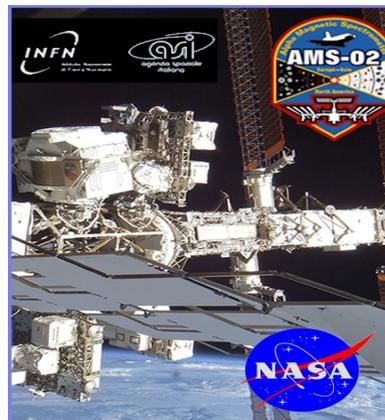
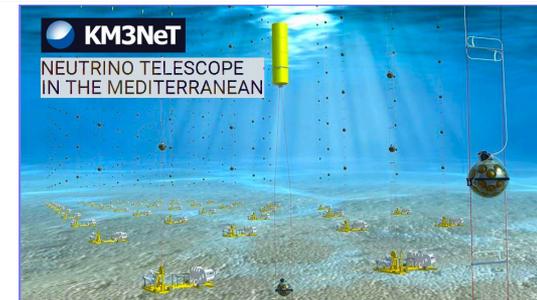
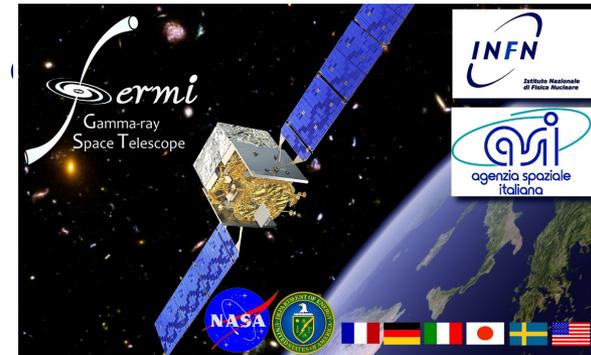
Fisica delle astro-particelle

- ❑ La fisica delle astroparticelle consiste nell'osservazione e nella misura sperimentale delle particelle provenienti dallo spazio: raggi cosmici, neutrini, raggi gamma ad alta energia, altra radiazione (fotoni ad energie più basse), onde gravitazionali, processi fisici denominati rari.
- ❑ Gli esperimenti di fisica delle astroparticelle studiano la radiazione e le particelle del cosmo con esperimenti che trovano naturale ambientazione in laboratori di superficie, sotterranei, sottomarini, d' alta quota o direttamente nello spazio (su satelliti, sonde, stazioni spaziali).
- ❑ Questo permette di studiare quella parte della fisica fondamentale che non possiamo indagare direttamente con gli acceleratori sfruttando invece e direttamente l'Universo visto come un sistema di tanti acceleratori naturali e come un enorme laboratorio di fisica.



Fisica delle astro-particelle nell'INFN

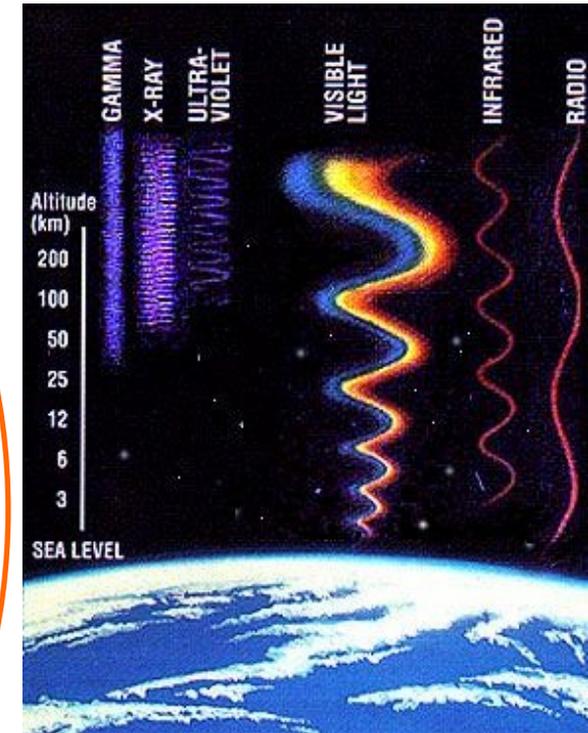
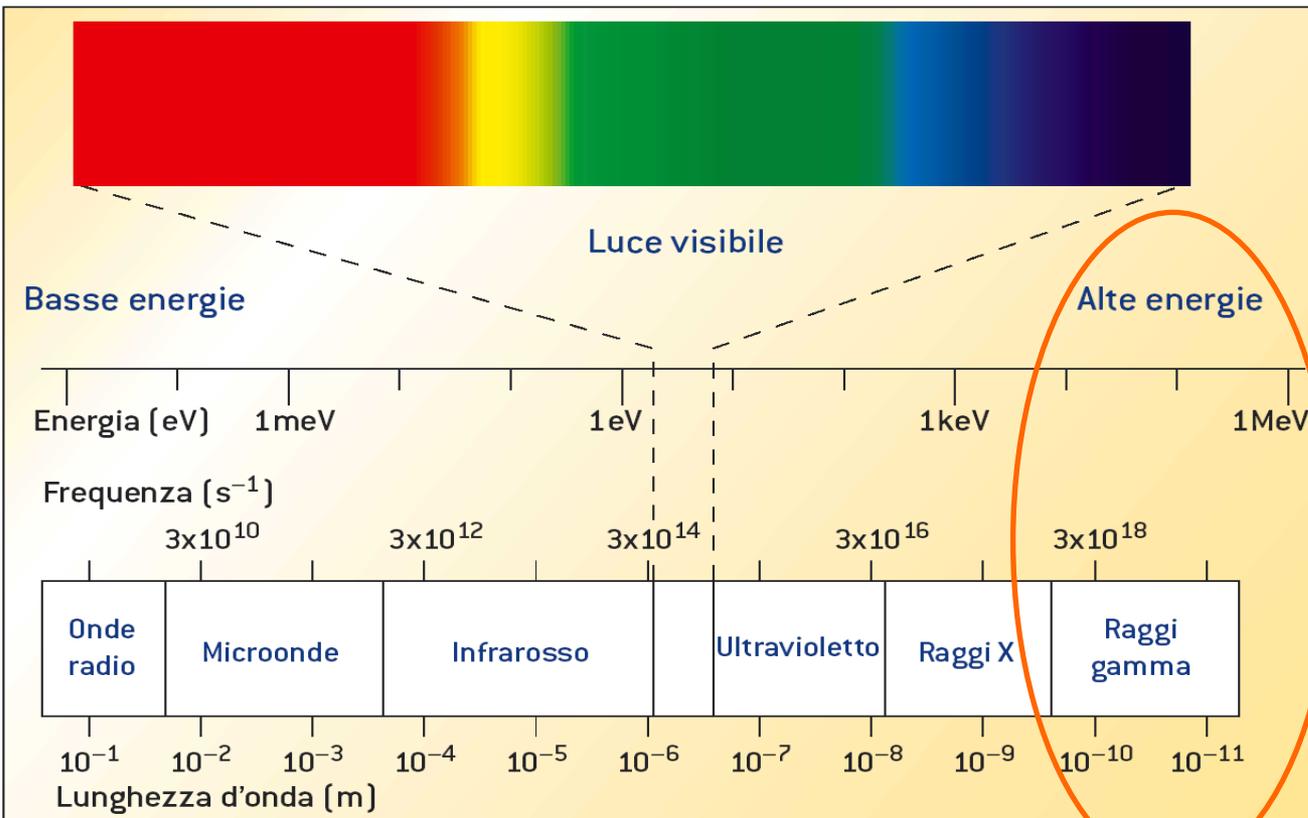
- ❑ Esempio: nei **Laboratori Nazionali del Gran Sasso** dell'INFN (il più grande laboratorio sotterraneo al mondo) vi sono rivelatori per lo studio della **materia oscura**, **neutrini**, **fenomeni rari**, rivelabili solo nelle condizioni di "silenzio cosmico" garantite dalla protezione della roccia sovrastante.
- ❑ Li si svolgono anche ricerche di carattere astrofisico (es. **neutrini solari**, da **supernova**).
- ❑ Nello spazio i **rivelatori** posti su **satelliti** hanno accesso diretto ai **raggi cosmici primari** (anche fotoni di alta energia, **raggi-gamma**) che sarebbero attenuati (o schermati del tutto) dall'atmosfera terrestre.
- ❑ Fisica astroparticellare spaziale dei **raggi gamma** di alta energia, i **laboratori sottomarini** (e sotto calotta Antartica) per la fisica con **neutrini** (atmosferici/solari/cosmici...), i grandi **rivelatori interferometrici** per le **onde gravitazionali**.



Fotoni dal cosmo (radiazione elettromagnetica)

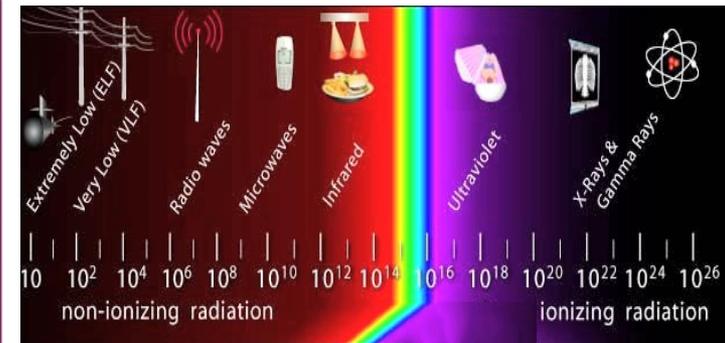
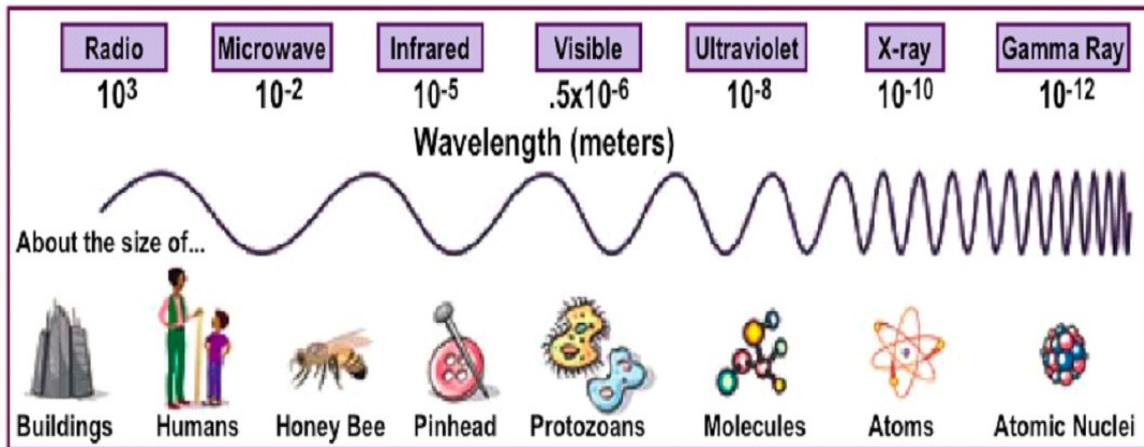
- ☐ ~0.1% dei raggi cosmici sono raggi gamma
- ☐ Il termine raggi-gamma (gamma-rays) è storico e non descrittivo. Si riferisce a una porzione dello spettro delle onde elettromagnetiche (non era noto nei primi anni del '900 quando fu

Einstein (1905) light quantum hypothesis: electromagnetic radiation is composed of discrete particles (later called PHOTONS) whose energy is $E=hc/\lambda$, where h is Planck's constant (4.1357×10^{-15} eV s), λ is the wavelength, and $c=3 \times 10^8$ m/s.



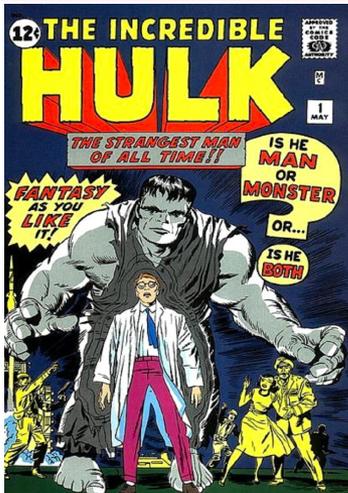
I raggi gamma

Cosa è un **raggio gamma** ? E' una delle molte forme della luce (**fotoni**). Ogni tipo di luce (fotone radio, infrarosso, ottico, UV, X, gamma) trasporta diverse informazioni. I **raggi gamma** sono il tipo di luce di più alta **energia** che esista. Ci danno informazioni sugli **oggetti** e **fenomeni** più energetici ed estremi del Cosmo.



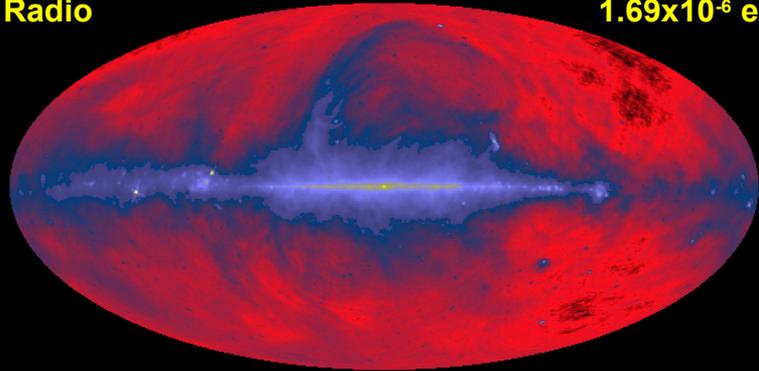
Che cosa ha trasformato David Banner nell'incredibile Hulk dei fumetti? **I raggi Gamma!**

Perche i raggi gamma soni molto potenti (decadimenti, reazioni ed **esplosioni nucleari**, fenomeni molto energetici prodotti da **pulsar**, **buchi neri**, **shock**, **getti di plasma e gas**, **annichilazione materia-antimateria**, **diffusione Compton inversa**, possibili interazioni prodotte da **materia oscura**, etc.).



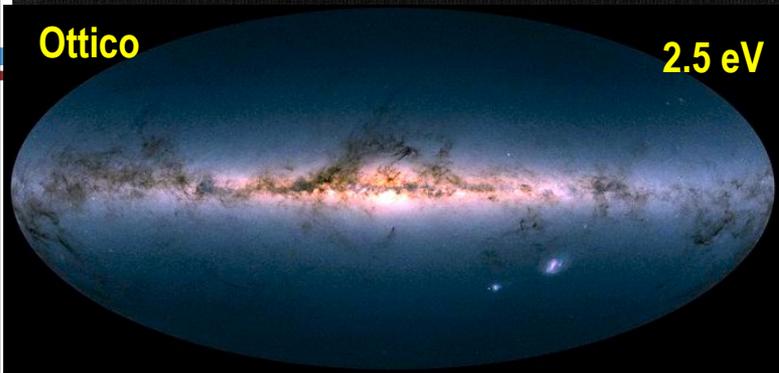
Fotoni: mappe del cielo (astronomia) multi-frequenza

Radio 1.69×10^{-6} eV

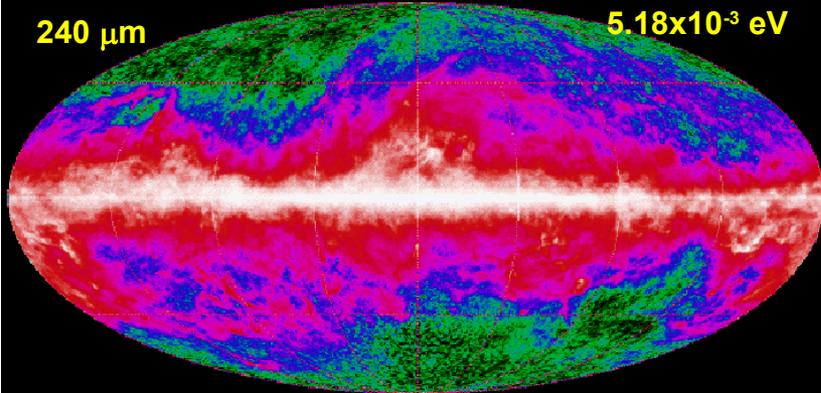


Ottico

2.5 eV

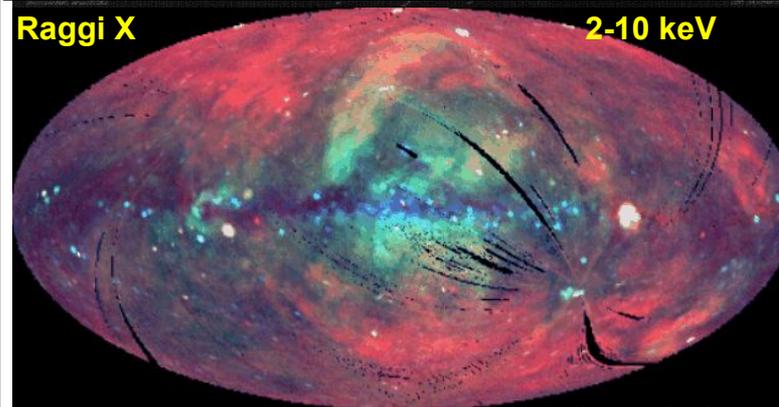


240 μm 5.18×10^{-3} eV

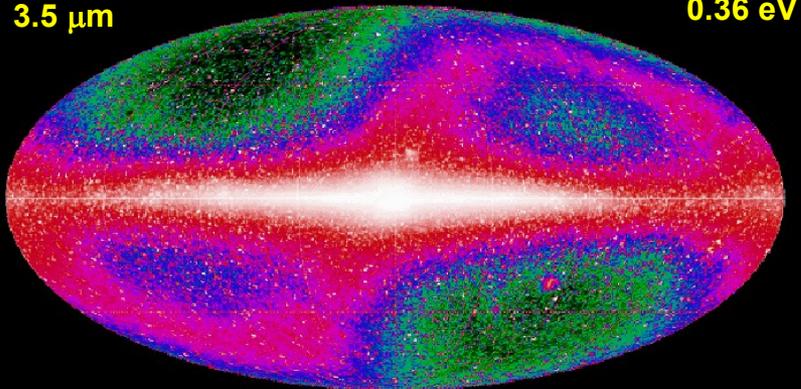


Raggi X

2-10 keV

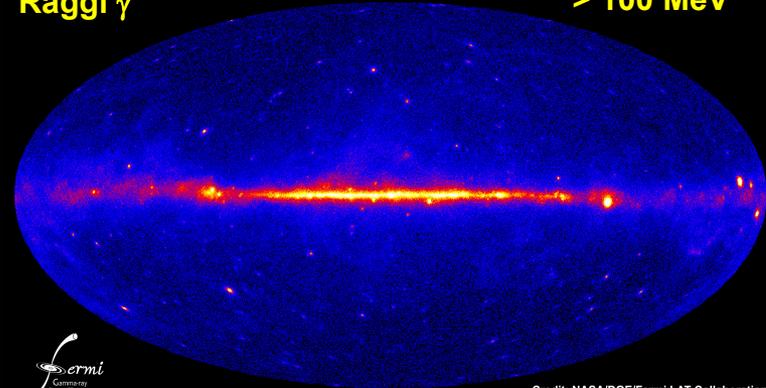


3.5 μm 0.36 eV



Raggi γ

> 100 MeV



L'aspetto del cielo e quello che vi appare evidente cambiano a seconda della frequenza della radiazione elettromagnetica (e quindi del diverso strumento) con cui lo osserviamo.



Lancio del Fermi Gamma-ray Space Telescope

General Spacecraft Information:

Lifetime	5-10 years
Height	2.9 m (9.2 feet)
Width	1.8 m (4.6 feet) across spacecraft bus
Mass	4,303 kg (9,487 lbs)
Download Link	40 megabits/second
Power	1,500 watts
Launch	June 11, 2008

Launch from Cape Canaveral Air Station

11-June-2008 at 12:05PM EDT
Circular orbit, 565 km altitude (96 min period), 25.6 deg inclination.



Fermi Gamma-ray Space Telescope: due strumenti, il LAT ed il GBM

The Large Area Telescope (LAT)

20 MeV - 300 GeV - >2.5 sr FoV

the LAT

modular - 4x4 array
7 ton - 650watts

Tracker (4x4 array of towers)

Precision Si-strip Tracker (TKR)
18 XY tracking planes with tungsten foil converters. Single-sided silicon strip detectors (228 μ m pitch, 900k strips) Measures the photon direction; gamma ID.

ACD

Segmented Anticoincidence Detector (ACD) 89 plastic scintillator tiles. Rejects background of charged cosmic rays; segmentation mitigates self-veto effects at high energy.

Calorimeter

Hodoscopic CsI Calorimeter (CAL) Array of 1536 CsI(Tl) crystals in 8 layers. Measures the photon energy; image the shower.

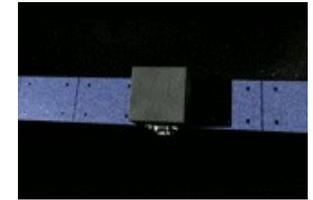
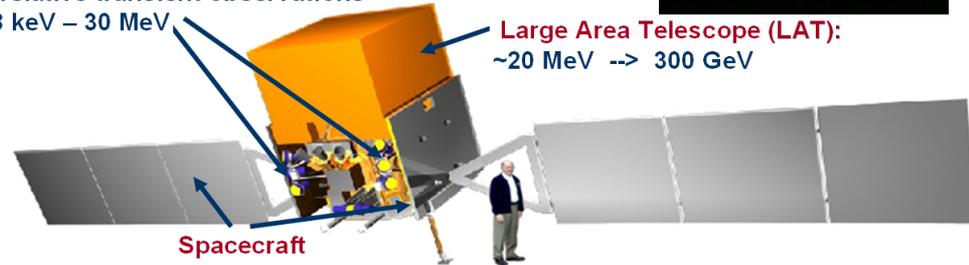
Electronics System

Includes flexible, robust hardware trigger and software filters.

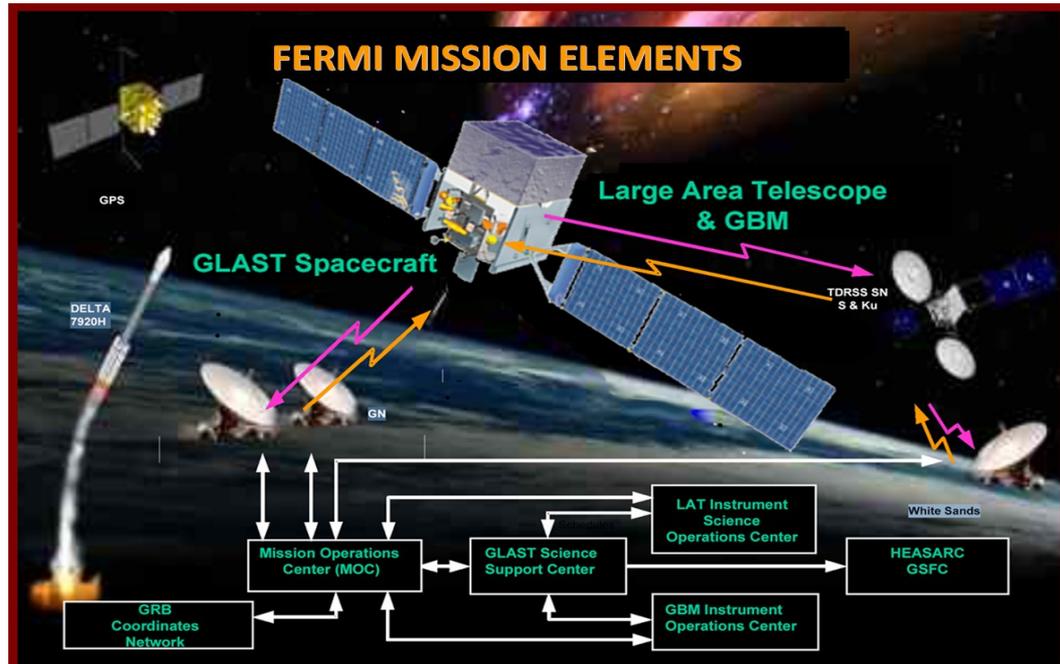
The Burst Monitor (GBM)

8 keV - 40 MeV - 9.5 sr FoV

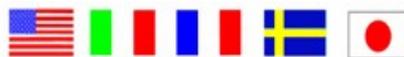
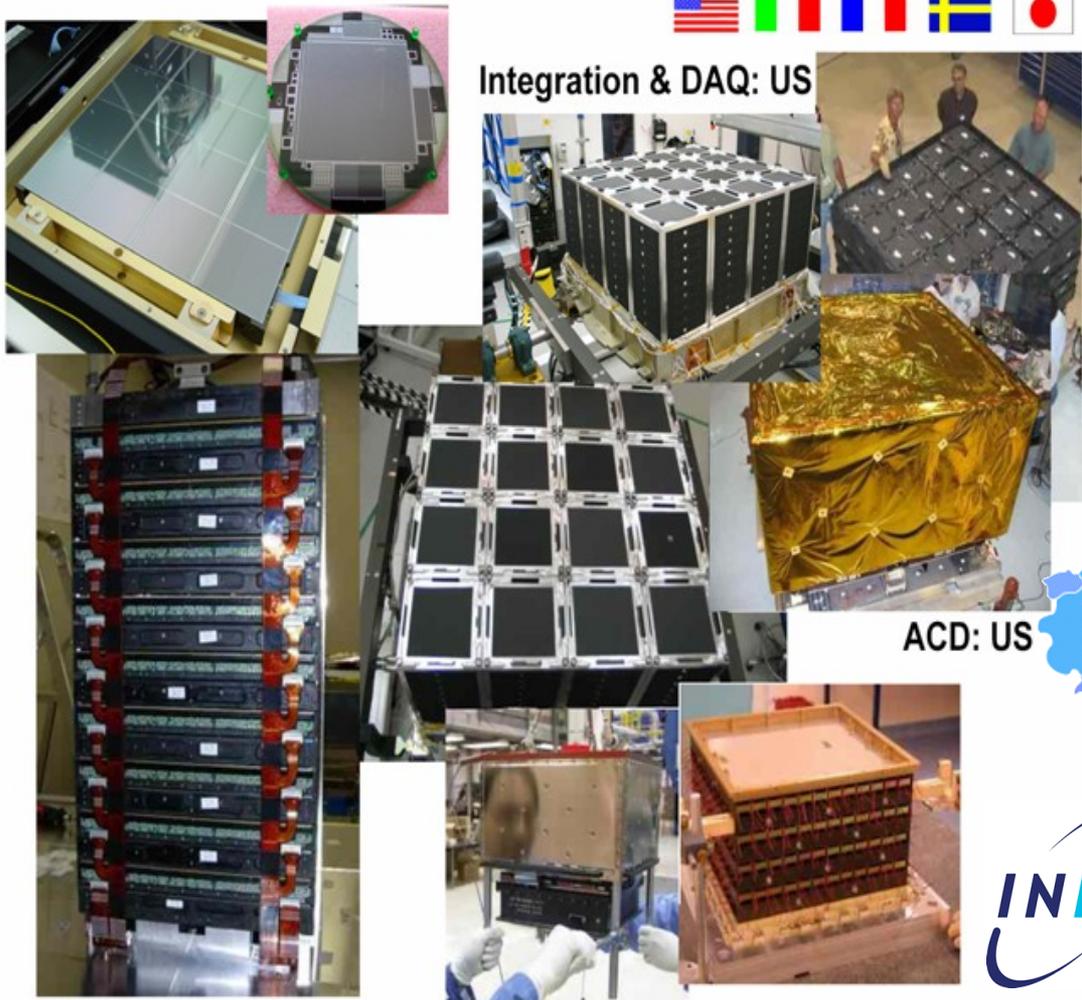
Gamma Ray Burst Monitor (GBM):
correlative transient observations
 ~ 8 keV - 30 MeV



FERMI MISSION ELEMENTS



Strumento LAT di Fermi: uno sforzo INFN e internazionale



Integration & DAQ: US

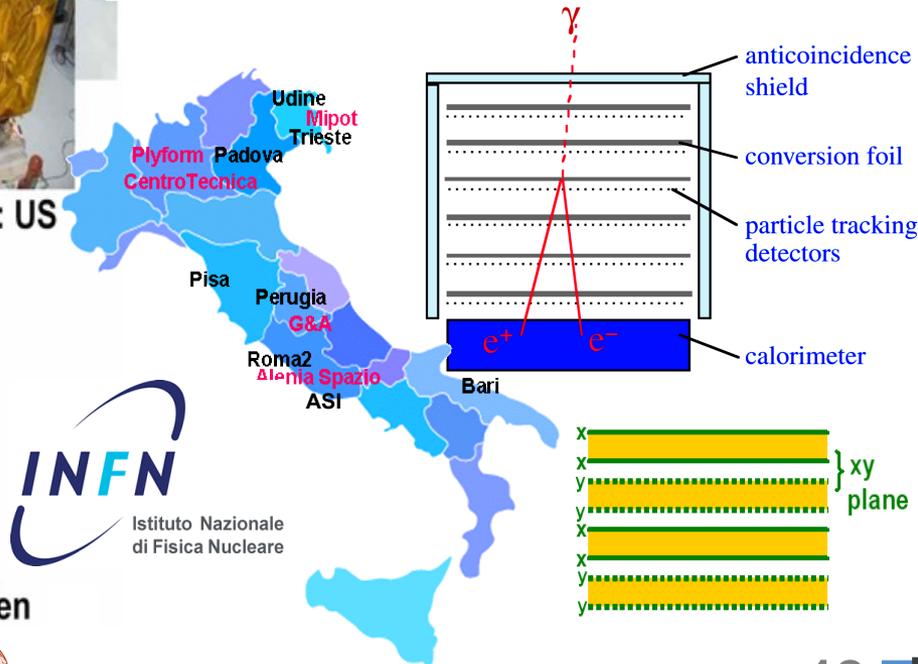
ACD: US

TRACKER details:

- ❑ 16 tower modules: $37 \times 37 \text{ cm}^2$ active cross section/layer
- ❑ 83 m^2 of Si (11500 Single Strip Detectors, $\sim 1\text{M}$ channels, strip-pitch: $228 \mu\text{m}$)
- ❑ 18 xy layers per tower 19 "tray" structures, 12 with $3\% X_0 W$ on top, 4 with $18\% X_0 W$ on bottom, 3 with no converter foils. W foils followed by x,y plane.
- ❑ Trays stack and align at their corners. Electronics on sides of trays: minimize gap between towers

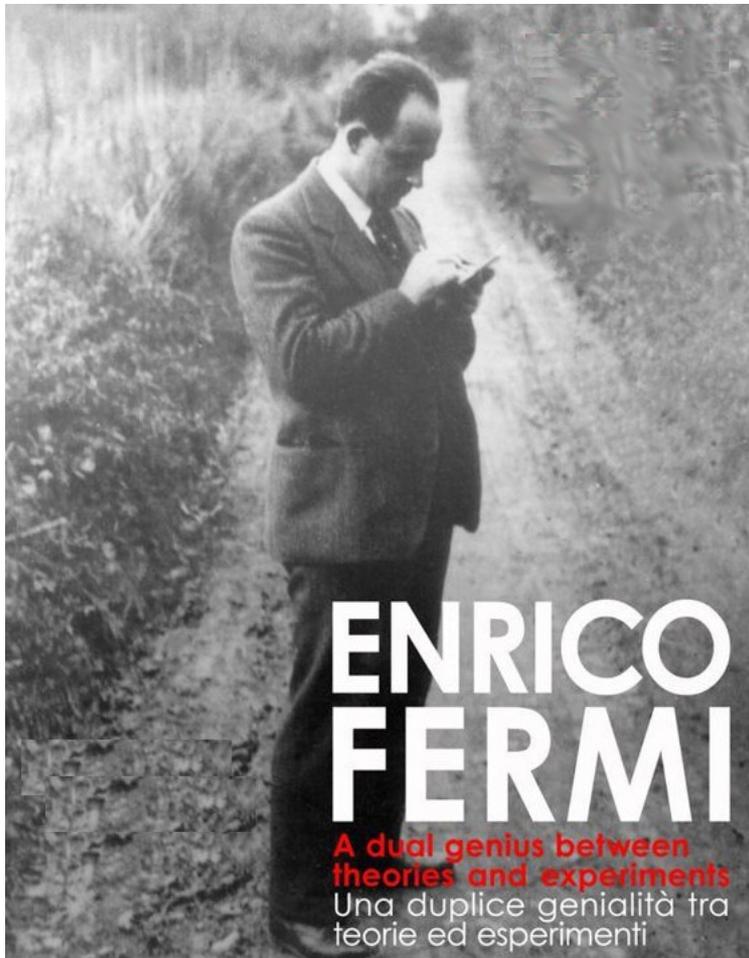
Tracker: US, Italy, Japan

Calorimeter: US, France, Sweden



INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Il nome: *Fermi* Gamma-ray Space Telescope



Enrico Fermi ed I “ragazzi di via Panisperna” a Roma



Il Terzo Fermi Symposium a Roma nel 2011



DoE–NASA partnership internazionale

GLAST rinominato *Fermi* dalla NASA il 26 Agosto 2008

“ Enrico Fermi (1901-1954) ... was the first to suggest a viable mechanism for astrophysical particle acceleration. This work is the foundation for our understanding of many types of sources to be studied by the Fermi Gamma-ray Space Telescope, formerly known as GLAST. ”

“ Questo nuovo nome e' stato selezionato con un sondaggio pubblico realizzato dalla NASA e che ha ricevuto piu' di 12 mila risposte. Oltre ad avere un legame diretto con la scienza dei raggi-gamma della nostra nuova missione, **Fermi ha un significato speciale per il DoE, l'ASI e l'INFN, tre agenzie che hanno maggiormente contribuito alla missione**”

Jon Morse
Director of Astrophysics Division, NASA HQ, Washington DC

Fermi LAT: telescopio a produzione di coppie per alte energie tali che $E = mc^2$ diviene importante

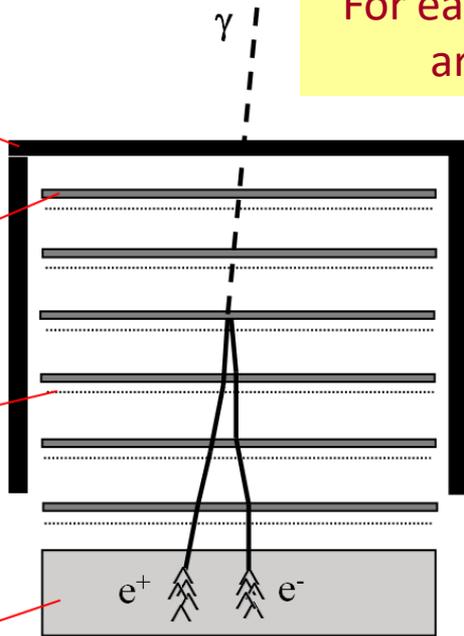
Principle of Operation

Charged particle anticoincidence detector

Conversion foils

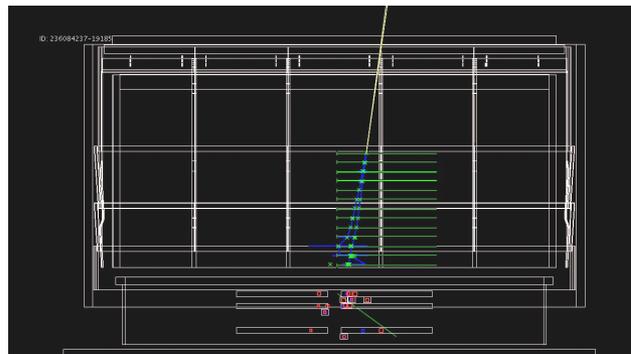
Particle tracking detectors

Calorimeter (energy measurement)



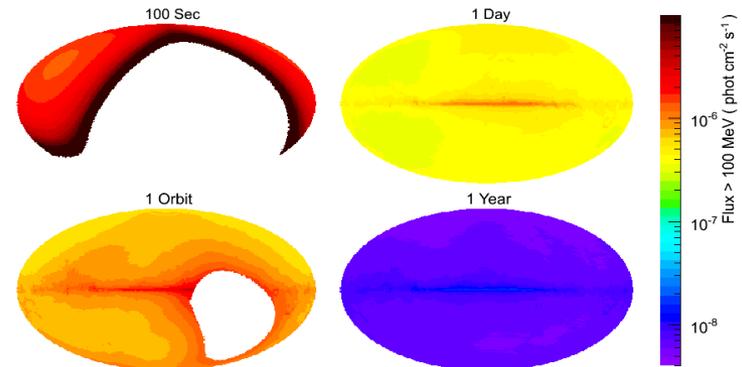
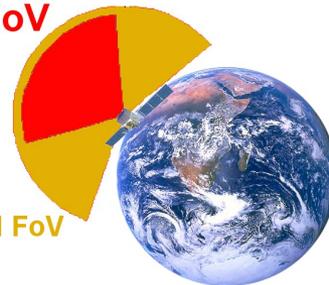
For each event, the LAT measures three quantities: arrival direction, energy, and arrival time.

- ❑ A key point - because gamma rays are detected one at a time like particles, the *Fermi* telescopes do not have high **angular resolution** like radio, optical or X-ray telescopes. **No pretty pictures** of individual objects.
- ❑ Instead, *Fermi* trades resolution for **field of view**. The LAT field of view is 2.4 steradians (about **20%** of the sky), and the GBM field of view is over 8 steradians.
- ❑ The *Fermi* satellite is usually operated in a **scanning mode**, always looking away from the Earth.
- ❑ The **combination of huge field of view and scanning** means that the LAT and GBM view the entire sky every three hours!



LAT FoV

GBM FoV



Cosa ci dice il cielo nei raggi gamma

Gamma rays as Signatures:

- Signatures of Extreme Systems: Energy Sources
- Signatures of Exotic Particles: Dark Matter Searches

Gamma rays as Tracers:

- Tracing Cosmic Rays & Targets: Emission Mechanisms

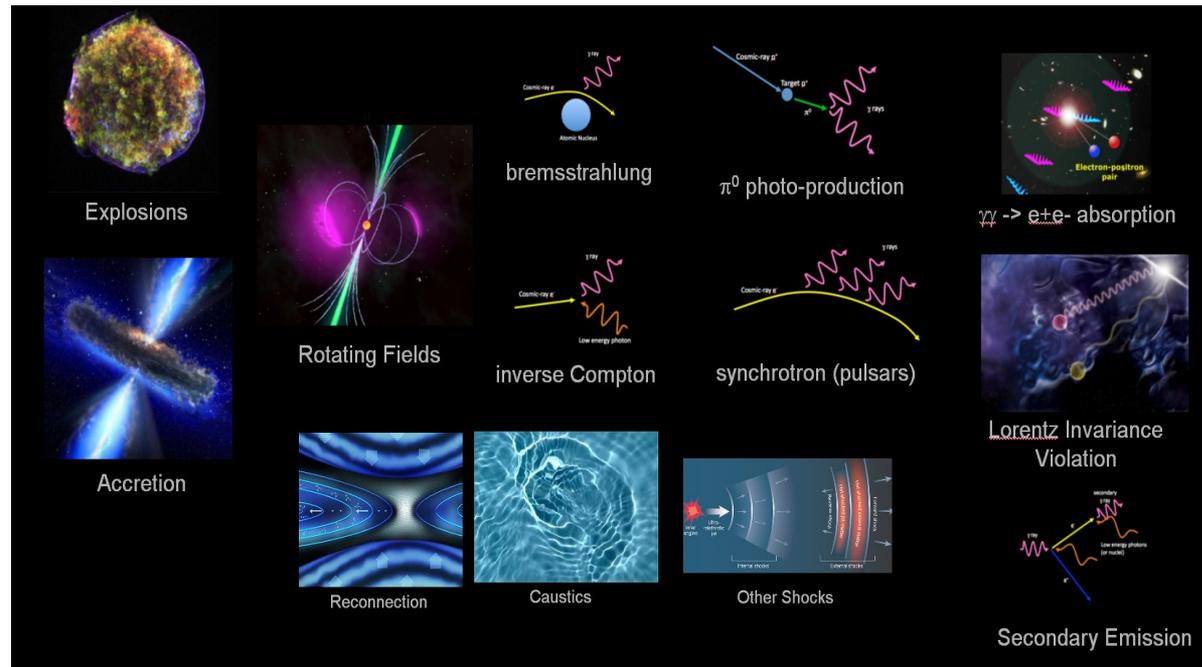
Gamma ray Sources as Probes:

- Probing Extreme Systems: Acceleration Mechanisms
- Probing the Medium: Foreground / Propagation Effects

SOME SCIENCE MENU:

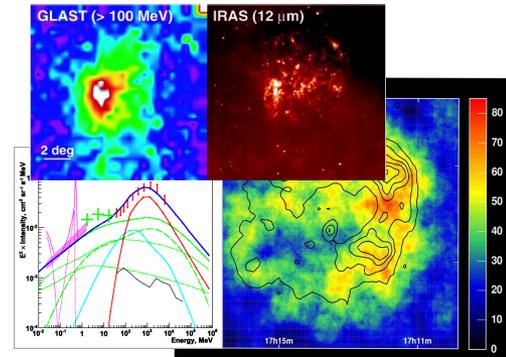
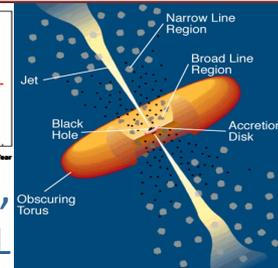
- Active galactic nuclei (blazars, quasars, radiogalaxies, etc.)
- Gamma ray bursts
- Supernova remnants
- Pulsars
- X-ray binaries and microquasars
- Solar flares and solar system objects
- Normal galaxies, clusters of galaxies
- Unidentified sources/new populations
- Study of diffuse gamma-ray emission
- Cosmic-ray acceleration & propagation
- Study of Extra-galactic background light (EBL)
- Search for Particle Dark matter/ tests of new physics
- Test Quantum Gravity
- Serendipity (survey/monitor observing mode)

L'osservazione del cielo nei raggi gamma interessa entrambe le comunità della fisica delle particelle delle alte energie e dell'astrofisica delle alte energie.

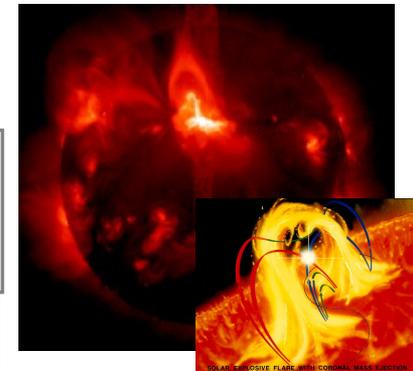
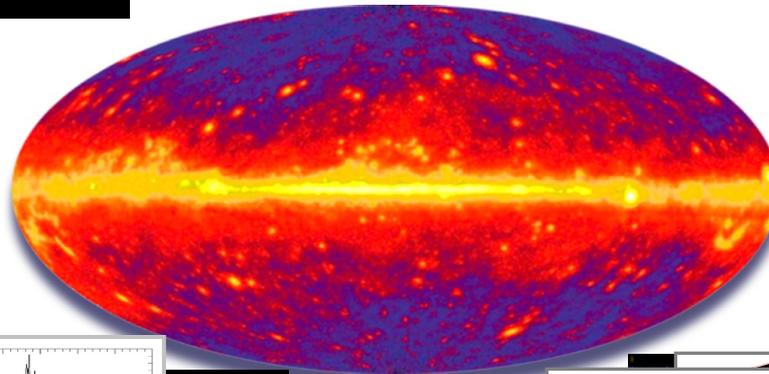


Lo zoo dell'astronomia gamma sopra 100 MeV

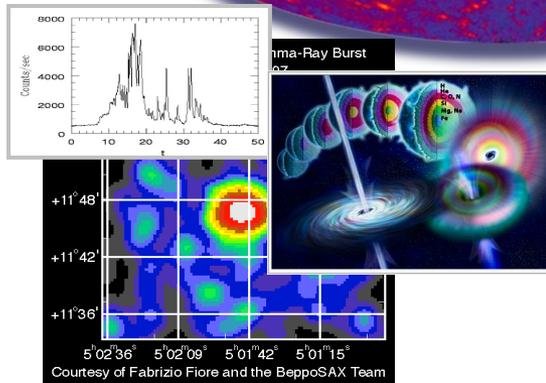
Active Galactic Nuclei, blazars, relativistic jets, EBL



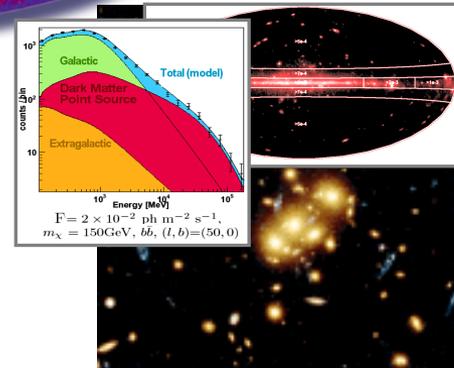
Diffuse, Molecular Clouds, SNR, Cosmic ray accelerat.



Solar flares

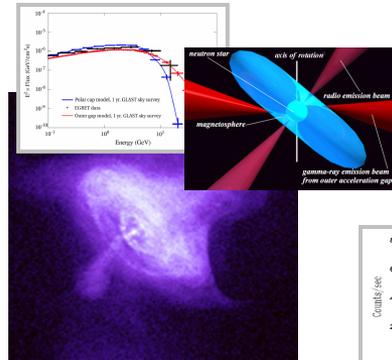


Gamma Ray Bursts

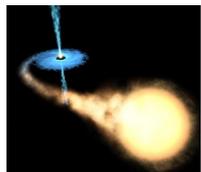


Dark matter, cosmology, particle physics

Unidentified sources



Pulsars



Microquasars

0.01 GeV

0.1 GeV

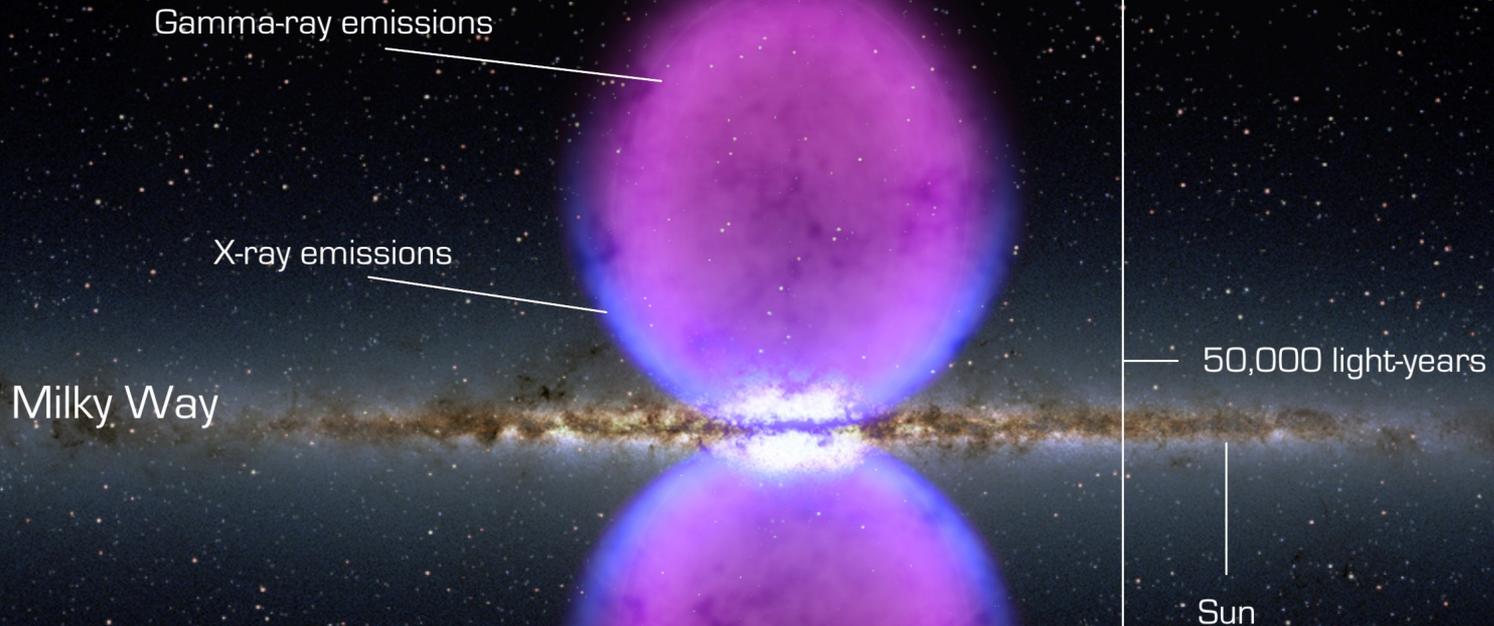
1 GeV

10 GeV

100 GeV

1 TeV

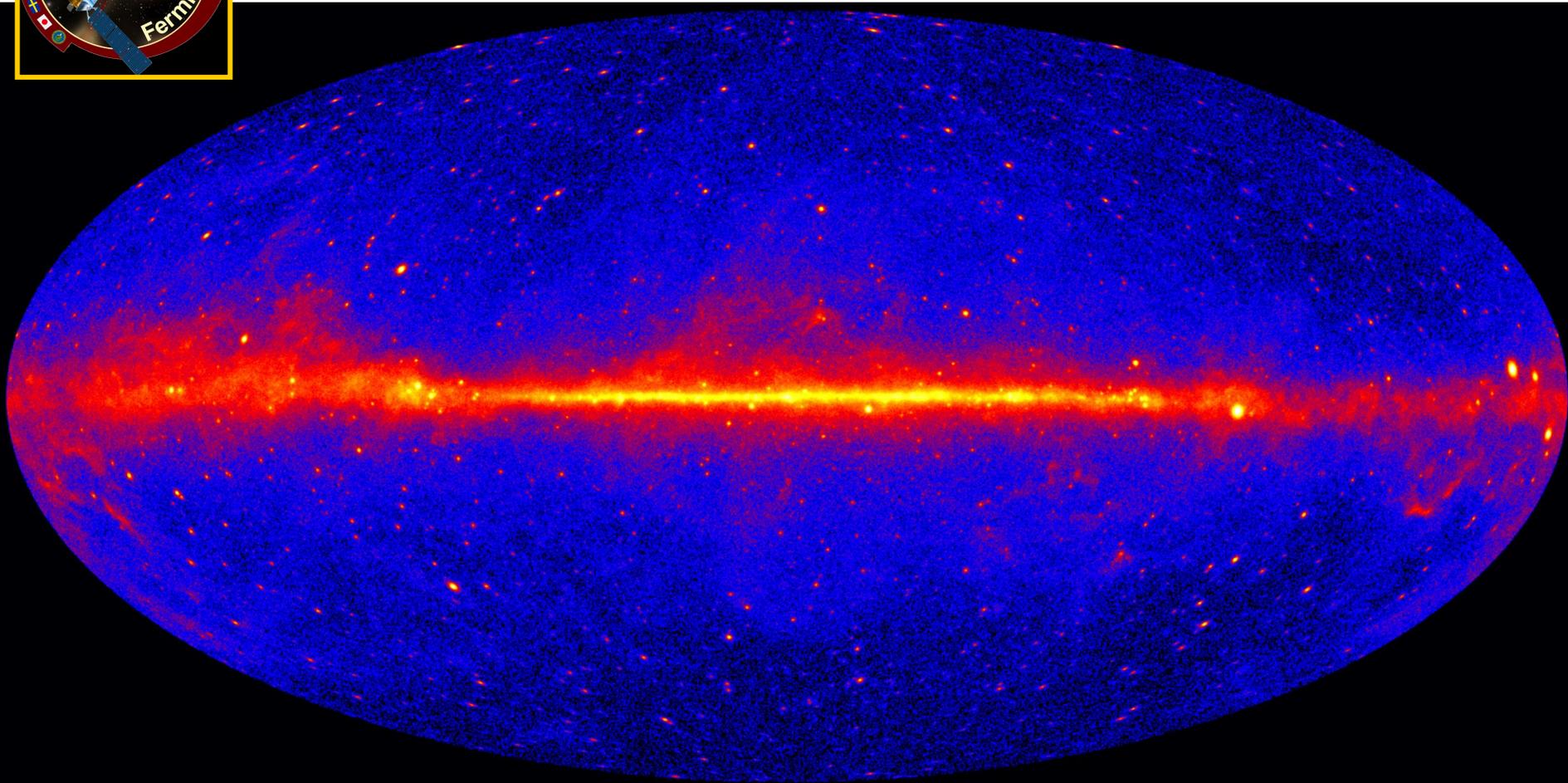
Esempio: le bolle gamma della nostra Galassia



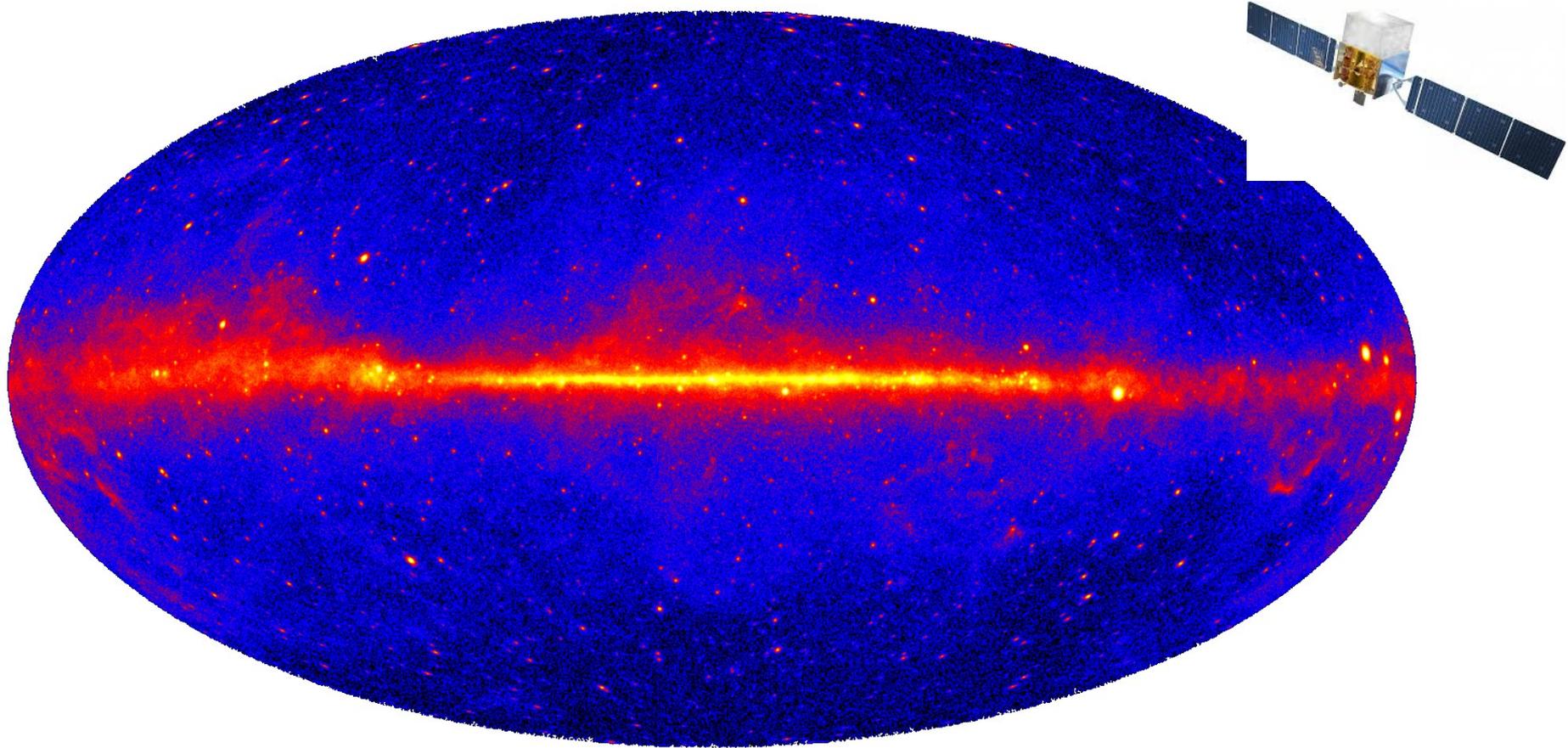
These bubbles may indicate past energetic activity in the center of our Galaxy.

Il cielo nei raggi gamma visto dall'esperimento *Fermi* LAT

Il cielo nei raggi gamma in coordinate galattiche (piano della nostra galassia Via Lattea è la fascia centrale) con scala colori arbitrari per l'intensità (luminosità). Mappa ottenuta accumulando i primi 10 anni di dati (fotoni raggi gamma) rivelati dal *Fermi* LAT.



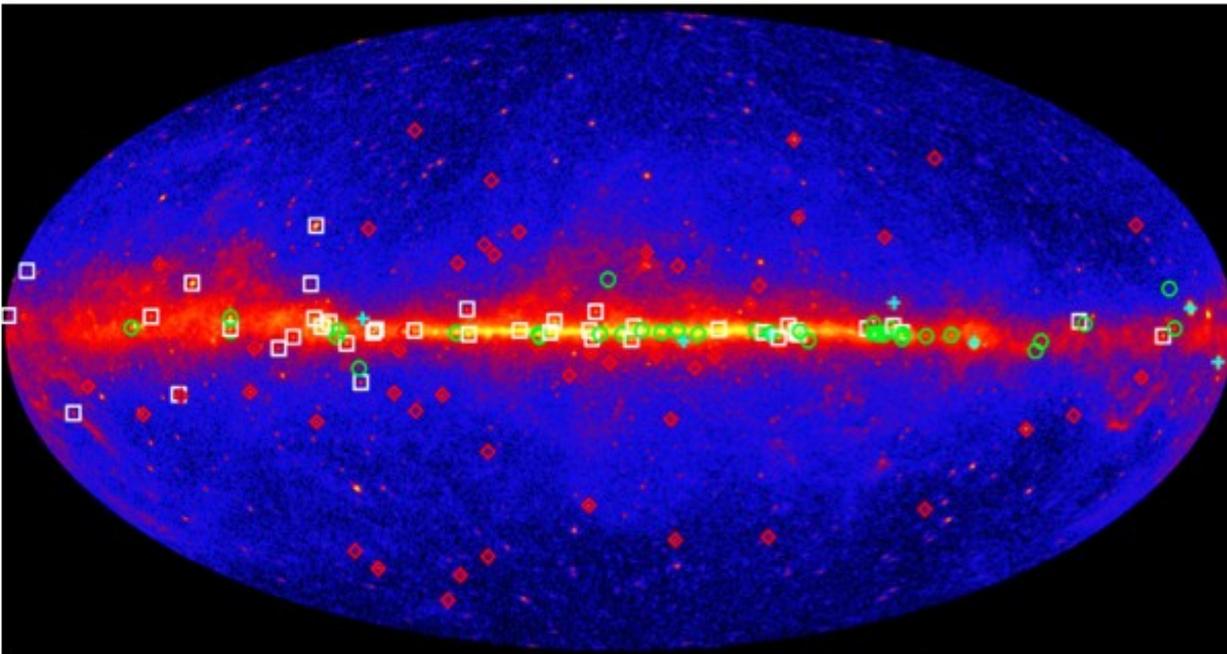
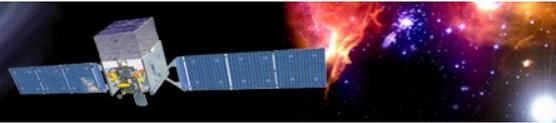
Il cielo nei raggi gamma nel 2022 (Fermi LAT)



Mappa del cielo con fotoni accumulati dal 2008 al 2022 nei raggi gamma con energia $E > 1\text{GeV}$ ottenuta dal satellite Fermi (strumento Large Area Telescope)

Il cielo nei raggi gamma: contiene quasi 300 pulsar!

Fermi
Gamma-ray Space Telescope

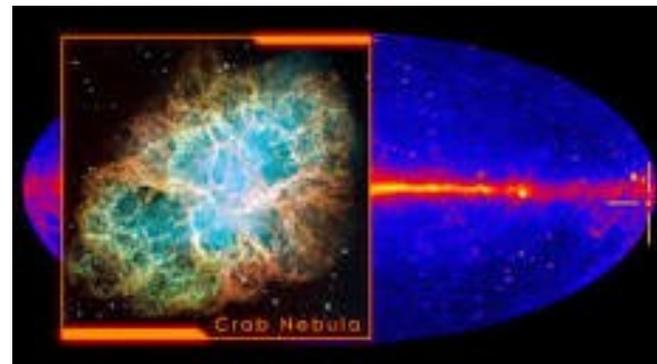
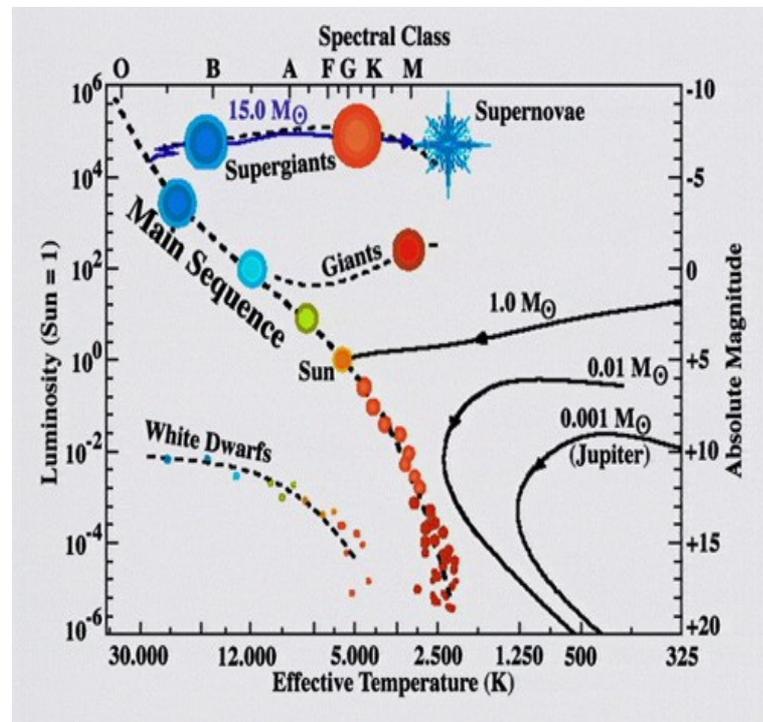


gamma-ray pulsars detected with the LAT: CGRO PSRs (plus), young radio-selected (circle), young gamma-selected (square), and MSPs (diamond).

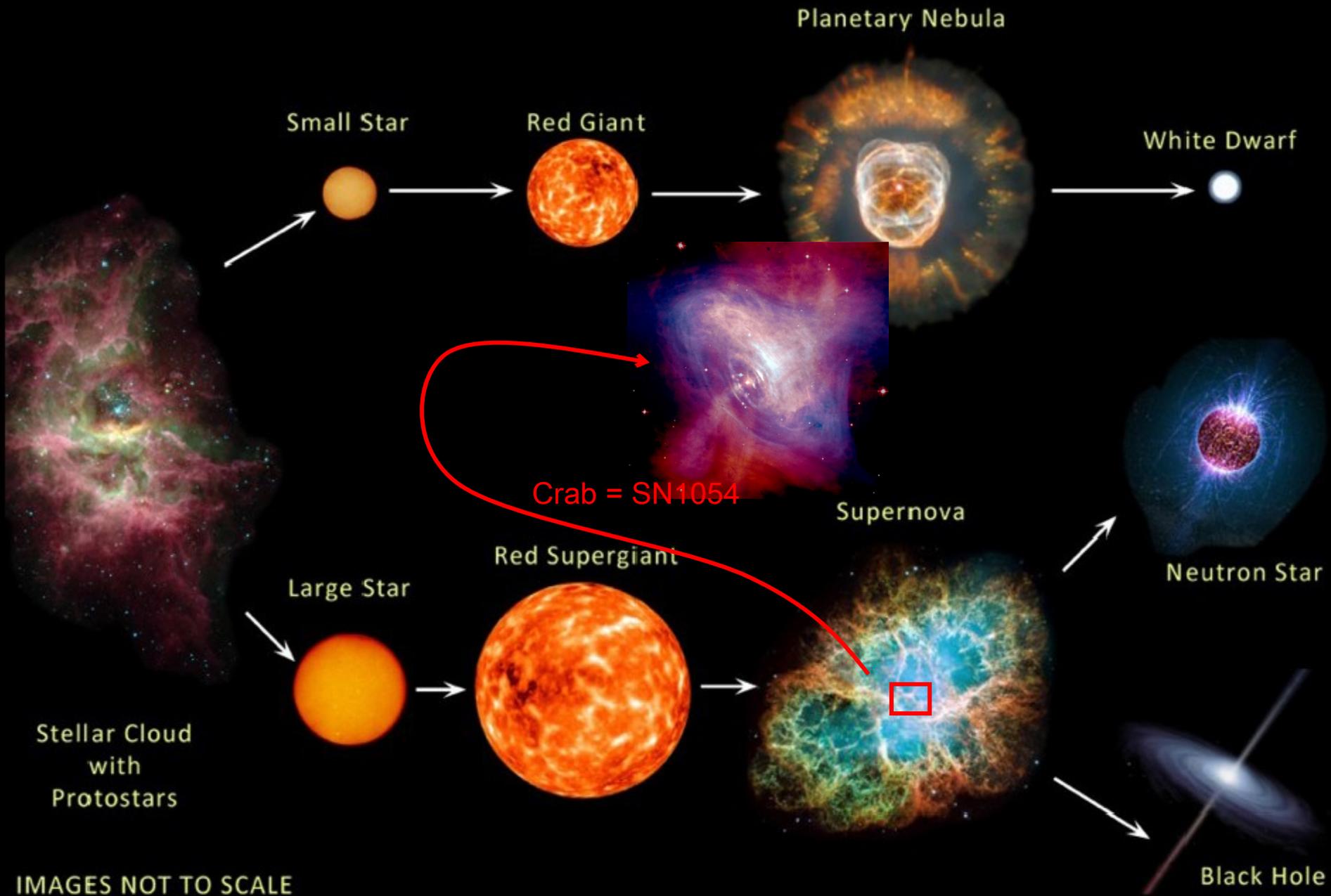


Stelle di neutroni (...e le pulsar?)

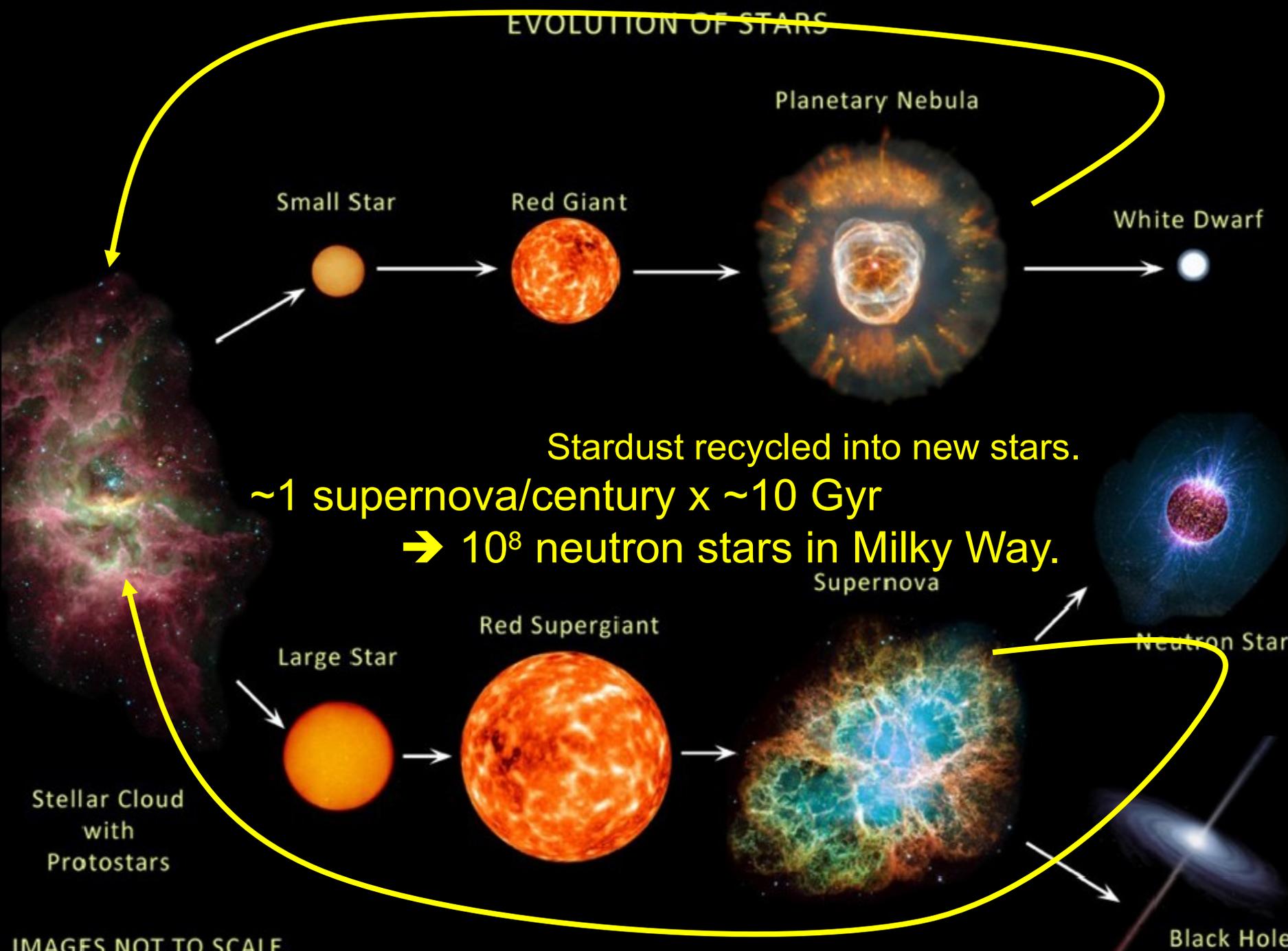
- Stelle estremamente **massicce** → esplosioni di **supernovae** visibili a milioni di anni luce → e poi **carcasse** (resti di supernovae con **stelle di neutroni** o **buchi neri**).
- MA **cosa sono le stelle di neutroni** e come **diventano pulsar** ?
- Le stelle di neutroni sono in realtà **stelle morte**. Carcasse che sfidano le leggi della materia. Si formano quando **una stella massiccia** **collassa** per poi esplodere in un supernova. Durante il collasso che avviene subito prima dell'esplosione, la **pressione** alla quale è sottoposta la materia è così enorme che i **protoni e gli elettroni** si schiacciano e si fondono, trasformandosi **in neutroni**.
- Ovviamente l'energia rilasciata da questo fenomeno è altissima. → **le supernove** sono fenomeni potentissimi e molto luminosi.



EVOLUTION OF STARS



EVOLUTION OF STARS



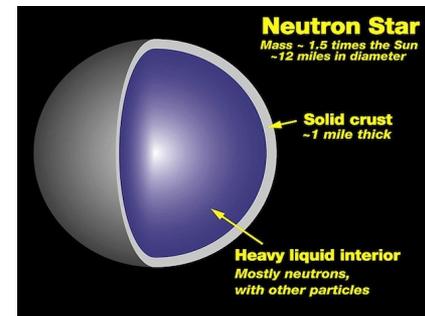
Stardust recycled into new stars.
~1 supernova/century x ~10 Gyr
→ 10^8 neutron stars in Milky Way.

Stellar Cloud with Protostars

IMAGES NOT TO SCALE

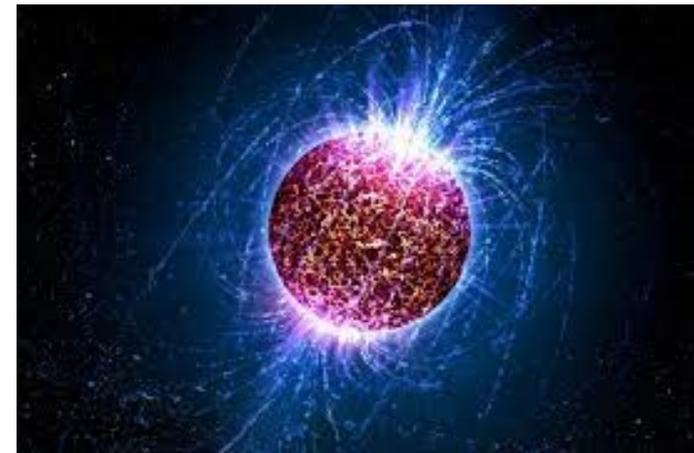
Stelle di neutroni (NS)

- Le stelle di neutroni risultanti da questo **collasso gravitazionale** sono gli oggetti più densi conosciuti, dopo i **buchi neri** ovviamente.
- Sono stelle con la massa di un Sole, ma **compressa** fino alle dimensioni di una città.
- Hanno un diametro di circa 20 km, **un cucchiaio del loro materiale peserebbe tanto quanto una montagna** e la gravità sulla superficie è circa **2 miliardi di volte più forte della gravità sulla Terra**. E anche il campo magnetico è milioni di volte più forte di quello del Sole.
- Se potessimo affettare una stella di neutroni ci accorgeremmo che **non é per niente omogenea**, o per lo meno questa è la teoria.
- Le stelle di neutroni sono fatte da **una crosta e da un nucleo**.
- La **crosta** è composta da da uno strato esterno di poche centinaia di metri, un **miscuglio molto compatto di nuclei atomici** (protoni e neutroni) ed **elettroni liberi** si muovono indipendentemente e non legati al nucleo atomico.
- La **densità** qui è talmente alta che **non si può più parlare di atomi**. In un centimetro cubo di questo strato di crosta si trova una tonnellata di materia.

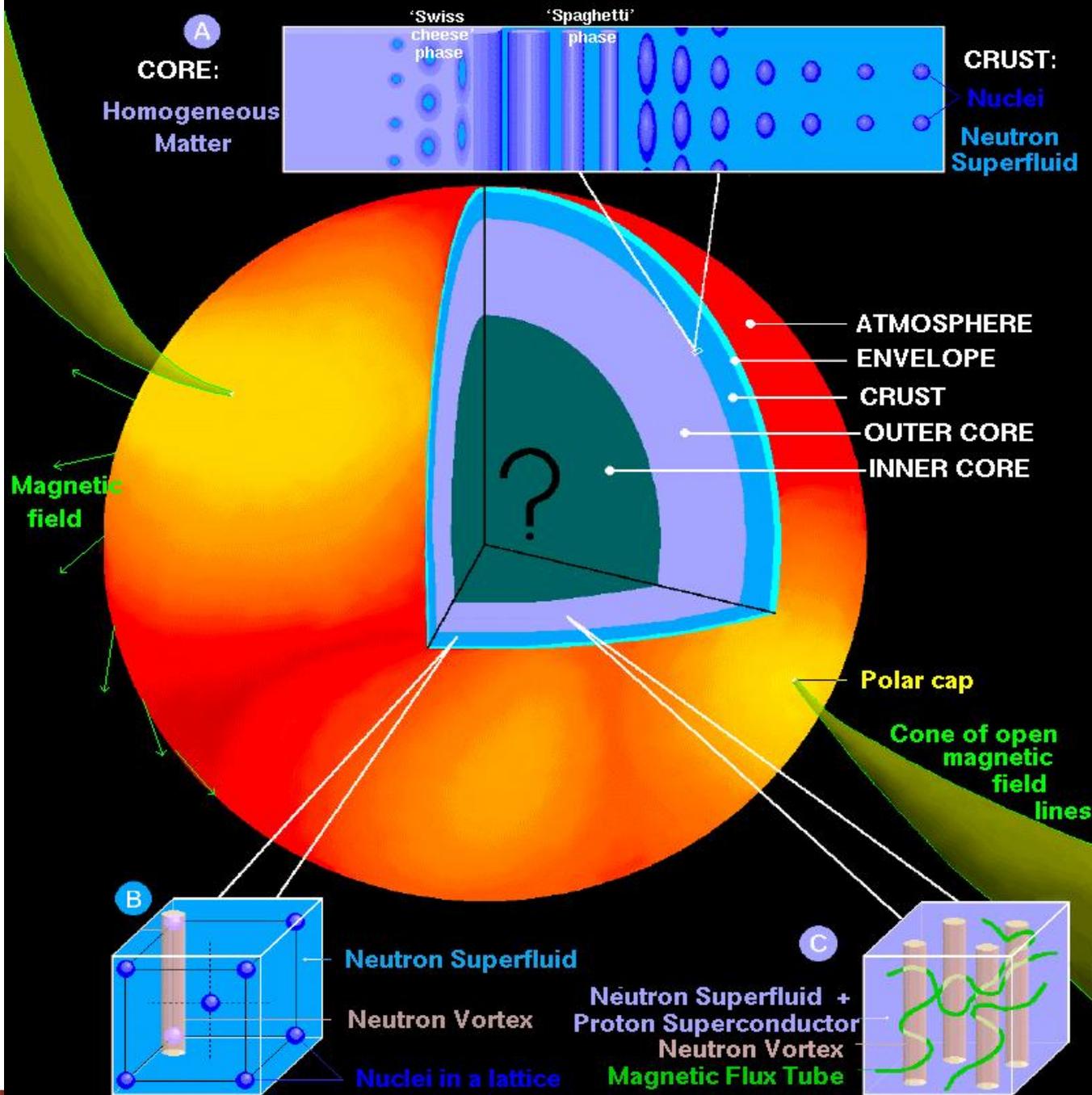


Stelle di neutroni (NS)

- Sotto a questo strato troviamo la **crosta interna**, spessa circa un paio di km e più densa dello strato sopra.
- Nella crosta interna oltre agli elettroni liberi iniziamo a trovare **anche neutroni liberi**.
- Scendendo ancora più verso l'interno troviamo il **nucleo**. Questa zona è il cuore della stella di neutroni ed ha un diametro di circa 10 / 13 km.
- La **parte esterna del nucleo** di una stella di neutroni è molto probabilmente **liquido**. Qui la pressione alla quale è sottoposta la materia è davvero altissima ed è proprio qua che i neutroni prendono la scena: **più del 90% del nucleo esterno è composto da neutroni**.
- Gli atomi come li conosciamo non riescono più a resistere. Nemmeno i loro nuclei mantengono più le caratteristiche atomiche alla quale siamo abituati. **In questa sfera liquida di circa 10 km di diametro esistono quasi solamente neutroni!**



A NEUTRON STAR: SURFACE and INTERIOR



~13 km radius.

< 1.4 to >2.5 solar masses. Superfluid core, hundreds of millions of tons per cm³.

Iron crust.

Whopping magnetic field.

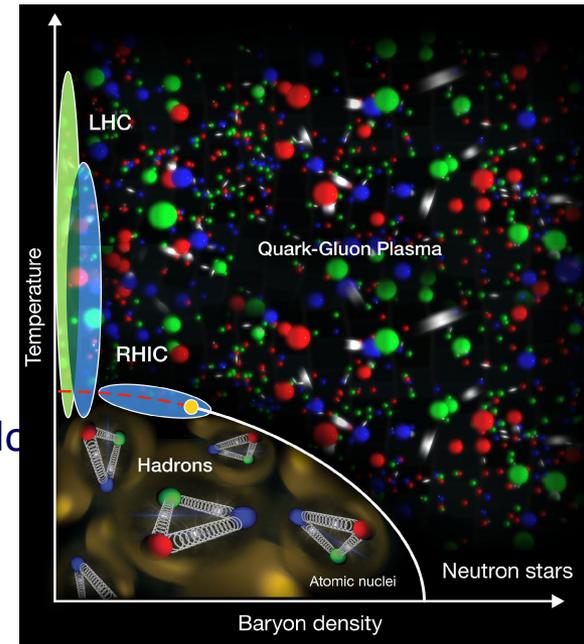
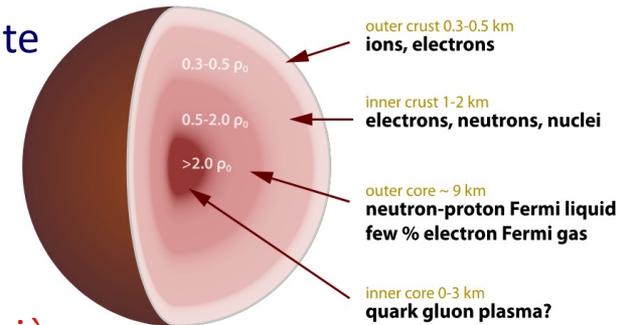
Nearby spacetime highly deformed.

Some spin faster than a blender!

Maximum spin:
~ 45k rpm
(1.7 ms spin period)

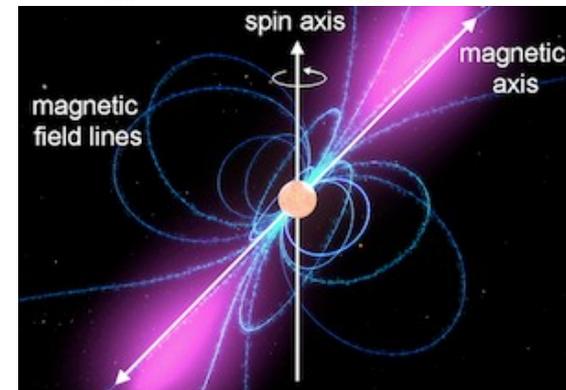
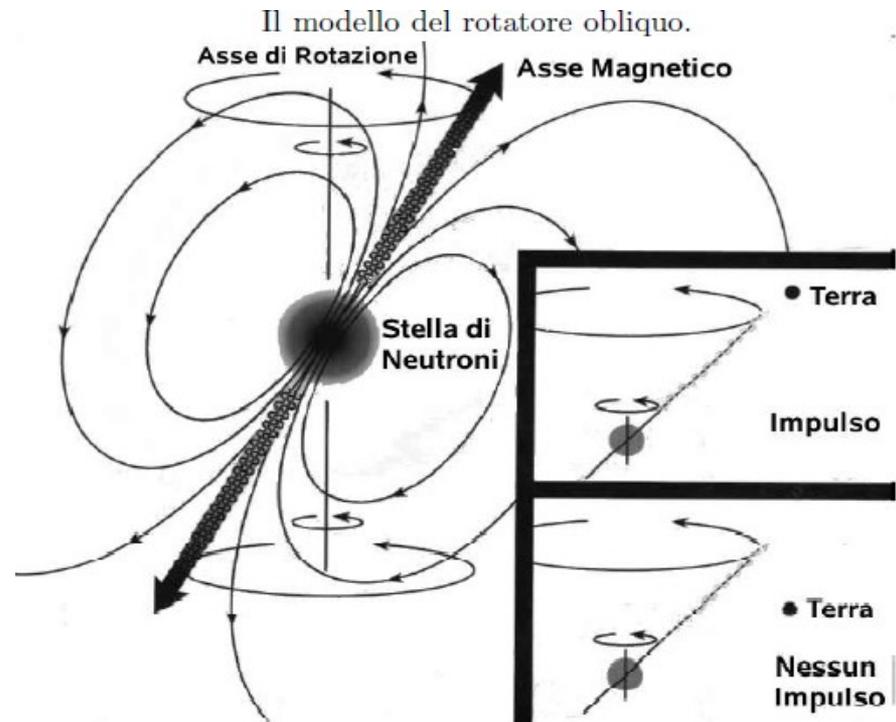
Stelle di neutroni (NS)

- Superati i primi 10 km di profondità all'interno del nucleo, e cioè negli ultimi 2 / 3 km, la pressione e la forza di gravità sono talmente alte che gli astrofisici fanno davvero fatica a capire in che stato possa essere la materia.
- Questo punto delimita l'inizio del nucleo interno della stella di neutroni. Qui le particelle elementari si comportano in modo imprevedibile. Il nucleo interno delle stelle di neutroni è il punto più denso dell'universo osservabile. La densità raggiunge probabilmente valori di circa un miliardo di tonnellate per centimetro cubo!
- La maggior parte dei fisici concorda sul fatto che nel cuore delle stelle di neutroni ci sia il plasma di quark e gluoni, un brodo di particelle subatomiche che può esistere solo a temperature o densità altissime.
- Nei primi millisecondi dopo il Big Bang l'universo era talmente caldo da essere permeato di questo plasma. Situazione che è andata via via raffreddandosi creando i primi atomi. Nel nucleo più interno delle stelle di neutroni potrebbe esserci abbastanza pressione da creare lo stesso plasma!



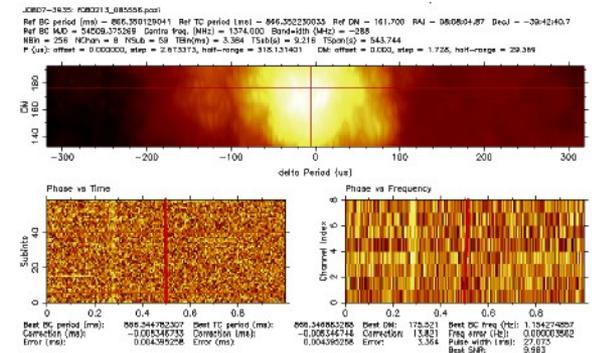
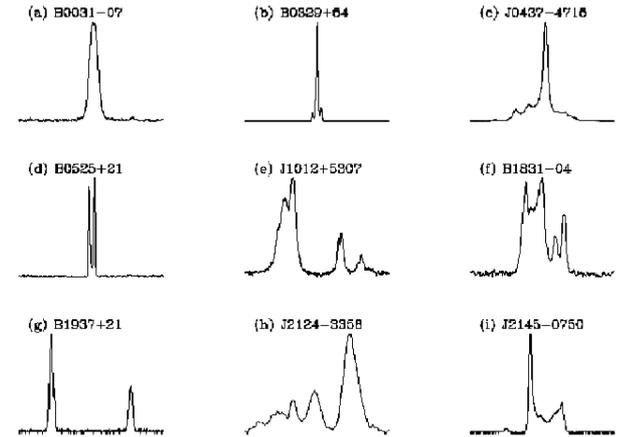
Pulsar e legame con le stelle di neutroni

- Cosa centra tutto ciò con le pulsar? Le pulsar altro non sono che stelle di neutroni con un piano rotatorio molto particolare.
- Tutte le stelle di neutroni sono in realtà anche delle pulsar. Ma ciò che le fa diventare pulsar ai nostri occhi è l'inclinazione del loro asse rispetto al nostro punto di osservazione.
- Ma ci manca un aspetto essenziale. Una stella di neutroni deriva da una stella molto grande, il cui diametro è di qualche milione di chilometri. Dopo l'esplosione ed il collasso, la stella di neutroni risultante mantiene il momento angolare della sua progenitrice. Il suo diametro è passato da qualche milione di km a poco più di 10km. Questo ha un'effetto potentissimo sulla sua velocità di rotazione che può raggiungere i 700 giri al secondo o più.



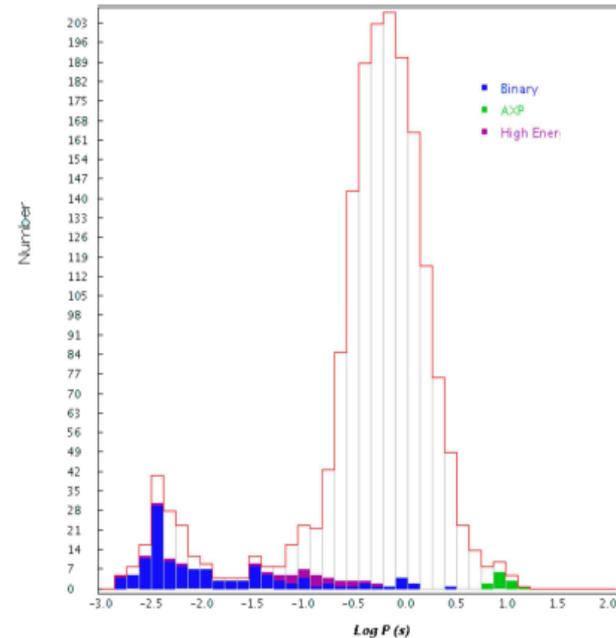
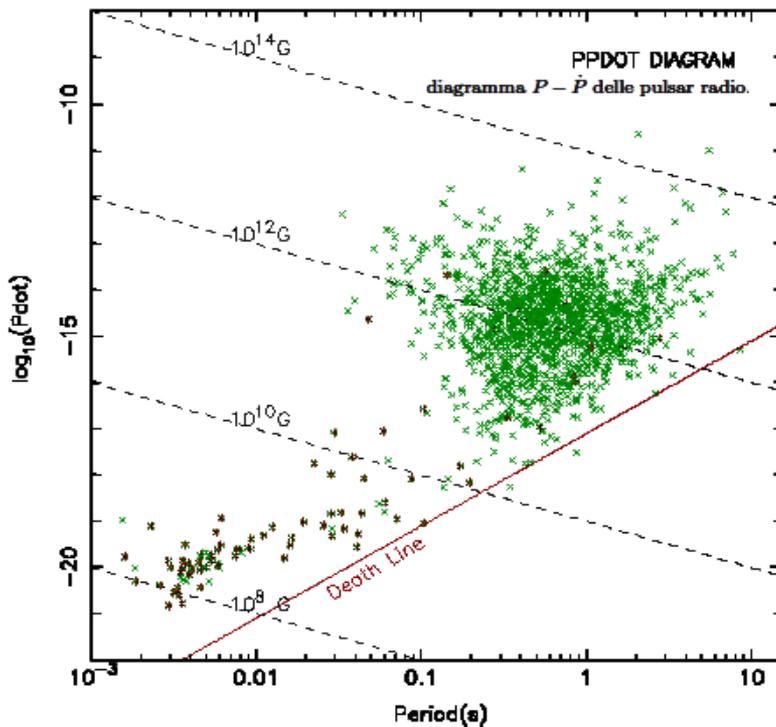
Le pulsar

- Il momento angolare si conserva. L'energia che ha un oggetto che ruota così velocemente è molto elevata. Una parte di questa enorme energia viene rilasciata attraverso il forte campo magnetico che avvolge la stella di neutroni.
- Il risultato è un fascio (beam) costante e potente di energia radiante espulso dai poli del campo magnetico della NS.
- Proprio questo fascio che intercetta la direzione della nostra visuale sulla Terra rende le stelle di neutroni anche delle pulsar.
- In base all'inclinazione che ha l'asse di rotazione della stella di neutroni ed alla sua velocità, il fascio avrà per noi sulla Terra una intermittenza diversa ("effetto faro"). Considerata la velocità di rotazione delle stelle di neutroni, potete farvi un'idea di quanto velocemente possa "lampeggiare" una pulsar.
- Esistono pulsar con impulsi 1 volta al secondo. Altre, 30 volte al secondo, fino ad arrivare a impulsi a centinaia di volte al secondo.



Le pulsar

- Ma questa rotazione è destinata piano piano a rallentare. E' un serpente che si morde la coda, più la stella ruota velocemente e più energia disperde. Più energia disperde e prima terminerà la sua rotazione. Si parla comunque di decine milioni di anni.
- Un'altra causa che determina il rallentamento di una pulsar è legata al suo **raffreddamento**. Mentre una stella di neutroni si raffredda, il suo interno inizia a diventare sempre più "superfluido".



la distribuzione del periodo di 1770 pulsar. In blu le pulsar binarie, in verde le Anomalous X-ray Pulsar ed in viola le High Energy pulsar.

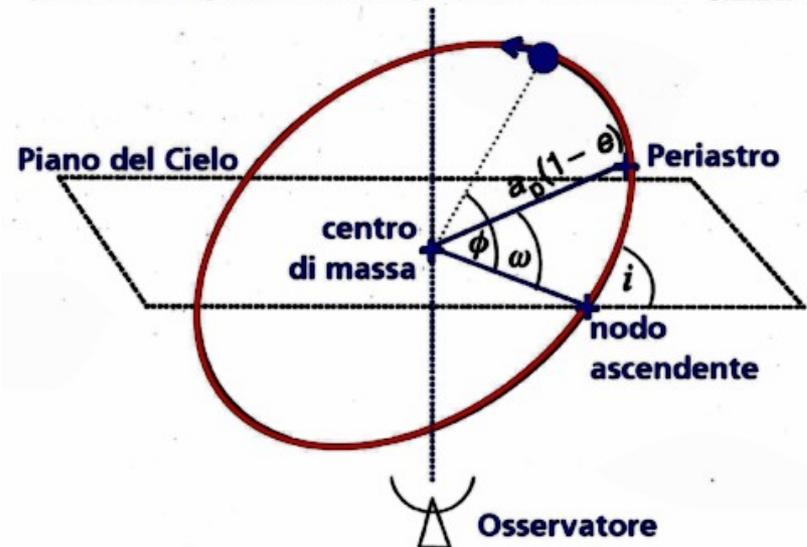
Le pulsar

- Il **superfluido** è uno stato della materia che si comporta come un fluido, ma **senza l'attrito o la "viscosità" del fluido**.
- Anche questo cambiamento di stato influenza gradualmente il modo in cui la rotazione della stella rallenta.
- Le pulsar sono oggetti straordinari, fari cosmici con ritmi secolari. Oggi ne conosciamo **più di 3300** ed il numero cresce sempre di più. **Più di 300 scoperte emettere raggi gamma**. Sono un esempio di quanto l'universo possa stupirci con le sue straordinarie stranezze.

Rappresentazione artistica del sistema binario di pulsar PSR J0737-3039A/B.

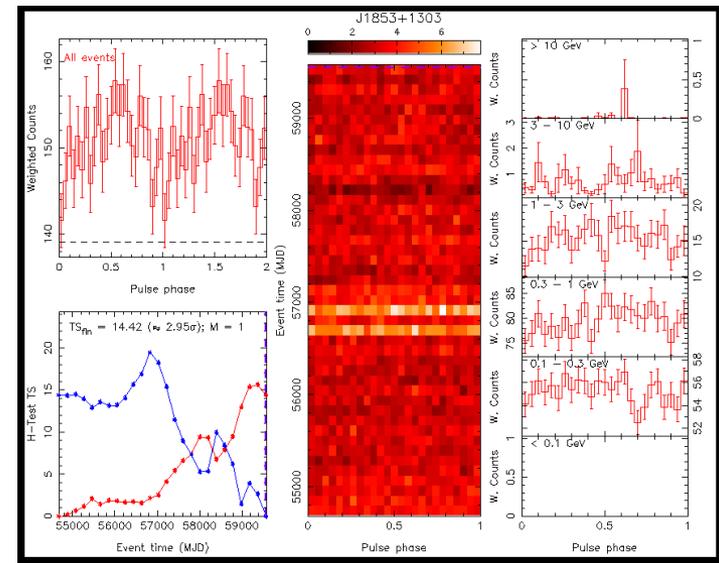


parametri Kepleriani di una pulsar in un sistema binario



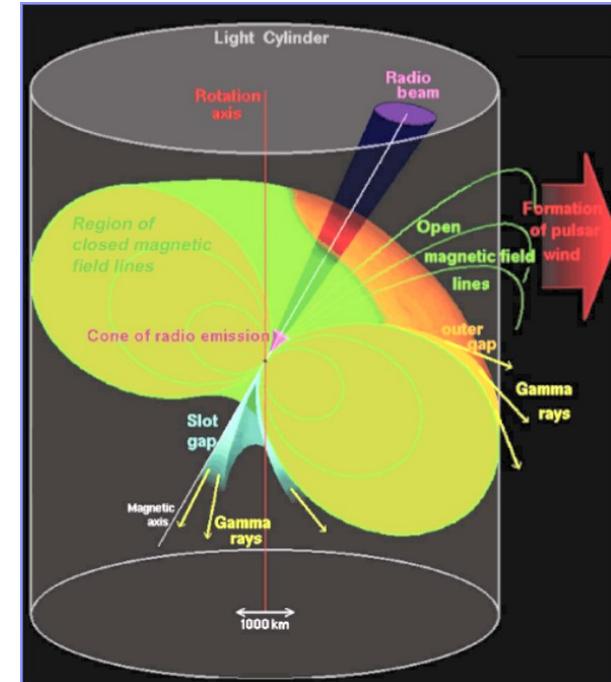
Le pulsar

- A seconda del loro periodo di rotazione, e della loro età caratteristica, possiamo suddividere le pulsar in: **pulsar ordinarie** con periodi di rotazione $P > 30$ ms e le **pulsar al millisecondo** (periodi rotazione $P \leq 30$ ms ed età caratteristiche > 100 milioni di anni).
- Le pulsar sono sorgenti di radionde molto deboli e la loro emissione radio subisce vari effetti dovuti al mezzo interstellare: la **dispersione**, la **diffusione** e la **scintillazione**. Ciò rende difficile la loro osservazione e scoperta. Si usano i più **grandi radiotelescopi** disponibili e **tecniche di ricerca complesse** che richiedono elevata potenza computazionale e lunghi tempi di calcolo.
- Scoperta una pulsar, dallo **studio dei tempi di arrivo degli impulsi** (i TOA) con la **tecnica del timing**, si possono determinare con un'estrema precisione le sue principali caratteristiche posizionali, cinematiche e rotazionali.



Le pulsar

- Le pulsar sono **un laboratorio per importanti problemi fisici ed astrofisici**. Tramite gli studi sulla popolazione delle pulsar, si può: 1) sondare la struttura della nostra Galassia, 2) determinarne la distribuzione degli elettroni nel mezzo interstellare, 3) conoscere il campo magnetico galattico, 4) studiare processi di emissione di fotoni ad alta energia (processi emissione raggi X e raggi gamma, accelerazione di particelle).
- I sistemi binari composti da una NS ed una pulsar, o da 2 pulsar, sono formidabili **laboratori per testare la teoria della relatività generale** e le varie teorie alternative sulla gravità in campo forte.
- Inoltre le pulsar al millisecondo e i merging di due stelle di neutroni rappresentano degli importanti mezzi d'indagine, nello studio sia delle **onde gravitazionali**, sia della **materia ultradensa e l'origine degli elementi pesanti**.
- Hanno pure permesso di scoprire i primi pianeti extrasolari.



Asscoltiamo il segnale radio di alcune Pulsar famose

Pulsar PSR B0329+54. Questa è una pulsar classica che pulsa con un periodo di 0,7 secondi

[ascolta](#)

Pulsar PSR B0833-45. Questa pulsar si trova al centro della nebulosa, resto di supernova della Vela. Costituita dai detriti dell'esplosione di circa 10.000 anni fa. Questa pulsar ha un periodo di 89 millisecondi e ruota 11 volte al secondo.

[ascolta](#)

Pulsar PSR B0531+21. E' sicuramente la pulsar più famosa perché si trova al centro della nebulosa del granchio: Messier 1 (Crab Nebula). Ruota circa 30 volte al secondo.

[ascolta](#)

Pulsar PSR J0437-4715. Questa è una pulsar millisecondo che ruota circa 174 volte al secondo.

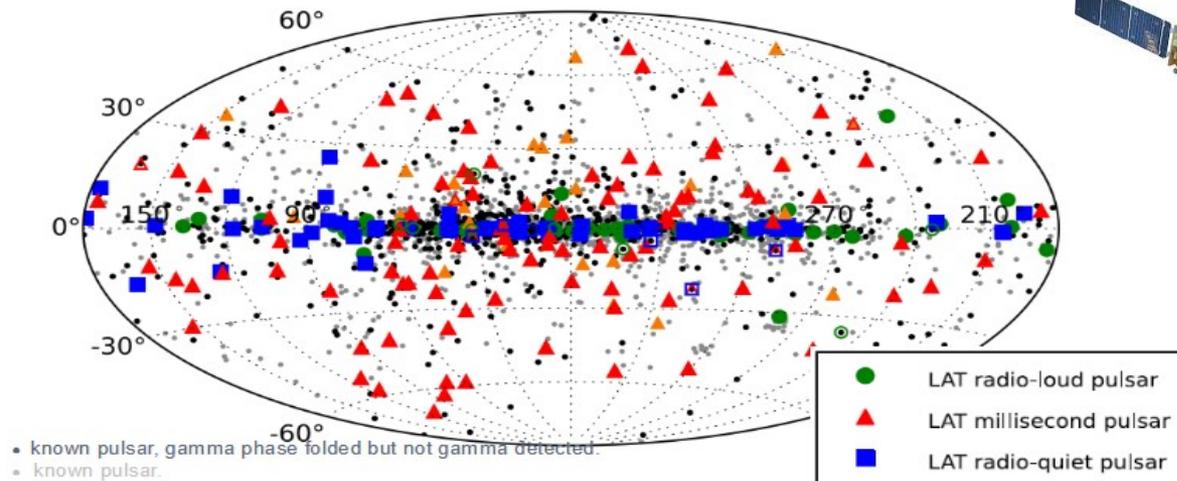
[ascolta](#)

Pulsar PSR B1937+21. E' la pulsar più veloce conosciuta. Ruota con un periodo di 0,00155780644887275 secondi, cioè o circa 642 volte al secondo. La superficie di questa stella si muove a circa 1/7 della velocità della luce e illustra le enormi forze gravitazionali e campi forti della Relatività Generale che impediscono il suo allontanarsi a causa delle immense forze centrifughe.

[ascolta](#)

Le pulsar

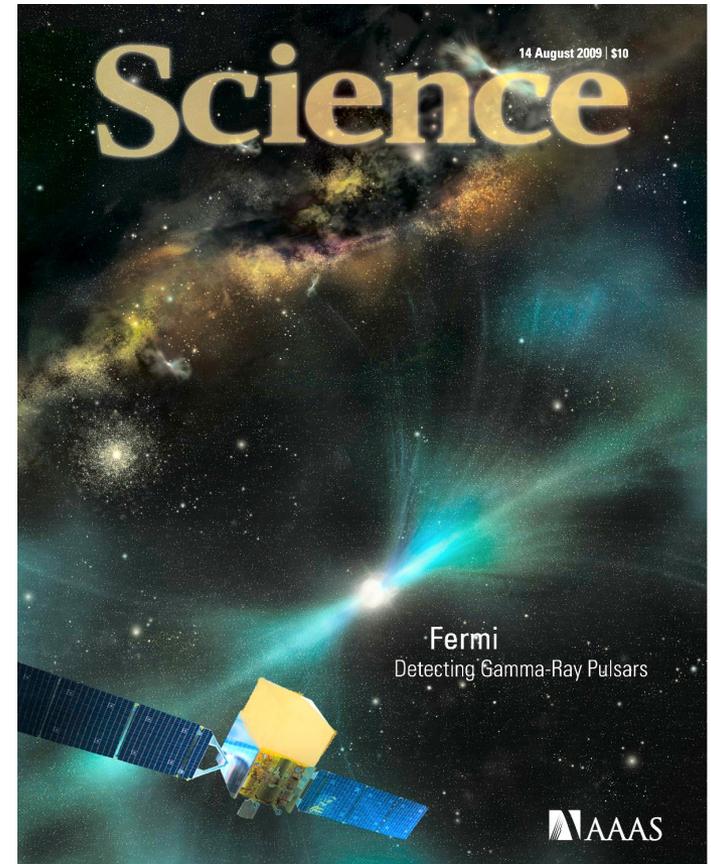
- RIASSUMIAMO: le pulsar sono stelle di neutroni che concentrano una massa un po' maggiore di quella del Sole **in poche decine di km di diametro**. Esse ruotano attorno al proprio asse a **velocità enormi** con periodi dell'ordine del secondo (o in alcuni casi, qualche millisecondo).
- All'origine della loro rapidissima rotazione c'è la **conservazione del momento angolare**. se un oggetto in rapida rotazione - come una stella di neutroni- si contrae, inizierà a ruotare ancora più velocemente. L'equivalente di una pattinatrice sul ghiaccio.
- Oggi ne conosciamo **più di 3300** ed il numero cresce sempre di più. **Più di 300 scoperte emettere raggi gamma**



Before *Fermi*: 10 pulsars seen with CGRO (all confirmed), and PSR J2021+3651 discovered by AGILE.

Le pulsar

- Catalogate con il prefisso “PSR” (Pulsating Source Radio), seguito da una lettera (epoca di riferimento per sistema di coordinate **B** per le 1950.0 e **J** per le 2000.0 utilizzate per la posizione nel cielo), poi seguono ascensione retta (α) e la declinazione (δ).
- Ad esempio la prima pulsar scoperta da J.Bell è stata catalogata come **PSR B1919+21** ($\alpha = 19\text{h}19\text{m}$, $\delta = +21^\circ$).
- Le pulsar mostrano caratteristiche peculiari ed uniche che li distinguono profondamente dagli altri oggetti celesti. **Segnale** (impulso elettromagnetico) che **si ripete con un periodo P estremamente regolare**, ed il **periodo stesso mostra di rallentare**.
- **10** ne scopri **EGRET** (GCRO satellite) nei raggi gamma ed **1 AGILE** prima del lancio del Fermi Gamma-ray Space Telescope. Ora ne conosciamo **quasi 300** emettere raggi gamma grazie a Fermi LAT



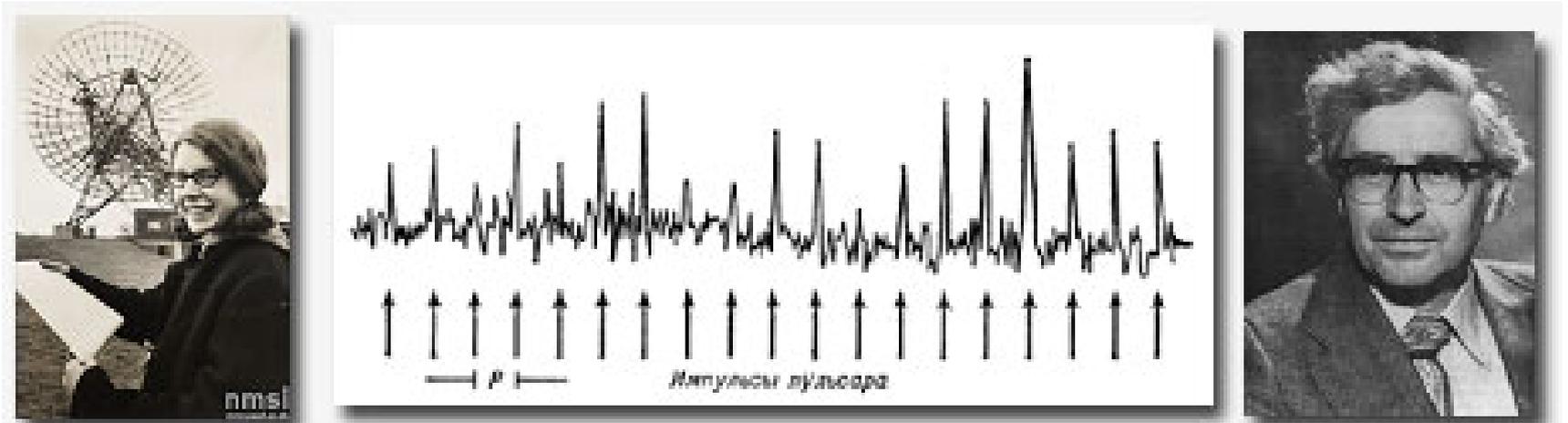
**A Gamma-ray Pulsar Timing Array
Constrains the Nanohertz
Gravitational Wave Background**

**Searching a Thousand Radio Pulsars
for Gamma-Ray Emission**

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 871:78 (13pp), 2019 January 20

Scoperta (casuale) delle pulsar

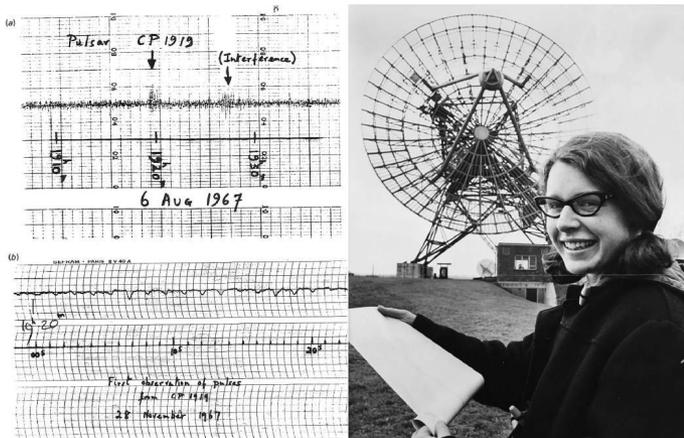
- Le **pulsar** sono state scoperte casualmente quindi da **Jocelyn Bell Burnell**, dottoranda, che lo comunicò al suo professore **Anthony Hewish** presso il Mullard Radio Astronomy Observatory, radiotelescopio un array di 2048 antenne, situato vicino Cambridge, nel **1967**.
- Bell ed Hewish, portavano avanti uno studio sulla scintillazione che subiscono le onde elettromagnetiche quando attraversano il mezzo interplanetario, in particolare osservavano l'interazione con il vento solare, delle onde radio emesse da una sorgente molto distante come un Quasar.



La période 1,33730113 seconde de PSR 1919+21 entre Jocelyn Bell et Anthony Hewish

Scoperta (casuale) delle pulsar

- La scoperta del 1967 di **Jocelyn Bell Burnell** e A. Hewish della prima pulsar, PSR J1919+21, fruttò SOLO a **Hewish** il premio Nobel del 1974.
- Analizzando i dati delle osservazioni, effettuate alla frequenza di 81.5MHz, quello che trovarono f`u un segnale molto regolare della durata di pochi centesimi di secondo che si ripeteva con un periodo P di 1.337 secondi.
- La emissione cadenzata di PSR J1919+21 fu dapprima **scambiata per un segnale radio di extraterrestri**. Il fenomeno è invece dovuto alla velocissima rotazione della stella, che emette radiazioni nella direzione del suo asse magnetico. Se l'asse di rotazione e quello magnetico non coincidono, **il flusso di radiazioni investe la Terra a ogni giro, come fosse un faro** come abbiamo detto.

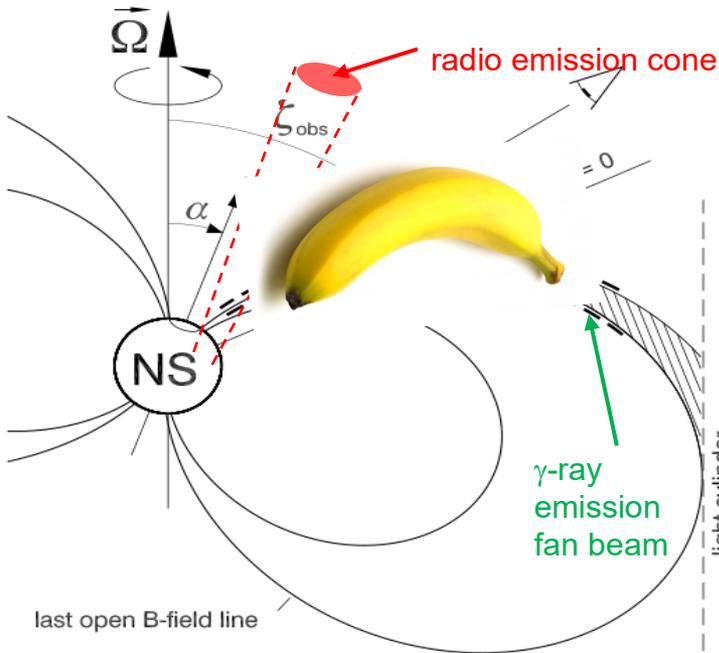


Le pulsar e NS (e Franco Pacini)

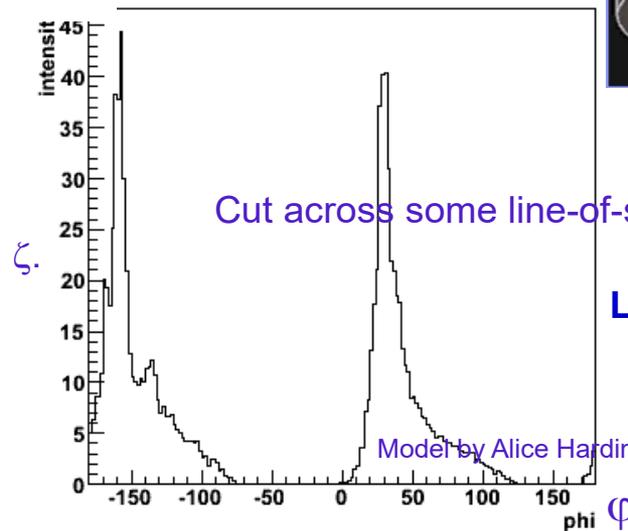
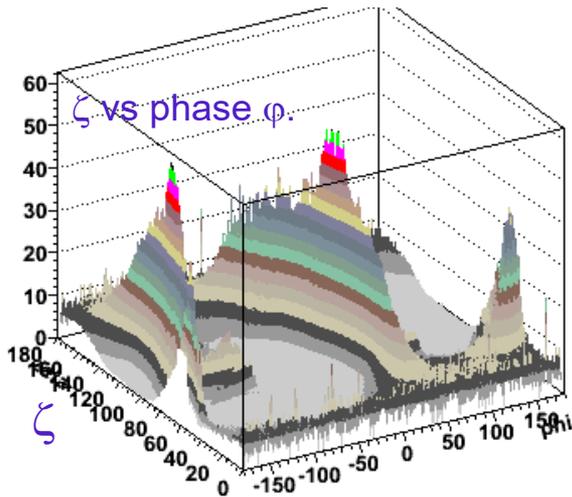
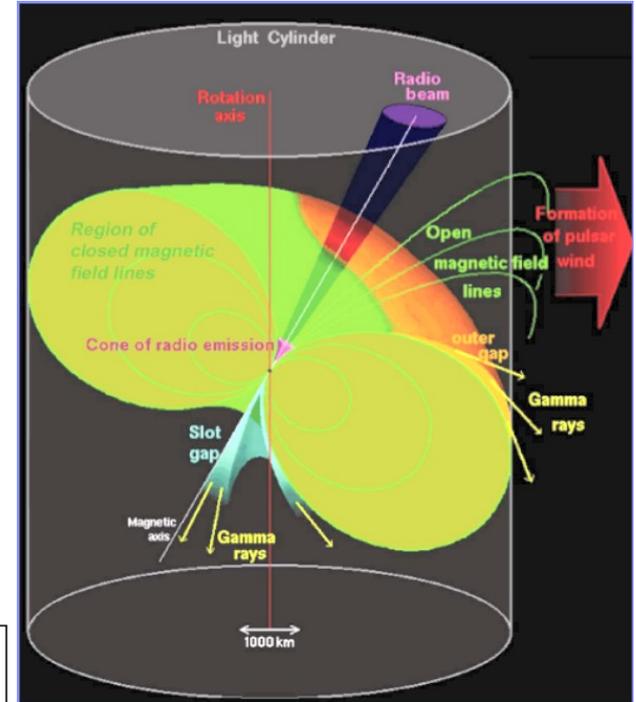
- All'inizio, non conoscendo la natura di questo segnale, venne presa in considerazione l'ipotesi di sorgente artificiale di origine extraterrestre (col nome di LGM Little Green Men), in seguito puntando il radiotelescopio in altre zone del cielo, i due scienziati scoprirono segnali analoghi; → era evidente che era altamente improbabile che due gruppi di piccoli omini verdi scegliessero la stessa inusuale frequenza e l'improbabile tecnica di ntaoke segnale per contattarci.
- **J. Bell Burnell e A. Hewish** quindi la scoperta di un nuovo oggetto astrofisico, di origine naturale dell'Universo, che venne chiamato Pulsar (**PULSAting Radiosources**).
- Prime interpretazioni: radiazione associata a oscillazioni prodotte da Nane Bianche (WD-White Dwarfs) o da Stelle di Neutroni (NS-Neutron Stars), m vennero presto scartate.
- Si fece largo l'ipotesi di Thomas Gold: **le pulsar non sono altro che delle NS con una altissima velocità di rotazione ed elevatissimi campi magnetici superficiali**. Tale idea si collegava con lavoro contemporaneo (del 1967) pubblicato dall'astronomo italiano **Franco Pacini**.
- F. Pacini propose per le NS un semplice modello di dipolo magnetico, capace di convertire l'energia rotazionale in radiazione elettromagnetica e indi in moto di particelle.

A big surprise --they hadn't thought about Baade & Zwicky's 1935 prediction of neutron stars, nor that Pacini (1967) had deduced that the spinning magnet would act like a lighthouse.

Fasci (beam) di raggi gamma dalle pulsar

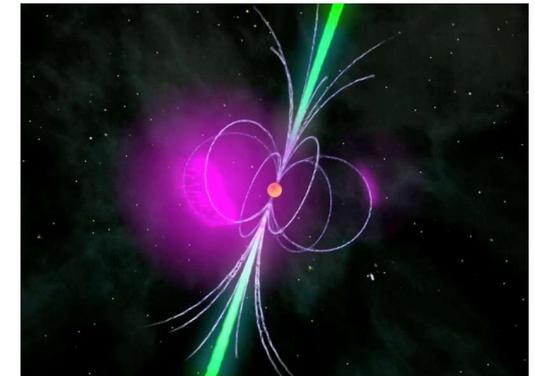
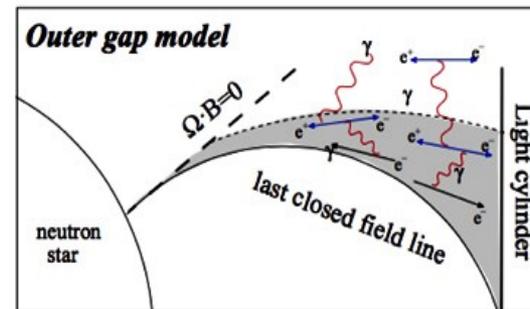
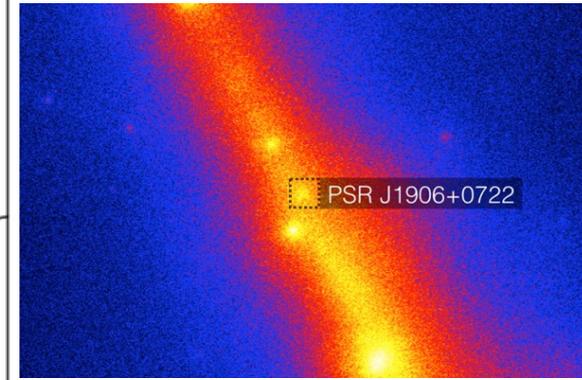
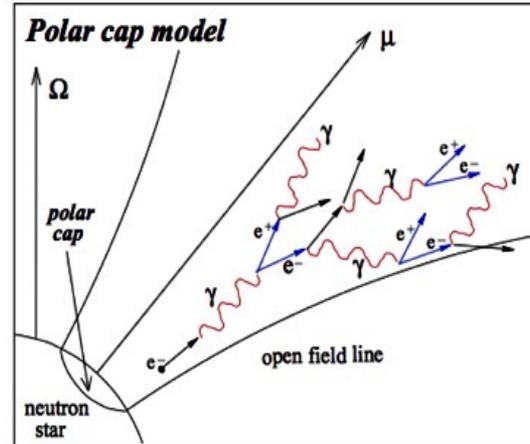
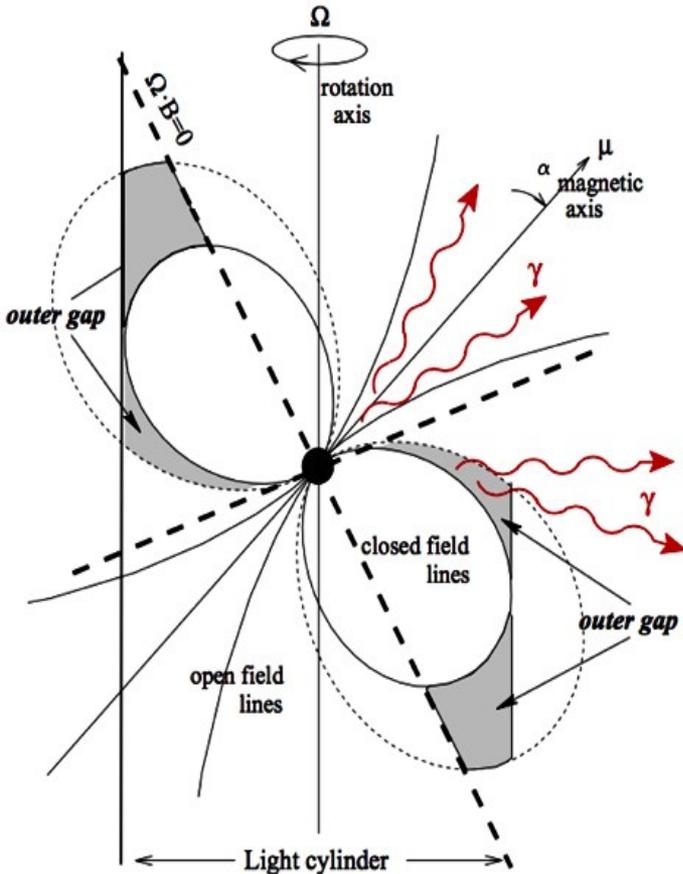


Curvature radiation in 'gaps'. Long in latitude, thin in longitude (*caustics*).



LOBs = Luminous Orbiting Bananas

Modello polar cap vs outer cap

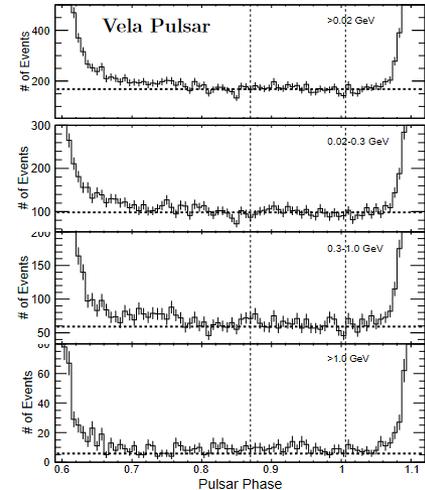
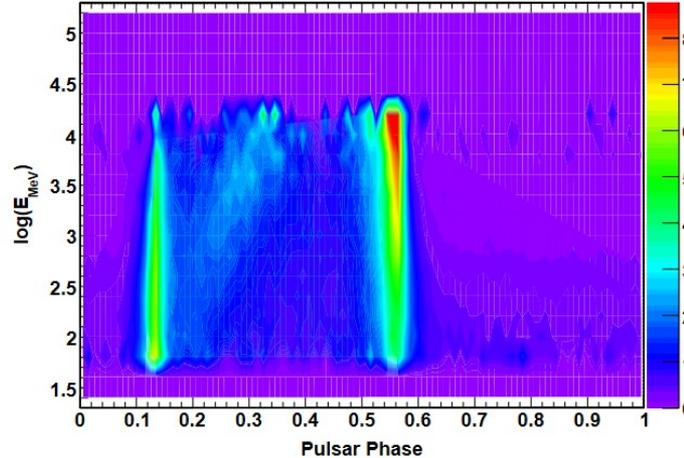
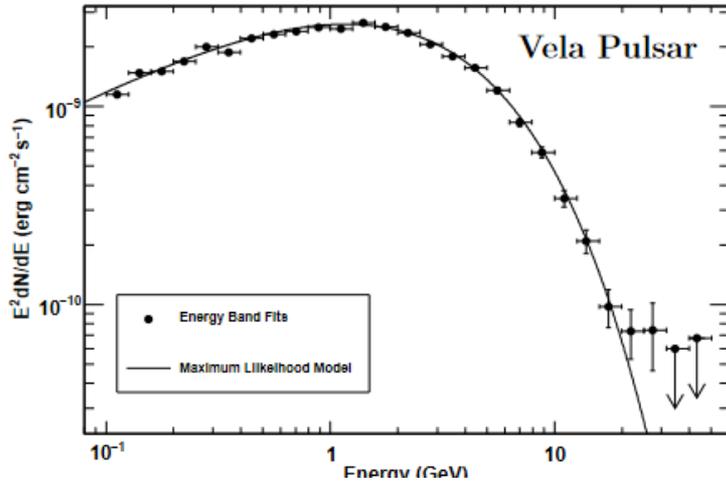


- I raggi gamma dominano la potenza energetica irradiata dalle pulsar gamma.
- Hanno una distribuzione spettrale di energia hard, con un rapido cutoff in banda gamma GeV.

Esempio risultati Fermi LAT su Vela pulsar dopo 1 anno di presa dati

- Analisi timing temporale e spectral energy distribution della pulsar della Vela utilizzando solo imprimi 11 mesi di osservazioni del Fermi LAT.

Phase-averaged spectrum for $E > 0.1 - 100$ GeV.



- La luminosità intrinseca di Vela ad energie del GeV, combinati con la risoluzione angolare e sensibilità del LAT consentono lo studio più dettagliato mai pubblicato: energy-dependent light curves, phase-resolved spectra, usando un timing model direttamente derivato dai dati gamma del LAT.
- La curva di luce è costituito da due picchi (periodi P1 e P2) collegati da un ponte di emissione connesso a un terzo picco (P3): forte diminuzione del rapporto P1/P2 con energia crescente, mentre P1 scompare sopra i 20 GeV. P3 e P2 sono presenti fino alle più alte energie di pulsazione.

1.5-min movie su cosa è una pulsar gamma di Fermi LAT

NASA
Goddard Space Flight Center

NASA
National Aeronautics and Space Administration
Goddard Space Flight Center

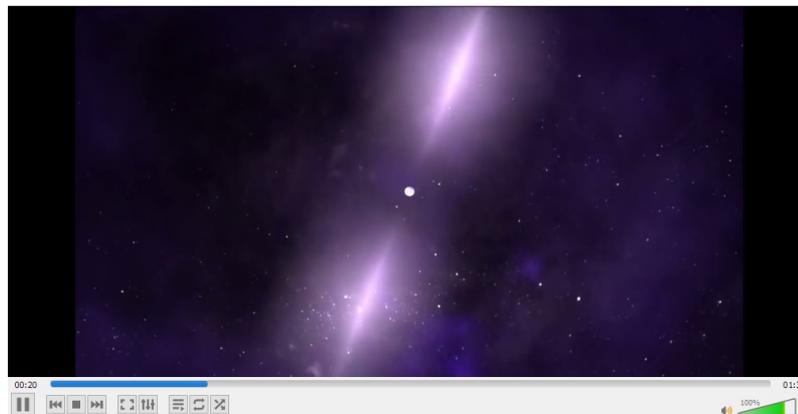
Search: Fermi GO

Fermi • FSSC • HEASARC
Sciences and Exploration

Fermi
Gamma-ray Space Telescope

Home Support Center Observations Data Proposals Library HEASARC Help

Video e animazioni prodotti dal NASA Goddard Space Flight Center.

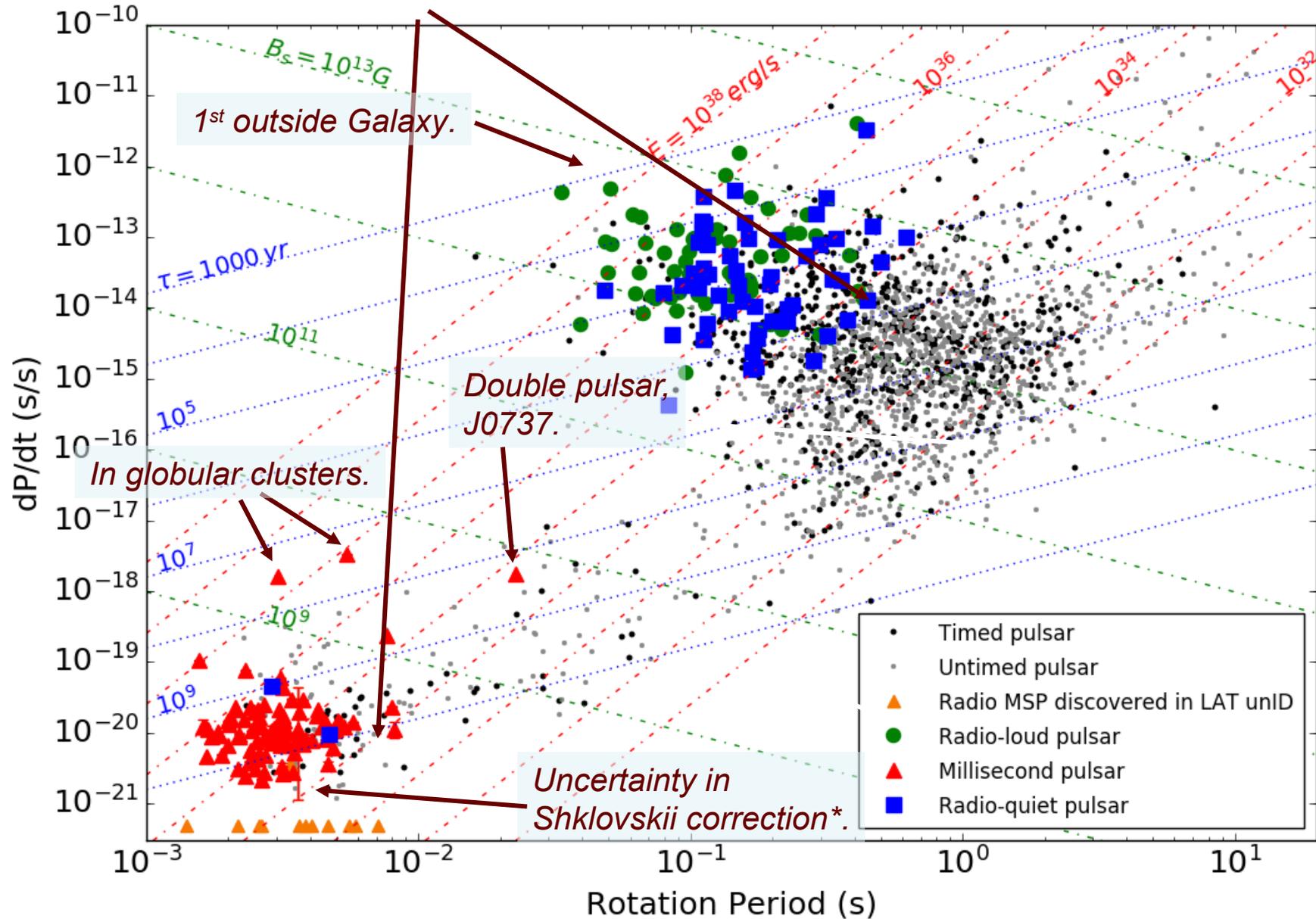


Gamma-ray deathline near spin-down power

$$\dot{E} = 4I\pi^2 \dot{P} / P^3 \text{ of } \sim 3E33 \text{ erg/s.}$$

($I \equiv 1E45 \text{ gm cm}^2$ depends on EoS.)

Update of 2PC Fig 1.

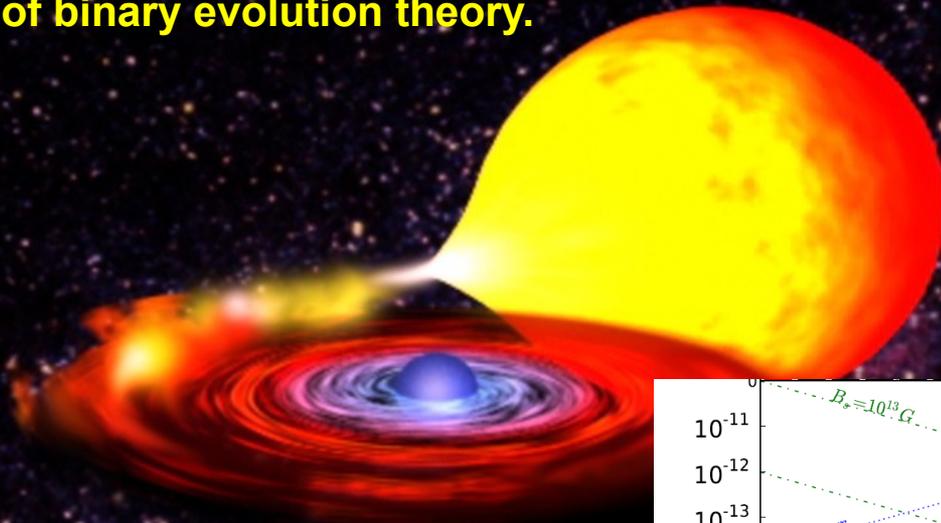


*See e.g. *γ MSP Deathline, revisited*, Guillemot et al. A&A (2016)

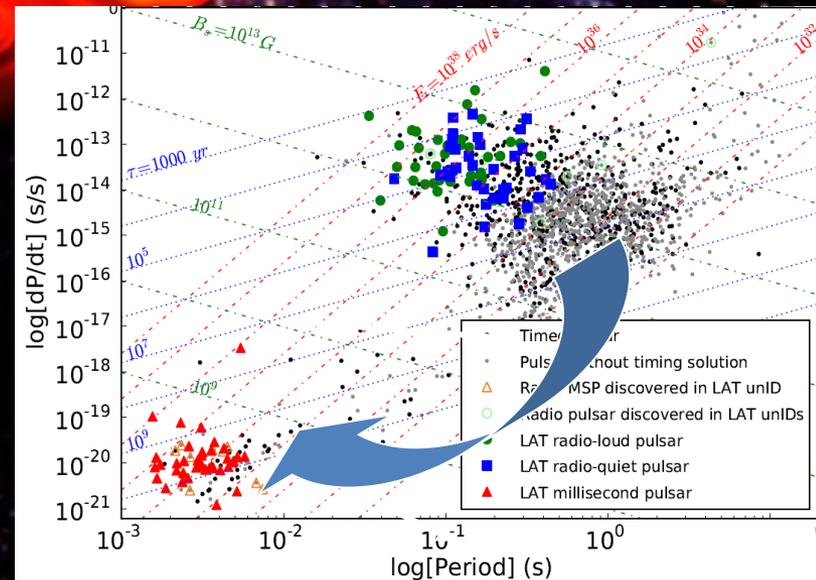
Millisec. pulsars (MPS) che emettono raggi-gamma

“recycled” (OLD) = millisecond pulsars = MSPs
(life after death!)

Fermi-led discoveries of many “spiders” (companion star ablated by pulsar wind) provide tests of binary evolution theory.



Before Fermi:
Expected few (no?) gamma MSPs.
Nearly half of the gamma pulsars!



3 modi per scoprire gamma-ray pulsars

1. Phase-fold gammas using *known* rotation parameters.

Weight using spectrum \rightarrow point-spread-function* \rightarrow O(1) trials, highest sensitivity. \sim 1000 ephemerides provided by radio astronomers (x-rays too)

2. Deep radio searches at positions of pulsar-like unidentified gamma sources.

85 MSPs found. Rotation ephemeris \rightarrow phase-fold as above. 58 gamma MSPs so far. LOFAR found fastest (707 Hz) field MSP in a *Fermi* source

Now using also Meerkat and SKA

3. Blind period search in gamma-rays

at those same positions.

58 young PSRs , 5 MSPs.

\sim 4 radio detections.

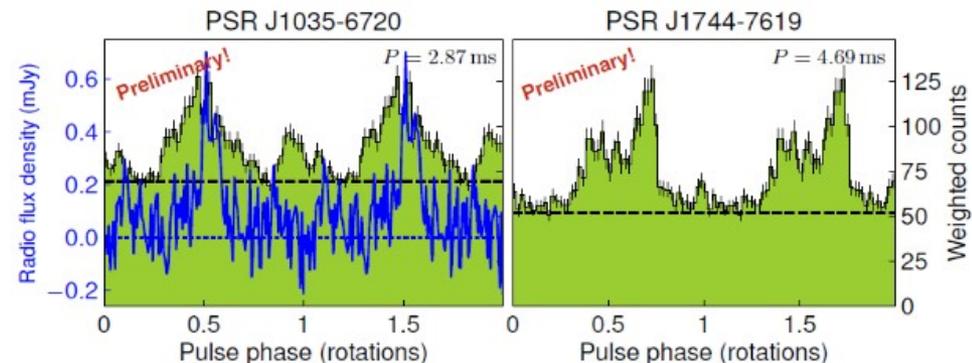
Einstein@Home searches very successful.

1st radio quiet MSP discovered!

Einstein@Home Blind-search MSPs

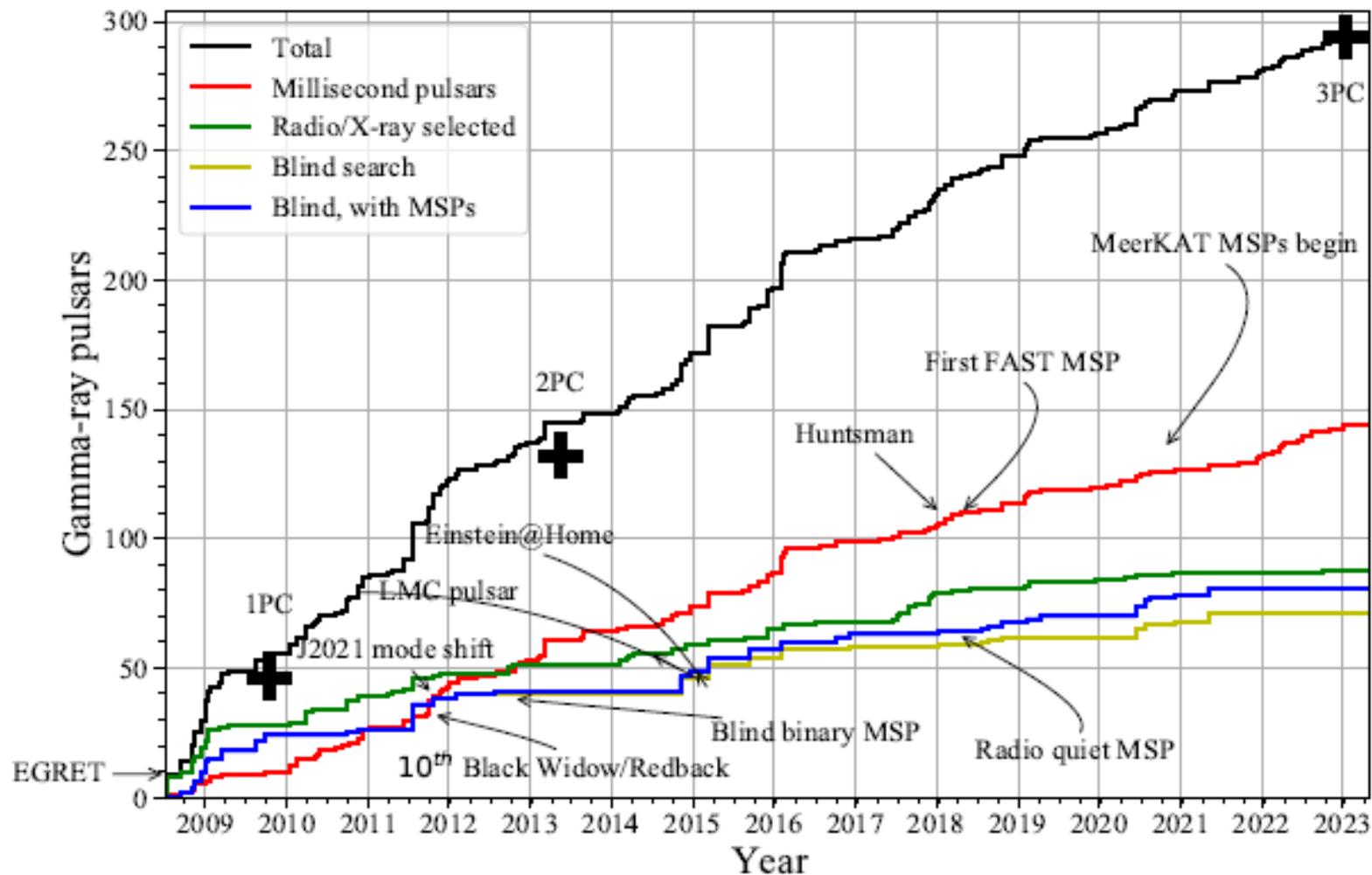
10,000 years of CPU on thousands of volunteers' PCs.

'citizen science' at work



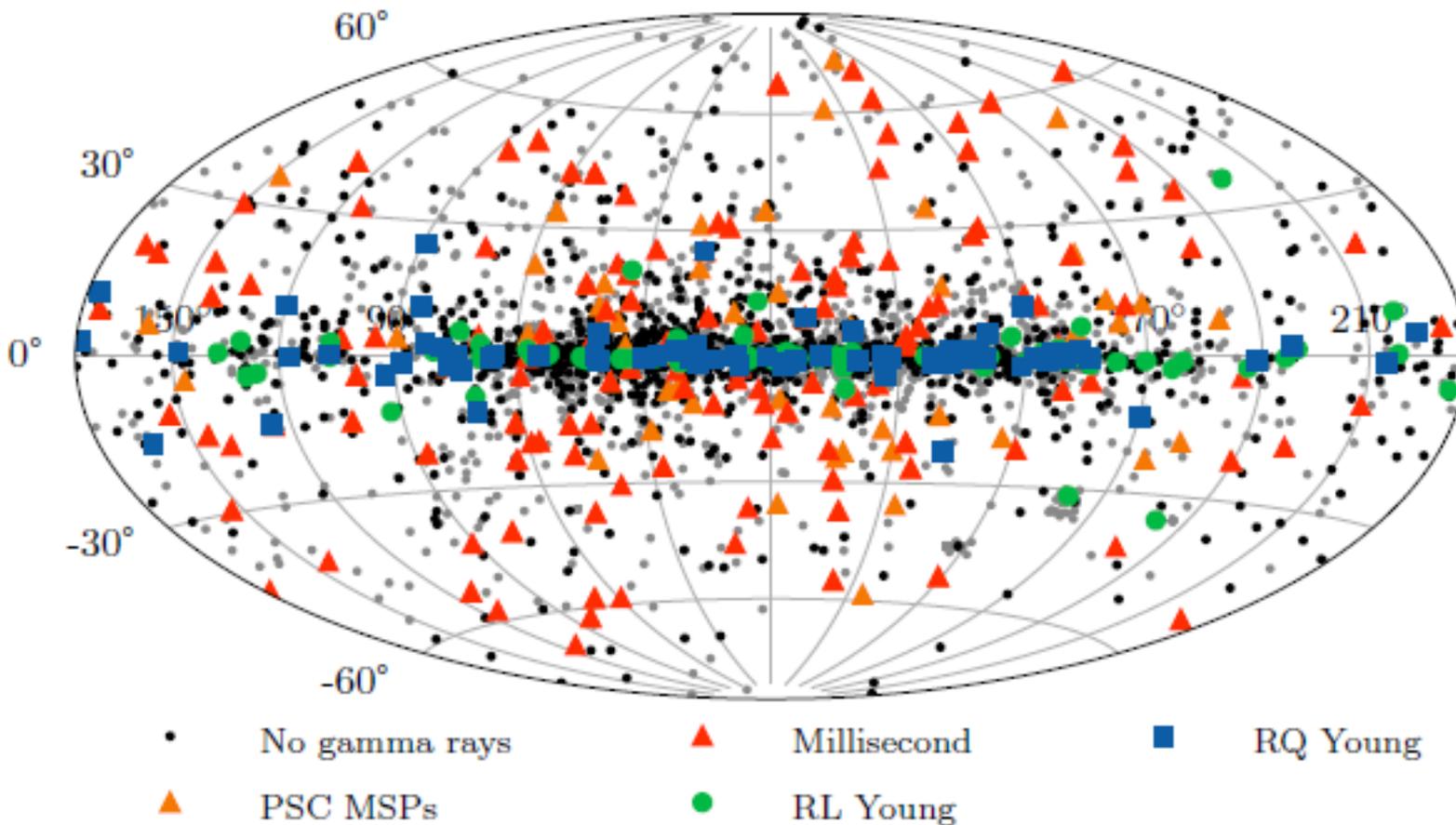
Third Fermi LAT gamma-ray pulsar catalog

Cumulative number of known gamma-ray pulsars,



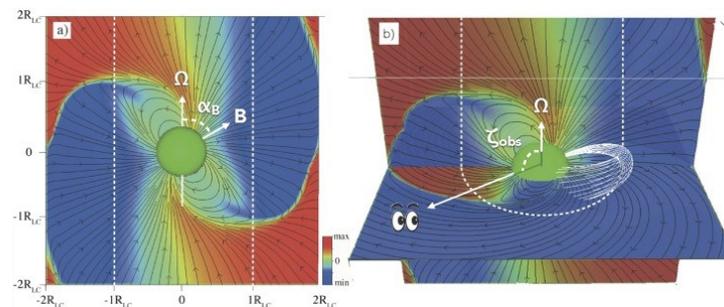
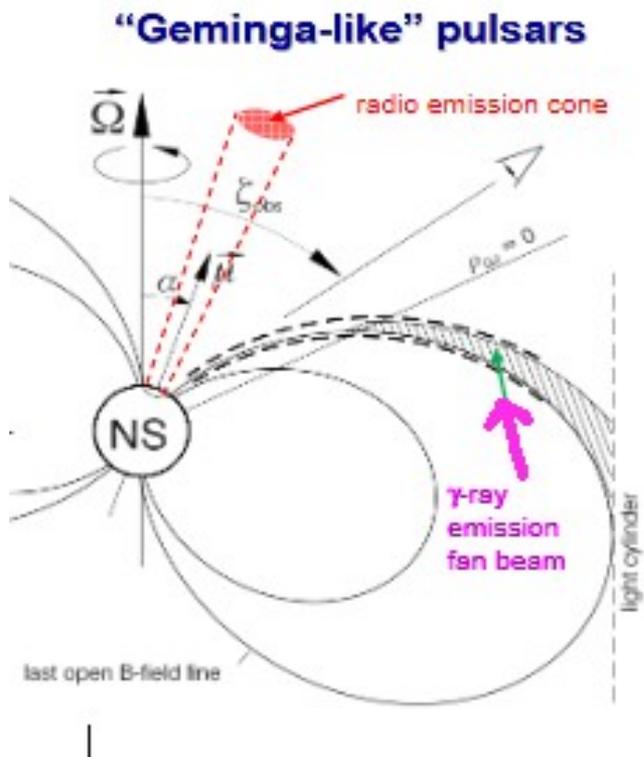
Third Fermi LAT gamma-ray pulsar catalog

The Third *Fermi* Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars

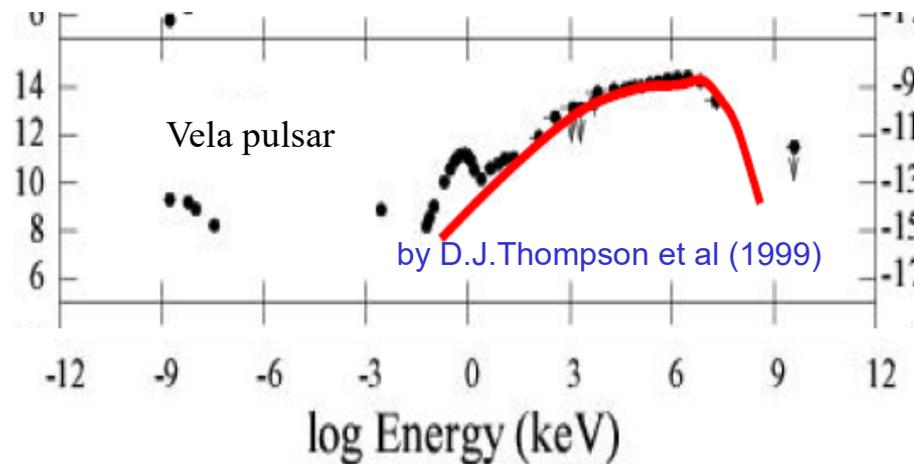


Gamma rays dominates the emitted power

- Gamma rays dominate pulsar's radiated power.
- Hard spectrum, with a sharp cut in the GeV range.

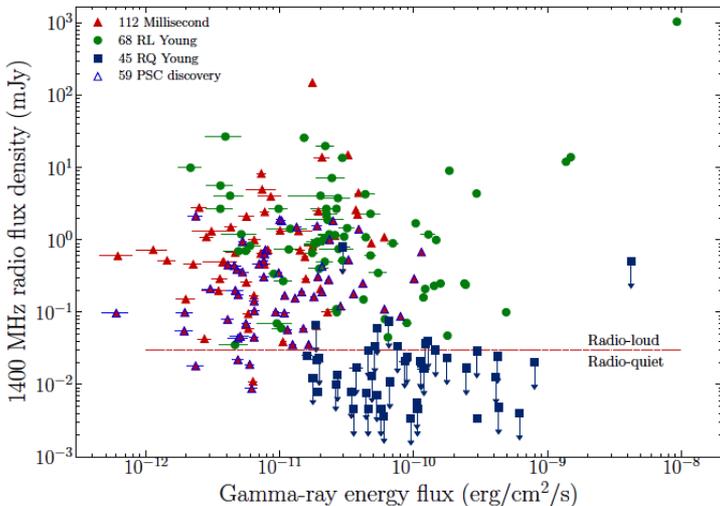
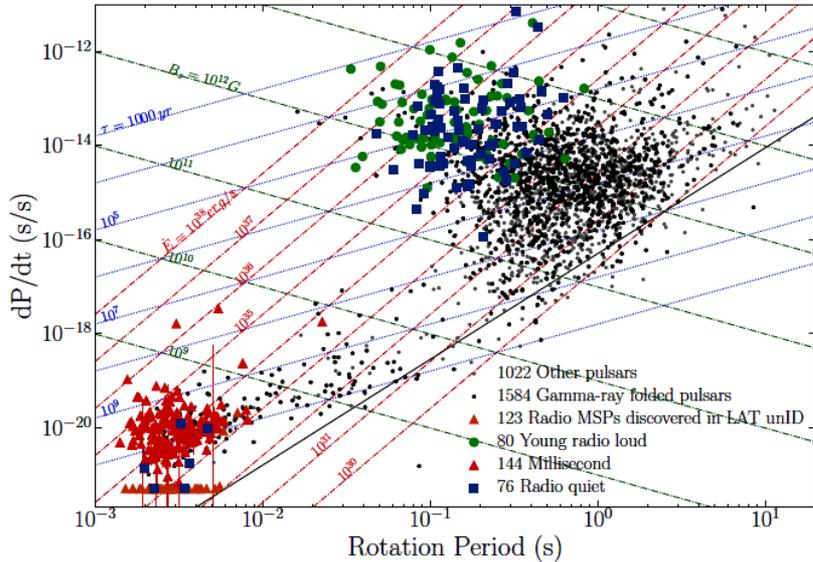


Power



$\log [E^2 * \text{Flux}]$ ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Third Fermi LAT gamma-ray pulsar catalog

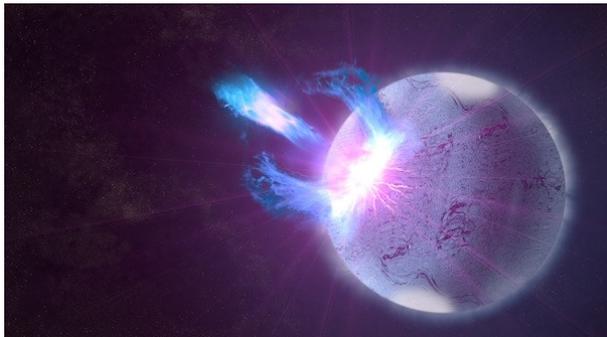


Pulsar varieties

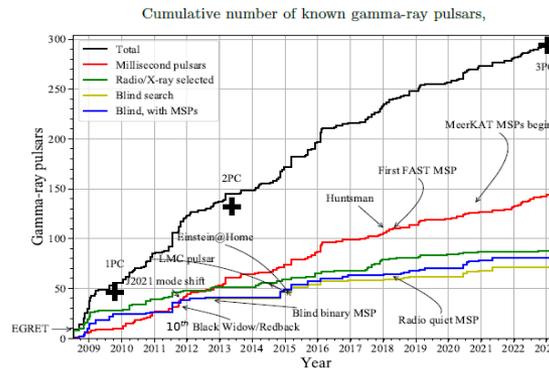
Category	Count	Sub-count
Known rotation-powered pulsars (RPPs) ^a	3436	
with measured $\dot{E} > 3 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$		762
Millisecond pulsars (MSPs, $P < 30 \text{ ms}$)	681	
with measured $\dot{E} > 3 \times 10^{33} \text{ erg s}^{-1}$		250
Field MSPs ^b		427
MSPs in globular clusters ^c		254
Gamma-ray pulsars in this catalog^d	294	
Spectral fits (with free b parameter) ^f		255 (116)
Profile fits in $\geq 1, 2, 6$ energy bands		237, 129, 29
Young gamma-ray pulsars	150	
Radio-quiet ^e		70
Gamma-ray MSPs	144	
Isolated, Binary		32, 112
Discovered in LAT blind searches		10
Radio-quiet		6
Black Widows, Redbacks:		32, 13
Radio MSPs discovered in LAT sources	119	
with gamma-ray pulsations		78
waiting for ephemeris phase-connection ^d		33

Conclusioni

- Abbiamo visto la connessione dei dati dell'esperimento *Fermi Large Area Telescope (LAT)* cioè dei **fotoni** alle alte energie dei **raggi gamma** con le misteriose ed intriganti **pulsar**.
- Tutti i dati di *Fermi LAT* sono **immediatamente pubblici** ed usabili da tutta la comunità scientifica. *Fermi* è pertanto una **grande missione di astronomia e fisica gamma** della NASA con fondamentale contributo italiano (ASI e INFN principalmente). Uno degli esperimenti dallo spazio **più produttivi**.
- La scoperta di **tante pulsar che mettono raggi-gamma** e di **tipologie diverse** è uno dei risultati principali della missione spaziale *Fermi* e suo strumento a bordo (e relativa collaborazione internazionale scientifica) **Large Area Telescope (LAT)**.



Gamma Ray Burst Monitor (GBM):
correlative transient observations
~ 8 keV – 30 MeV



Large Area Telescope (LAT):
~20 MeV --> 300 GeV

