

Un altro modo di guardare il cielo:
Astrofisica delle alte energie:
Astronomia con fotoni e raggi cosmici carichi con esperimenti a
terra e nello spazio

Aldo Morselli

INFN e Università di Roma Tor Vergata



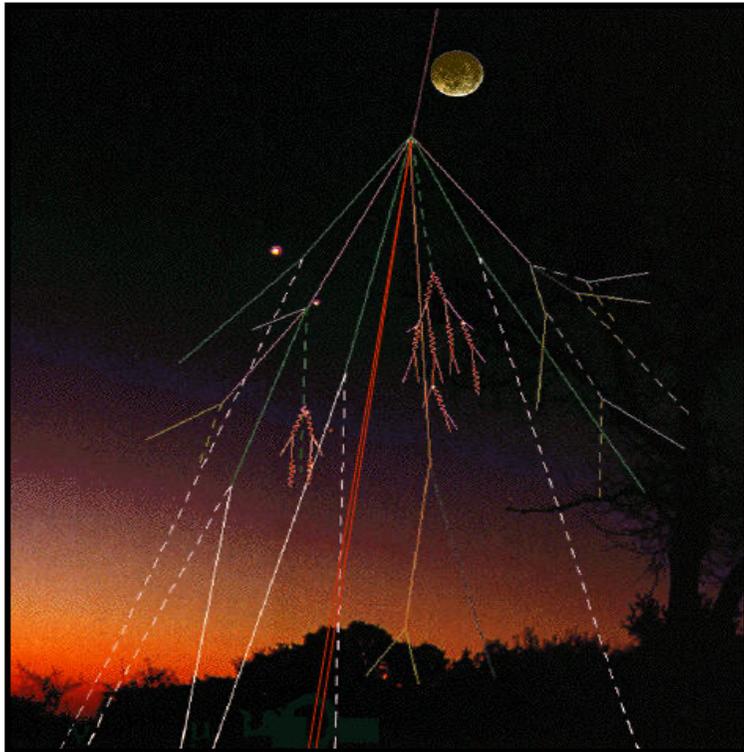
Cosa Riceviamo dal Cielo

- Radiazione Elettromagnetica
- Raggi Cosmici
- Neutrini
- Particelle Esotiche ?
- Onde Gravitazionali



Apri la tua mano...

**Nel tempo impiegato
a leggere questa frase
circa 20 particelle
(per lo più "muoni")
la avranno attraversata!**



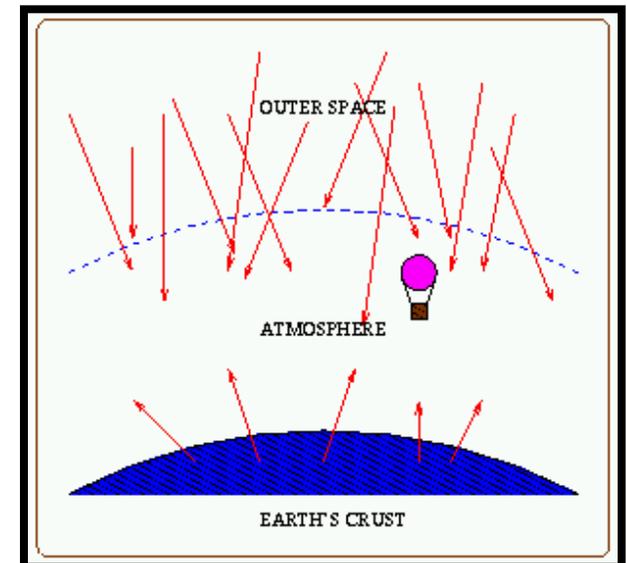
i "muoni" vengono create dai
"Raggi Cosmici", particelle di vario tipo
che dallo spazio esterno entrano nella
nostra atmosfera ed interagiscono con
l'atmosfera stessa

1912: Scoperta dei 'Raggi Cosmici'



- Victor Hess volò su pallone ad un'altitudine di 5000 metri
- Misurò le radiazioni con un elettroscopio...
- ... e trovò che questa aumentava con l'ascesa del pallone

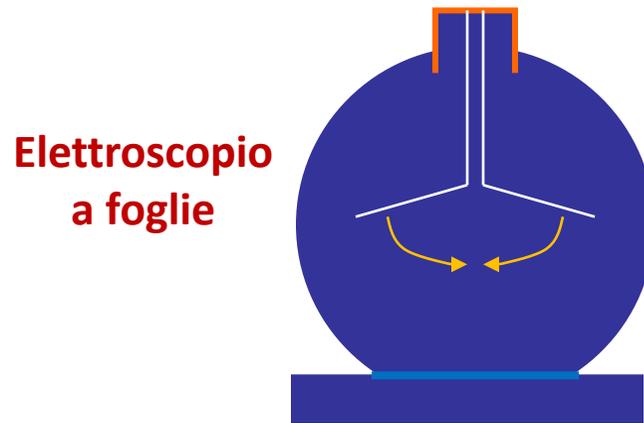
• **Ciò fu una grande sorpresa perché si pensava che questa radiazione fosse generata da materiale radiattivo nella crosta terrestre**



- 1926 Millikan introdusse il nome di 'cosmic rays' (raggi cosmici)

l'elettroscopio

Il Primo rivelatore utilizzato per mettere in evidenza l'esistenza dei raggi cosmici , è stato l'elettroscopio usato da **Victor Hess**:



Hess notò che, a differenza di quanto atteso, le foglioline d'oro del suo strumento si riavvicinavano molto più rapidamente quando era ad una grande quota rispetto a quanto succedeva quando era a Terra

- la scarica dell'elettroscopio indica che il gas interno all'ampolla è ionizzato
- la ionizzazione è provocata da particelle cariche che attraversano l'ampolla
- se il livello di ionizzazione cresce con la quota, i raggi cosmici (che non si chiamavano ancora così) devono necessariamente venire da sopra l'atmosfera.

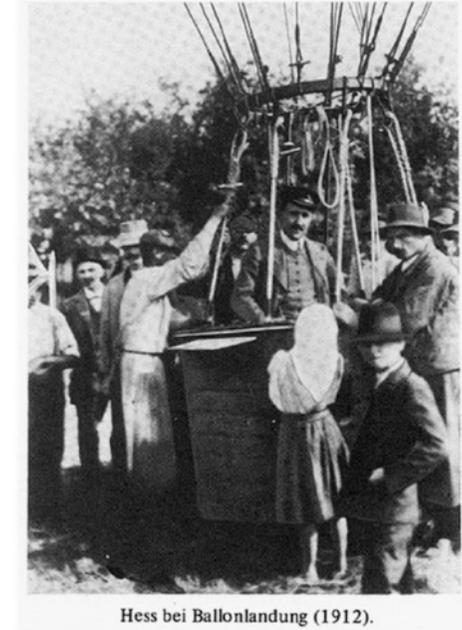


Fig. 2. Victor Hess (in the middle) and his crew in the balloon gondola after the landing in Pieskow.

Raggi Cosmici

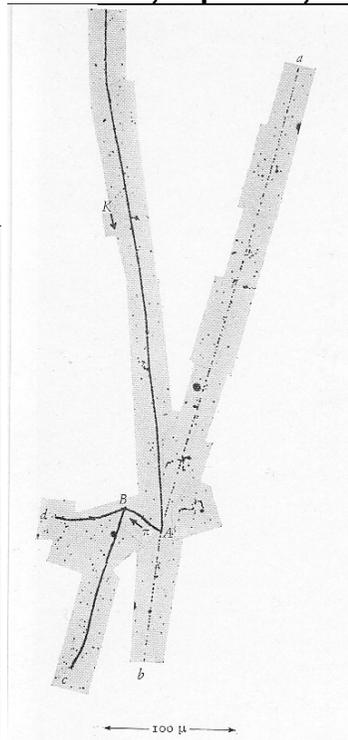
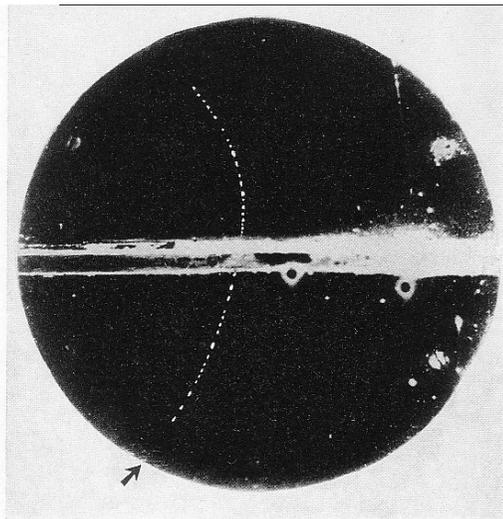
- Particelle cariche : protoni, antiprotoni, elettroni, positroni, nuclei , antinuclei (?), Altro (?)
- Risentono dei campi elettrici e magnetici
- Portano da distanze differenti un campione di materiale galattico ed extragalattico ed accelerato ad energie molto elevate.

C.R.: come vengono studiati e cosa ci dicono?

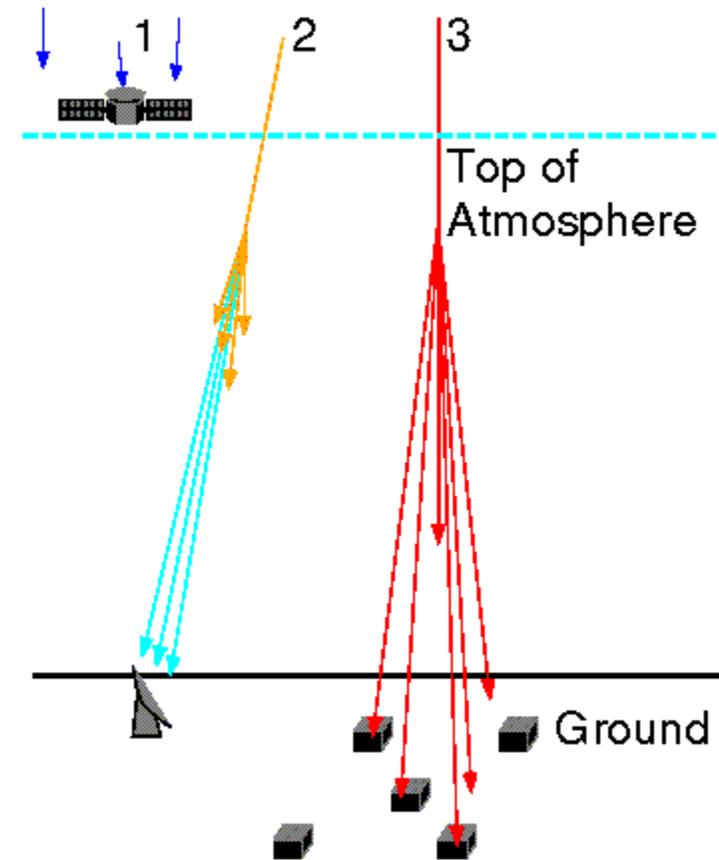
Anni 1930-1950:

Strumenti: camere a nebbia, emulsioni, contatori Geiger, etc.

I raggi cosmici permettono di scoprire l'antimateria (positroni), i muoni, i pioni, le particelle "strane"...



Attualmente: principalmente sonde per lo studio dell'astrofisica



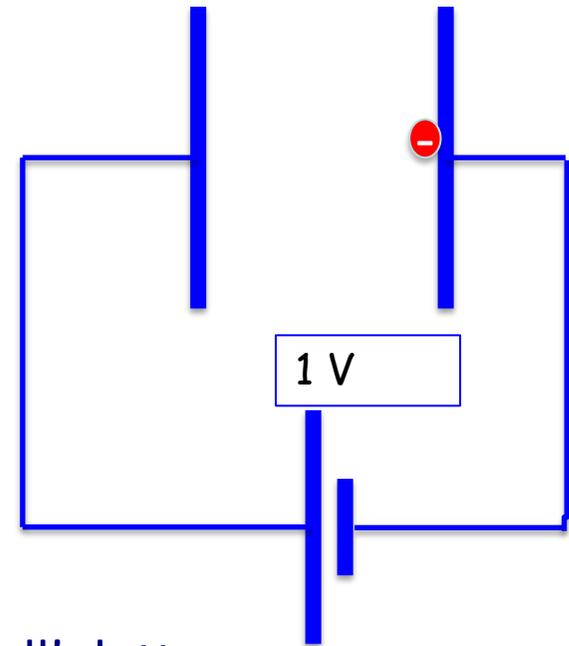
Cosa sappiamo oggi dei Raggi Cosmici ??

- ~ 1000 particelle/(s·m²)
- nuclei ionizzati: 90% protoni, 9% particelle α , nuclei più pesanti
- quale è l'origine dei raggi cosmici ?
 - nel sistema solare ? una piccola quantità associata a fenomeni violenti nel Sole e caratterizzata da grande variabilità temporale
 - nella galassia: la maggior parte. Si nota anche una anticorrelazione con intense attività solari
 - extragalattica: la parte più energetica dello spettro

Una utile unità di misura: elettronvolt (eV)

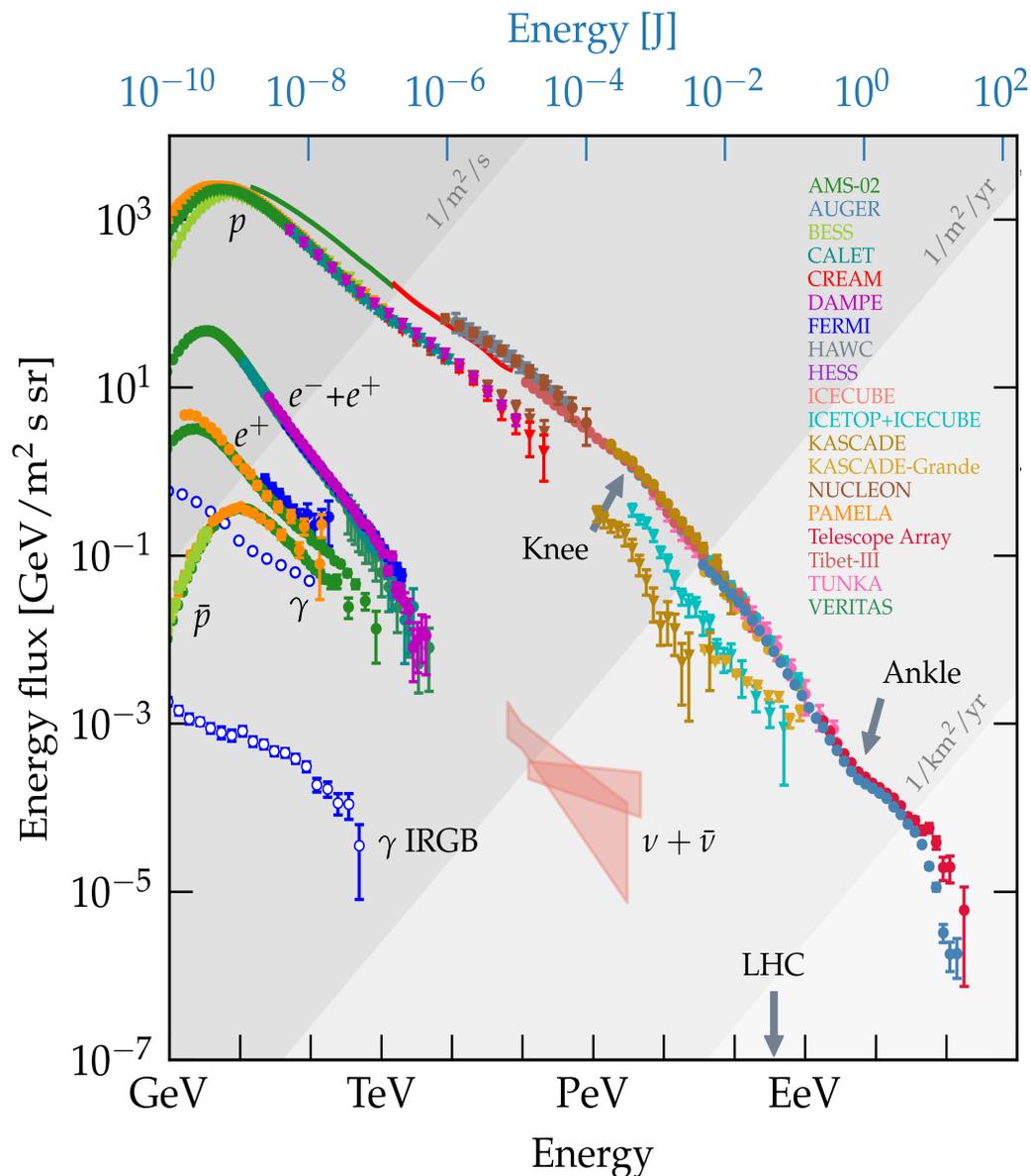
- L'energia delle particelle si misura in eV
 - Energia acquisita da un elettrone muovendosi in una differenza di potenziale di 1 Volt
- La luce visibile ha un energia di 1,6 / 3,4 eV
- 1 MeV (1.602×10^{-13} J): 2 volte l'energia a riposo dell'elettrone
- 200 MeV: Energia media della fissione di un nucleo di U-235
- 125.1 ± 0.2 GeV: La massa del bosone di Higgs
- 1 TeV: Mille miliardi di eV, l'energia cinetica di una zanzara in volo

Nota: KeV = 10^3 eV MeV = 10^6 eV GeV = 10^9 eV TeV = 10^{12} eV



Cosa sono i raggi cosmici

I raggi cosmici nello spazio sono particelle elettricamente cariche costituite principalmente da protoni (circa per il 90%), nuclei di elio (circa 9%) e il rimanente 1% da tutti gli altri nuclei atomici della tavola periodica, elettroni e le rispettive anti-particelle. Le sorgenti dei raggi cosmici possono essere sia galattiche sia extra-galattiche. Poi ci sono anche i fotoni





La massa
è una forma
di energia

Materia

Antimateria



Secondo la teoria del Big Bang,
nelle fasi iniziali dell'Universo, materia e antimateria
si annichilavano e ricreavano in continuazione.

Attualmente nell'Universo
c'è solo materia e radiazione e non c'è traccia di antimateria.

Tutti i corpi sono il risultato di un misterioso
eccesso di **materia**.

L'antimateria può essere
prodotta solo nelle interazioni
dei raggi cosmici o agli
acceleratori.

Quando la materia incontra l'antimateria si annichila trasformandosi
in energia secondo la famosa formula di Einstein

Energia — $E = m c^2$

Massa delle particelle

Velocità della luce al quadrato

Lo spettro elettromagnetico:

Onde Radio, raggi di sole, raggi Gamma sono anche **fotoni**, o quanti di luce con una doppia natura, sia onde che particelle, come scoperto con la meccanica quantistica
Ogni fotone, privo di massa, ha una sua energia e lunghezza d'onda

Le 2 relazioni fondamentali:

$$E = h \nu \quad E = \text{energia}$$

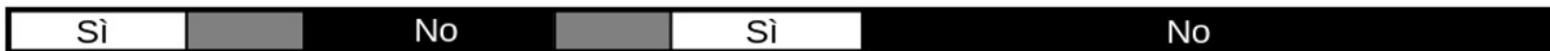
$$\nu = \text{frequenza}$$

$$c = \lambda \nu \quad c = \text{velocità della luce}$$

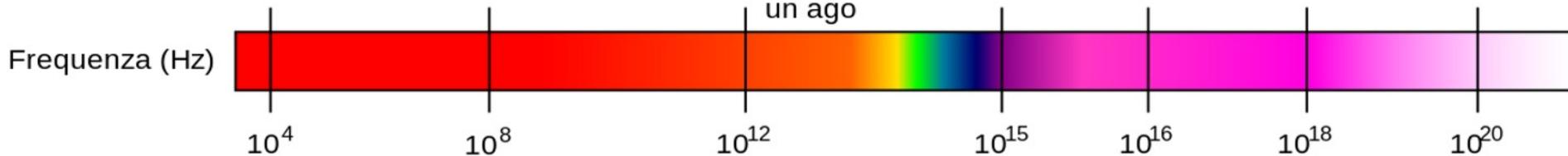
$$\lambda = \text{lunghezza d'onda}$$

Radiazione elettromagnetica

Penetra l'atmosfera terrestre?



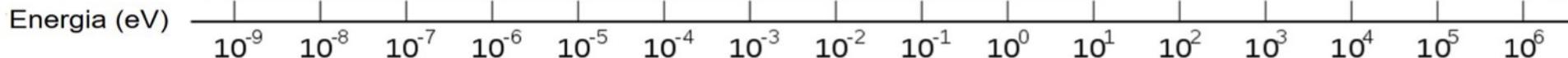
Tipo di radiazione	Radio	Microonde	Infrarosso	Visibile	Ultravioletto	Raggi X	Raggi Gamma	
Lunghezza d'onda (m)	10^3	10^{-2}	10^{-5}	0.5×10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}	10^{-12}	
Scala approssimativa della lunghezza d'onda								
	Edifici	Esseri umani	Farfalle	Punta di un ago	Protozoi	Molecole	Atomi	Nuclei atomici



Sorgenti							
	Radio	Forno a microonde	Radar	Esseri umani	Lampade a fluorescenza	Strumenti per radiografie	Elementi radioattivi

Non Ionizzanti

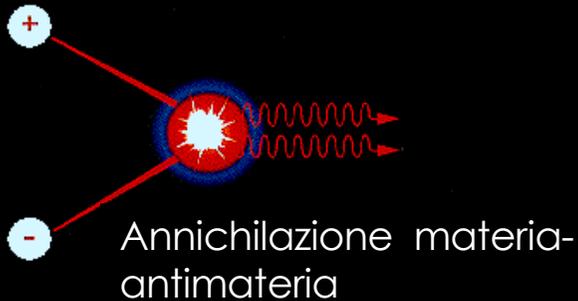
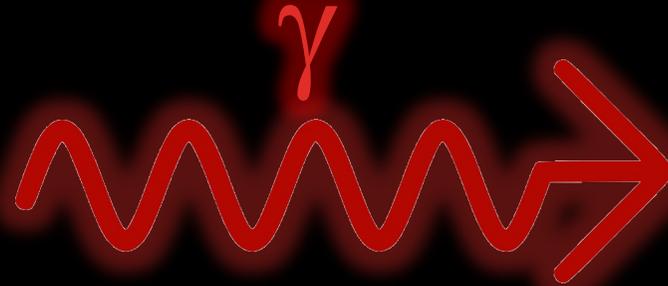
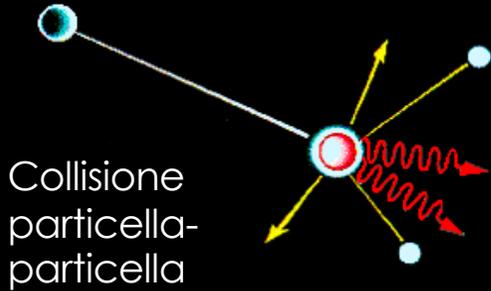
Ionizzanti



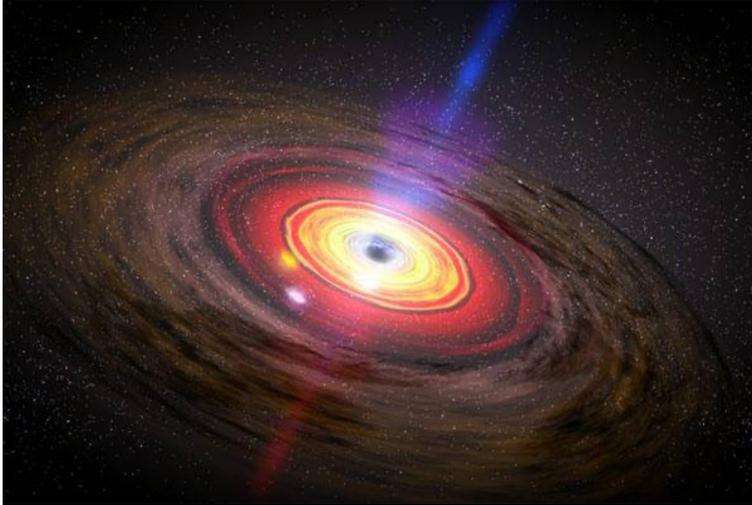
ma esistono i raggi gamma ?

e come vengono prodotti ?

COME SI FORMANO I RAGGI GAMMA

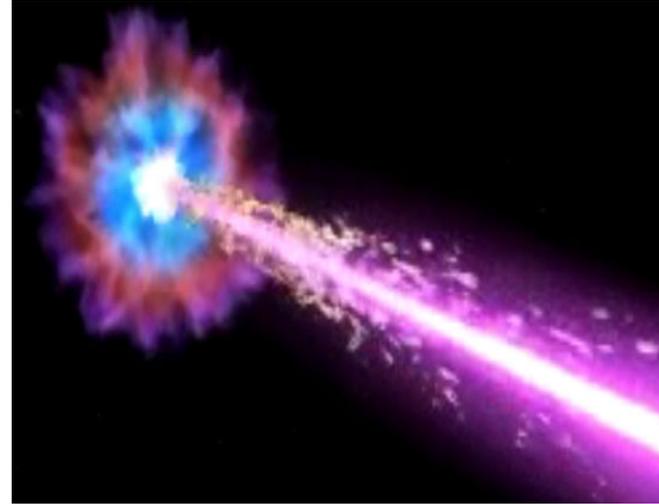


Chi emette raggi gamma?

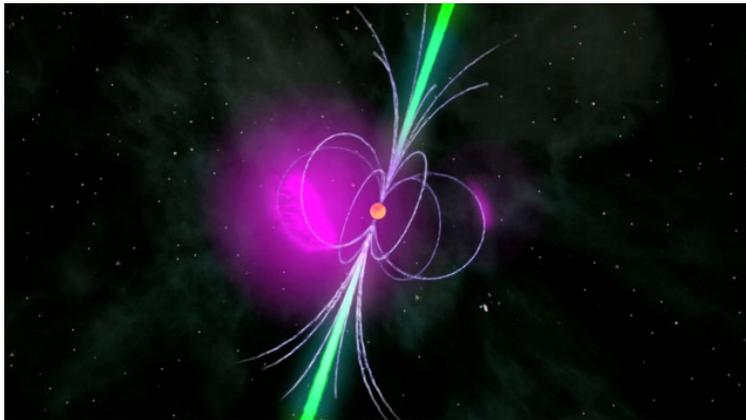


Blazar (*blazing quasi-stellar object*)

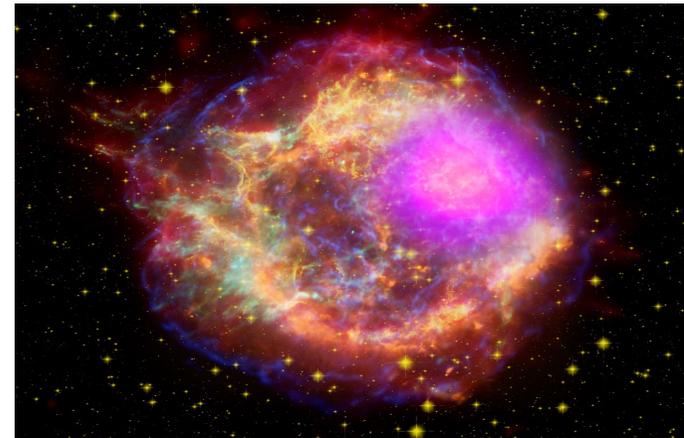
O Nuclei Galattici Attivi (AGN)



Gamma Ray Burst (GRB)



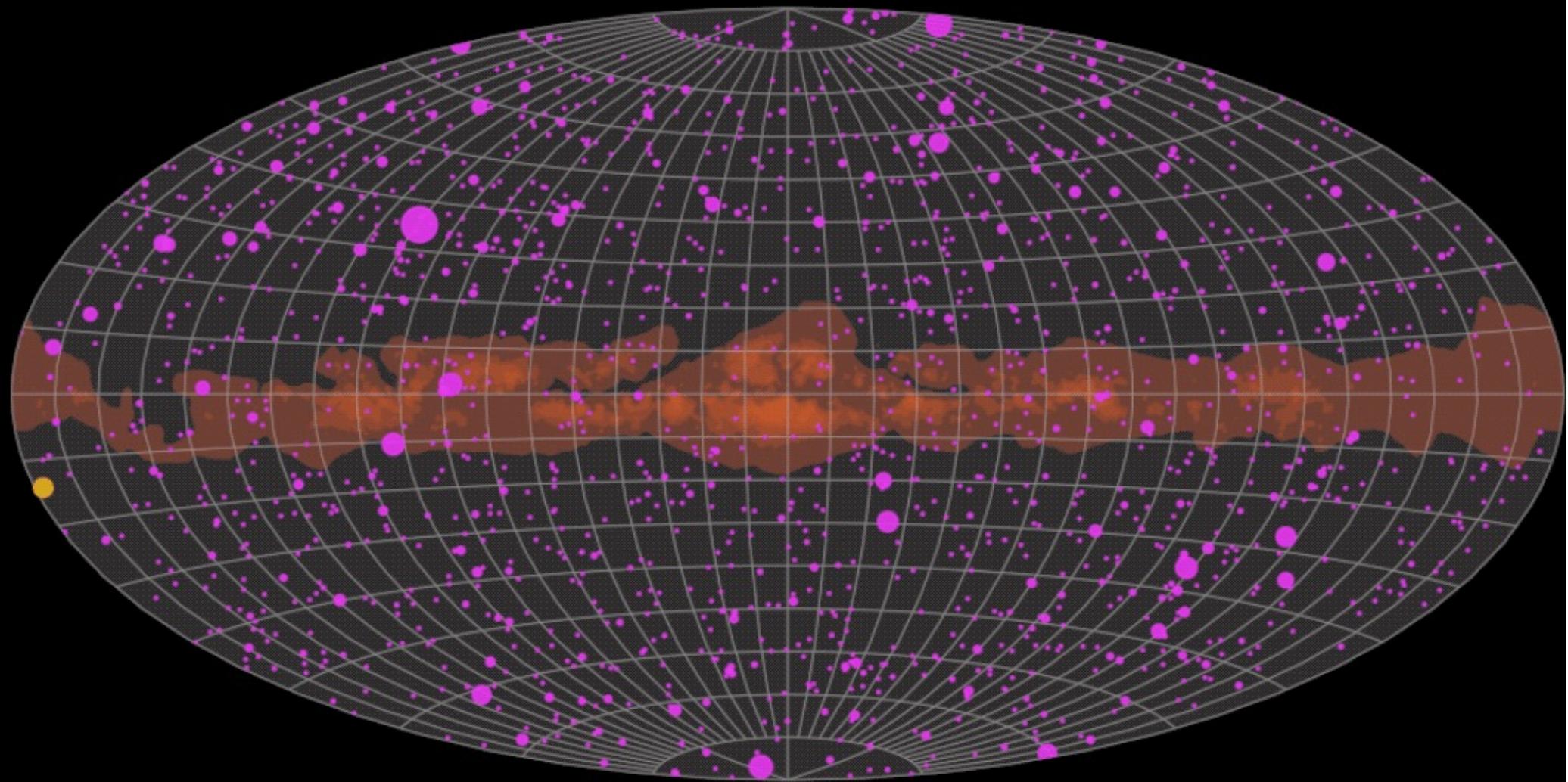
Pulsar



Resti di supernova

sono processi non termici e molto variabili





un anno di dati dal Large Area Telescope (LAT) a bordo del Fermi Gamma-ray Space Telescope della NASA. Il cerchio magenta di ogni oggetto cresce man mano che si illumina e si restringe man mano che si attenua. Il cerchio giallo rappresenta il Sole che segue il suo percorso annuale apparente attraverso il cielo. L'animazione mostra un sottoinsieme dei record di raggi gamma LAT ora disponibili per oltre 1.500 oggetti in un nuovo repository continuamente aggiornato. Oltre il 90% di queste fonti sono un tipo di galassia chiamata blazar, alimentata dall'attività di un buco nero supermassivo.

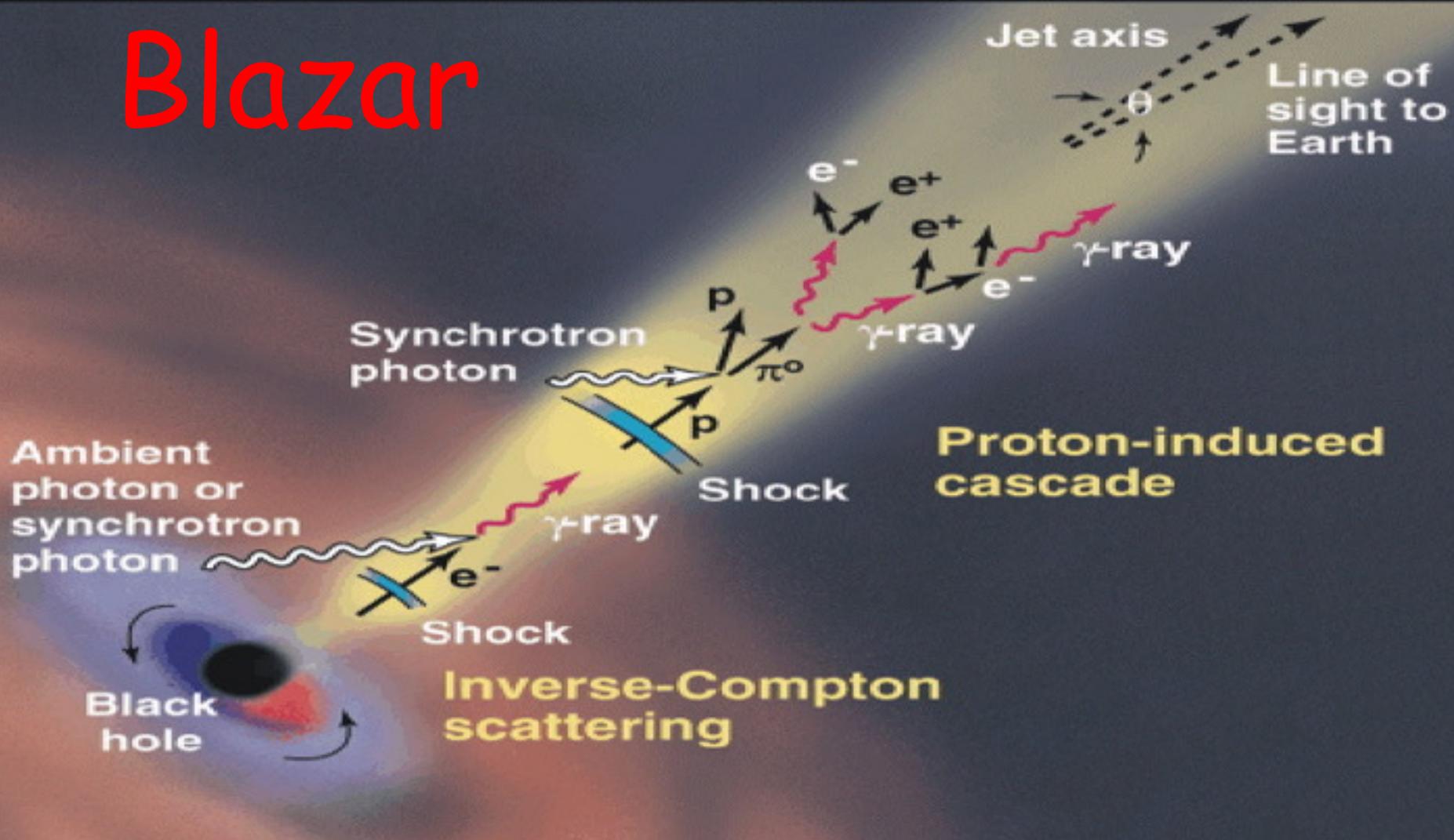


Blazar



un buco nero rotante in un disco di accrescimento

Blazar

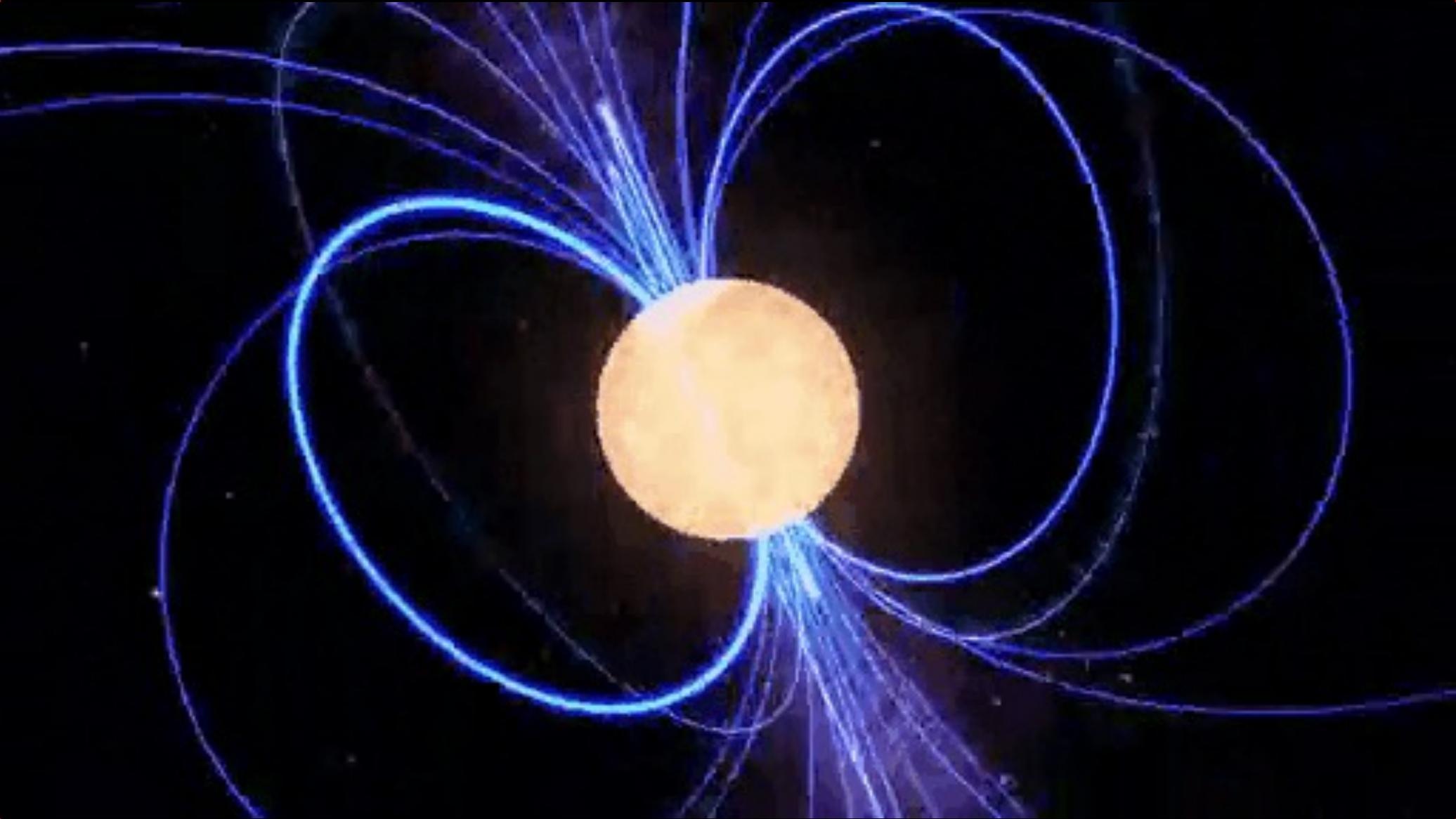


Modelli per l'emissione di alta energia da buchi neri al centro di galassie attive



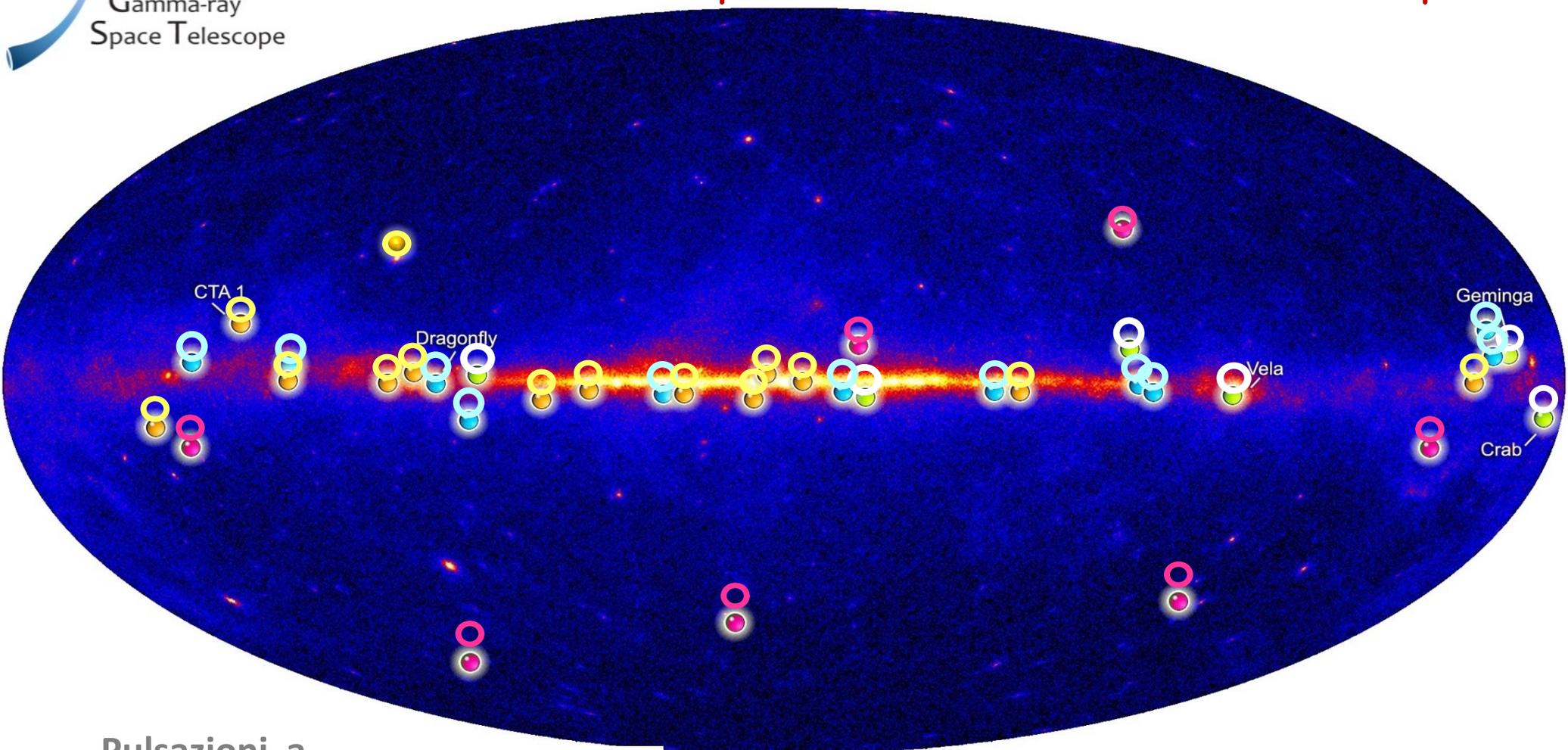
La CRAB Pulsar

PULSARS: STELLE DI NEUTRONI ROTANTI CON ELEVATISSIMI CAMPI MAGNETICI



Il cielo pulsante nei raggi gamma

➔ prossimo intervento del Dott. Ciprini



Pulsazioni a
1/10 della
frequenza reale

- New pulsars discovered in a blind search
- Millisecond radio pulsars
- Young radio pulsars
- Pulsars seen by Compton Observatory EGRET instrument

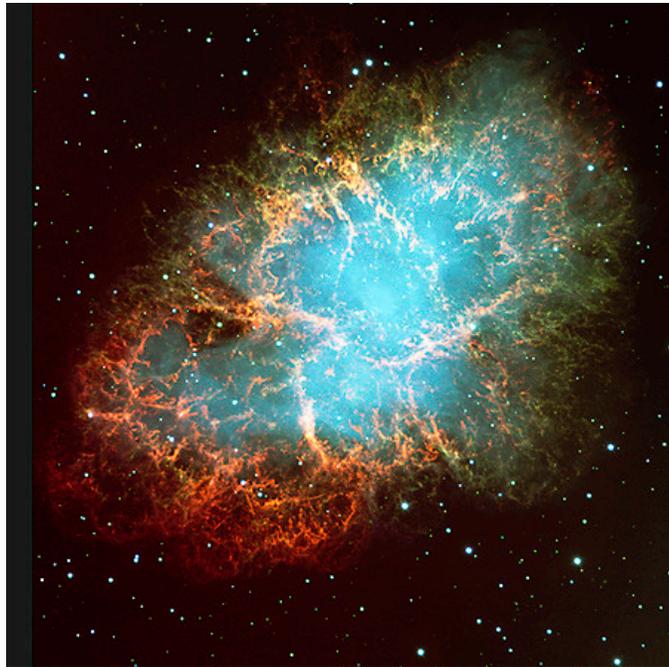
Esplosione di supernova



Esplosione di SuperNova

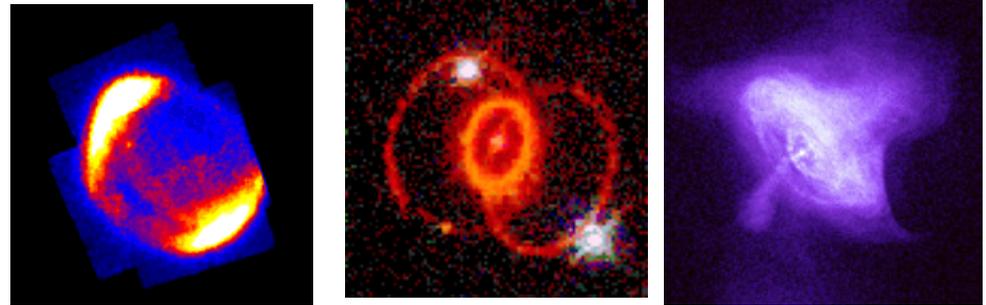
Una SuperNova indica la fine esplosiva della vita di una stella massiva (>10 masse solari); nella nostra galassia circa una SN ogni 50 anni

Particelle (protoni e nuclei fabbricati durante la vita della stella) vengono espulsi e poi accelerati nell'”onda d'urto” che si forma



NEBULOSA DEL GRANCHIO

Astronomi cinesi ne registrarono l'esplosione nel 1054.



Mentre i fotoni prodotti vanno dritti ed in circa 5000-50000 anni escono dalla galassia, le particelle cariche espulse rimangono intrappolate dai campi magnetici anche per 10 milioni di anni

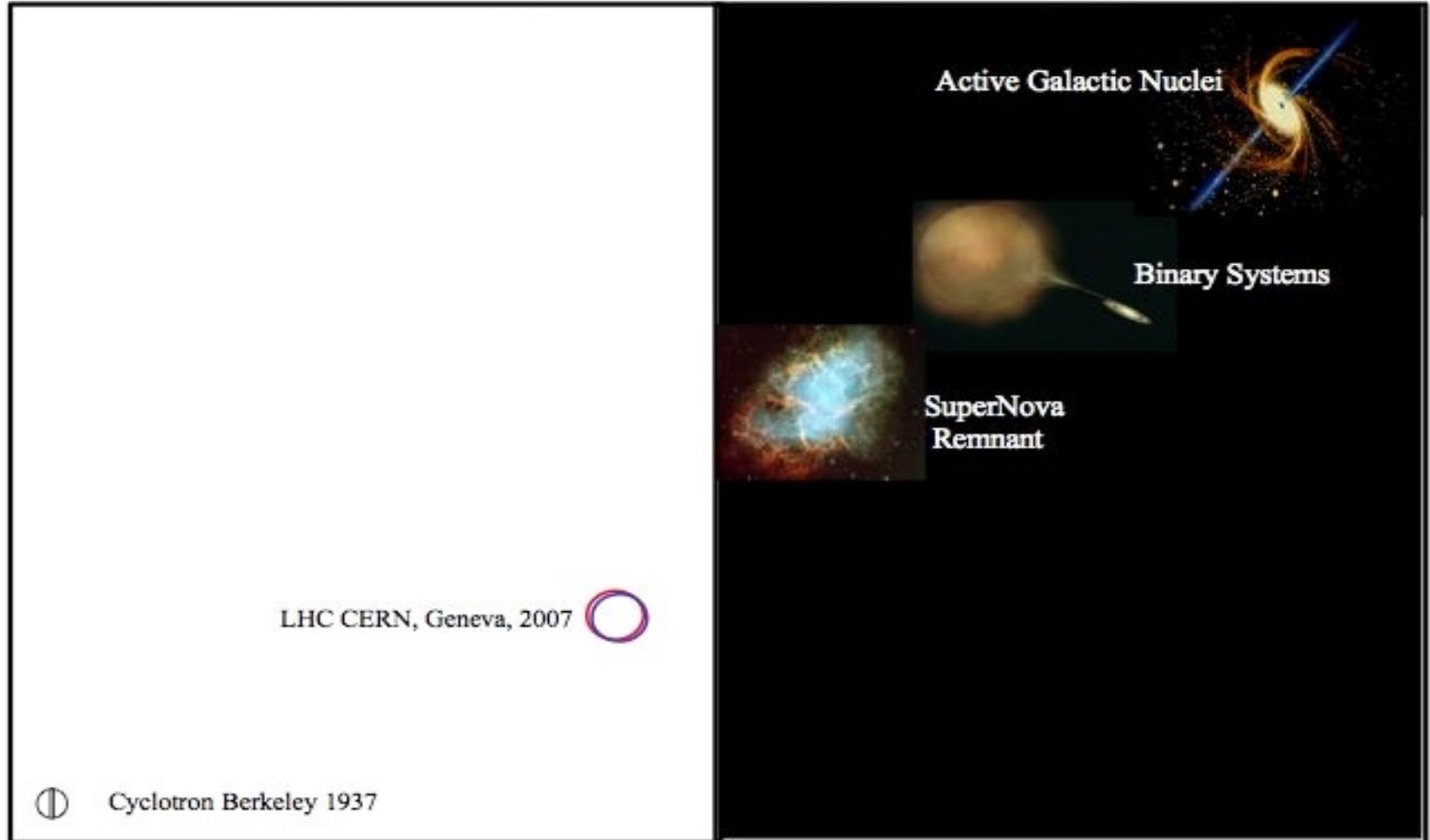
Questo meccanismo puo' spiegare gran parte dello spettro di energia dei raggi cosmici (fino a circa 10^{16} eV)

Fisica delle particelle => Astrofisica delle particelle

acceleratori terrestri

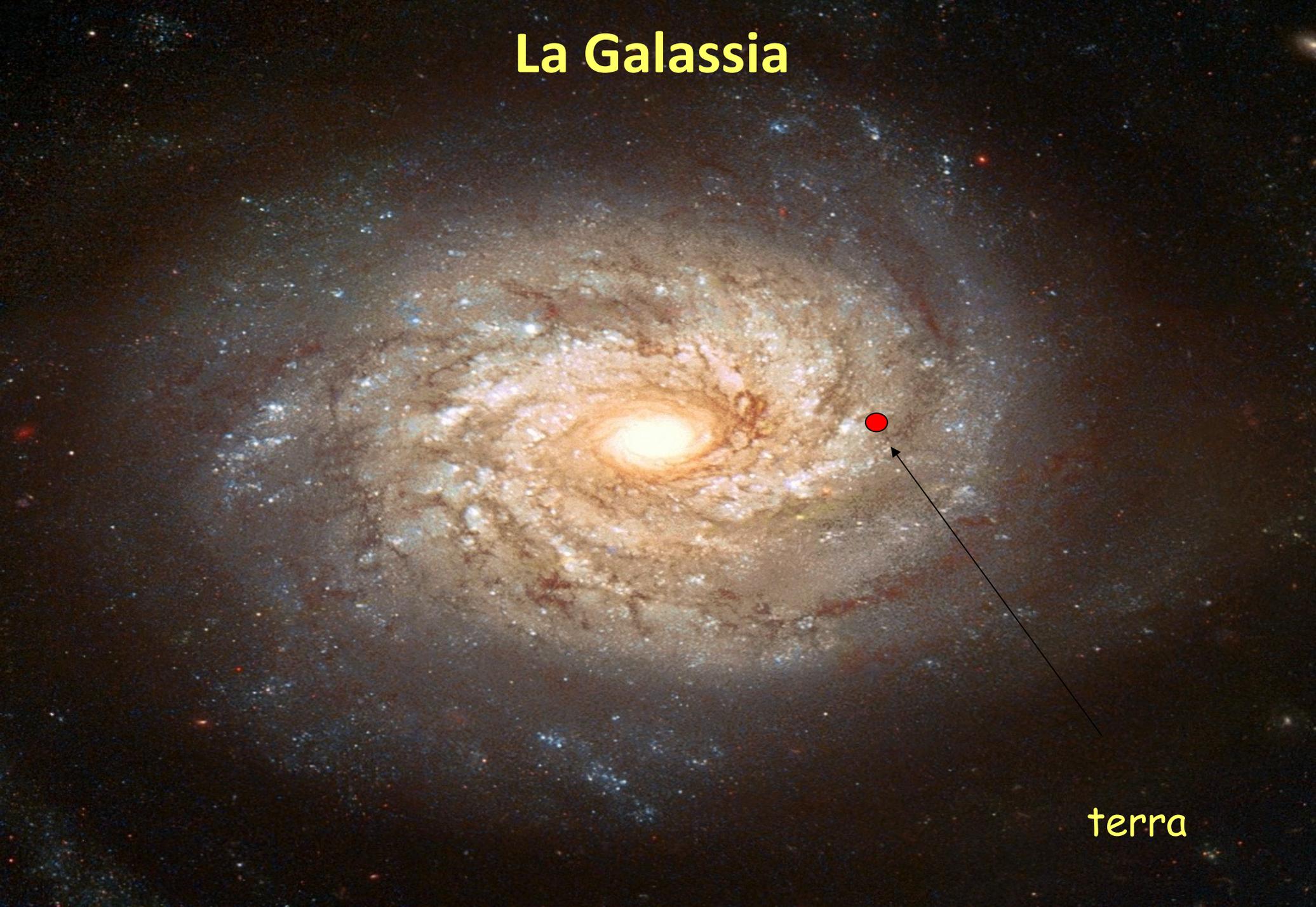
acceleratori cosmici

Diameter of collider



Energy of accelerated particles

La Galassia

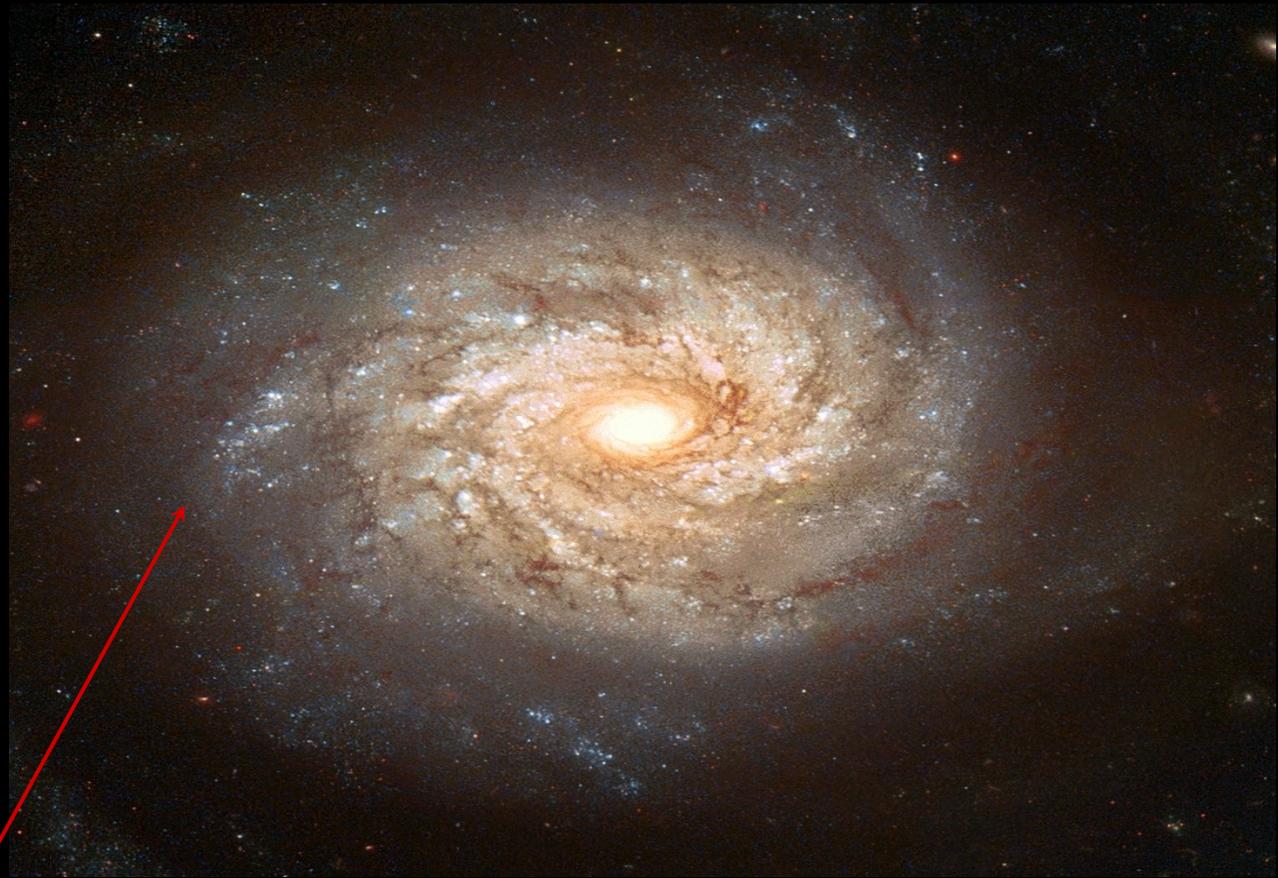


terra

Di cosa è fatto l'Universo?

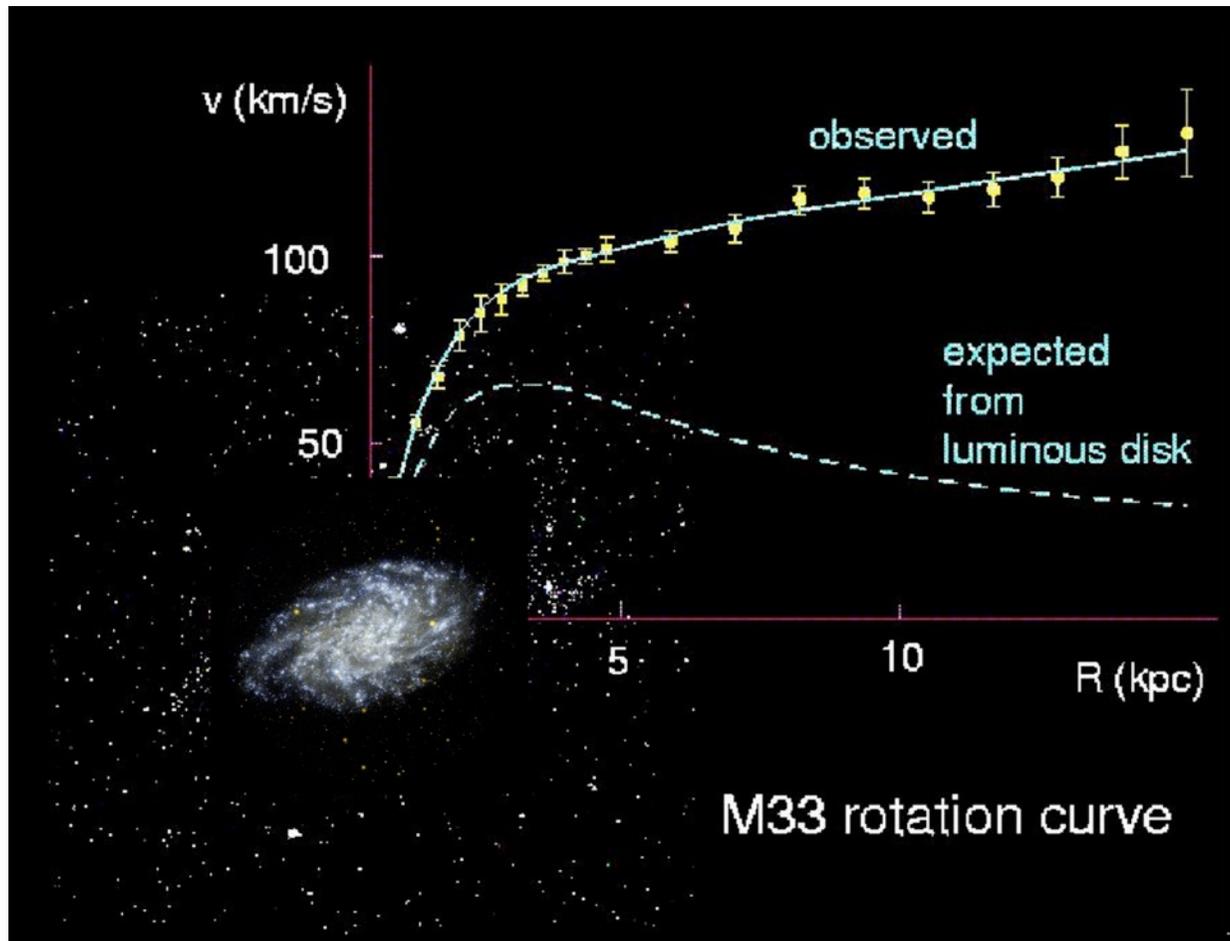
Ora sappiamo che esiste della materia oscura, necessaria per spiegare la dinamica delle stelle nelle Galassie e delle galassie negli ammassi di Galassie.

Questa materia oscura non è composta della stessa materia di cui siamo fatti noi, ma non sappiamo ancora cos'è



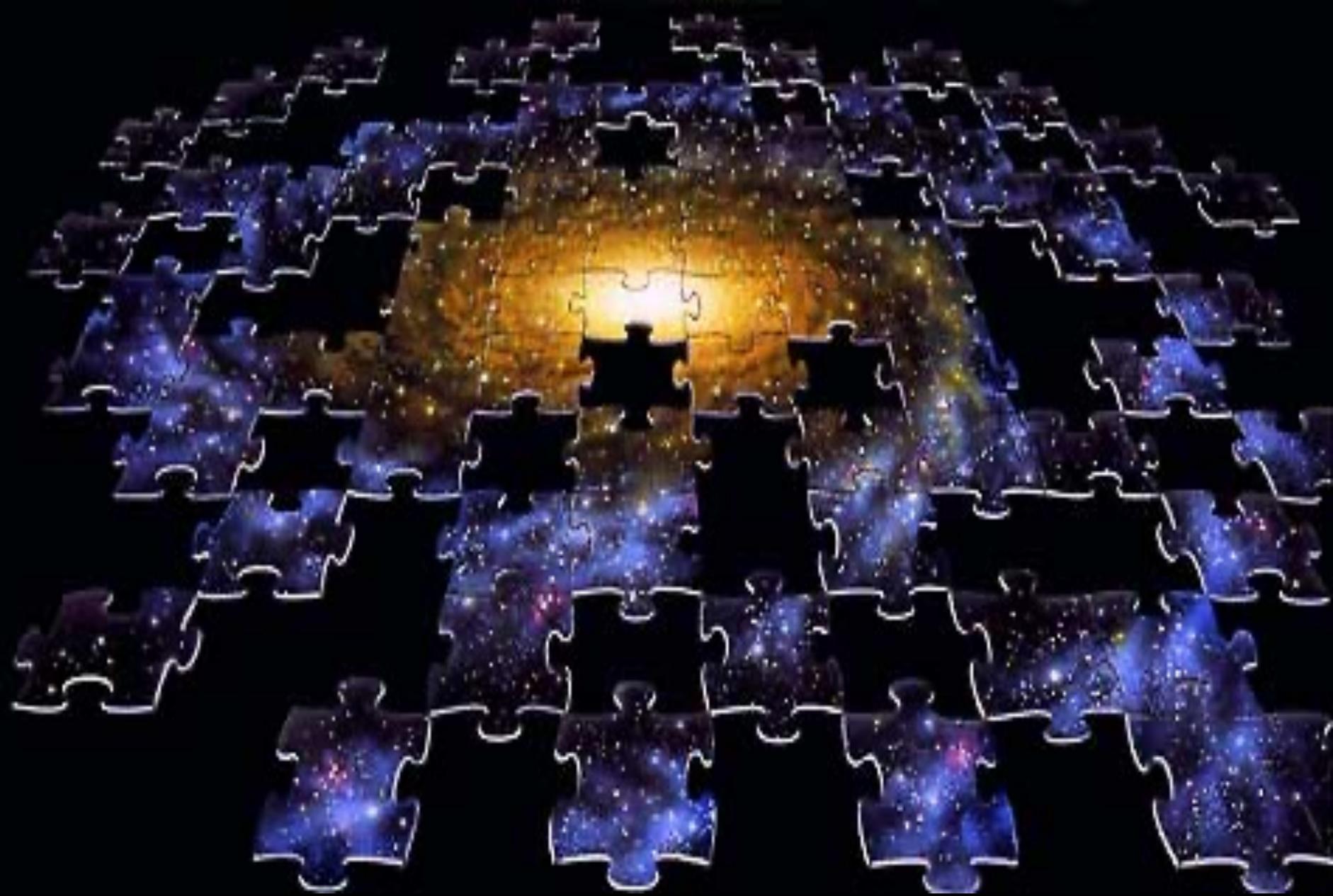
- Le stelle periferiche delle galassie ruotano più velocemente della velocità di fuga e l'unica spiegazione è che ci sia più materia di quella che vediamo nella galassia. Questa è un'evidenza indiretta della presenza di materia oscura.

Evidenza di Materia Oscura nelle Galassie



M33 rotation curve

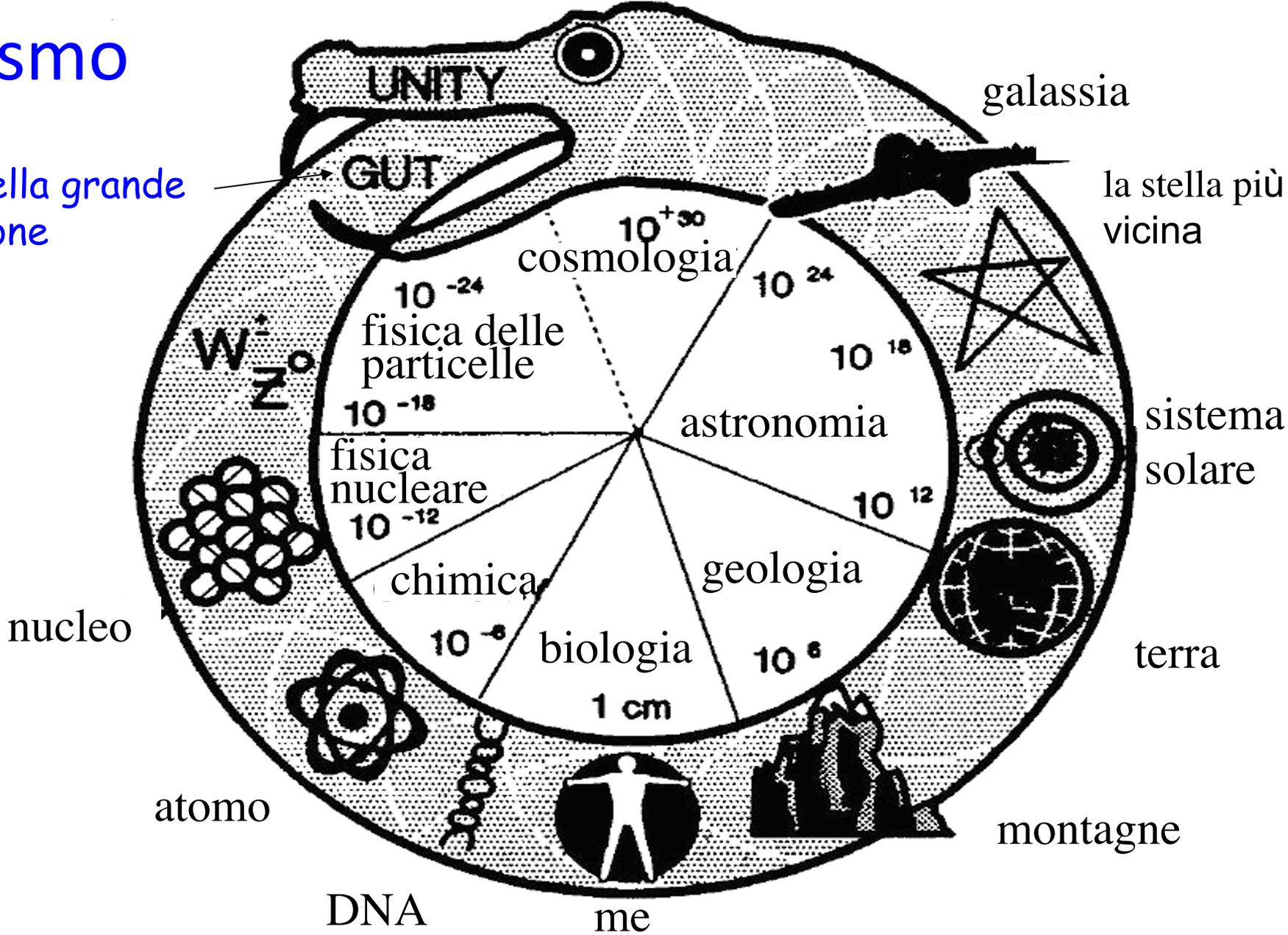
Le osservazioni evidenziano la presenza di un alone di materia oscura (“dark halo”). La materia oscura contenuta nell’alone contribuisce a determinare la “forza centripeta” e costituisce un “legame gravitazionale” che permette alle stelle della galassia, anche le più lontane, di conservare una velocità di rotazione di circa 250 km/s



Dai quark al Cosmo

L' Universo

Teorie della grande
unificazione

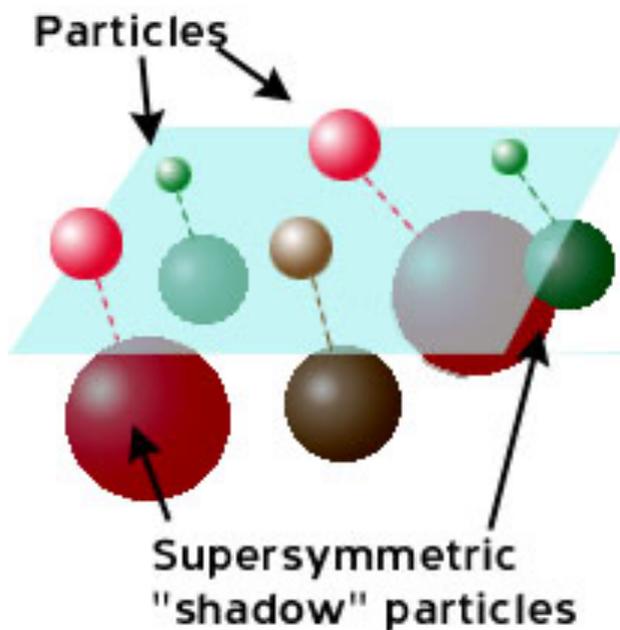


viale
dell'Astronomia

via
della Fisica

Supersimmetria

Particella \longleftrightarrow Partner supersimmetrico



è possibile che la materia oscura sia formata dalla particella supersimmetrica più leggera, unico rimasta dopo il Big bang

E' anche possibile che il nostro universo a quattro dimensioni (spazio-tempo) non sia che la parte visibile di un mondo costituito in realtà da dimensioni supplementari.

Se la teoria della supersimmetria fosse vera, la particella supesimmetrica più leggera potrebbe essere la principale componente della materia oscura.

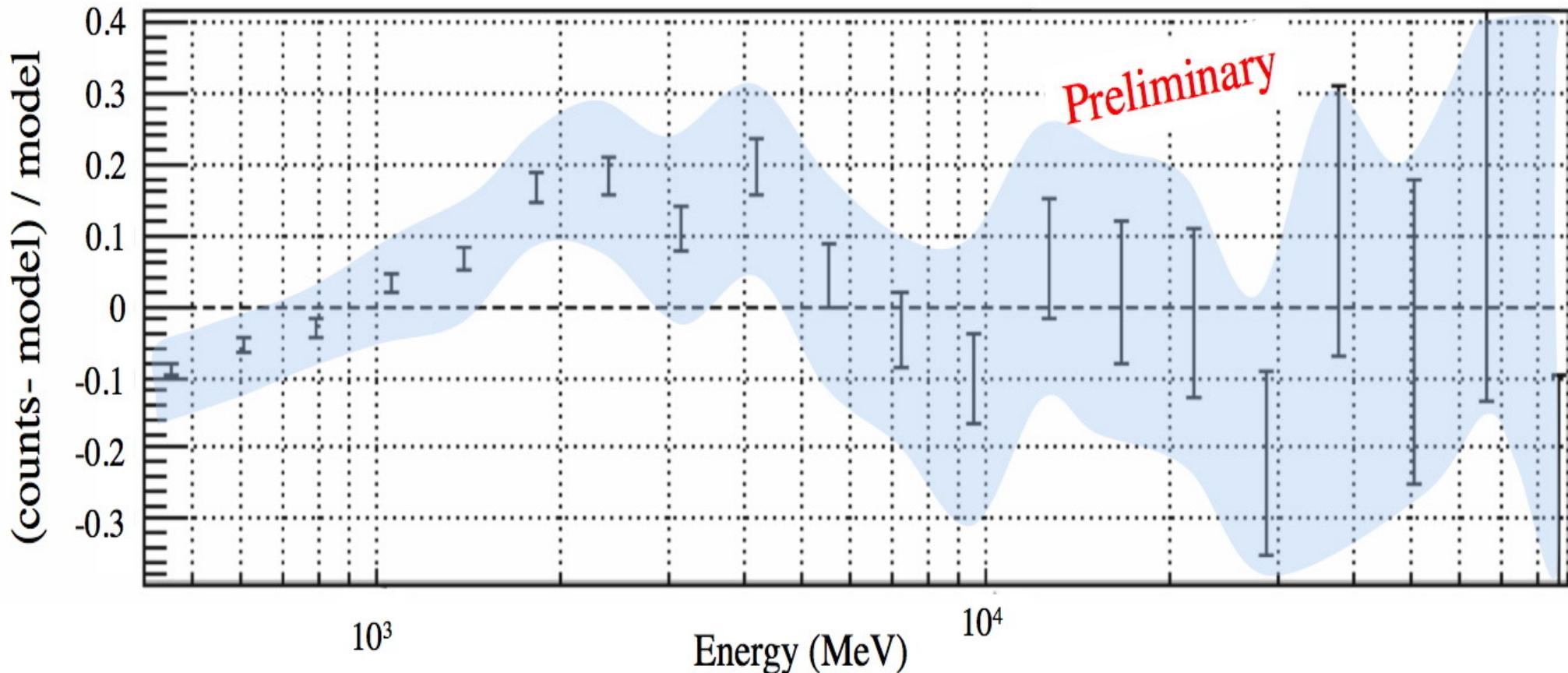
Un modo per scoprirlo è quello di osservare il cielo nei raggi gamma per vedere se ci sono annichilazioni di particelle supersimmetriche che, secondo la legge $E=mc^2$, darebbero raggi gamma, antiprotoni e positroni

Residui dei fotoni dal centro galattico

(dati - modello)

regione di $7^\circ \times 7^\circ$ centrata nel Centro Galattico, 11 mesi di dati, $E > 400$ MeV)

- Incertezza sistematica $\sim 10\%$ at 100 MeV e 20% at 10 GeV



potrebbe essere un segnale dalla
materia oscura ?

forse.

bisognerà escludere tutte le altre
ipotesi,
rendere più precisi i modelli,
c'e' ancora molto lavoro da fare
ma e' un bel lavoro!

GW170817

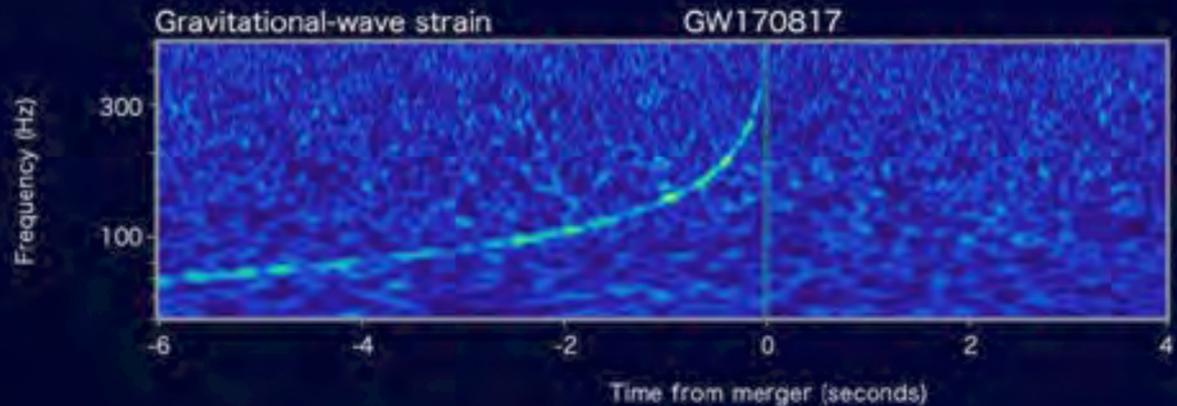
Fermi

Reported 16 seconds after detection



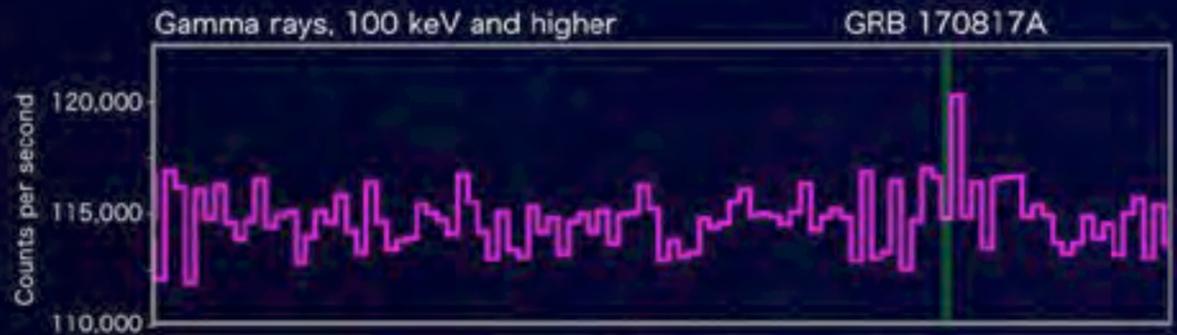
LIGO-Virgo

Reported 27 minutes after detection



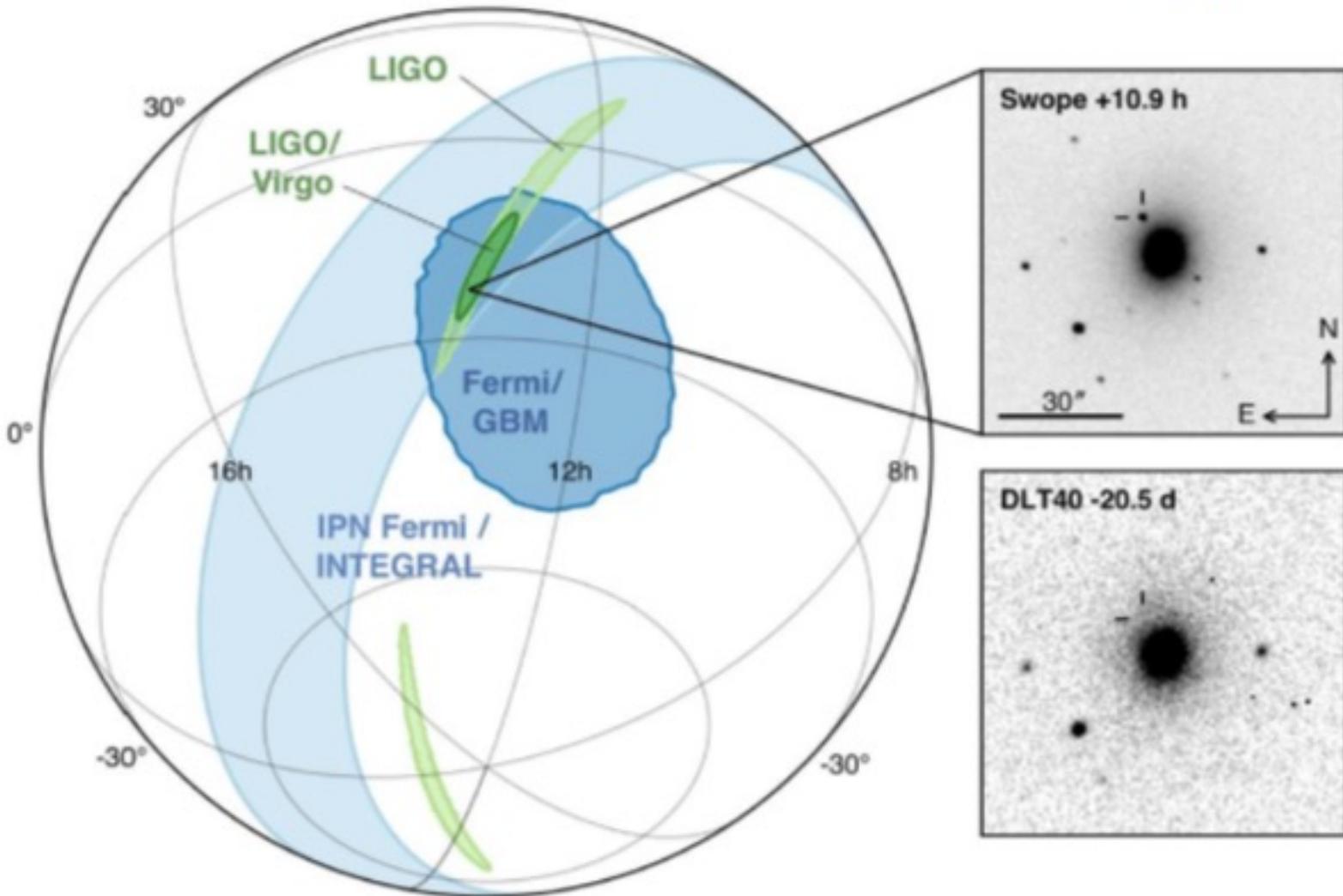
INTEGRAL

Reported 66 minutes after detection



Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger *ApJL* 848 L12 2017 [arXiv:1710.05833] 3656 authors !

GBM e Onde Gravitazionali: 17 08 2017



17 agosto 2017: coalescenza fra due Stelle di neutroni

Lampi di raggi Gamma



GW170817

- In sintesi :
- le misurazioni delle onde gravitazionali hanno determinato la massa delle stelle di neutroni che si uniscono e una localizzazione iniziale del cielo
- le osservazioni elettromagnetiche hanno determinato la galassia ospite della fusione e la massa, la velocità, l'energia e la composizione della materia espulsa dal sistema durante la fusione'
- Luce ottica/infrarossa alimentata da decadimenti nucleari coinvolti nella produzione di molti degli elementi più pesanti in natura.
- In effetti, la luce ottica-infrarossa ha fornito una forte evidenza che le fusioni di stelle di neutroni sono un sito astrofisico significativo per la produzione di elementi di cattura rapida dei neutroni (compresi i metalli delle terre rare, il platino e l'oro), un mistero di vecchia data nella nostra comprensione di l'origine degli elementi rintracciati negli spettri delle stelle.
- La combinazione di una distanza dell'onda gravitazionale dalla fusione e uno spostamento verso il rosso nello spettro della galassia ospite ha permesso anche una misurazione completamente indipendente della costante di Hubble.
- Sebbene la singola misurazione con GW170817 non sia precisa come altre tecniche, la cosmologia multi-messaggero aumenterà di importanza nel prossimo decennio man mano che rileveremo sempre più fusioni binarie di stelle di neutroni e buchi neri.

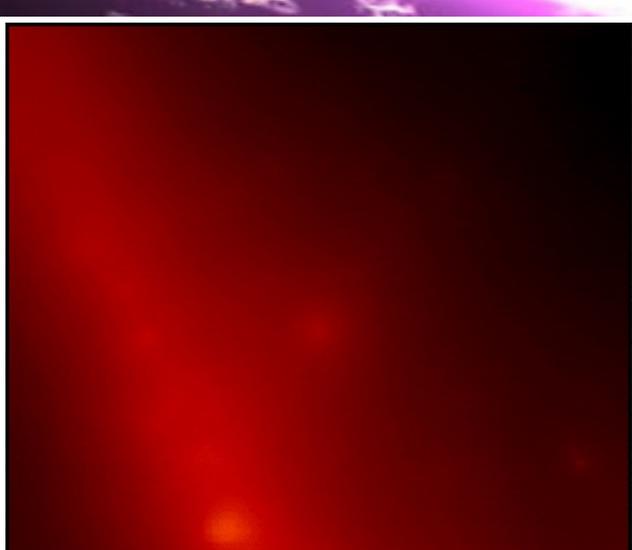
Oct 9, 2022 Swift and Fermi Missions Detect Exceptional Cosmic Blast



La sequenza costruita dai dati del Fermi Large Area Telescope rivela il cielo in raggi gamma centrati sulla posizione di GRB 221009A. Ogni fotogramma mostra raggi gamma con energie superiori a 100 MeV, ~ 10 ore di osservazioni. Il bagliore dal piano medio della nostra galassia, la Via Lattea, appare come un'ampia banda diagonale. L'immagine è di circa 20 gradi di diametro.

Osservazione del telescopio Gemini South il 14 ottobre

Z=0,51



Lhaaso in 2000 s ha rivelato ~5000 gammas con $E > \text{TeV}$ fino a 18 TeV

Oct 9, 2022 Swift and Fermi Missions Detect Exceptional Cosmic Blast



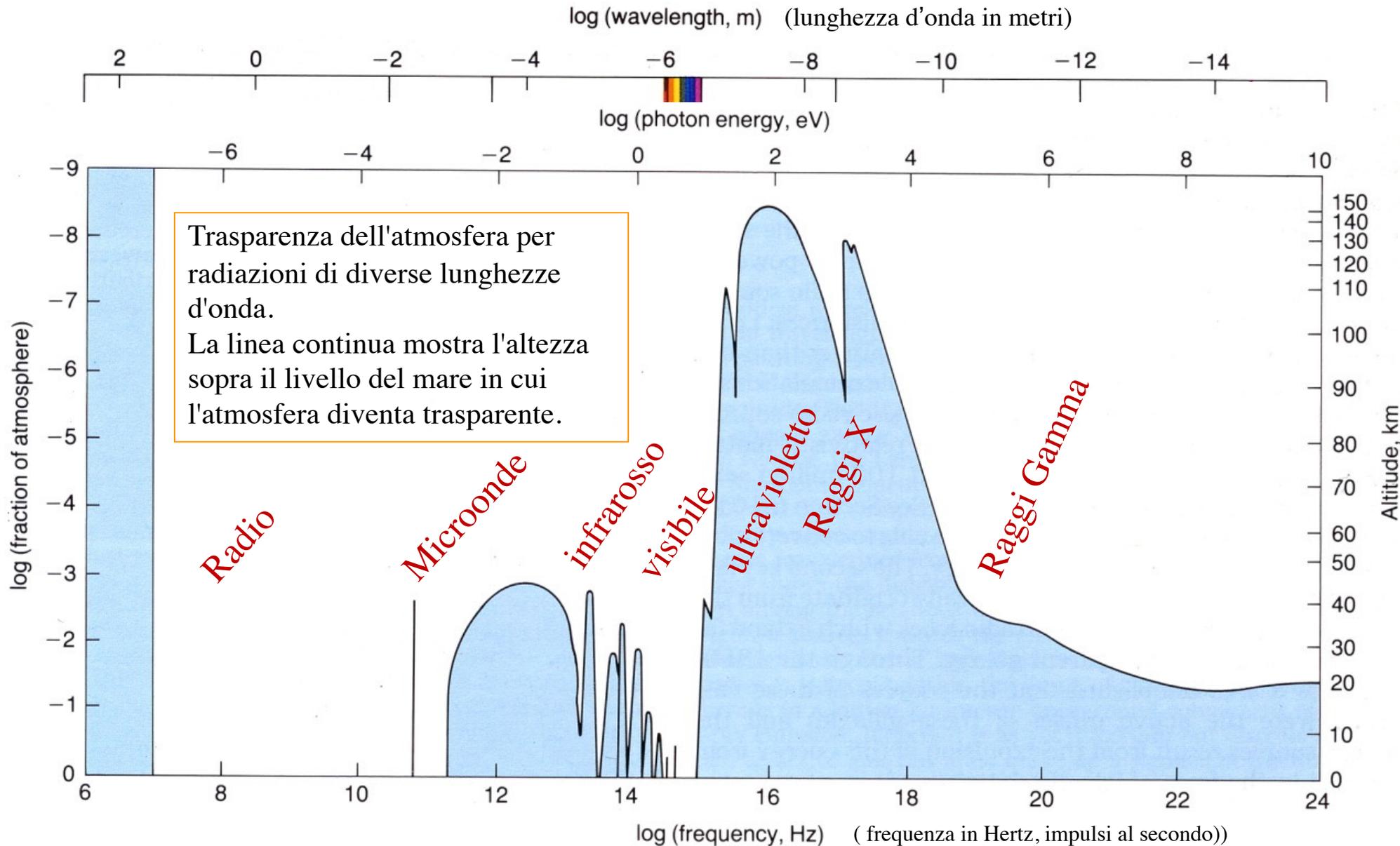
GRB 221009A :nascita di un nuovo buco nero formatosi nel cuore di una stella che collassa.

Onde Radio, raggi di sole, fotoni Gamma

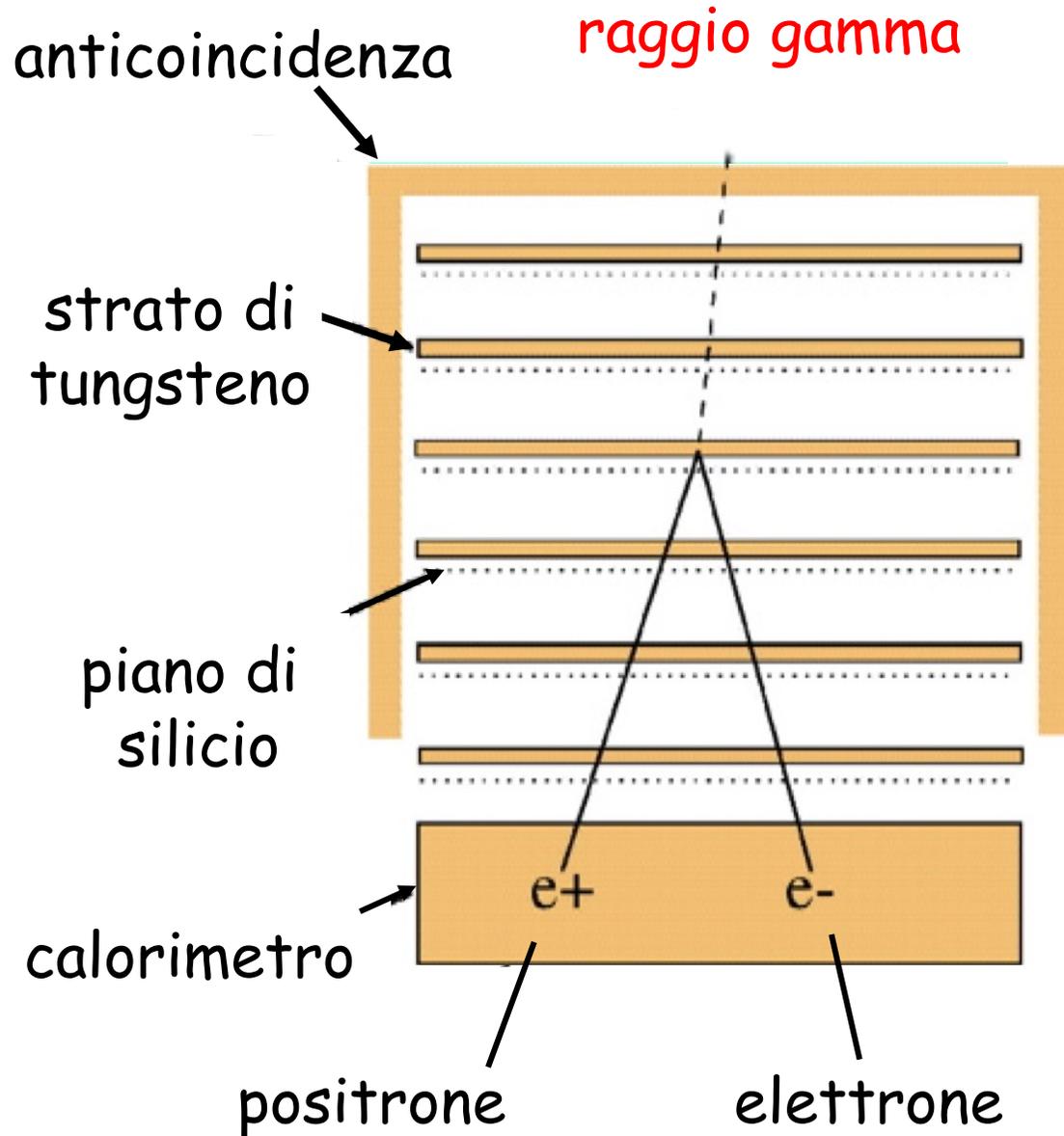
Come si rivelano?



Trasparenza dell'atmosfera

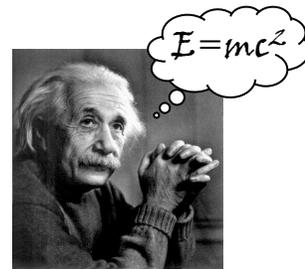


Rivelare i raggi gamma



La produzione di coppia elettrone - positrone avviene attraverso la trasformazione dell'energia elettromagnetica associata al fotone (il raggio gamma) quando interagisce con il campo elettromagnetico del nucleo pesante (tungsteno, piombo). Questo è possibile grazie a:

- l'equivalenza energia-massa $E=mc^2$
- il meccanismo quantistico di interazione tra il fotone e il campo elettromagnetico

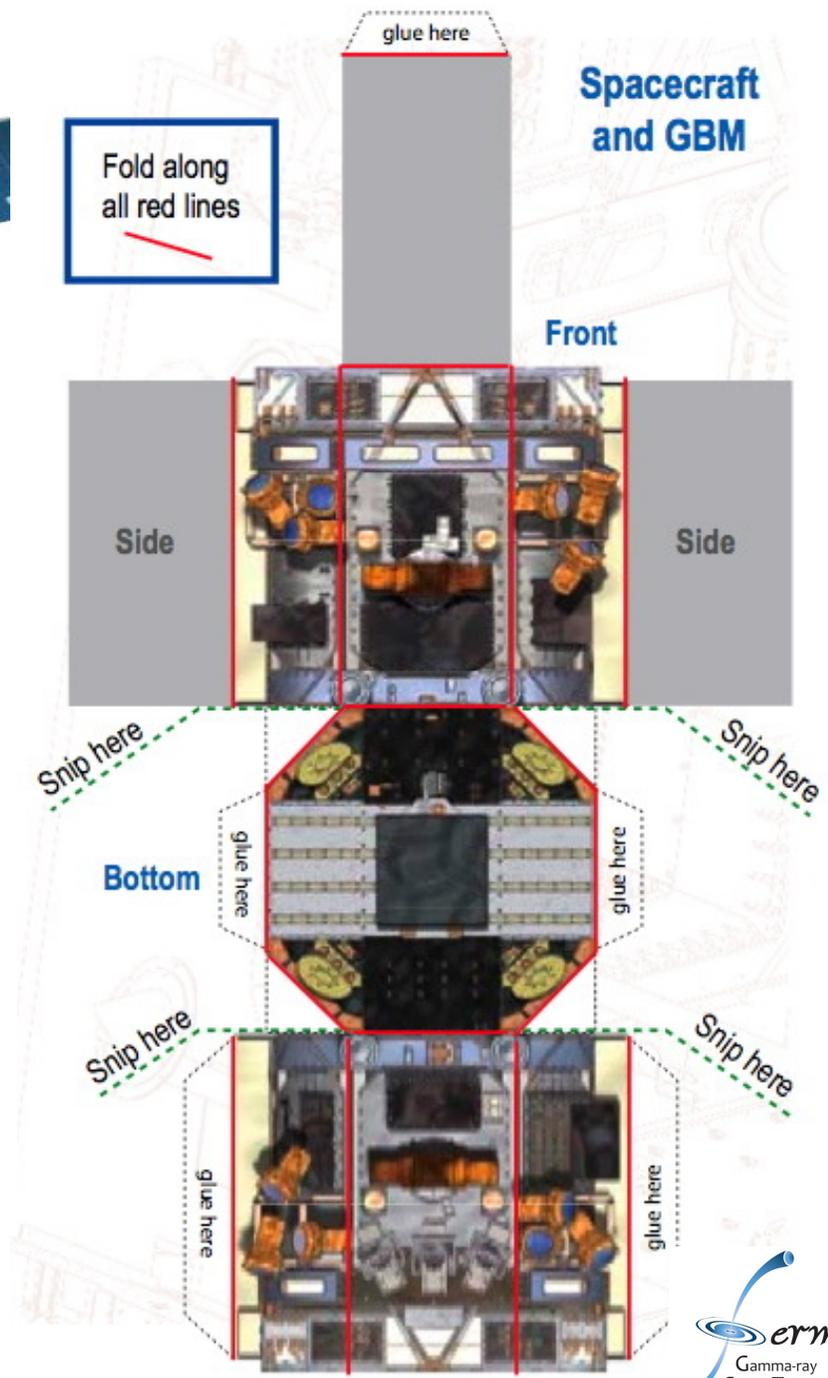
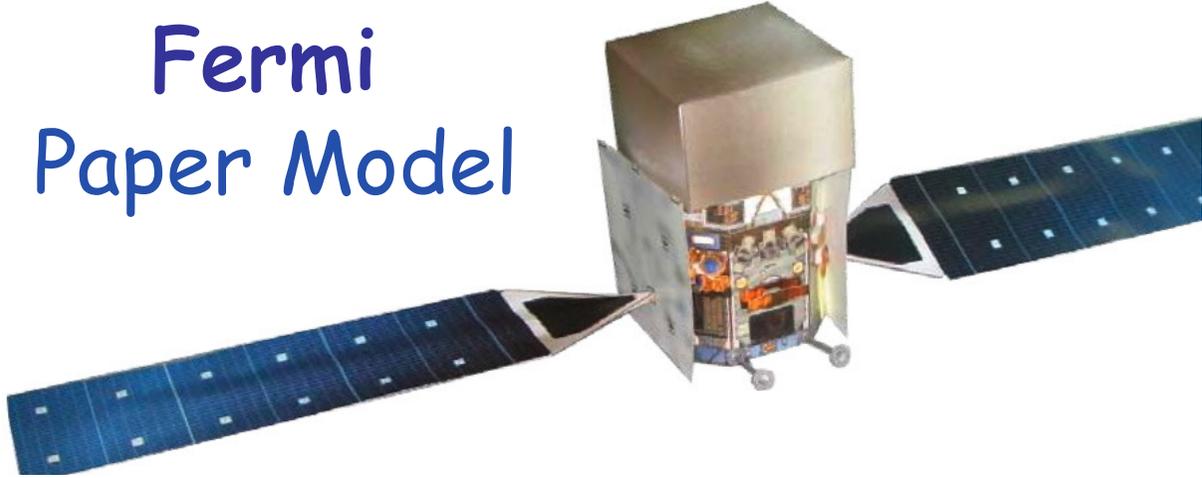


Il Telescopio di raggi Gamma FERMI



→ Prossimo intervento di Federica Giacchino

Fermi Paper Model



- se volete costruire il modellino del satellite:
- <https://owncloud.roma2.infn.it/index.php/s/yvpYj8NMDV2Bip7>