

Osservare il cielo con i raggi gamma: l'esperimento Fermi



Francesco Loparco

Università degli Studi di Bari & INFN Sezione di Bari

E-mail: francesco.loparco@ba.infn.it

Sommario

- Astronomia e astrofisica: cosa si studia?
- I rivelatori di particelle
- Il «Large Area Telescope» (LAT) a bordo del satellite Fermi
- Cosa si studia con i dati del LAT?

ASTRONOMIA E ASTROFISICA: COSA SI STUDIA?

La nascita dell'astronomia

- Fin dalla preistoria, l'uomo si interessò dell'osservazione e della previsione dei movimenti degli oggetti celesti che potevano essere osservati ad occhio nudo
- Le prime civiltà costruirono enormi manufatti che avevano probabilmente scopi astronomici oltre che religiosi e cerimoniali
 - Questi osservatori potrebbero essere stati utilizzati per determinare le stagioni nonché per la comprensione della lunghezza dell'anno
- Inizialmente l'astronomia coincide con l'astrologia!



L'astronomia pre-galileiana

- I primi studi astronomici consistono nel mappare la posizione di stelle e pianeti osservabili a occhio nudo
- Nascono le prime teorie sulla natura dei corpi celesti e sul moto dei pianeti
 - I babilonesi riescono per primi a predire le eclissi lunari
 - Nel II secolo a.C. Ipparco crea il primo catalogo stellare, che include oltre 800 stelle, classificate in base alla luminosità
 - Nel II secolo d.C. Tolomeo sviluppa il modello geocentrico



Galileo e il telescopio

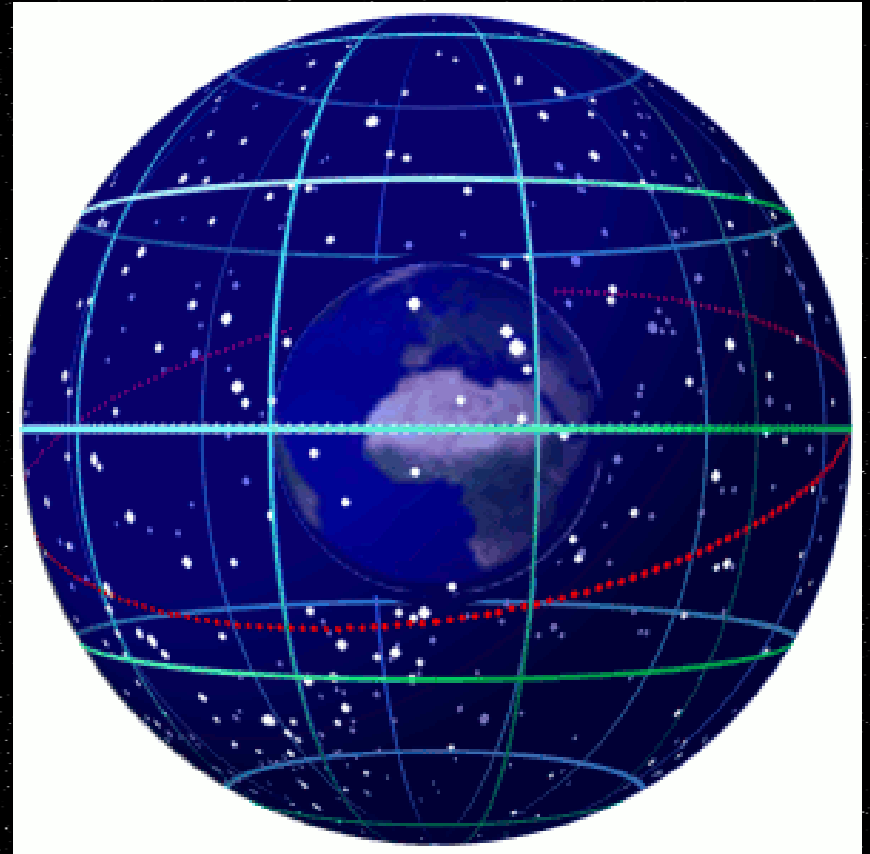
- Nel 1609 Galileo Galilei venne a sapere dell'invenzione del telescopio e ne costruì uno
- Nel 1610 pubblicò il «Sidereus Nuncius» in cui annunciava le scoperte effettuate grazie al telescopio:
 - La Luna ha una superficie non liscia → monti lunari
 - Giove è circondato da 4 satelliti (battezzati da Galileo «pianeti medicei»)
 - Nella Via Lattea è possibile risolvere milioni di stelle
- Per la prima volta si utilizza uno strumento per osservare il cielo: nasce l'**astronomia strumentale**

Il cielo ad occhio nudo

- In una notte limpida senza nuvole e senza luna lontano dall'inquinamento luminoso delle città, si possono osservare dei magnifici gruppi di stelle: le **costellazioni**
 - L'Unione Astronomica Internazionale riconosce 88 costellazioni
- A seconda del luogo di osservazione, del passare delle ore e delle stagioni, le costellazioni appaiono in luoghi differenti della volta celeste
 - Dal tramonto all'alba le costellazioni sembrano muoversi **da est verso ovest**: è un moto apparente, dovuto alla rotazione terrestre
 - Oltre alla trasformazione notturna della mappa celeste ne esiste anche una molto più lenta, che segue il mutare delle stagioni
 - Puntando lo sguardo verso nord gli occhi incontrano particolari gruppi di stelle: le **costellazioni circumpolari**
 - Rispetto a tutte le altre, non sorgono e non tramontano mai, ma rimangono sempre visibili sopra l'orizzonte
 - Dall'Italia in qualsiasi ora di qualunque sera dell'anno possiamo vederne alcune come l'Orsa Maggiore, l'Orsa Minore, Cassiopea, Cefeo, il Dragone e la Giraffa

La sfera celeste

- La sfera celeste è una sfera immaginaria di raggio arbitrario sulla cui superficie sono proiettati tutti gli astri
- Nel corso della giornata, a causa della rotazione terrestre, un osservatore sulla Terra vede gli astri in movimento sulla superficie della sfera celeste, da Est verso Ovest



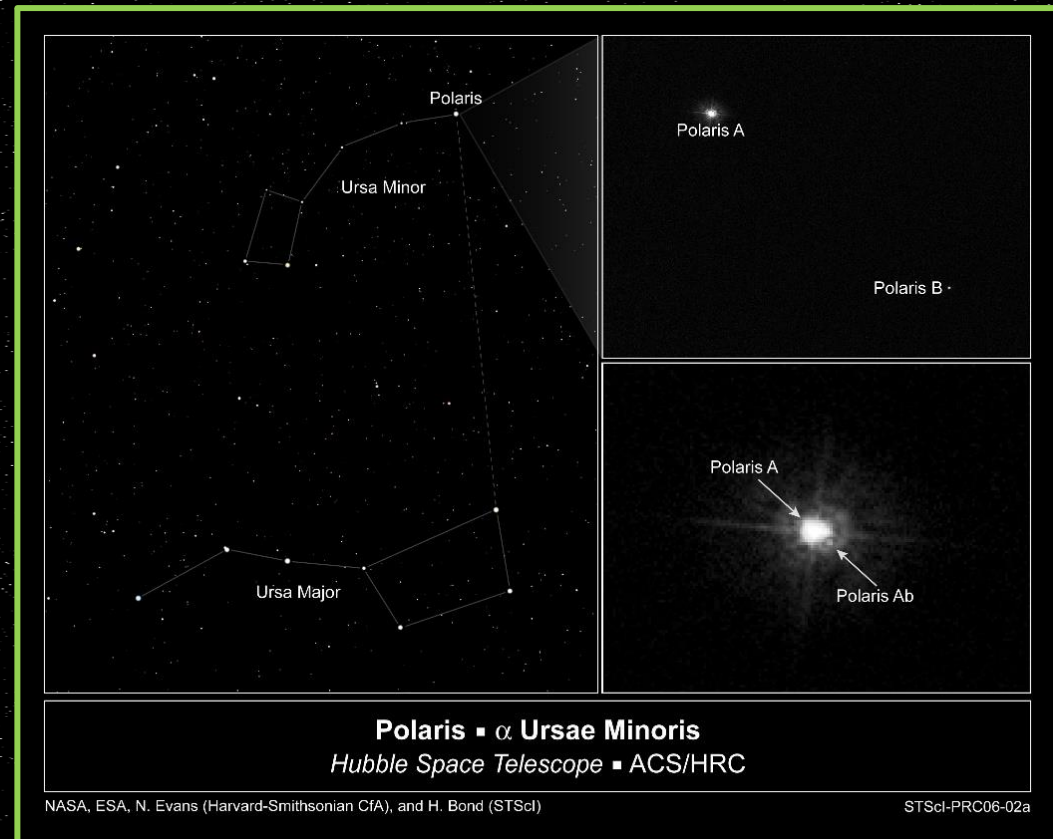
I poli celesti

- I **poli celesti** sono due punti diametralmente opposti, individuati dall'intersezione dell'asse di rotazione terrestre con la sfera celeste
 - Possono anche pensarsi come la proiezione dei poli geografici sulla sfera celeste
- I **poli celesti rimangono fissi nel cielo** e tutti gli astri sembrano ruotare loro attorno
 - Il periodo di rotazione completo è di **23h56m04s** e si chiama «**giorno siderale**»



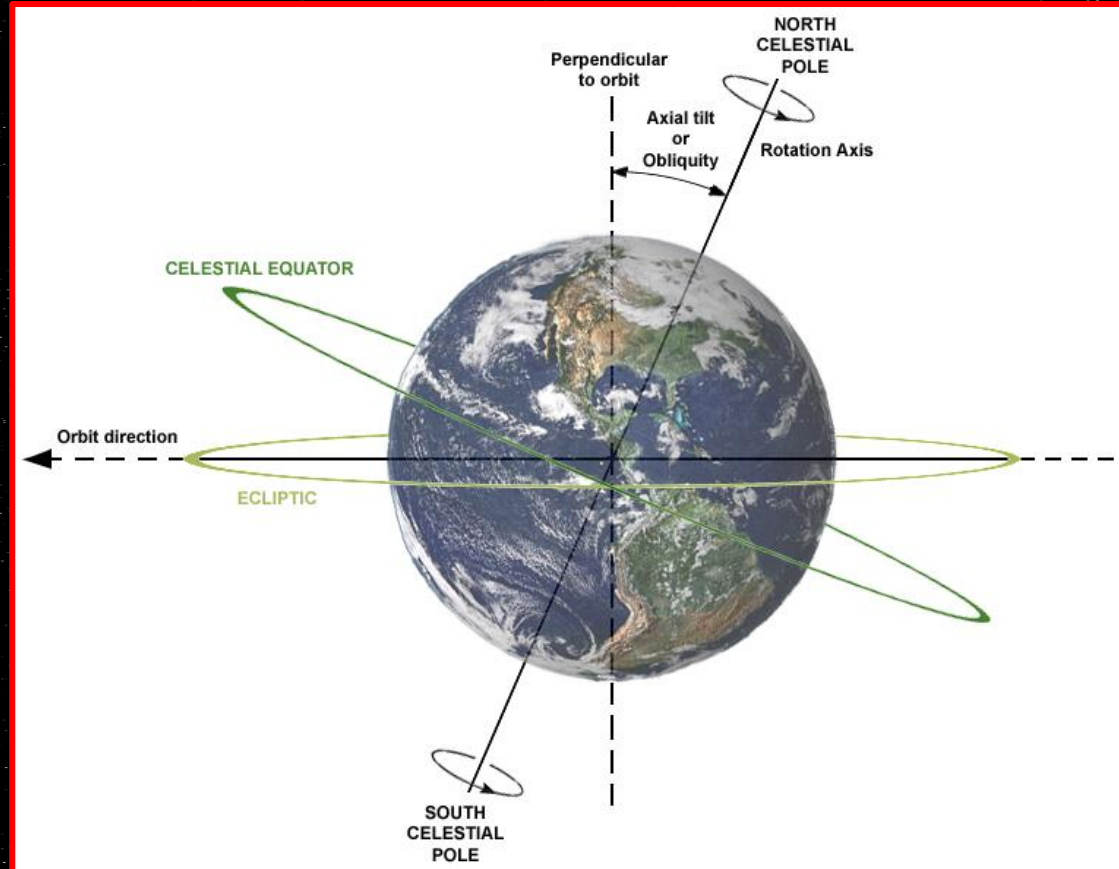
La stella polare

- La **stella polare** è l'astro più vicino al Polo Nord celeste e si trova nella costellazione dell'**Orsa Minore**
 - In realtà **Polaris** è un sistema stellare triplo
- La stella più vicina al Polo Sud è invece **σ -Octantis**, invisibile a occhio nudo
 - Come riferimento si usa la costellazione della **Croce del Sud**



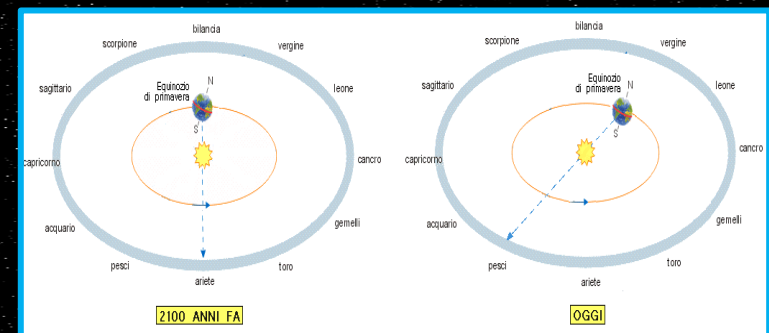
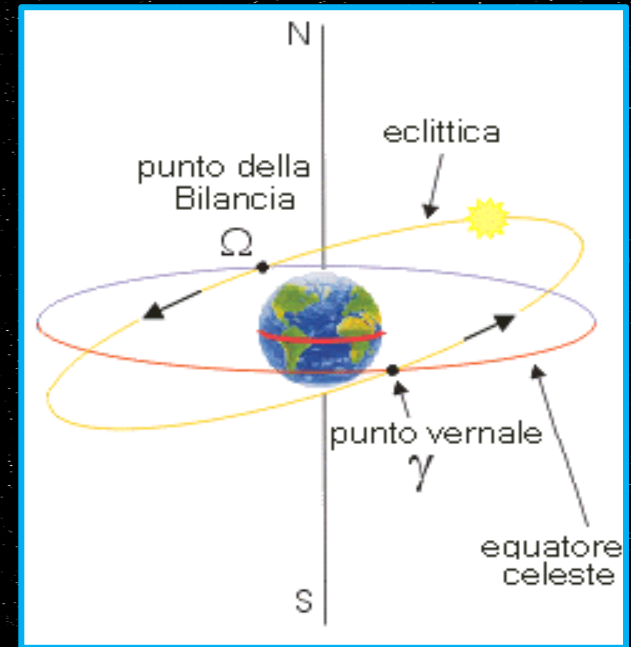
L'equatore celeste

- L'**equatore celeste** è il cerchio massimo equidistante dai poli celesti ed è la proiezione dell'equatore terrestre sulla sfera celeste
- Esso divide la sfera celeste nei due emisferi: **emisfero celeste boreale** ed **emisfero celeste australe**
- L'equatore celeste è inclinato di circa 23.5° rispetto al piano dell'eclittica



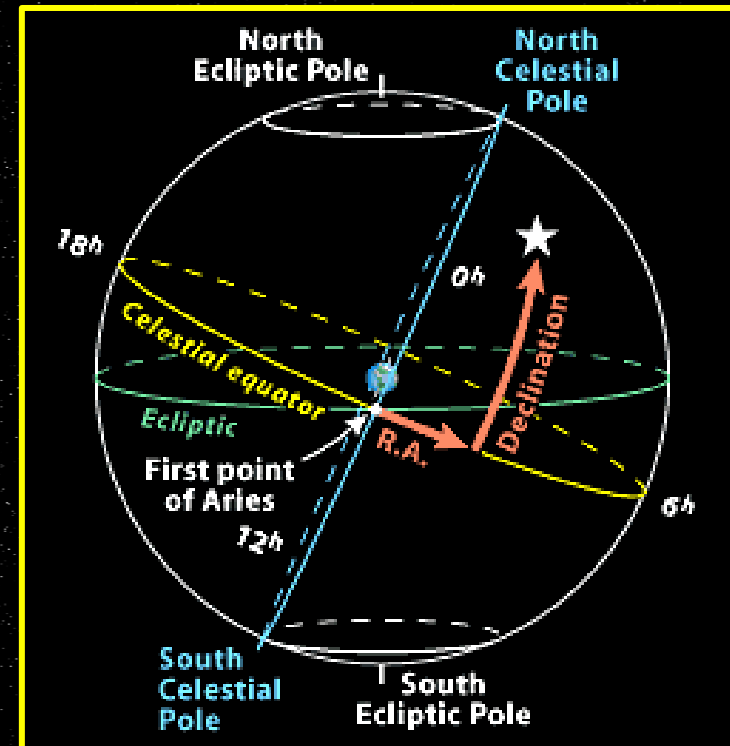
Il punto d'Ariete e il punto della Bilancia

- Il **punto vernale**, o **punto d'Ariete** è uno dei due punti equinoziali in cui l'equatore celeste interseca l'eclittica
- Quando il Sole, nel suo apparente moto annuo, transita per tale punto, la Terra viene a trovarsi in corrispondenza dell'equinozio di primavera, il Sole «sale» dall'emisfero celeste australe a quello boreale e ha inizio la primavera astronomica
 - Il nome deriva dal fatto che nell'equinozio di primavera di circa 2100 anni fa il Sole si trovava nella costellazione dell'Ariete
 - oggi, a causa della precessione degli equinozi, in corrispondenza dell'equinozio di primavera il Sole si trova nella costellazione dei Pesci
- In posizione opposta al punto d'Ariete si trova il **punto della Bilancia**, per cui il Sole passa nell'equinozio d'autunno

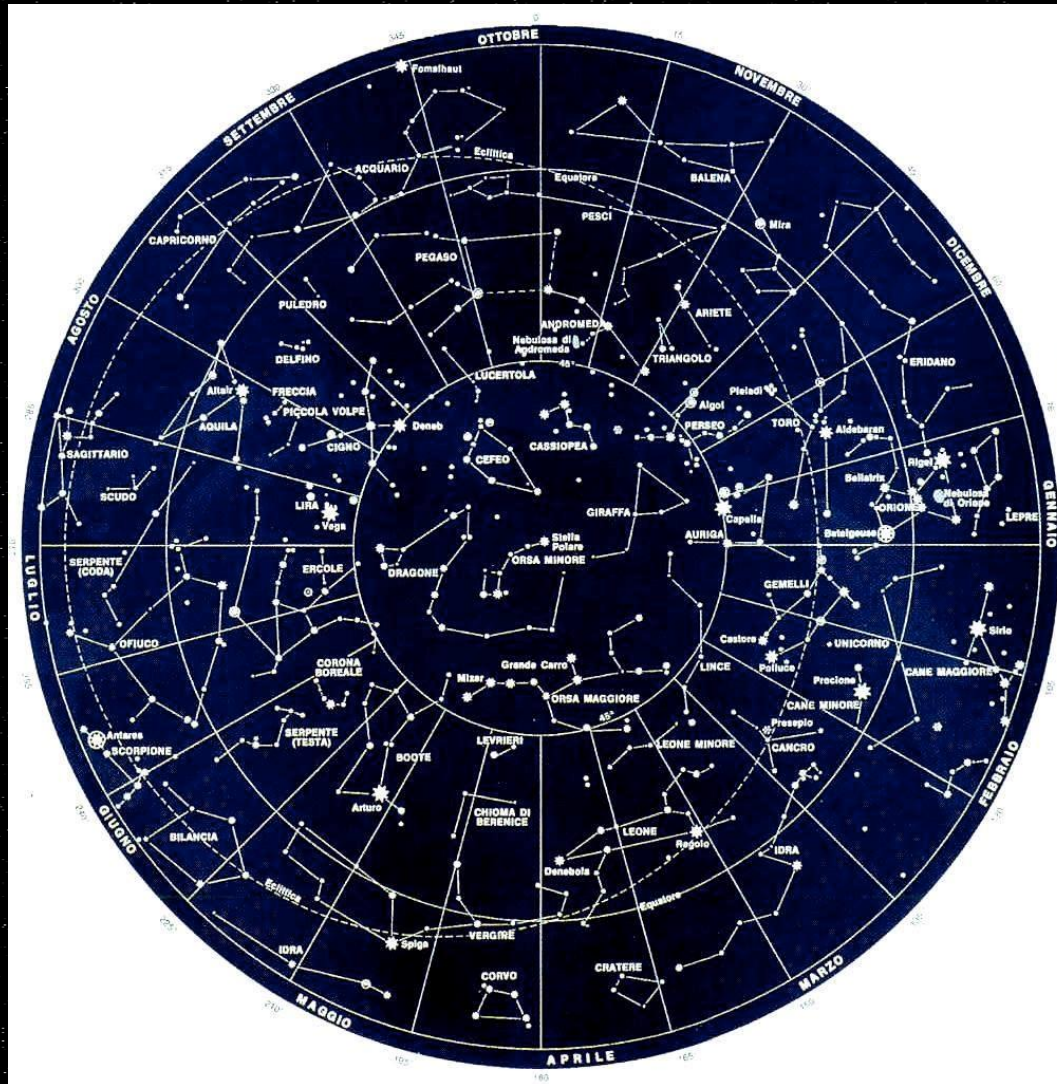


Coordinate equatoriali

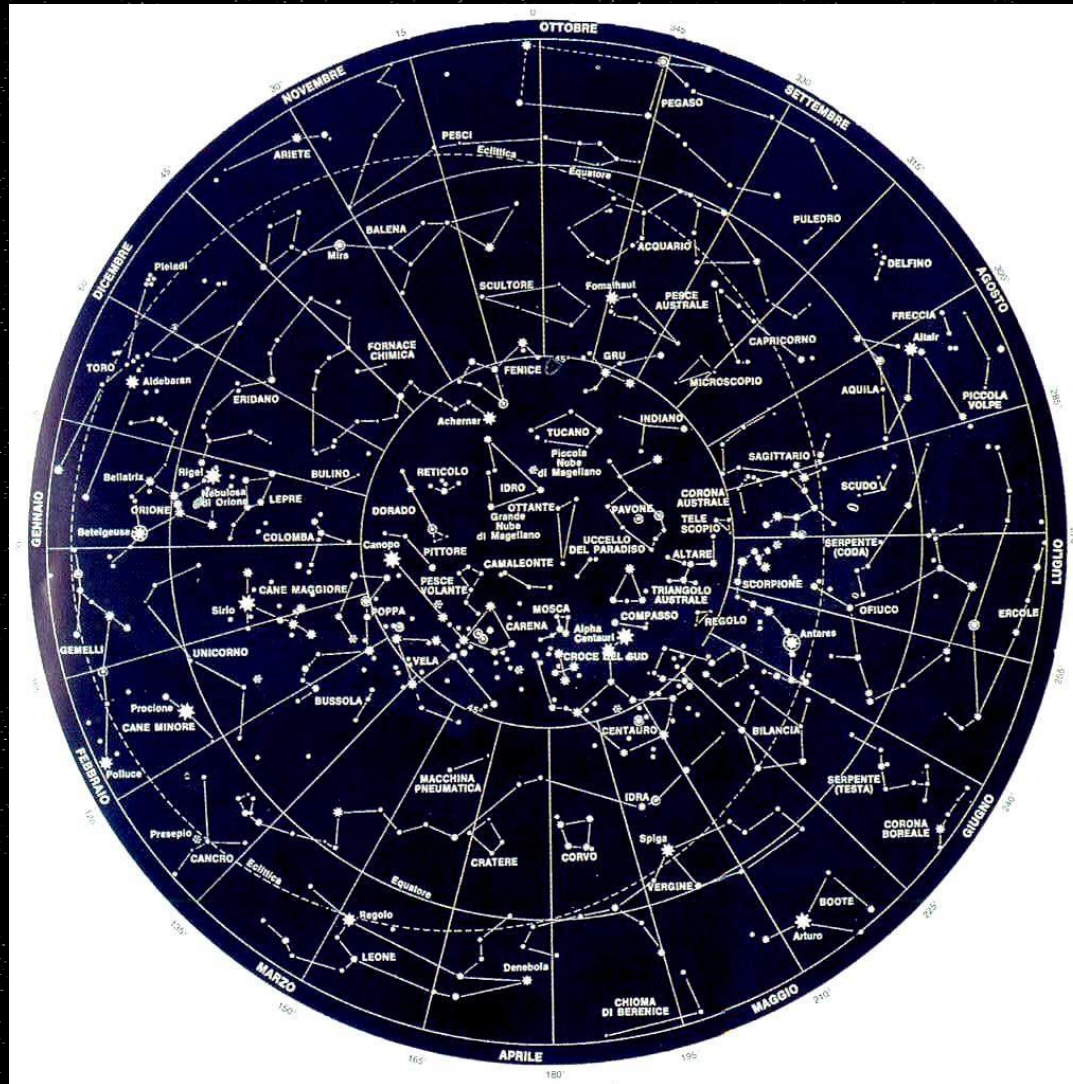
- Si prendono come riferimenti:
 - l'**equatore celeste**
 - i **cerchi orari** (o **meridiani**)
 - sono i cerchi massimi passanti per i poli celesti
 - il **punto d'Ariete**
- Le coordinate sono:
 - **Declinazione (δ)** di un astro: è la sua distanza angolare dall'equatore celeste
 - varia da -90° al polo sud a $+90^\circ$ al polo nord
 - **Ascensione retta (α)** di un astro: è la distanza angolare tra il punto d'Ariete e l'intersezione del meridiano passante per l'astro con l'equatore celeste
 - si misura a partire dal punto d'ariete in senso antiorario in gradi (0° , 360°) oppure in ore ponendo $1h = 15^\circ$



Emisfero boreale



Emisfero australe



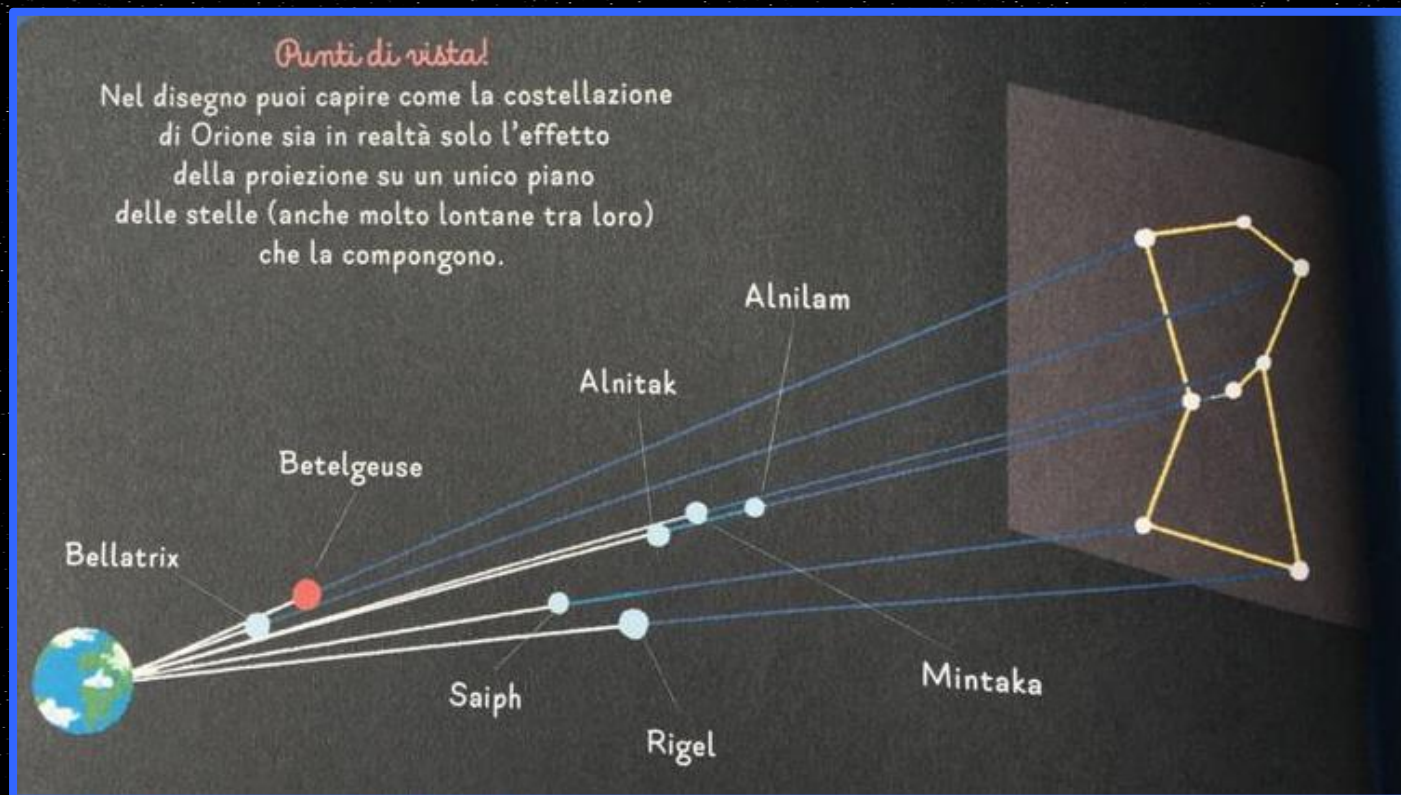
Non tutto è così vicino come sembra

- Le costellazioni che vediamo sono formate da stelle che fanno parte della **Via Lattea**, la galassia in cui abitiamo
- I puntini che si uniscono per formare la costellazione di una galassia rappresentano solo la proiezione delle stelle sulla volta celeste e stelle che ci appaiono vicine possono essere separate da distanze enormi
- Le costellazioni sono in realtà un effetto ottico!



Punti di vista...

- Le stelle che compongono la **costellazione di Orione** ci sembrano vicine ma in realtà si trovano a distanze differenti da noi!
 - Se le osservassimo da un altro punto della nostra Galassia la figura che esse compongono sarebbe diversa!



Le distanze in Astronomia (1)

- Lunghezza di un campo da calcio: ~100 m



- Distanza Bari – Sydney: ~16 000 km



- Diametro della Terra: ~12 700 km



- Distanza Terra – Sole: ~150 000 000 km



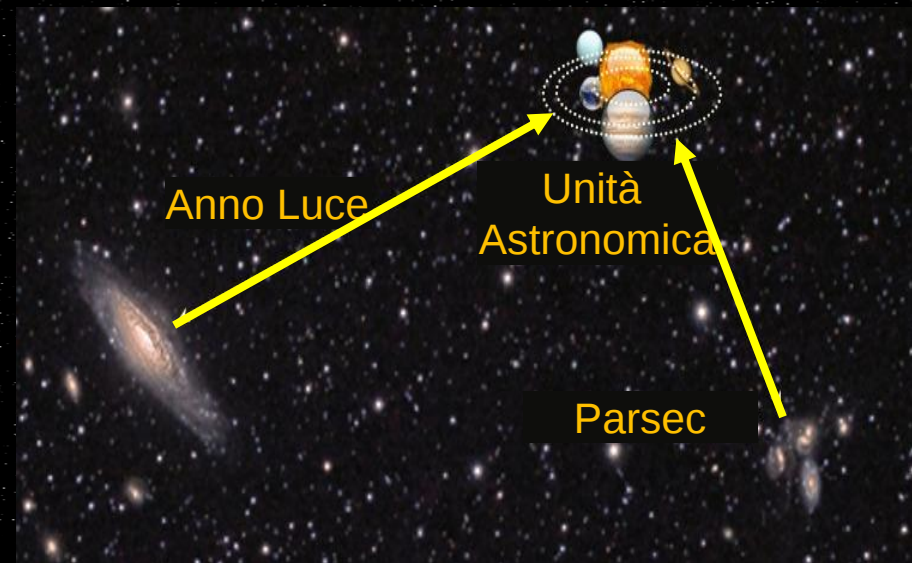
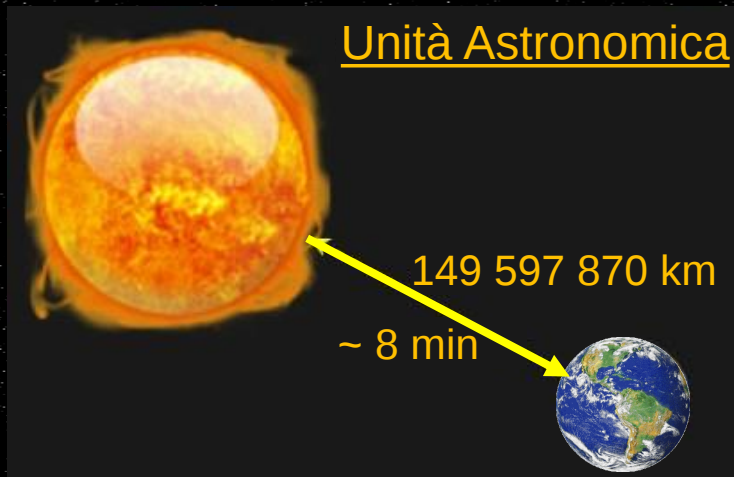
- Distanza Sole – Proxima Centauri:
~40000 miliardi di km



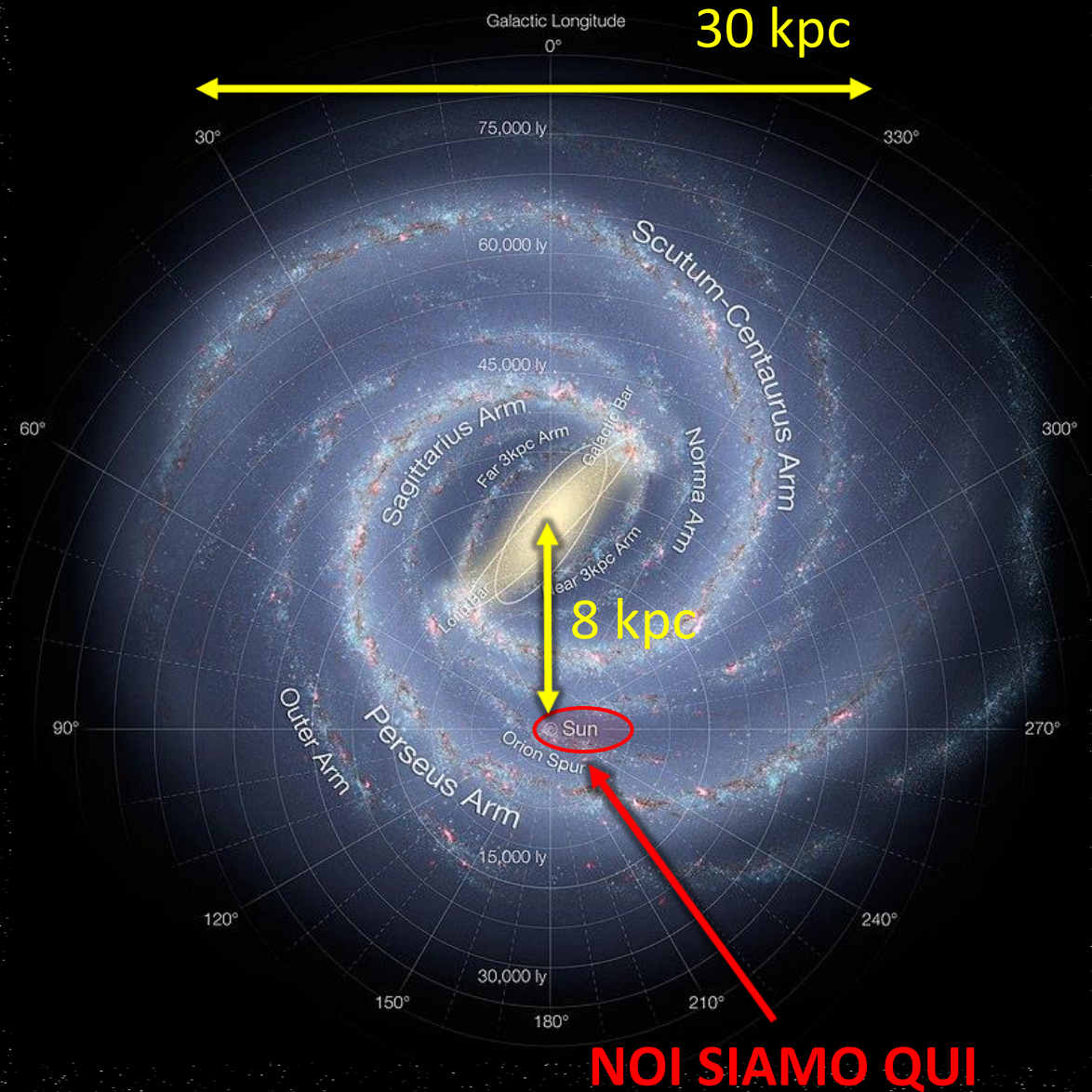
Le distanze in Astronomia (2)

■ Nuove unità di misura

- Unità Astronomica: **1 AU** = ~150 milioni di km
- Anno Luce: **1 ly** = ~ 9500 miliardi di km
- Parsec: **1 pc** = ~ 31000 miliardi di km

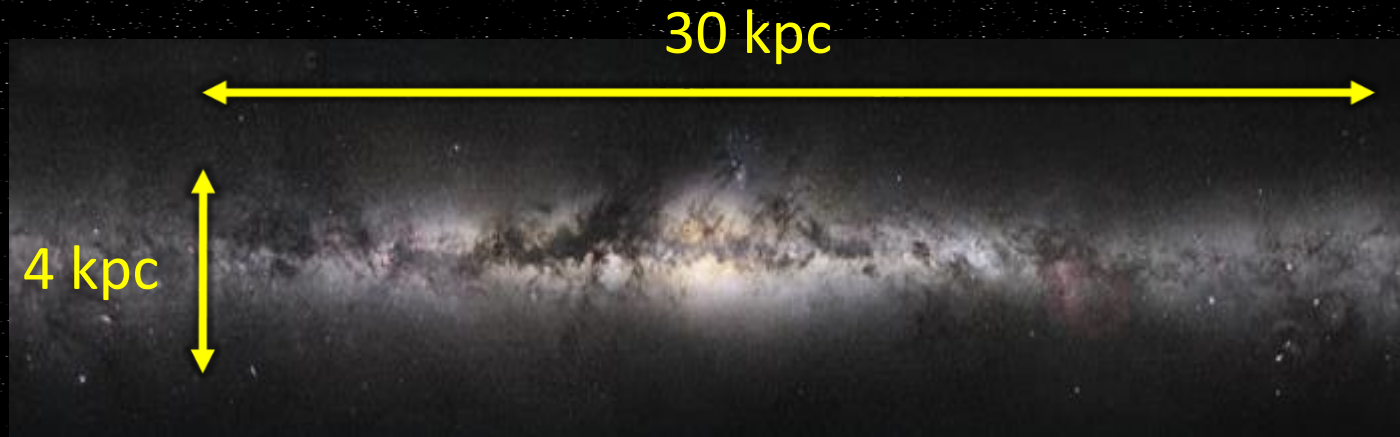


La Via Lattea



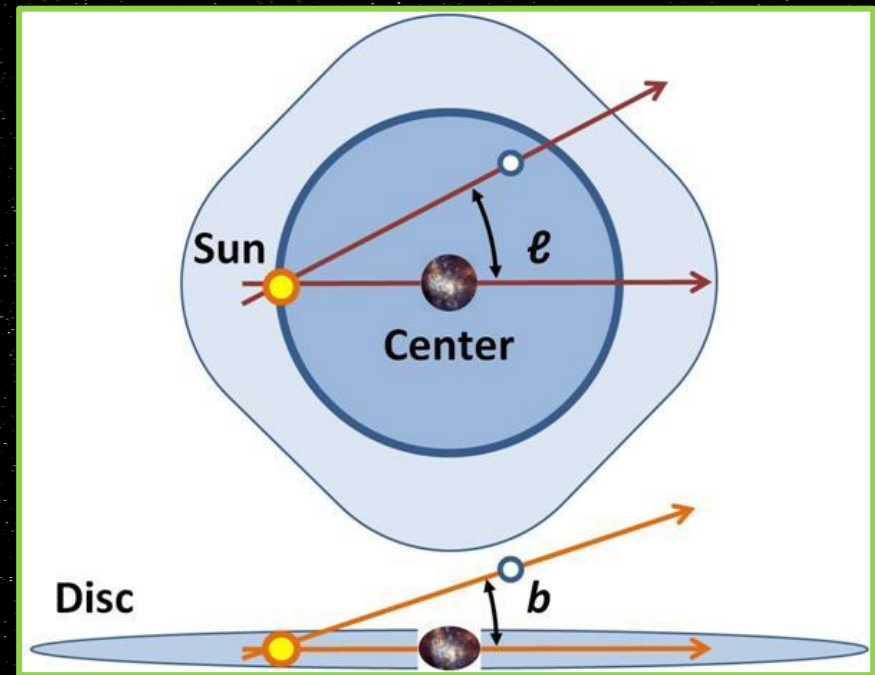
Cosa c'è nella Via Lattea?

- 10^{12} stelle (1000 miliardi di stelle!)
- Gas interstellare
- Campi magnetici
- Raggi cosmici
- Materia oscura?



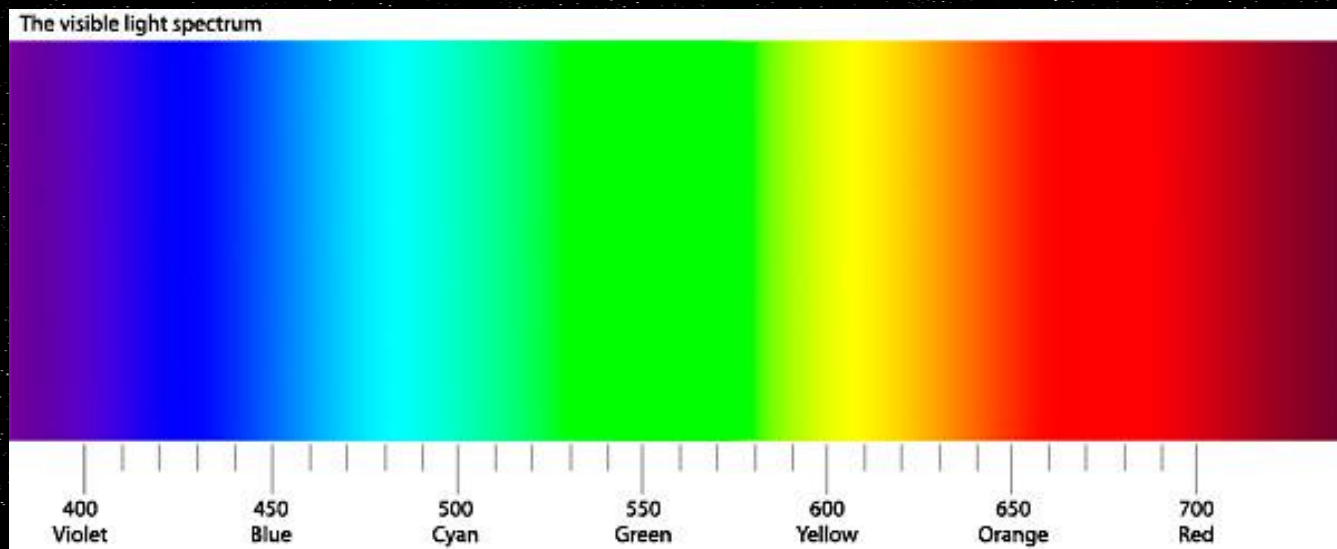
Coordinate galattiche

- Il sistema di coordinate galattiche ha origine nel Sole
- Il piano fondamentale (su cui giace l'equatore) coincide con il piano galattico
- La **longitudine galattica** misura la distanza angolare di un astro dal centro della Galassia, misurata lungo l'equatore verso Est
 - La **longitudine** varia tra 0° e 360°
- La **latitudine galattica** misura l'angolo di un astro rispetto al piano galattico
 - La **latitudine** varia tra -90° e $+90^\circ$



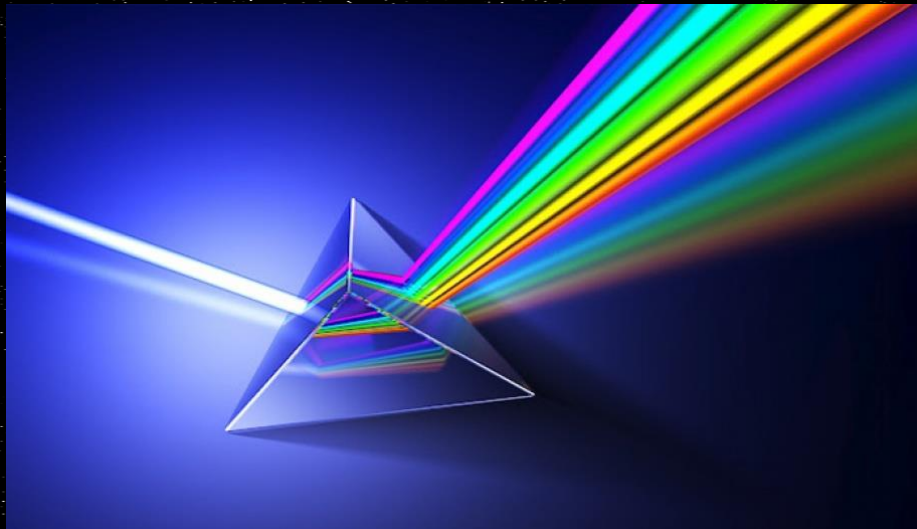
La luce e la radiazione elettromagnetica

- La luce visibile è la radiazione elettromagnetica che può essere percepita dall'occhio umano
- Essa rappresenta solo una piccola parte dello spettro elettromagnetico
- La lunghezza d'onda della luce visibile è compresa tra **400nm (violetto)** a **700 nm (rosso)**



La luce e i fotoni

- La luce ha da sempre attratto la curiosità degli uomini:
 - di che cosa è fatta?
- Il segreto è nel **fotone**, il “quanto” del campo elettromagnetico
 - si indica con la lettera greca γ
 - è un corpuscolo ma non ha massa
 - è anche un'onda che trasporta energia
- I fotoni sono gli elementi fondamentali di cui è composta la luce ed è grazie ai fotoni che riusciamo a vedere i colori!

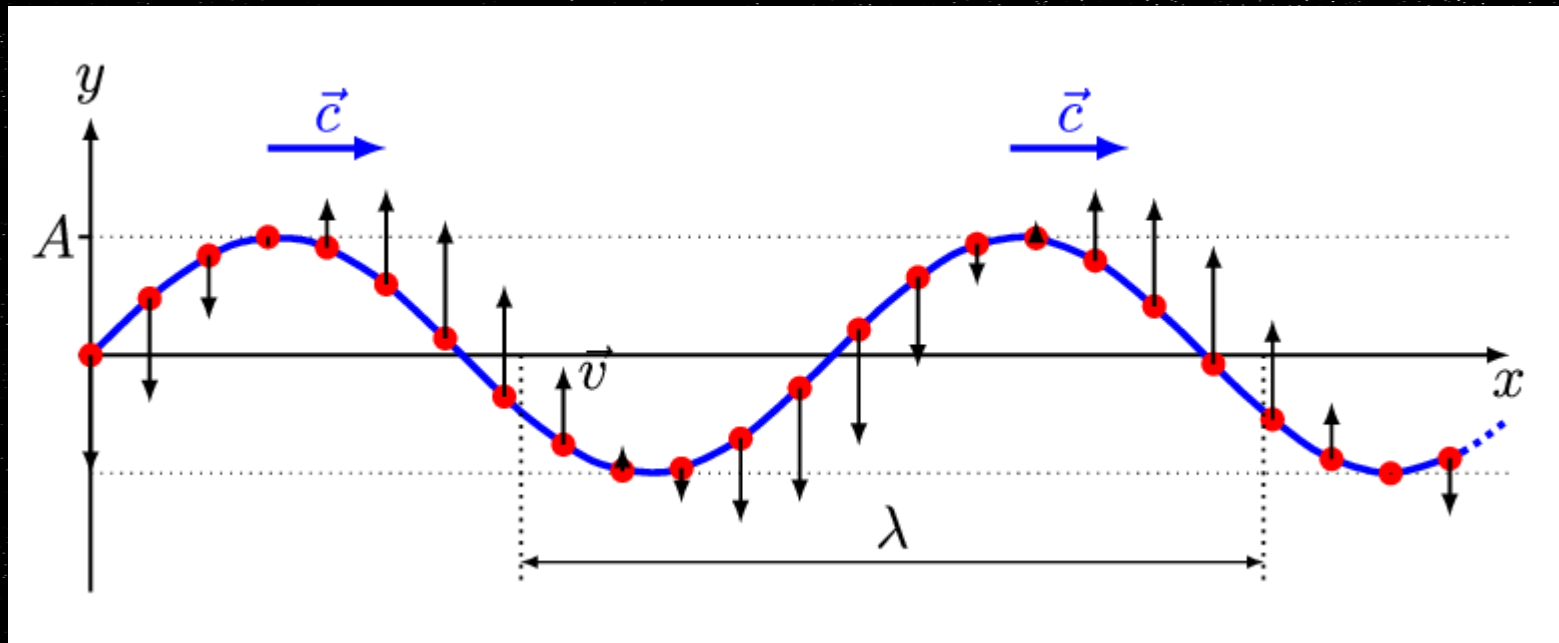


La velocità della luce

- La luce si propaga ad una velocità finita:
 - $c \approx 3 \times 10^5 km/s$
 - è la velocità più alta permessa dalla Teoria della Relatività!
- I fotoni possono:
 - In 1s fare il giro della Terra quasi 8 volte!
 - Percorrere la distanza fra Terra e Luna in meno di 1.5s
 - Partire dal Sole e raggiungere la Terra in 8 minuti
 - Se state osservando un tramonto... il Sole in realtà è già tramontato!
- Se osserviamo una stella distante 70milioni di anni luce, noi stiamo osservando ora la luce partita da una stella 70 milioni di anni fa, ovvero quando sulla Terra vivevano i dinosauri!

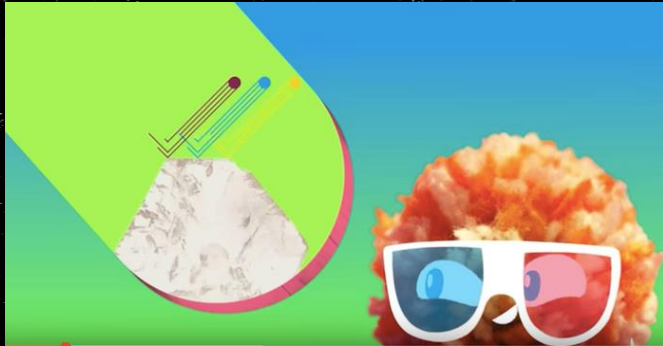
I fotoni

- I fotoni sono caratterizzati da:
 - Lunghezza d'onda λ
 - Indica il periodo spaziale dell'onda
 - Frequenza ν
 - Rappresenta il numero di oscillazioni per unità di tempo
 - È legata alla lunghezza d'onda dalla relazione $\nu = c/\lambda$



La luce e i colori

Se fotoni di energie diverse colpiscono un oggetto e vengono tutti assorbiti vediamo l'oggetto di colore **nero**



Se invece vengono tutti riflessi lo vediamo **bianco**

Se alcuni vengono assorbiti e altri riflessi, il colore che vediamo è la combinazione dei colori riflessi



Il colore delle stelle

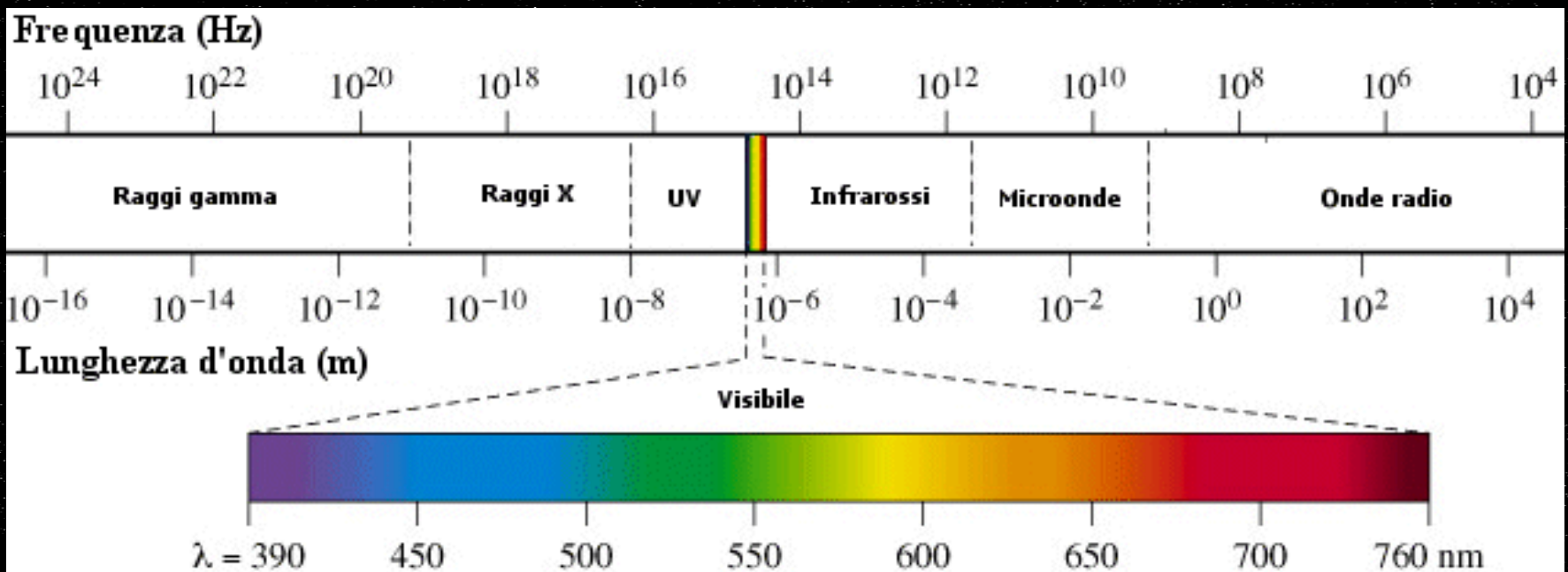
- Viste da terra le stelle sembrano tutte bianche ma in realtà ognuna ha il proprio colore
- Le stelle possono essere blu, azzurre, bianche, gialle, arancioni o rosse a seconda della loro temperatura superficiale

ROSSE	Dai 3000 ai 4000°C
ARANCIONI	Dai 4000 ai 5000°C
GIALLE	Dai 5000 ai 6000°C
BIANCHE	Dai 6000 ai 11000°C
AZZURRE	Dai 11000 ai 50000°C

Sole

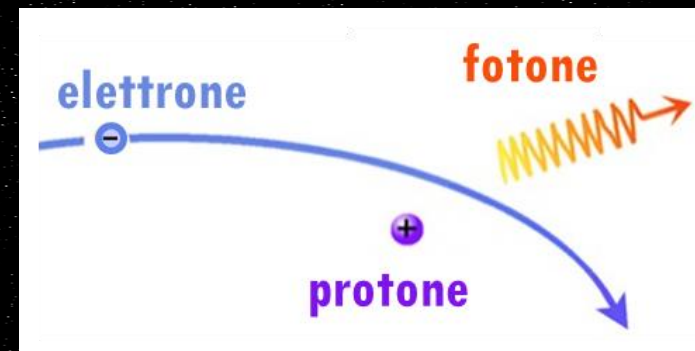
Lo spettro elettromagnetico

- Ogni fotone è caratterizzato da una lunghezza d'onda e da una frequenza legate dalla relazione $\lambda\nu = c$
- Ciascun fotone ha un'energia $E = h\nu$
 - $h = 6.6 \times 10^{-34} Js$ è la costante di Planck



La radiazione elettromagnetica

- Cosa può emettere radiazione elettromagnetica?
 - Qualsiasi corpo avente una **temperatura** superiore allo zero assoluto ($-273,37\text{ }^{\circ}\text{C}$) emette radiazione elettromagnetica
 - Più il corpo è caldo, maggiore sarà l'energia emessa dal corpo!
 - L'elettromagnetismo ci insegna che una **particella carica che subisce un'accelerazione** emette onde elettromagnetiche
 - Fotoni vengono emessi nelle **transizioni atomiche e nucleari**
 - Gli spettri di emissione presentano delle «righe»
 - Fotoni possono essere prodotti nei **decadimenti adronici** (es. $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$)

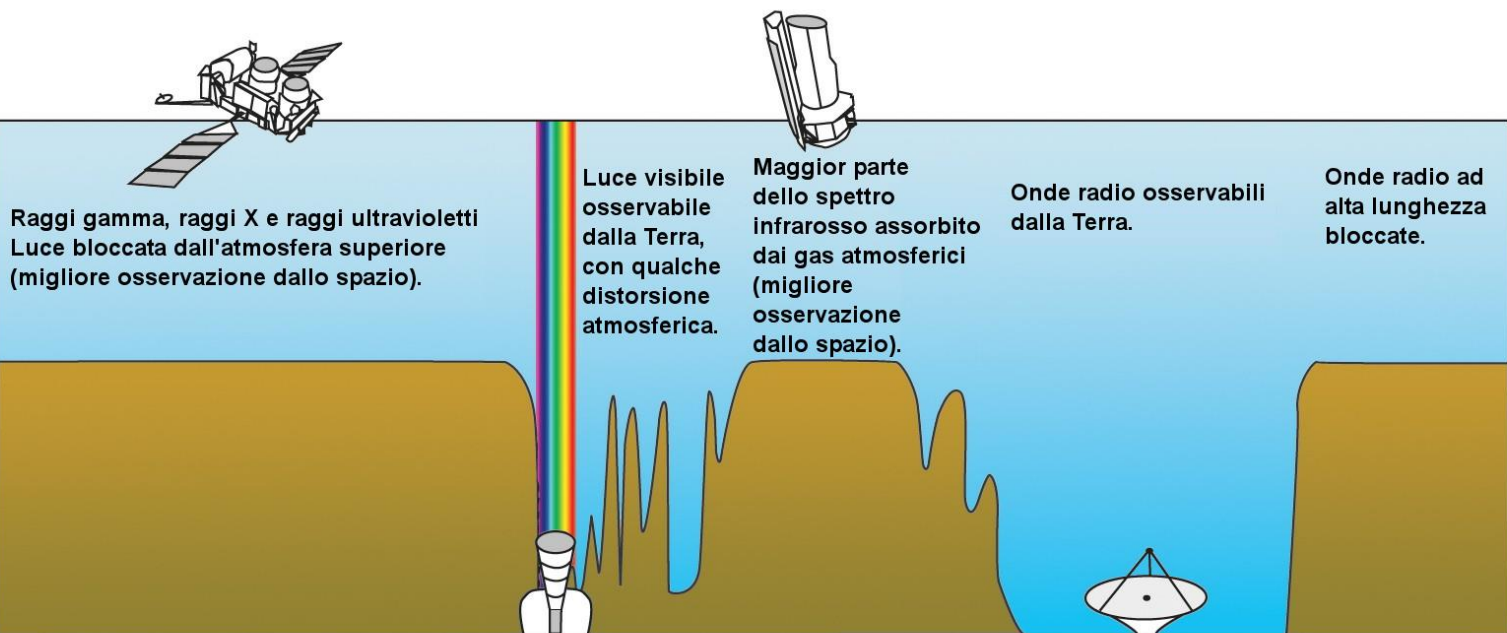
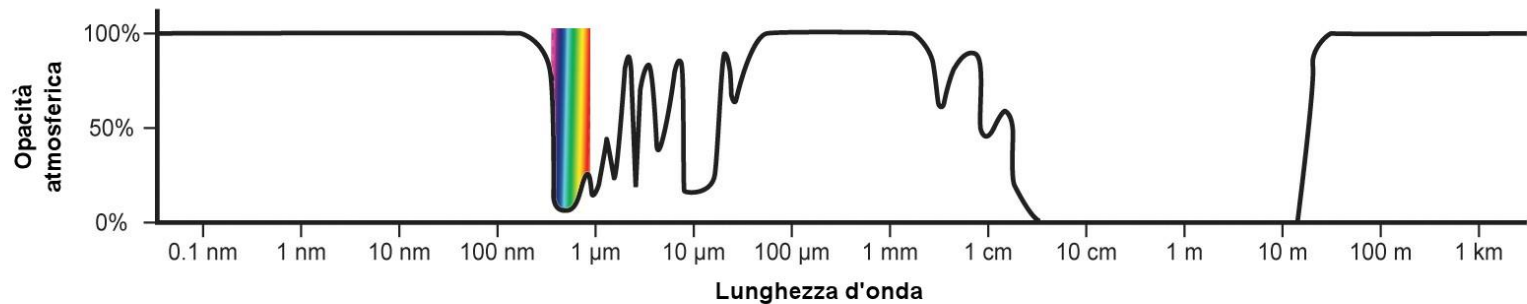


Unità di misura per energia e massa

- In fisica delle particelle elementari e in astrofisica le energie vengono comunemente misurate in **elettronVolt (eV)**
- 1 eV è la quantità di energia acquistata da un elettrone che viene accelerato da una differenza di potenziale di 1 V:
 - $1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- In fisica delle alte energie è comodo lavorare ponendo **c=1**
- In questo caso, sfruttando la relazione di Einstein **$E=mc^2$** , le masse a riposo delle particelle possono essere espresse nelle stesse unità di misura usate per le energie
 - Elettrone (e) $\rightarrow m_e = 0.5 \text{ MeV}$
 - Protone (p) $\rightarrow m_p = 938 \text{ MeV}$

Osservazione dei fotoni dallo spazio

- L'atmosfera terrestre assorbe la radiazione elettromagnetica
- Solo le onde radio e la luce visibile raggiungono la superficie terrestre



L'astronomia nel visibile

- E' la forma di astronomia più antica
- Agli inizi del XX secolo le immagini erano raccolte su pellicola fotografica
- Le immagini moderne sono raccolte usando rivelatori digitali (CCDs)
 - I CCD sono usati anche per il vicino infrarosso (NIR) e il vicino ultravioletto (NUV)
- Si usano telescopi sia a terra che nello spazio



Astronomia IR e UV

- La radiazione IR è usata per studiare oggetti la cui temperatura è troppo bassa per emettere luce visibile o che sono circondati da nubi di polveri che assorbono la luce visibile
 - Pianeti, nebulose, dischi circumstellari, nubi molecolari, nuclei di galassie
- Alcune molecole emettono radiazione IR
 - Studio della chimica dello spazio
- La radiazione UV è usata per studiare la radiazione termica emessa da vari oggetti celesti
 - Nebulose planetarie, SNR, AGN
- La luce UV è assorbita dalle polveri interstellari
- Gli osservatori IR e UV sono situati in alta quota o nello spazio
 - Sia la radiazione IR che la radiazione UV sono assorbite dall'atmosfera, che a sua volta emette nell'IR

Radioastronomia

- Si misurano le onde radio emesse da oggetti astronomici a lunghezze d'onda $>1\text{mm}$
- Onde radio sono prodotte da:
 - radiazione termica
 - emissione di sincrotrone da parte di elettroni che orbitano in presenza di campi magnetici intensi
 - Righe spettrali di emissione
 - Per esempio, l'idrogeno emette una riga spettrale a 21 cm
- Oggetti celesti che emettono nel radio:
 - Supernove, gas interstellari, pulsar, AGN



Astronomia con i raggi X

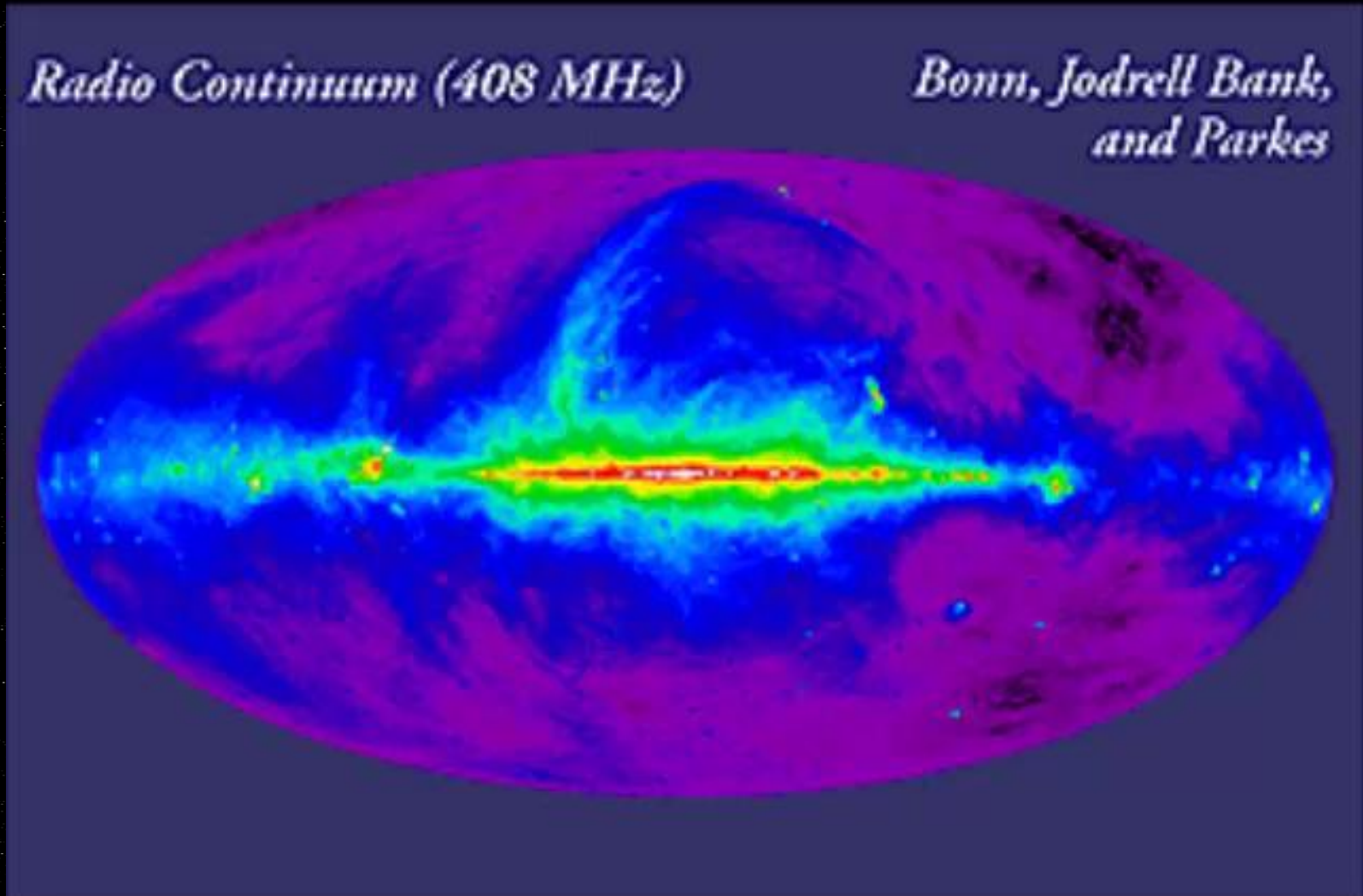
- Vengono osservati fotoni di energie fino ai 100 keV
- Meccanismi di produzione:
 - Emissione di sincrotrone di elettroni in campi magnetici
 - Emissione termica da parte di gas a temperature tra 10^6 e 10^8 K
- I raggi X sono emessi da:
 - Oggetti celesti che contengono gas ad alte temperature
 - Si osserva emissione di raggi X da stelle di neutroni e da buchi neri
 - Anche il Sole è una sorgente di raggi X
- I raggi X sono assorbiti dall'atmosfera
 - Si usano rivelatori su palloni in alta quota o su satelliti



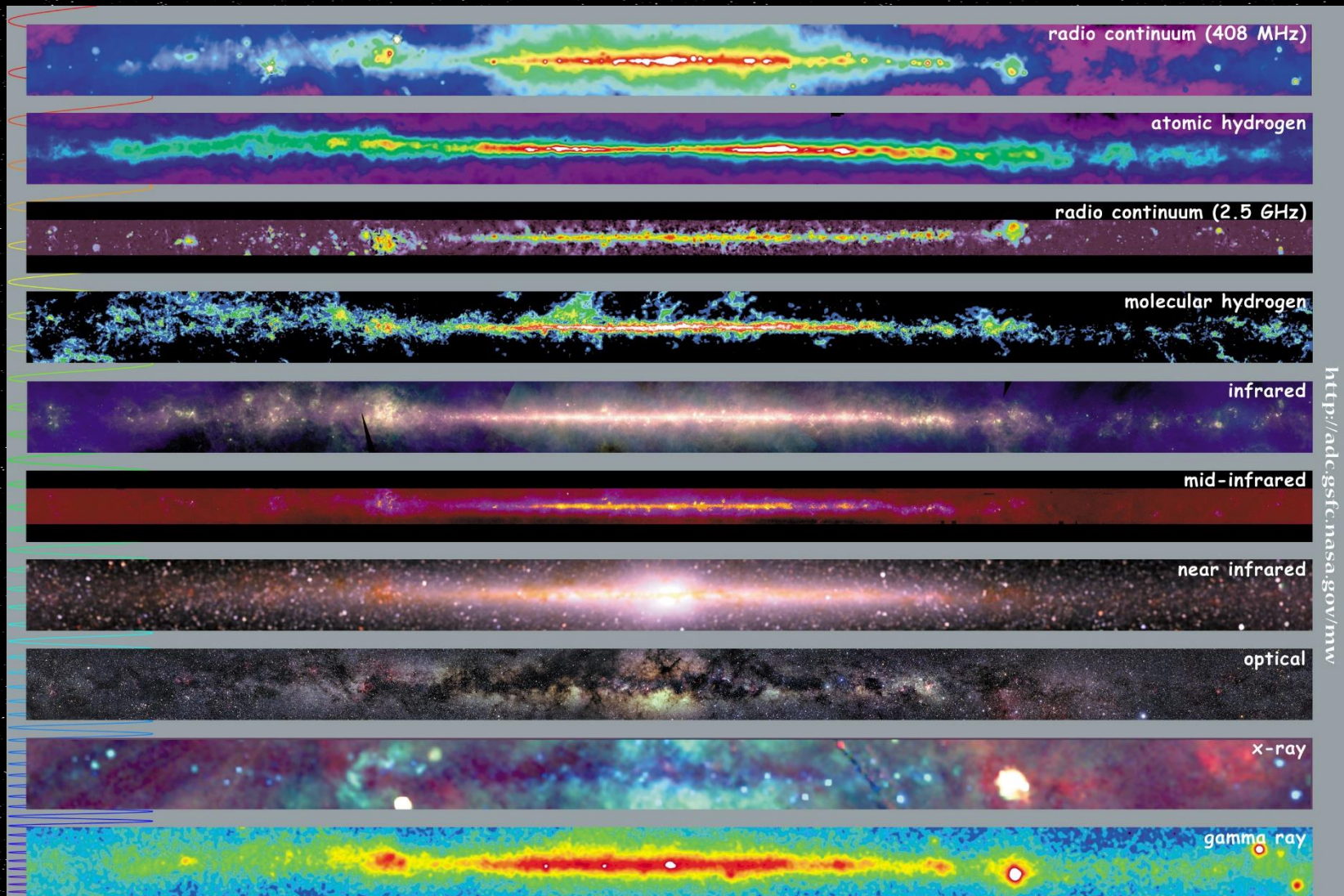
L'astronomia gamma

- Vengono osservati fotoni con $E > 100 \text{ keV}$
- Meccanismi di produzione:
 - Bremsstrahlung (interazione di elettroni con l'ISM) → fotoni di bassa energia
 - Interazione adronica ($p\text{-ISM} \rightarrow \pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$)
 - Interazione Compton inversa (interazione elettroni con la ISR a 3K)
 - Sincrotrone (elettroni che attraversano regioni con elevato campo magnetico)
 - Emissione nucleare
- Sorgenti gamma:
 - Sorgenti stazionarie
 - Pulsar, SNR, AGN, buchi neri
 - Anche il Sole e la Luna sono sorgenti gamma
 - Gamma-ray bursts
 - Oggetti che emettono raggi gamma per brevi intervalli di tempo (da qualche ms a qualche ora)
- Si usano telescopi su satellite o telescopi Cherenkov atmosferici
 - Questi ultimi non rivelano direttamente i raggi gamma, ma la luce Cherenkov emessa nelle cascate elettromagnetiche prodotte quando i raggi gamma sono assorbiti nell'atmosfera terrestre

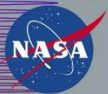
L'universo visto a varie frequenze...



...e la Via Lattea



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way

I raggi cosmici carichi

- Dallo spazio non arriva soltanto radiazione elettromagnetica!
- I raggi cosmici che raggiungono la Terra sono composti da:
 - **Nuclei (99% del totale)**
 - 90% protoni
 - 9% nuclei di He
 - 1% nuclei pesanti
 - Elettroni e positroni (1% del totale)
 - Antimateria (antiprotoni, nuclei di anti-deuterio, anti-elio...)
- Classificazione:
 - **Raggi cosmici primari:** sono le particelle prodotte e accelerate dalle sorgenti astrofisiche
 - **Raggi cosmici secondari:** sono le particelle prodotte nelle interazioni dei primari con il mezzo interstellare (ISM)
- Cosa si studia:
 - **Composizione**
 - Dal confronto con la composizione dei vari oggetti astrofisici si può risalire alle sorgenti
 - **Spettri energetici**
 - Permettono di ottenere informazioni sui processi fisici responsabili del processo di accelerazione delle particelle

Messaggeri dallo spazio

- Fotoni
 - Non risentono dei campi magnetici e permettono di individuare le sorgenti
 - Vengono osservate tutte le regioni dello spettro elettromagnetico
- Raggi cosmici
 - Sono molto più abbondanti dei fotoni
 - Risentono dei campi magnetici e non si propagano in linea retta
- Neutrini
 - Come i fotoni, non risentono dei campi magnetici
 - Hanno bassissima probabilità di interazione con la materia
 - L'Universo è praticamente trasparente ai neutrini
 - Sono difficili da rivelare
- Onde gravitazionali
 - I loro effetti sono praticamente impercettibili
 - Affinché siano rivelabili, occorrono oggetti di masse enormi
 - Le onde gravitazionali rivelate fino ad oggi sono originate dalla fusione di buchi neri o stelle di neutroni di decine di masse solari ($M_{\odot} \approx 2 \times 10^{30} kg$)

I RIVELATORI DI PARTICELLE

Funzione dei rivelatori di particelle

- Cosa si misura?
 - Posizione
 - Energia
 - Tempo
- Metodi di rivelazione
 - Metodi non distruttivi
 - viene conservata l'identità delle particelle
 - rilasci modesti di energia, per interazione elettromagnetica con il mezzo del rivelatore
 - Metodi distruttivi
 - le particelle sono completamente assorbite (per esempio nei calorimetri) o perdono la propria identità
 - sono usati per rivelare particelle neutre (neutrini, neutroni, fotoni)

I rivelatori elettronici

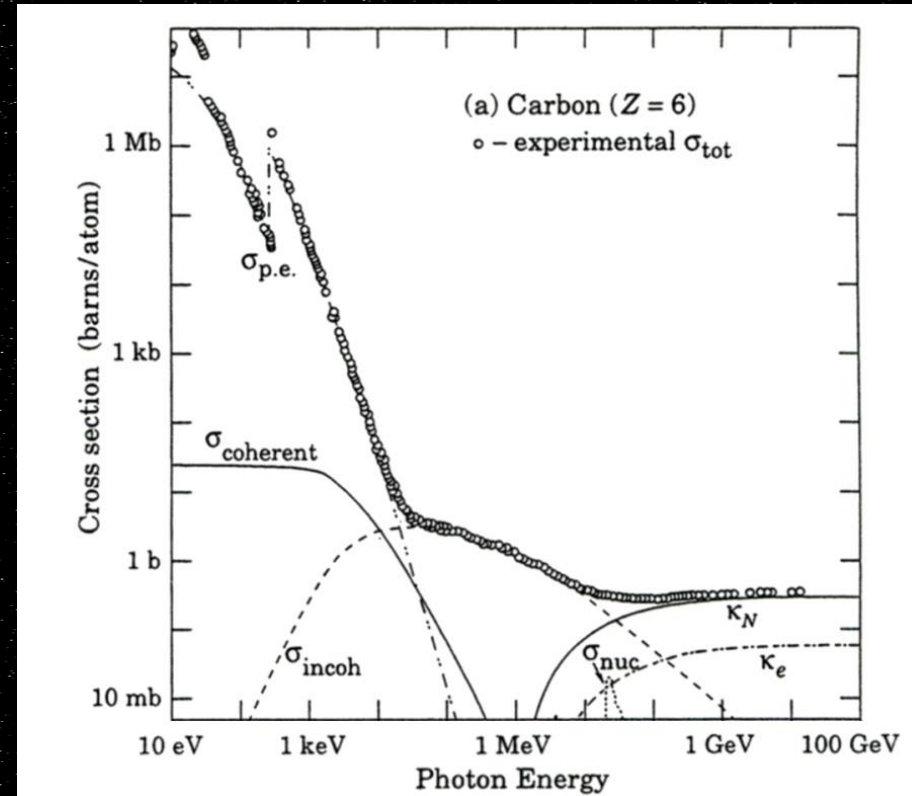
- La radiazione incidente interagisce con il mezzo da cui è composto il rivelatore
 - In seguito all'interazione, una parte (o la totalità) dell'energia della particella viene depositata nel rivelatore
- L'energia depositata dalla radiazione incidente è convertita in un segnale elettrico
 - Il segnale elettrico può recare informazioni sull'energia depositata nel rivelatore

Interazione di particelle cariche con la materia

- Le particelle cariche perdono energia nella materia essenzialmente per interazione con gli elettroni atomici
 - Processi di eccitazione e ionizzazione
- L'energia persa dalla particella è proporzionale allo spessore di materiale attraversato
- Per rivelatori «sottili», l'energia persa dalla particella è tipicamente trascurabile rispetto alla sua energia iniziale
 - In questo caso il processo di rivelazione è non distruttivo
- L'energia persa dalla particella per unità di spessore di materiale attraversato è pressoché indipendente dalla sua energia iniziale

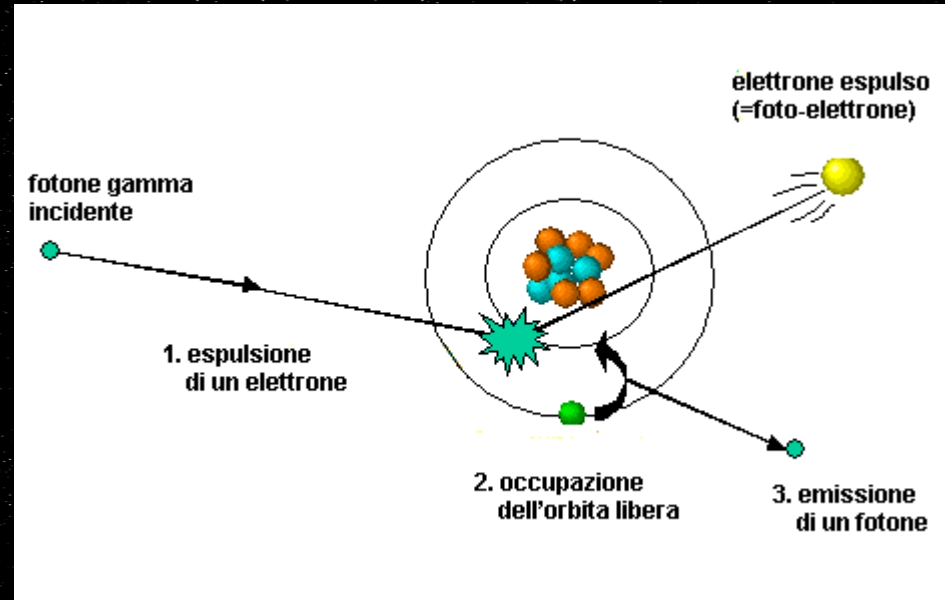
Interazione dei fotoni con la materia

- Processi di interazione dei fotoni con la materia:
 - scattering Rayleigh (σ_{coherent})
 - effetto fotoelettrico ($\sigma_{\text{p.e.}}$)
 - effetto Compton (σ_{incoh})
 - produzione di coppie nel campo nucleare o elettronico (k_N, k_e)
 - interazioni fotonucleari in cui il nucleo bersaglio viene distrutto (σ_{nuc})
- Le probabilità dei vari processi sono proporzionali alle rispettive **sezioni d'urto**
 - La sezione d'urto rappresenta l'area intorno alla particella bersaglio in cui deve passare la particella incidente per dare luogo all'interazione
 - La sezione d'urto varia con l'energia della particella incidente



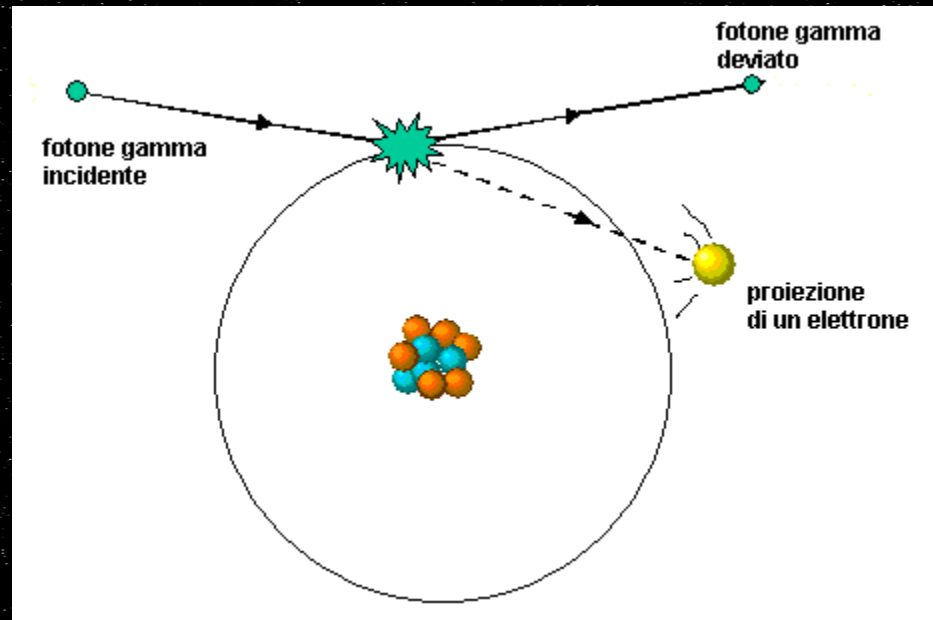
Effetto fotoelettrico

- Un fotone di energia $h\nu$ eccita un atomo estraendo un elettrone (detto fotoelettrone)
- Il fotoelettrone viene emesso con un'energia cinetica $E_K = h\nu - W$, dove W è l'energia di legame dell'elettrone
- Un secondo elettrone atomico può effettuare una transizione nell'orbita lasciata libera con emissione di un ulteriore fotone



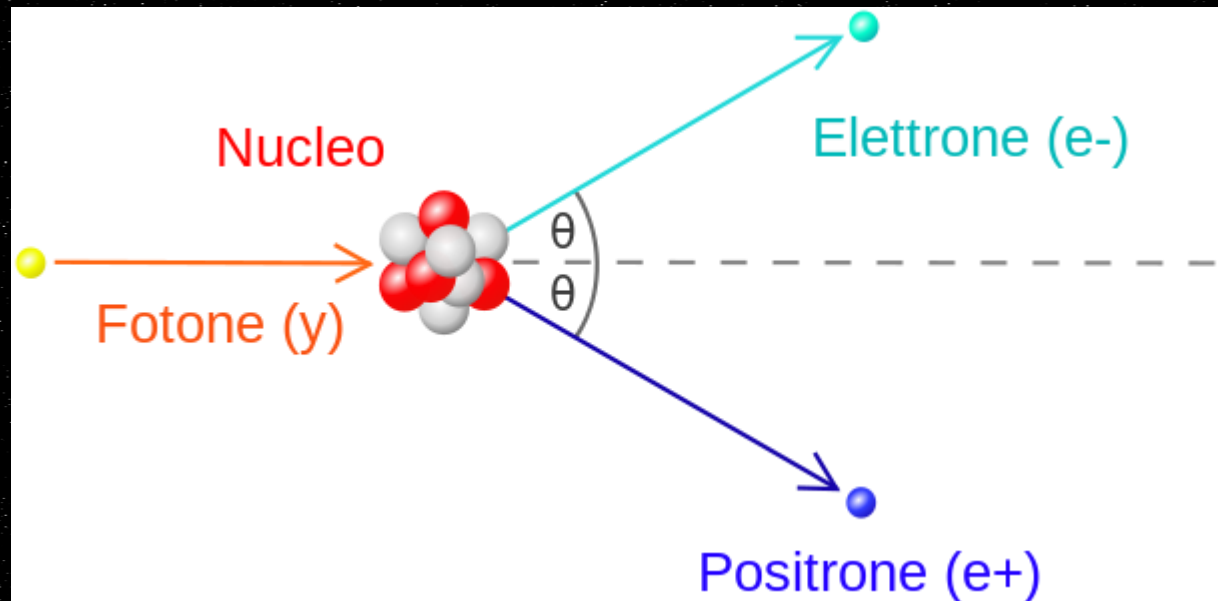
Effetto Compton

- Un fotone di energia $h\nu$ cede parte della sua energia all'atomo estraendo un elettrone (detto elettrone Compton)
- Il fotone viene deviato e perde parte della sua energia iniziale: $h\nu' < h\nu$
- Di conseguenza, la lunghezza d'onda del fotone diffuso sarà maggiore di quella iniziale: $\lambda' > \lambda$



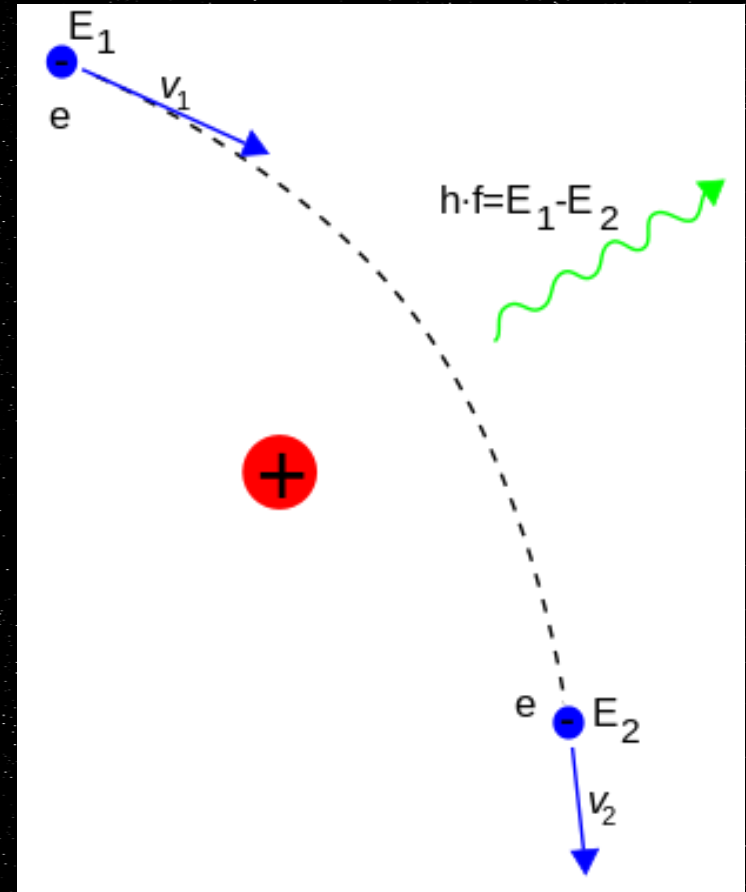
Produzione di coppie

- Un fotone di energia $h\nu$ interagisce con un nucleo atomico (o con un elettrone atomico) e viene prodotta una coppia elettrone-positrone
- L'energia del fotone incidente viene ripartita tra elettrone e positrone
- Perché il processo avvenga è necessario che $h\nu > 2m_e c^2$ (~1 MeV)



Bremsstrahlung

- La radiazione di frenamento, o **bremsstrahlung** è la radiazione emessa da elettroni quando subiscono una decelerazione in un'interazione con un nucleo atomico
- Un elettrone di energia E_1 viene decelerato dal nucleo e, in seguito all'interazione, emerge con energia $E_2 < E_1$
- Nell'interazione viene emesso un fotone di energia $h\nu = E_1 - E_2$

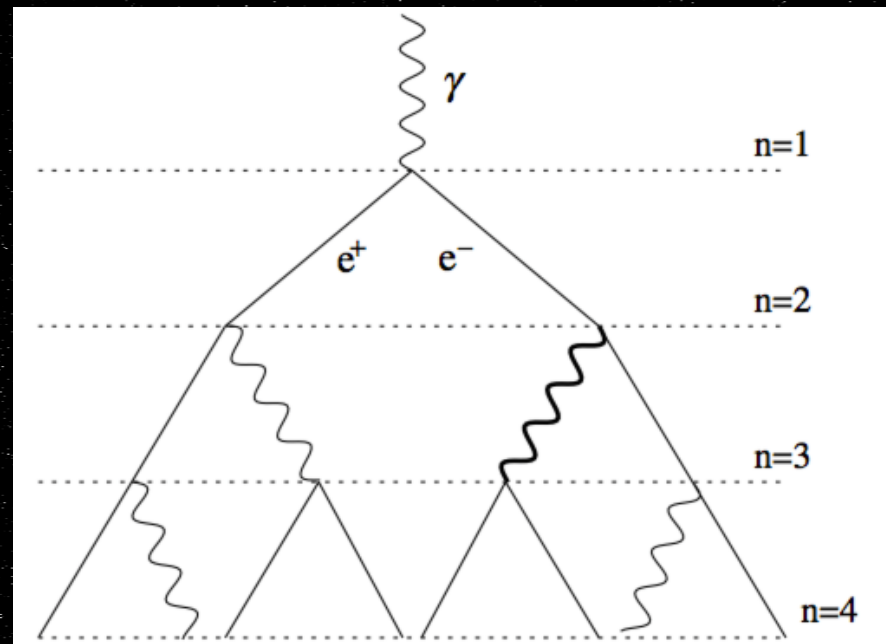


Interazioni di elettroni e fotoni di alte energie

- Per elettroni e fotoni di alta energia i processi dominanti nell'interazione con la materia sono:
 - elettroni → bremsstrahlung
 - fotoni → produzione di coppie elettrone/positrone
- Il parametro caratteristico usato per descrivere entrambi i processi è la **lunghezza di radiazione X_0**
 - La lunghezza di radiazione è lo spessore del mezzo dopo il quale l'energia media di un fascio di elettroni (fotoni) si è ridotta di un fattore $1/e$
 - Rappresenta anche il **libero cammino medio** per i due processi
- Un fotone di alta energia che entra in un rivelatore di spessore trascurabile rispetto alla lunghezza di radiazione avrà bassa probabilità di produrre una coppia
- Spesso è conveniente esprimere lo spessore di un rivelatore in unità della lunghezza di radiazione X_0

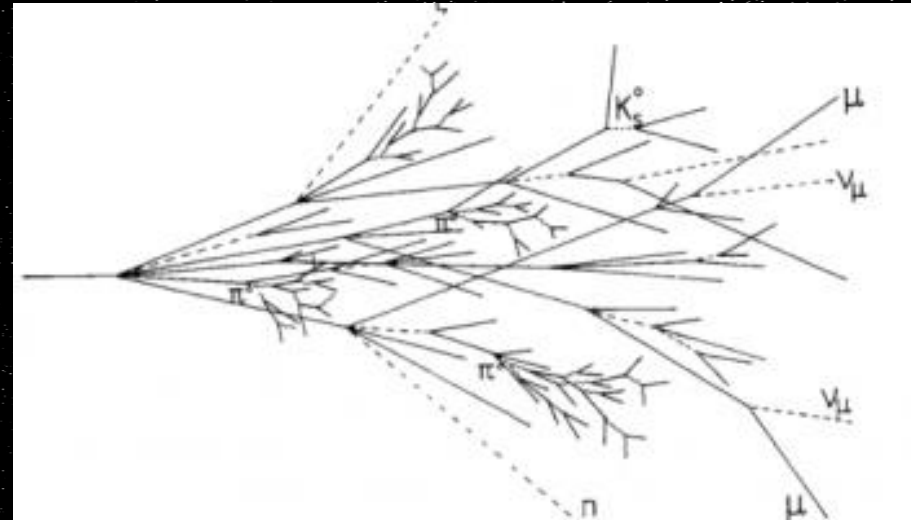
Le cascate elettromagnetiche

- Un fotone (elettrone) che attraversa un assorbitore darà luogo alla cosiddetta cascata elettromagnetica
 - In media si verifica un'interazione per ogni tratto di assorbitore pari a X_0
 - Il numero di particelle nella cascata raddoppia dopo ogni X_0
- A mano che la cascata si sviluppa, l'energia delle particelle secondarie diminuisce
- La cascata si arresta quando le particelle non hanno energia sufficiente per produrre ulteriori particelle secondarie
- L'estensione della cascata (sia in direzione longitudinale che in direzione trasversa) cresce con l'energia della particella iniziale



Interazioni di protoni (e nuclei) di alta energia

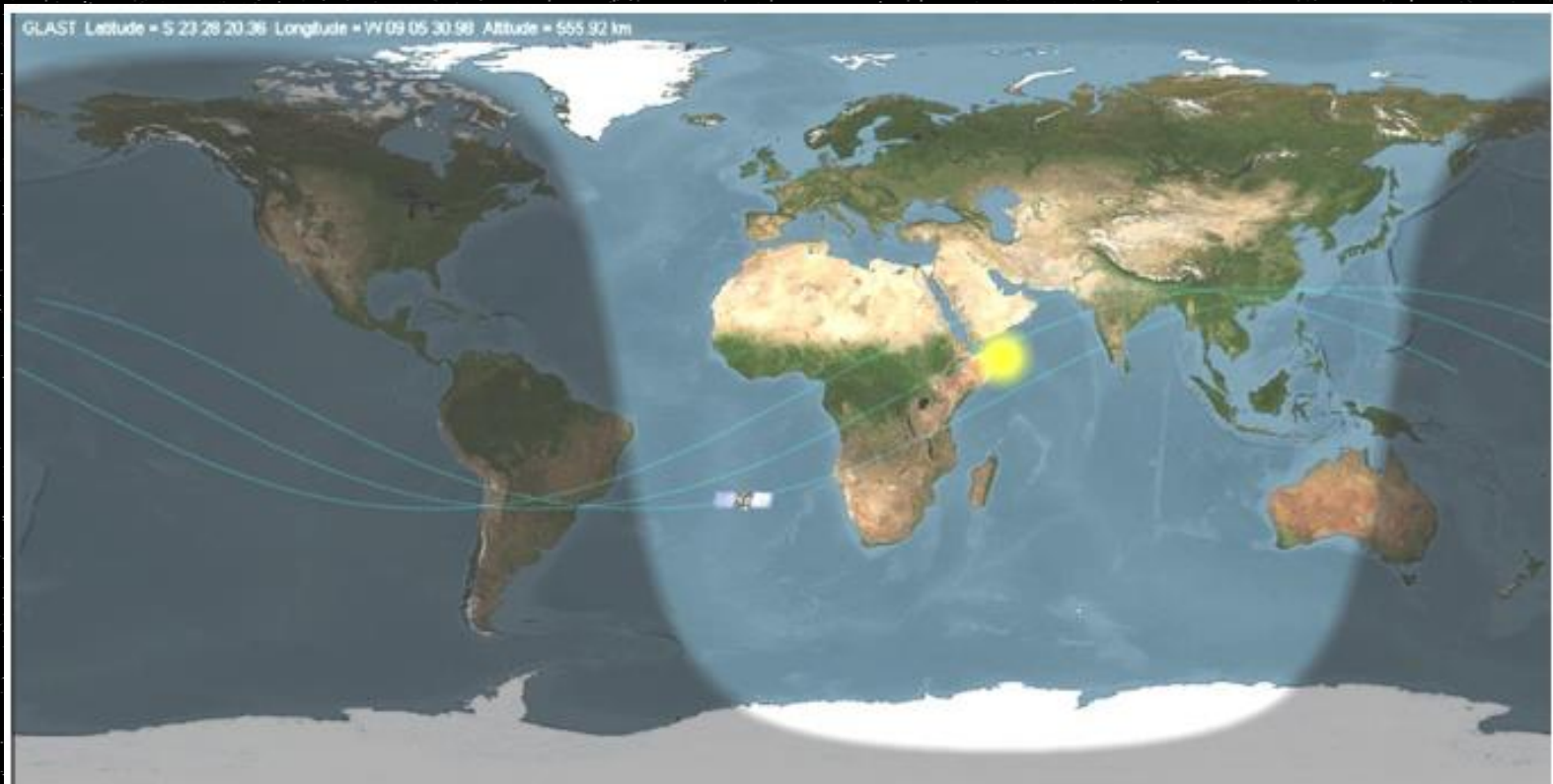
- Quando un protone (o un nucleo) di alta energia penetra nella materia interagisce in due modi:
 - perdita di energia continua per ionizzazione
 - interazioni forti nucleari in grado di produrre decine di particelle secondarie
- Il protone può quindi dare luogo alla cosiddetta «cascata adronica»
- Il parametro che descrive la cascata adronica è la **lunghezza di interazione λ_I**
 - Analogamente alla lunghezza di radiazione, la lunghezza di interazione rappresenta la distanza media tra due interazioni nucleari
- In una cascata adronica possono essere prodotti elettroni e fotoni che danno vita a cascate elettromagnetiche



IL LARGE AREA TELESCOPE A BORDO DEL SATELLITE FERMI

Il satellite Fermi (1)

- Il satellite Fermi è stato lanciato dalla NASA l'11 giugno 2008, dalla base di Cape Canaveral, in Florida
- Fermi descrive un'orbita circolare, a circa 565 km di altitudine, con un'inclinazione di 25.6° e con un periodo di 96 minuti
- Per sapere dove si trova il satellite Fermi in tempo reale:
<http://www.n2yo.com/?s=33053>



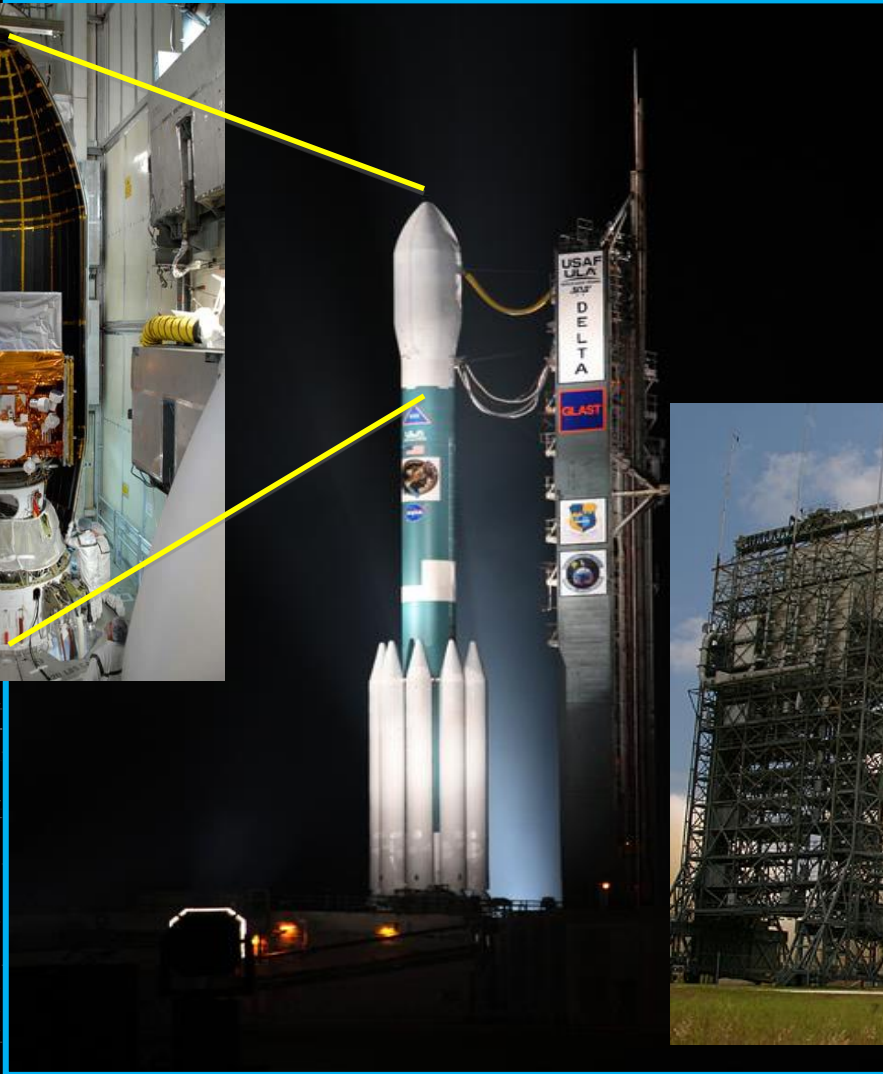
Il satellite Fermi (2)

- Il “Fermi Gamma-Ray Space Telescope” (FGST) è una missione spaziale internazionale per lo studio della radiazione gamma di origine astrofisica
- Il satellite è composto da due strumenti:
 - GLAST Burst Monitor (GBM)
 - Effettua misure su raggi gamma di energie tra 8keV e 40MeV
 - Large Area Telescope (LAT)
 - Effettua misure su raggi gamma di energie tra 20MeV fino a oltre 300GeV
- I dati raccolti da Fermi sono pubblici e possono essere scaricati direttamente dal sito web della NASA:
 - <https://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/>
- Oltre ai dati, la NASA mette a disposizione degli scienziati i software per l'analisi

Fermi in orbita



Il razzo Delta II



Il Large Area Telescope (LAT)

Tracciatore in silicio (TKR)

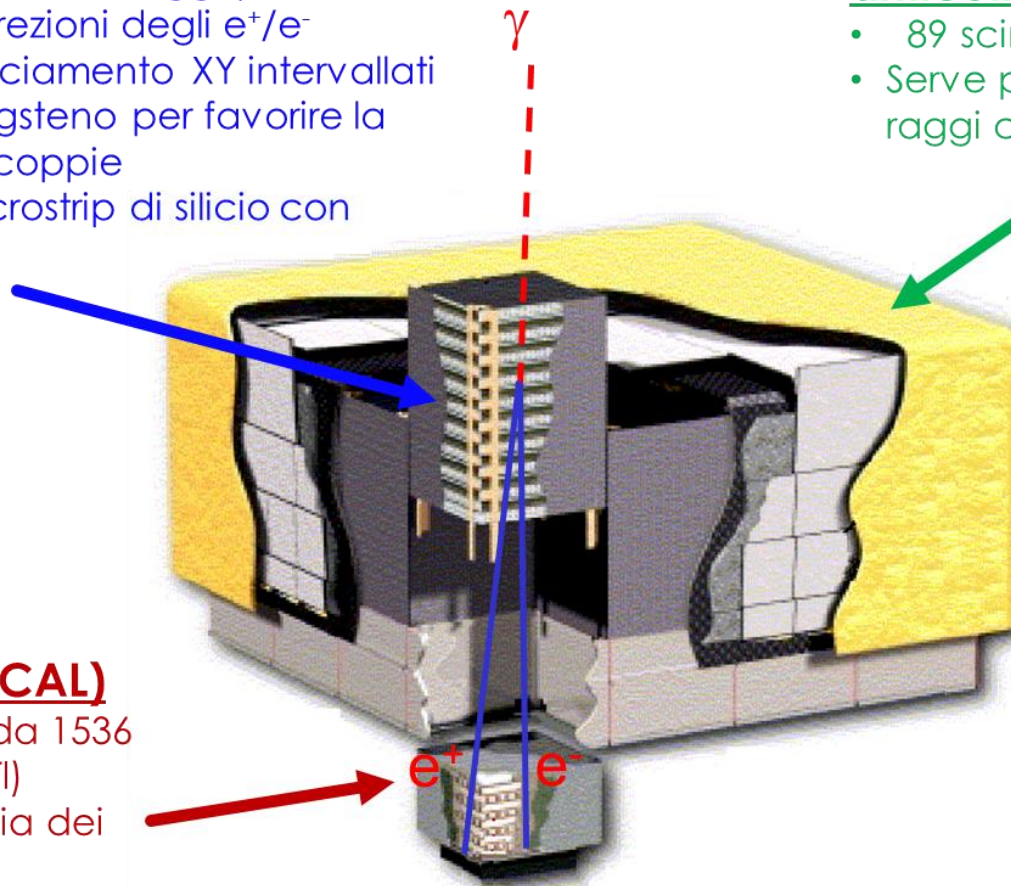
- Misura le direzioni dei raggi γ incidenti a partire dalle direzioni degli e^+/e^-
- 18 piani di tracciamento XY intervallati da piani di tungsteno per favorire la produzione di coppie
- Rivelatori a microstrip di silicio con passo 228 μm

Rivelatore di anticoincidenza (ACD)

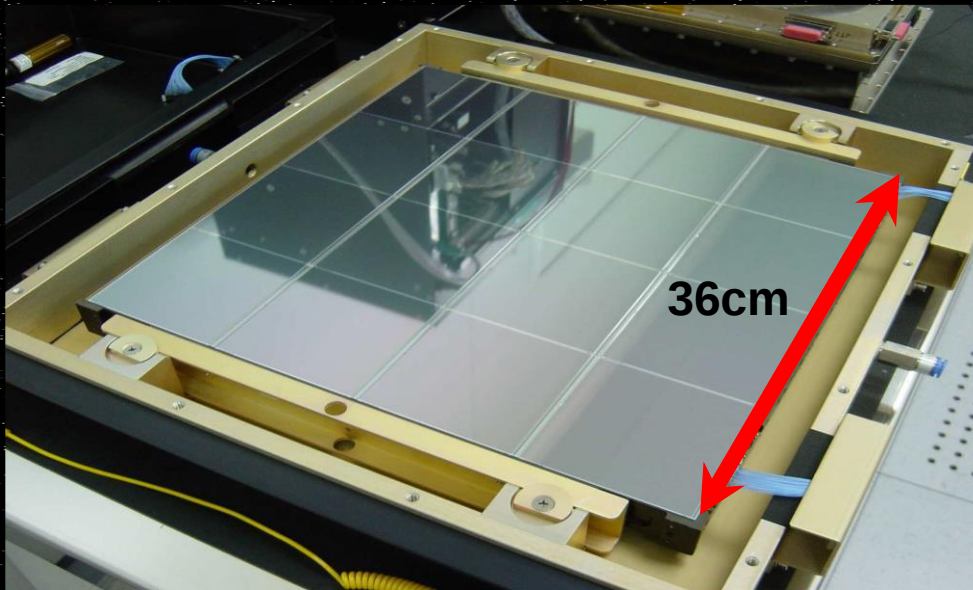
- 89 scintillatori plastici
- Serve per rigettare il fondo di raggi cosmici carichi

Calorimetro (CAL)

- E' composto da 1536 cristalli di CsI(Tl)
- Misura l'energia dei raggi γ

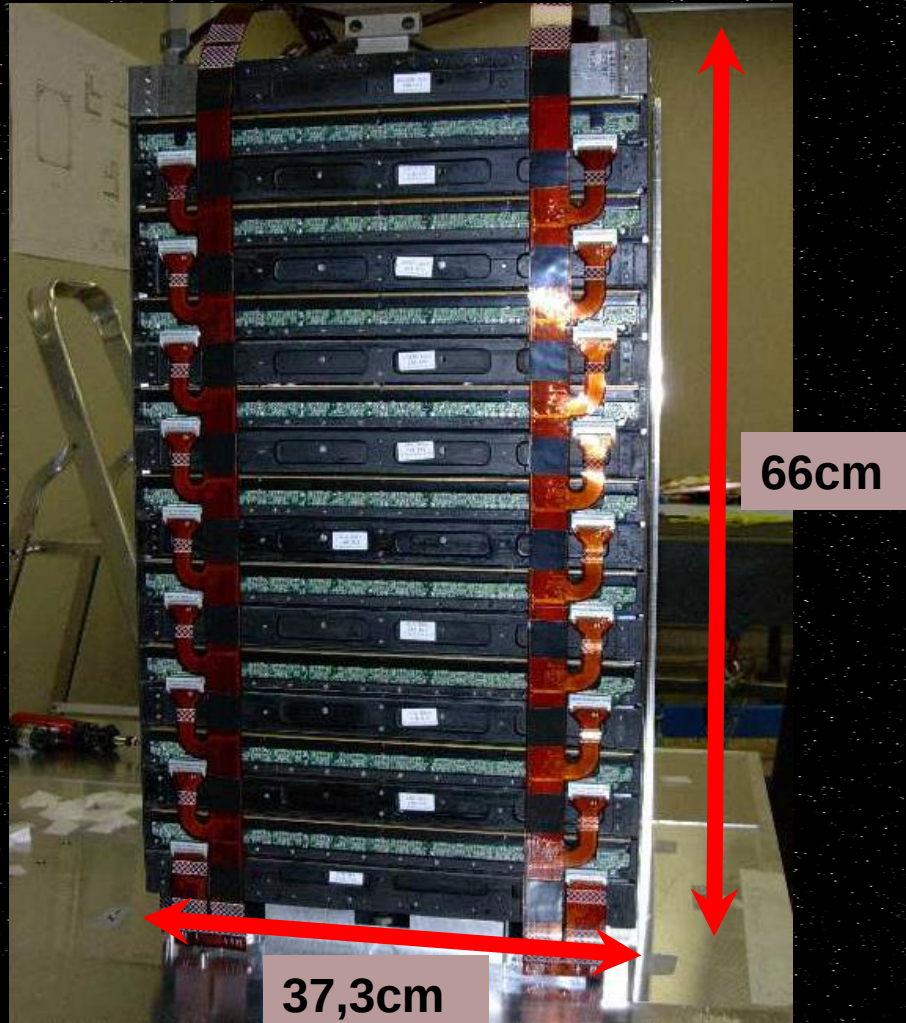


Il tracciatore in silicio (TKR)



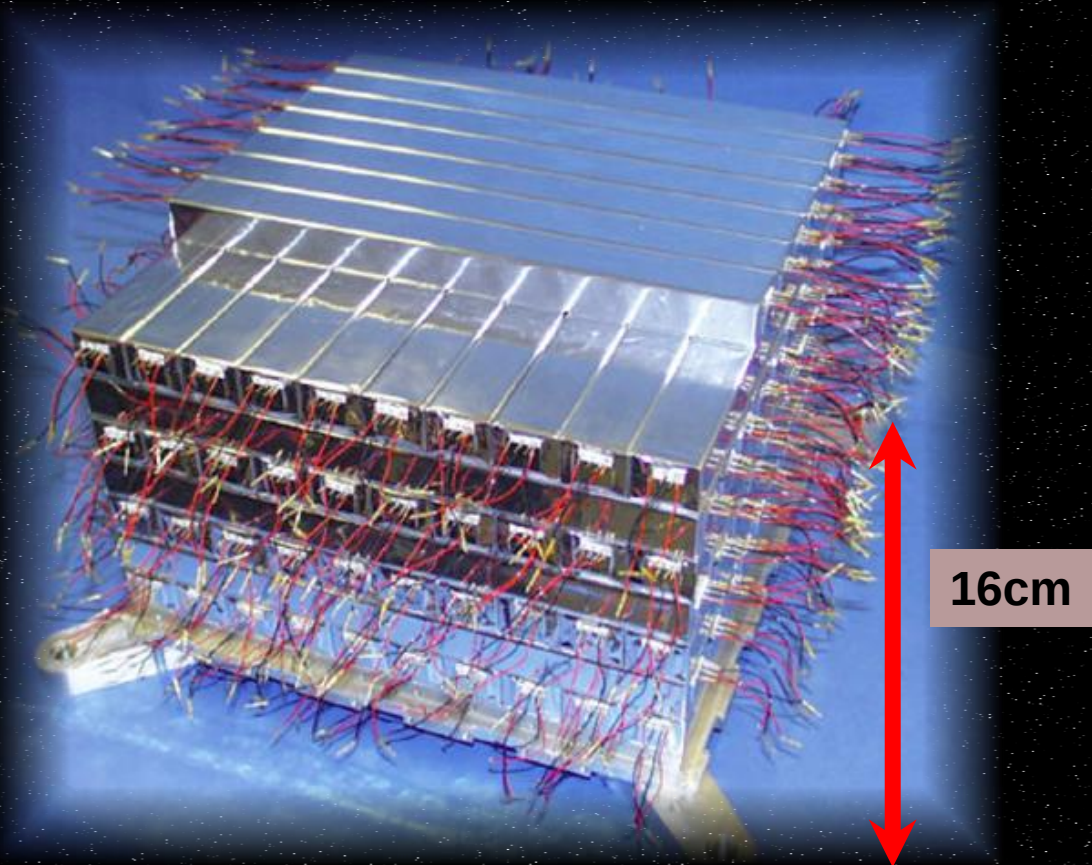
- Ogni piano di TKR è composto da 16 «wafer» di rivelatori a microstrip di silicio
- Ciascun wafer, di area $9 \times 9 \text{ cm}^2$, è suddiviso in 384 «strip» parallele, separate tra loro con un passo di $228 \mu\text{m}$
- In ogni piano di TKR ci sono 1536 strip
- Le strip dei wafer adiacenti sono micro-saldate tra loro
- I piani di rivelatori a silicio sono disposti nei «tray»
- Ciascun tray contiene un piano di silicio con le strip orientate lungo l'asse X e un secondo piano di silicio con le strip orientate lungo l'asse Y

Il tracciatore in silicio (TKR)



- Ciascuna “torre” di TKR contiene 18 tray
- In totale ci sono 19 tray e 36 piani di rivelatori a silicio
 - I tray in alto e quelli in basso contengono solo un piano di rivelatori a silicio
- In totale ci sono 18 piani di rivelatori silicio con le strip disposte lungo l'asse X e 18 con le strip disposte lungo l'asse Y
 - Il numero totale di strip per ciascuna torre è 55296
 - Il numero totale di strip nel TKR è circa 880000

Il calorimetro (CAL)



- E' composto da 1536 cristalli di CsI(Tl) disposti in 16 torri
 - Ciascun cristallo ha dimensioni $2.7 \times 2 \times 32.6 \text{ cm}^3$
- I cristalli di ciascuna torre sono disposti in 8 piani, in una configurazione odoscopica
- Lo spessore totale in direzione verticale è pari a $8.6 X_0$
- Permette di ricostruire l'energia delle cascate elettromagnetiche

Il rivelatore di anticoincidenza (ACD)



- E' composto da 89 «tiles» di scintillatore plastico
 - Le intercapedini tra le tiles sono riempite da nastri («ribbon») di scintillatore plastico
- Serve per rigettare il fondo dei raggi cosmici carichi
- La struttura segmentata serve a ridurre il fenomeno del «self-veto» dovuto al «backsplash»
 - Nelle cascate elettromagnetiche, alcune particelle possono sfuggire dal CAL e penetrare nell'ACD
 - A causa di questo fenomeno, un fotone può essere confuso con una particella carica

Un fotone nel LAT...

ID: 236084217-7280

Gli scintillatori lungo la traiettoria del fotone sono spenti!

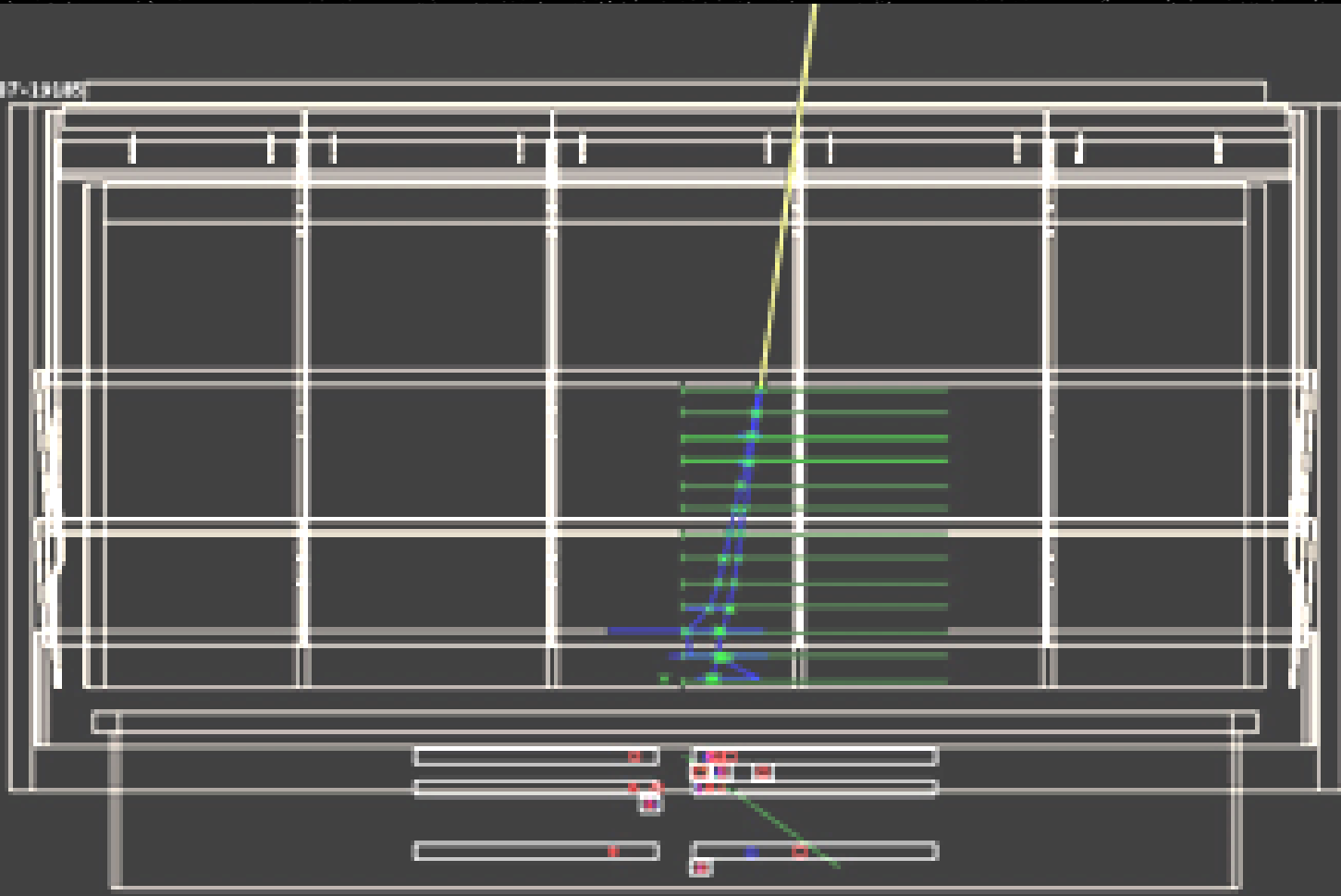
Il fotone converte nella coppia elettrone-positrone

L'elettrone e il positrone avanzano nel TKR e si separano

Si sviluppa la cascata elettromagnetica nel CAL

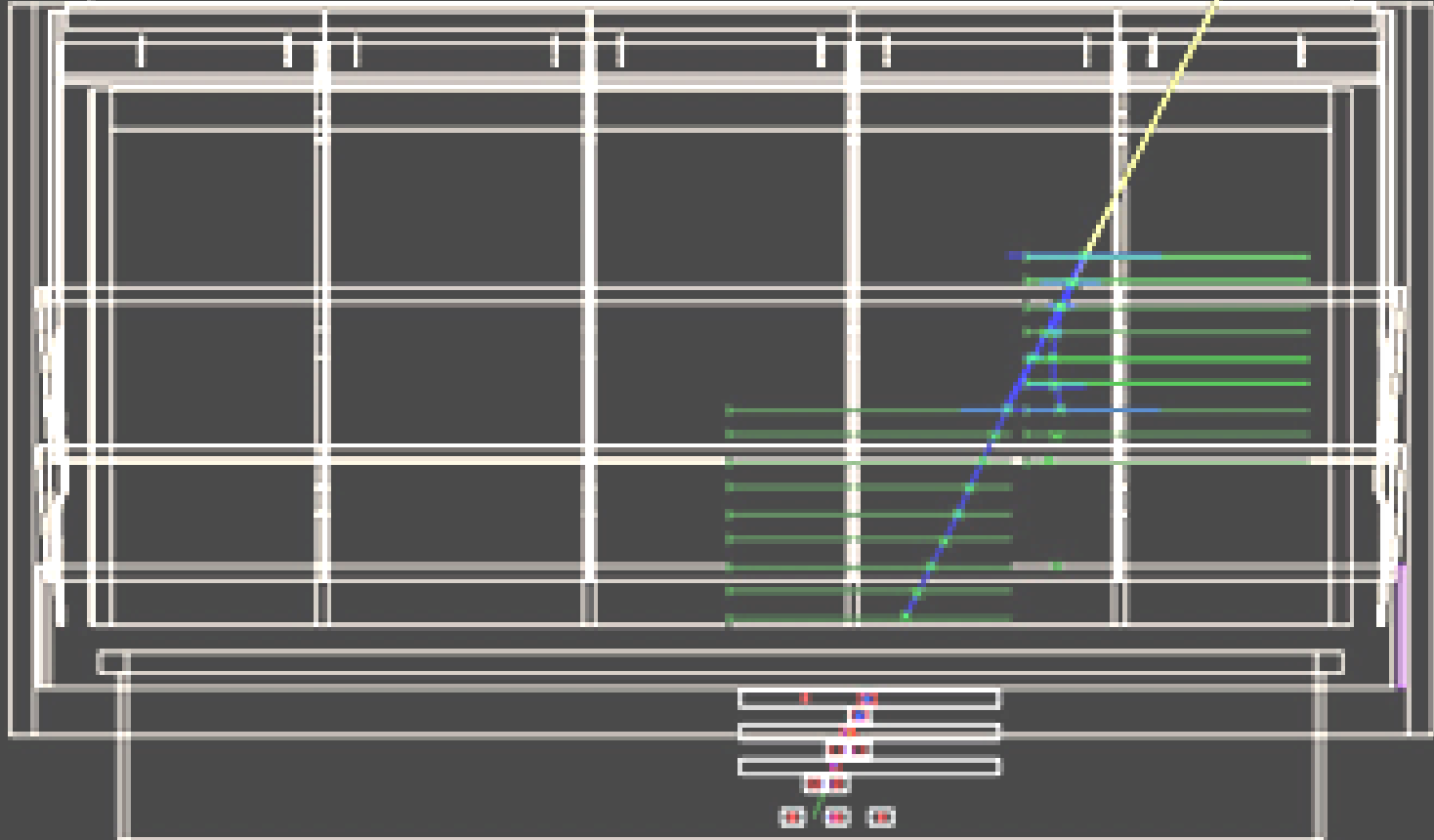
... un altro fotone ...

ID: 296084217-19185

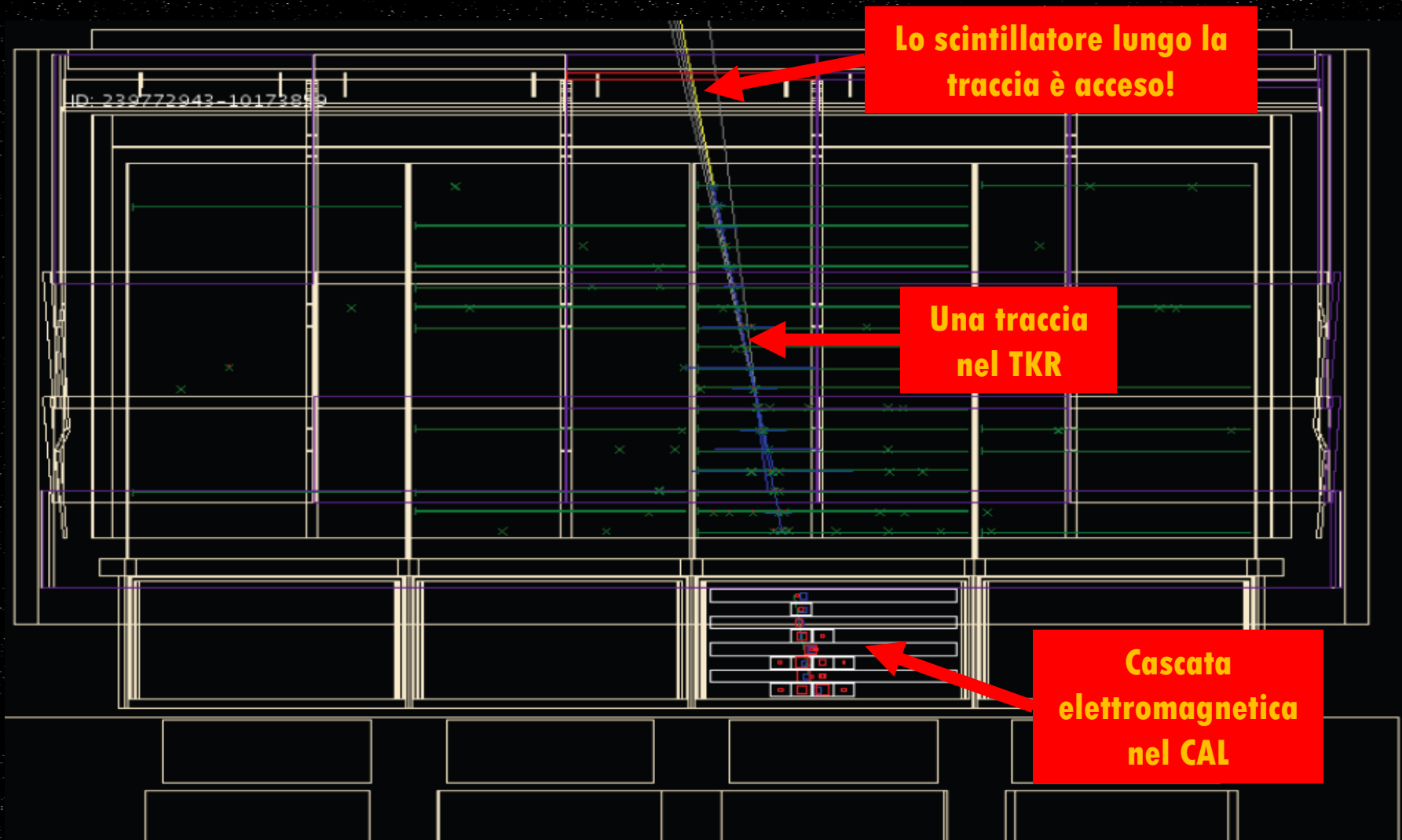


... e un altro ancora!

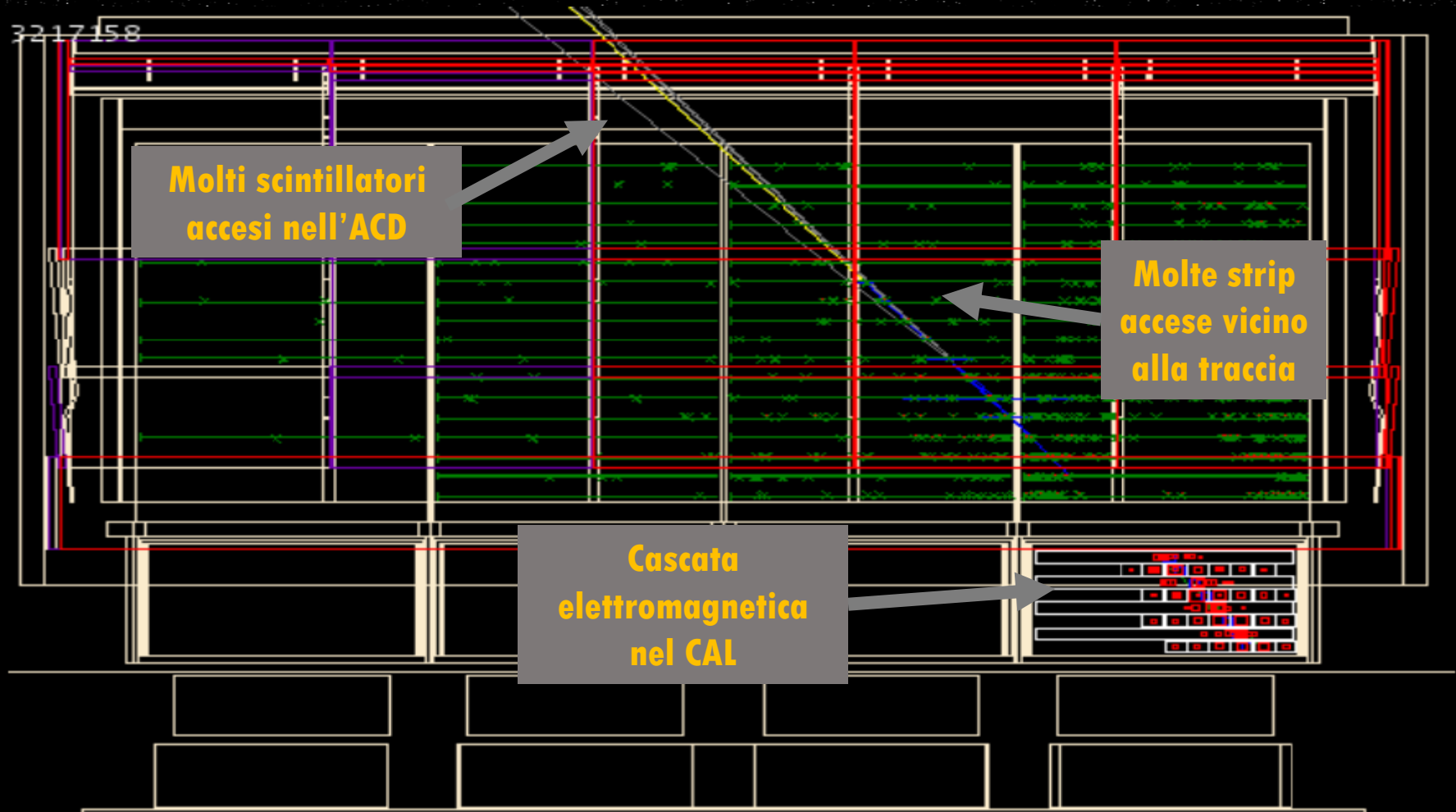
ID: 236084217-1498



Un elettrone (o un positrone?)

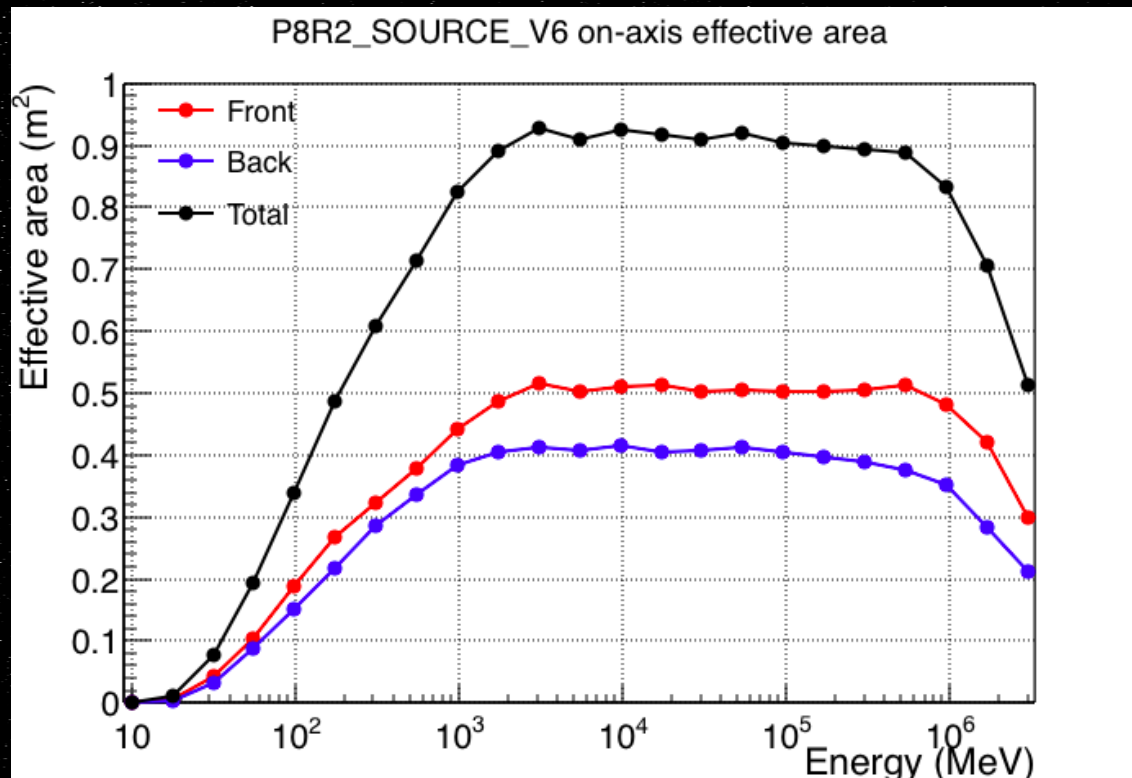


Un protone?



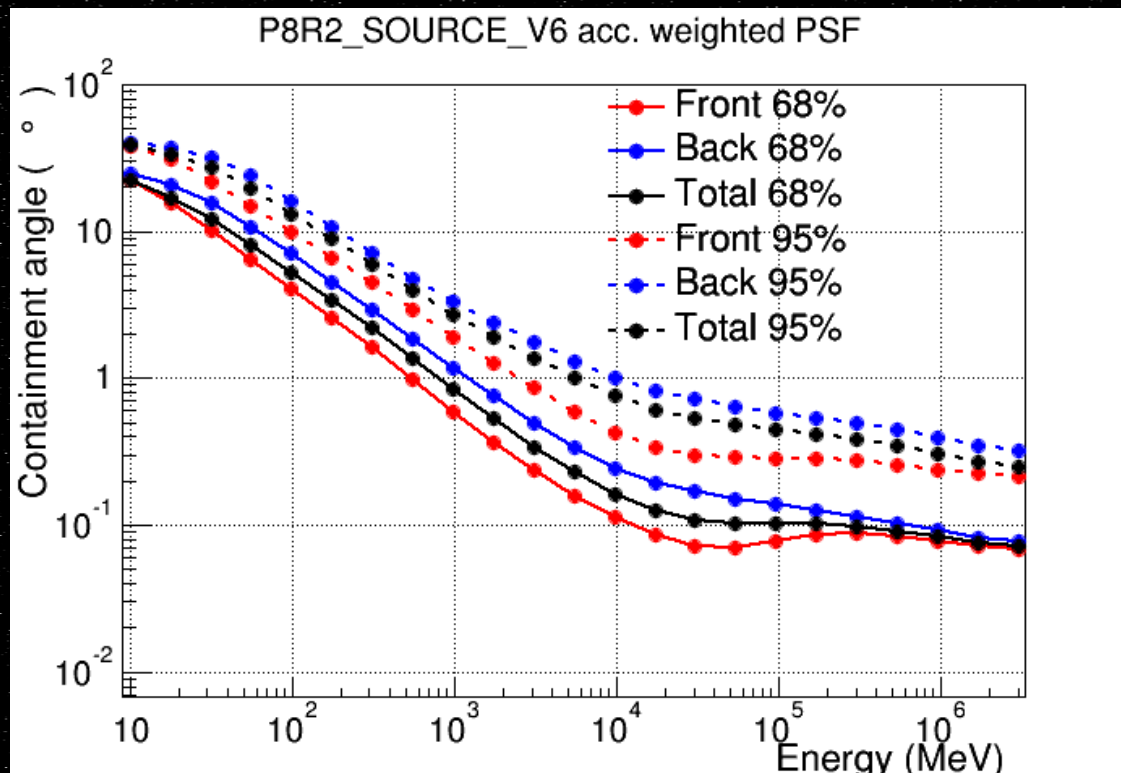
Le prestazioni del LAT: area efficace

- L'area efficace è una grandezza proporzionale alla probabilità che un fotone sia rivelato dal LAT
 - A basse energie riflette l'andamento della sezione d'urto del processo di produzione di coppie
 - Ad alte energie diminuisce per via del «backsplash»



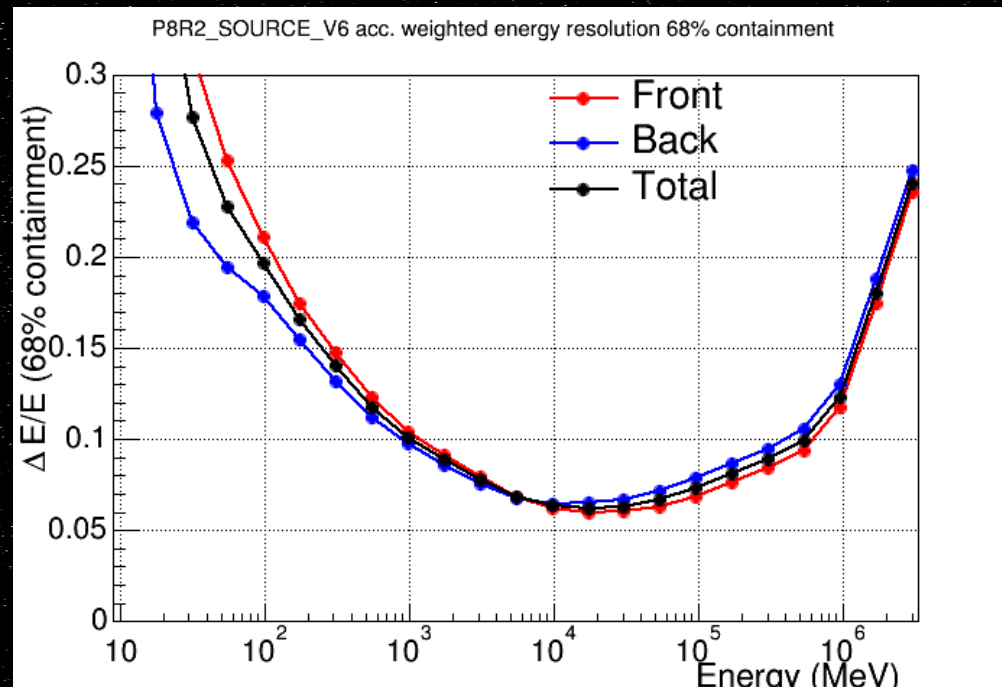
Le prestazioni del LAT: la PSF

- La PSF («point spread function») indica la risoluzione angolare del LAT
 - A basse energie è limitata dallo «scattering multiplo» degli elettroni e positroni nel TKR
 - Ad alte energie è determinata dal passo tra le strip



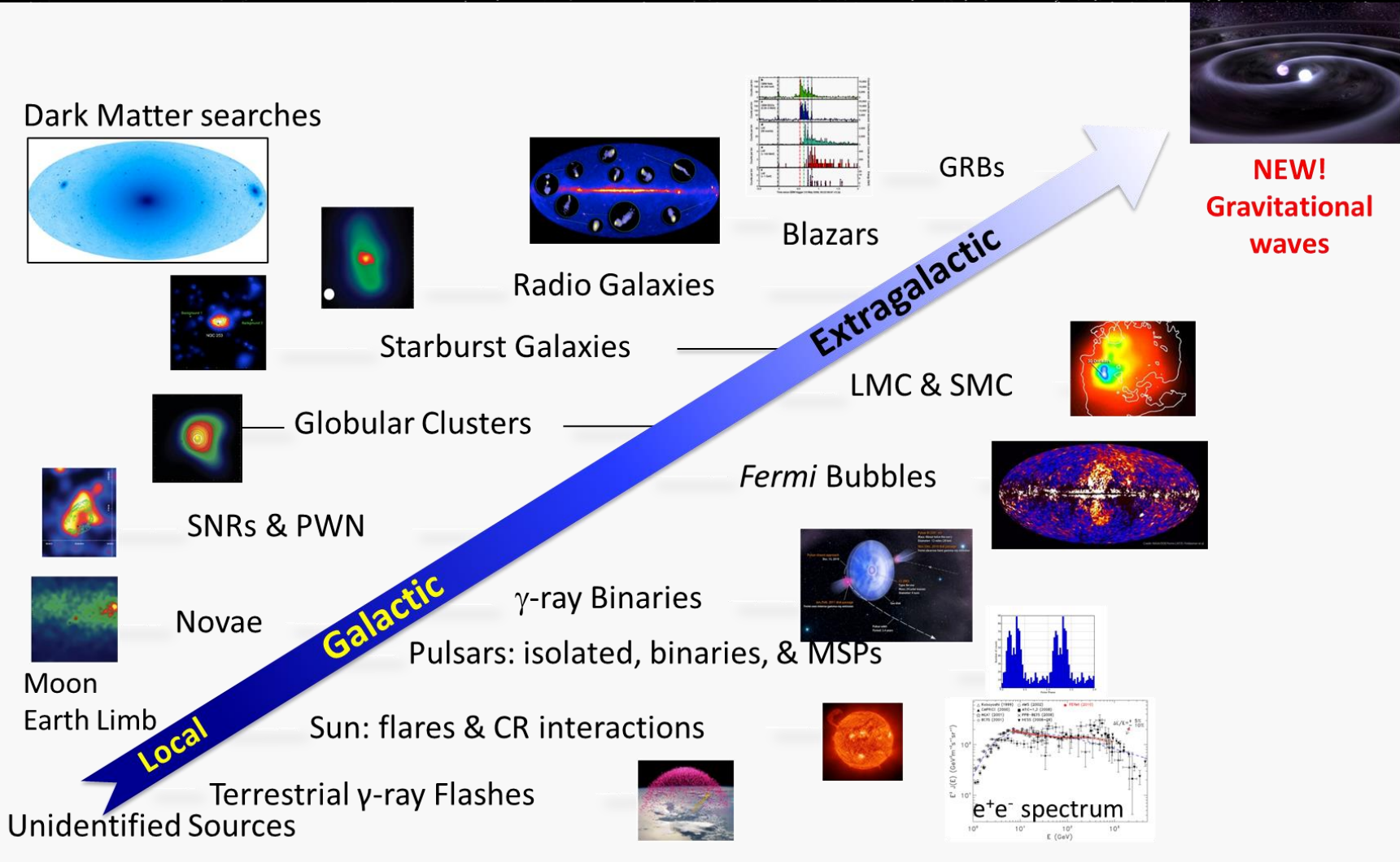
Le prestazioni del LAT: la risoluzione energetica

- La risoluzione energetica indica la capacità del LAT di ricostruire correttamente l'energia dei fotoni incidenti
 - Dipende essenzialmente dal CAL
 - A basse energie è limitata dalle perdite di energia di elettroni e positroni nel TKR
 - Ad alte energie è limitata dal fatto che le cascate elettromagnetiche non sono contenute interamente nel CAL

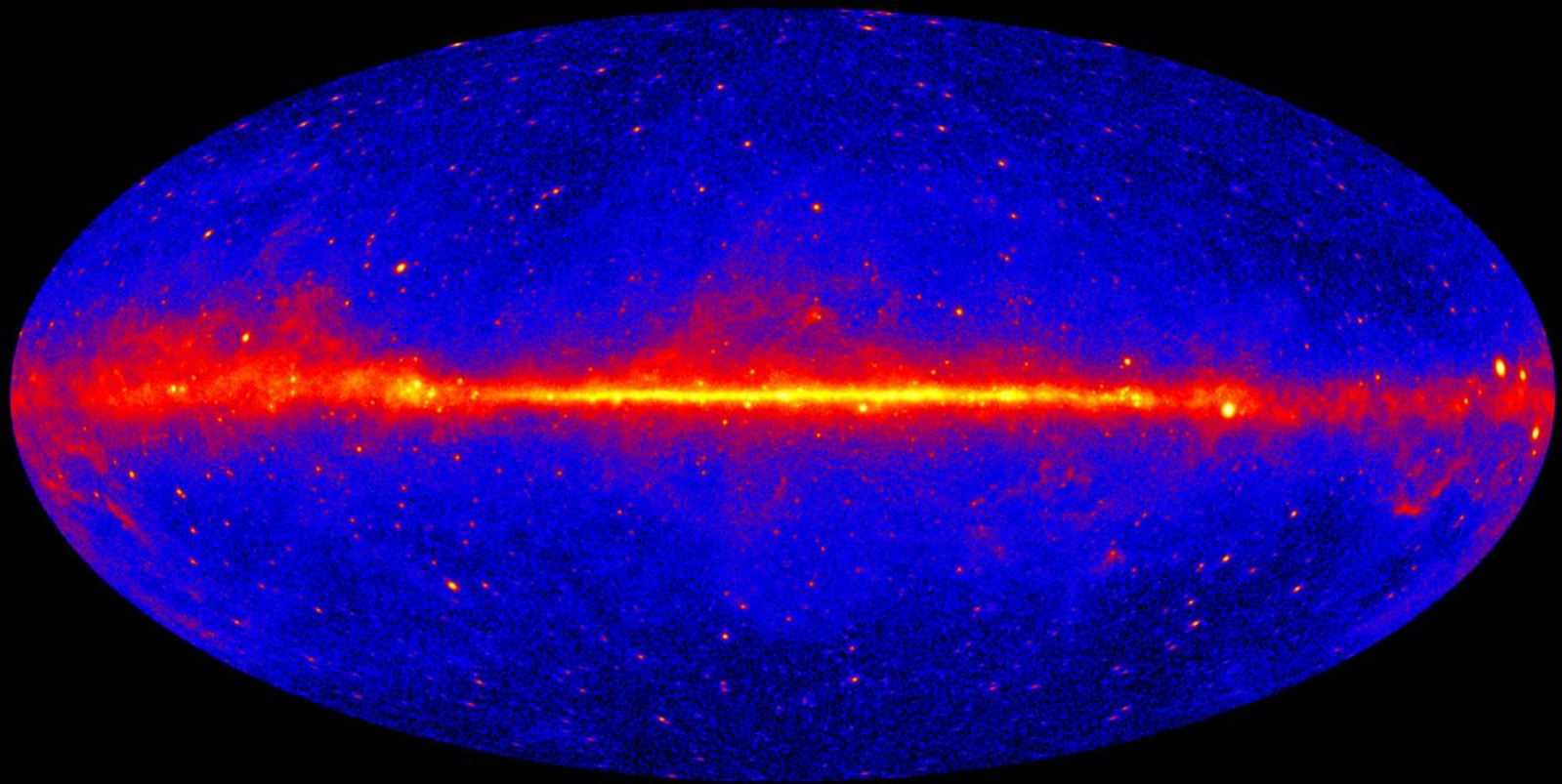


**COSA SI STUDIA CON I DATI DEL
LAT?**

Scienza con i dati di Fermi



Il cielo gamma visto dal LAT



Classificazione delle sorgenti gamma

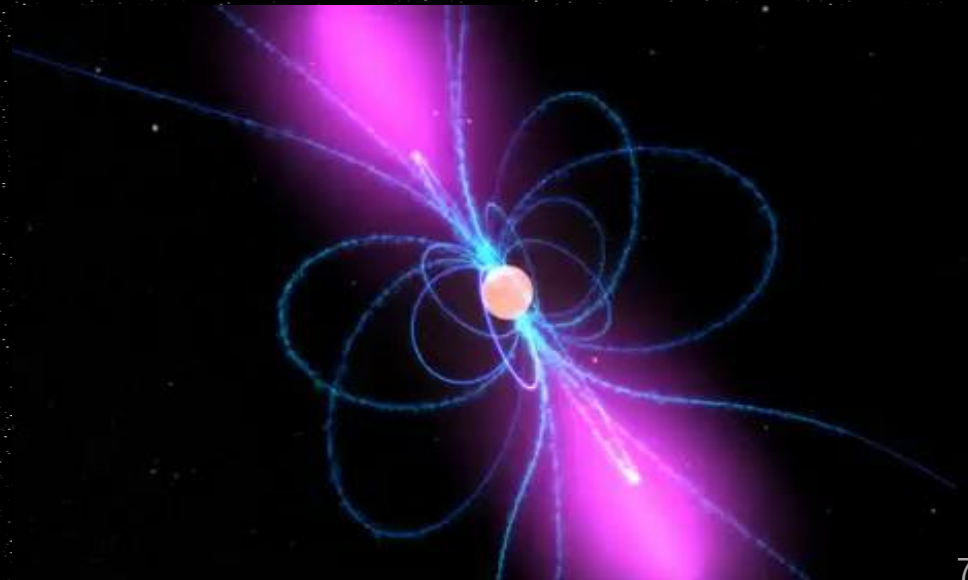
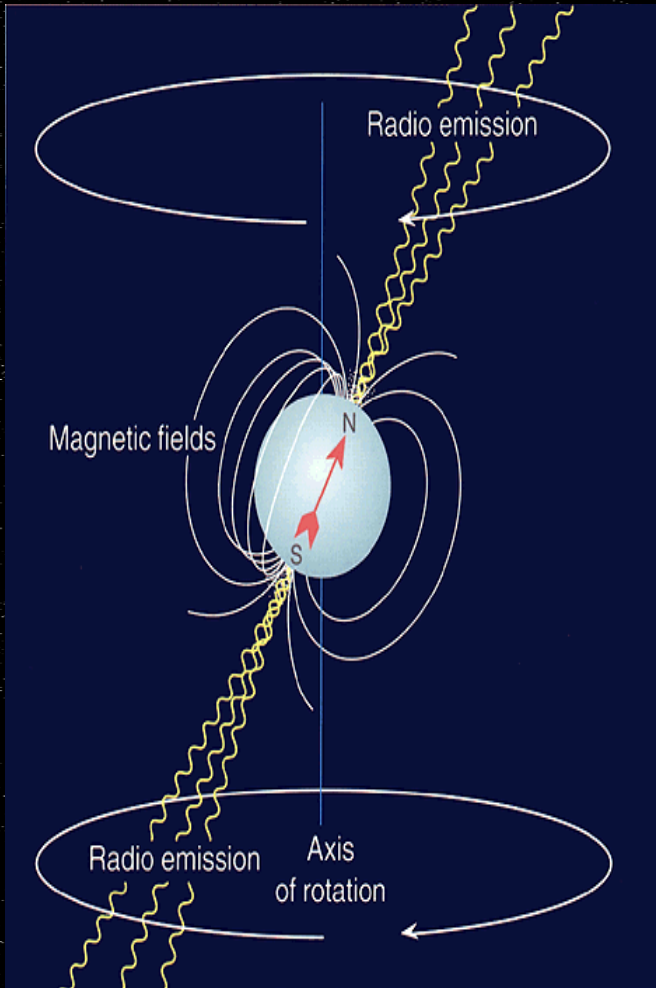
- Le sorgenti di raggi gamma rivelate dal LAT vengono classificate e catalogate
 - Studi di popolazione
 - Possibilità di trovare nuove classi di sorgenti
- Vengono rilasciati sia cataloghi generali che cataloghi specifici, legati a particolari classi di sorgenti
- Il catalogo più recente (4FGL-DR3) è stato costruito utilizzando 12 anni di dati
 - Sono state identificate 6658 sorgenti di raggi gamma
 - 4501 identificate e associate a controparti che emettono ad energie più basse (es. radio)
 - 2157 ancora non associate

I resti di supernova

- Il ciclo di vita di una stella massiva ($>9M_{\text{Sole}}$) si conclude con l'esplosione di una Supernova
- In un'esplosione di Supernova viene emessa una quantità di radiazione che supera quella di un'intera galassia (tanta energia quanta è previsto che ne emetta il Sole nella sua intera esistenza)
- Nell'esplosione viene espulso tutto (o quasi) il materiale che costituisce la stella a velocità fino a 30000km/h e viene prodotta un'onda d'urto che si propaga nel mezzo interstellare
- L'onda d'urto dell'esplosione si propaga, formando una nube di gas e polveri, rallentando e formando un **resto di Supernova (SNR)**
- Nel caso dell'esplosione di una stella massiva il nucleo può collassare così rapidamente da formare un oggetto estremamente compatto: una **stella di neutroni** o un **buco nero**

Le pulsar

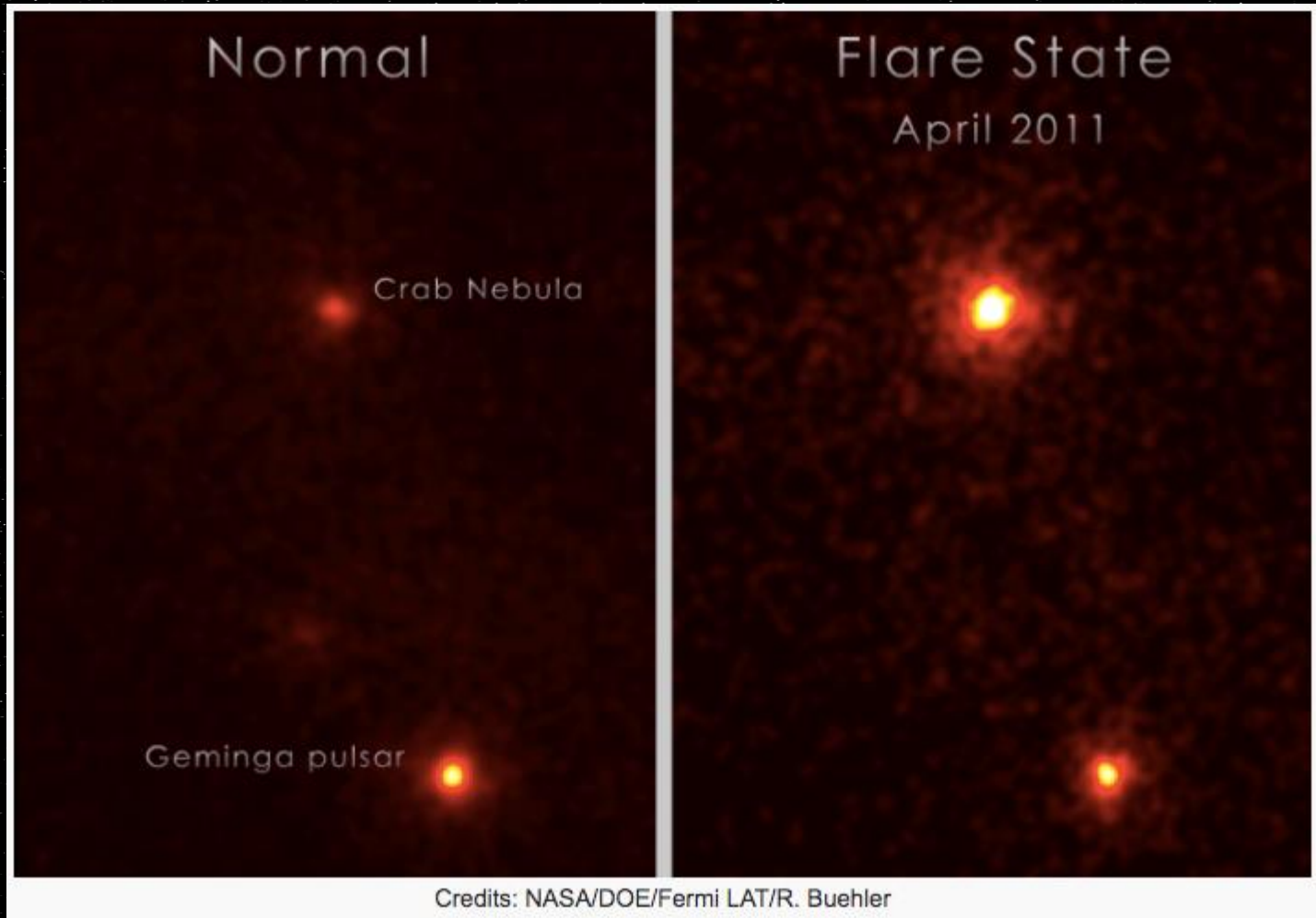
- In seguito all'esplosione di SN si può formare una stella di neutroni rotante
- Il campo magnetico rotante accelera particelle che emettono radiazione elettromagnetica (radio e gamma)
- Fasci di luce molto intensi visibili solo quando sono allineati con l'osservatore



Le pulsar osservate da Fermi

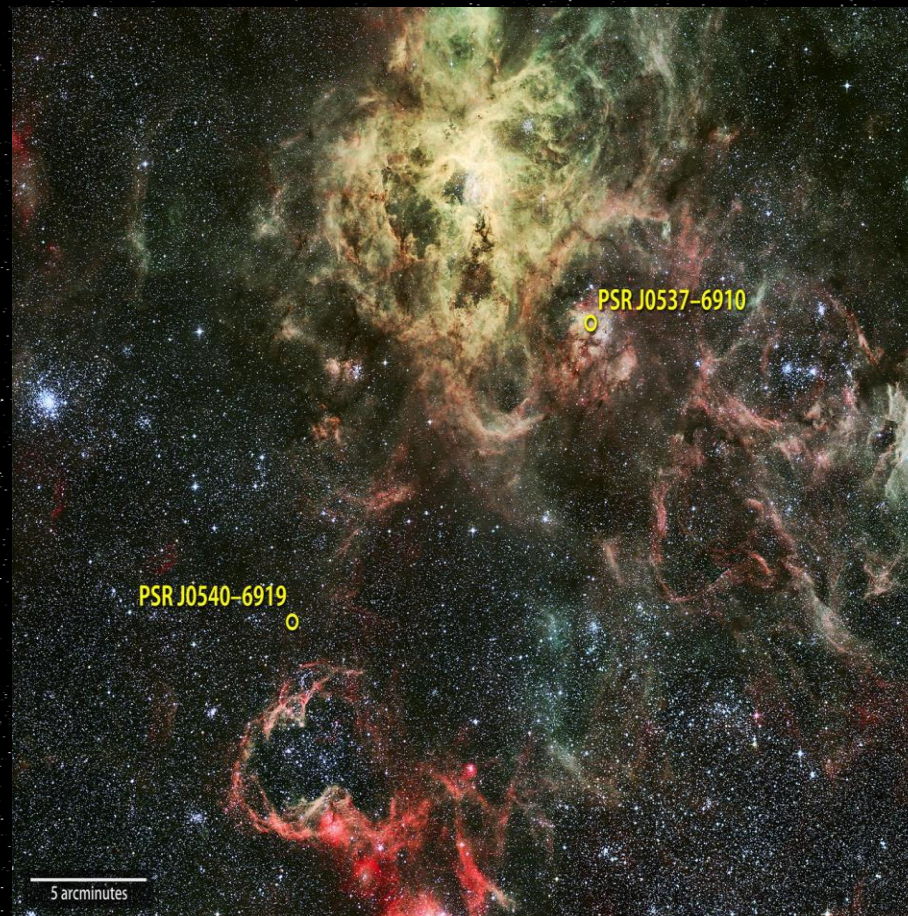
- Prima di Fermi si conoscevano soltanto 7 pulsar
- Il LAT ha rivelato 276 pulsar (dicembre 2021)!
 - Alcune di queste emettono soltanto nella regione gamma
- Il LAT ha permesso di scoprire le cosiddette **«millisecond pulsar» (MSP)**
 - Si tratta di pulsar con periodi di rotazione inferiori al ms
- Scoperta della variabilità nell'emissione delle pulsar
 - «Flare» nella nebulosa del Granchio osservato nel 2011

Il «flare» della nebulosa del Granchio



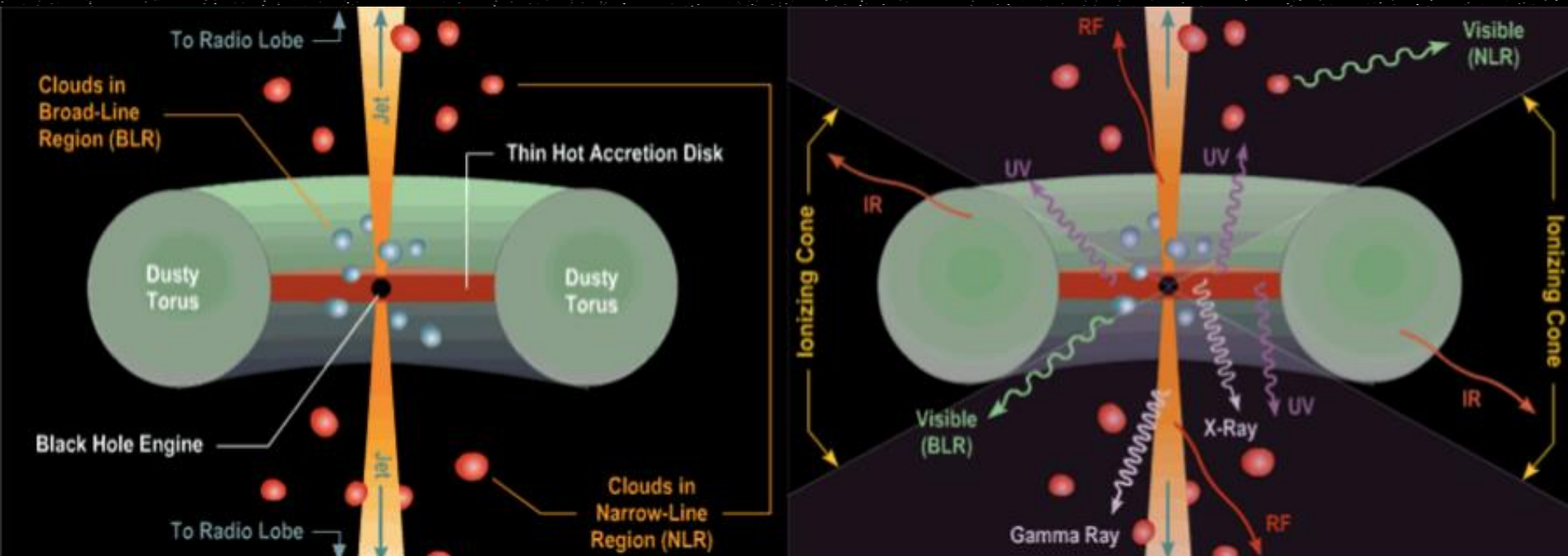
Prima pulsar in un'altra galassia

- La pulsar è nella **Grande nube di Magellano**, a 163000 anni luce da noi

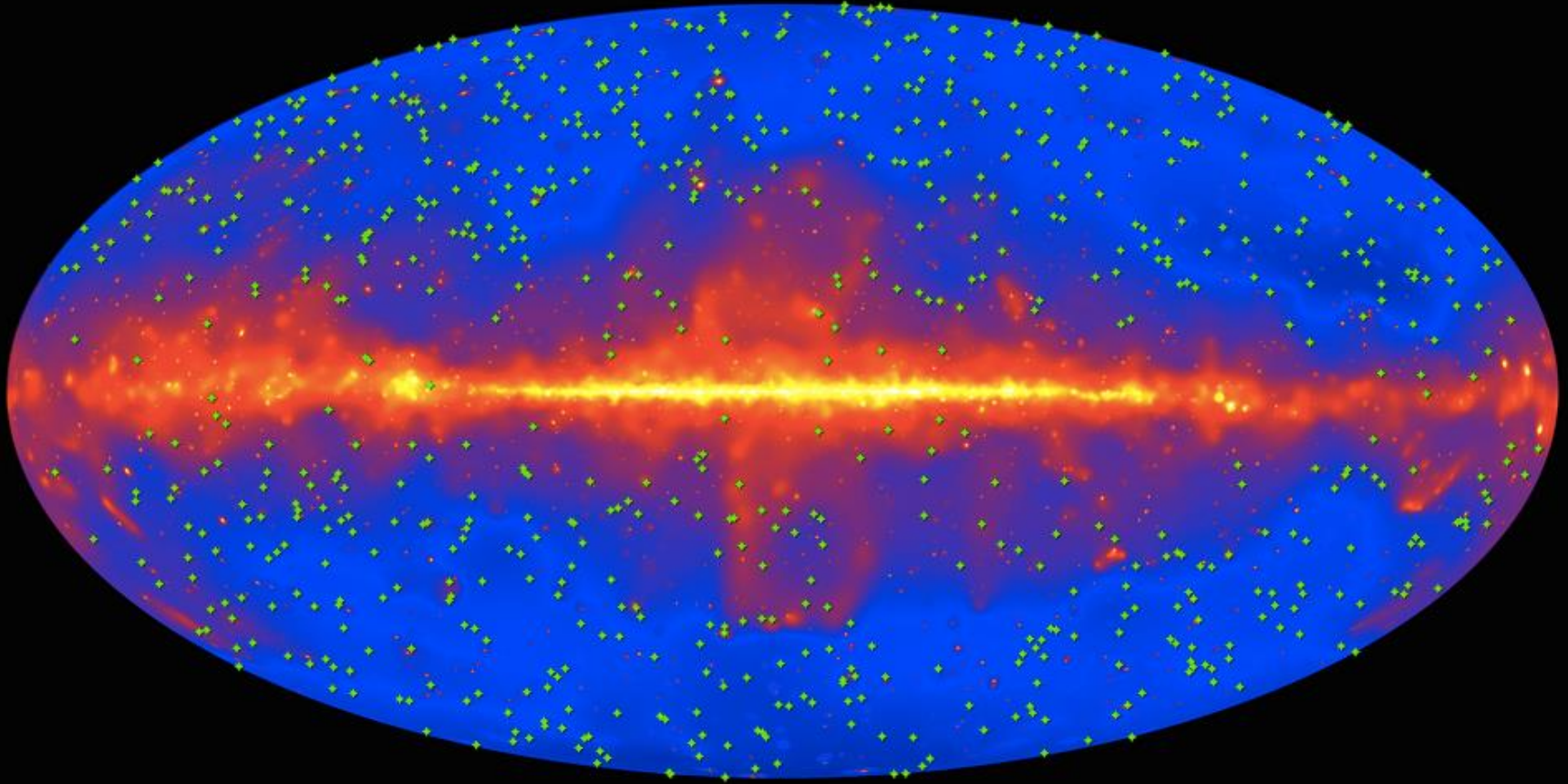


Nuclei Galattici Attivi (AGN)

- Galassie con nuclei straordinariamente luminosi, alimentati da buchi neri super-massicci
 - Le masse superano di almeno 10 milioni di volte la massa del Sole
 - Il materiale freddo vicino al buco nero centrale forma un disco di accrescimento
- Alcuni producono getti gemelli di particelle altamente collimate che emergono in direzioni opposte dal centro del disco
 - Questi getti di particelle possono puntare verso la Terra



Mappa degli AGN osservati da Fermi



Gli AGN sono oggetti estremamente variabili e per poter comprendere come sono fatti e a quali meccanismi è dovuta la loro emissione sono di fondamentale importanza le **osservazioni multifrequenza**

I Gamma-ray Burst (GRB)

- I **lampi di raggi gamma** (**gamma-ray burst, GRB**) sono intense emissioni di raggi gamma che possono durare da pochi millisecondi a diverse decine di minuti
- Sono esplosioni potentissime e costituiscono ad oggi il fenomeno più energetico finora osservato nell'Universo
- Sono distribuiti in maniera isotropa nello spazio, avvengono in direzioni casuali e imprevedibili e sono abbastanza frequenti (circa uno al giorno)
- Nel 2017 il **GRB170817A** venne associato all'onda gravitazionale **GW170817**, prodotta dalla fusione di due stelle di neutroni, un fenomeno noto come kilonova

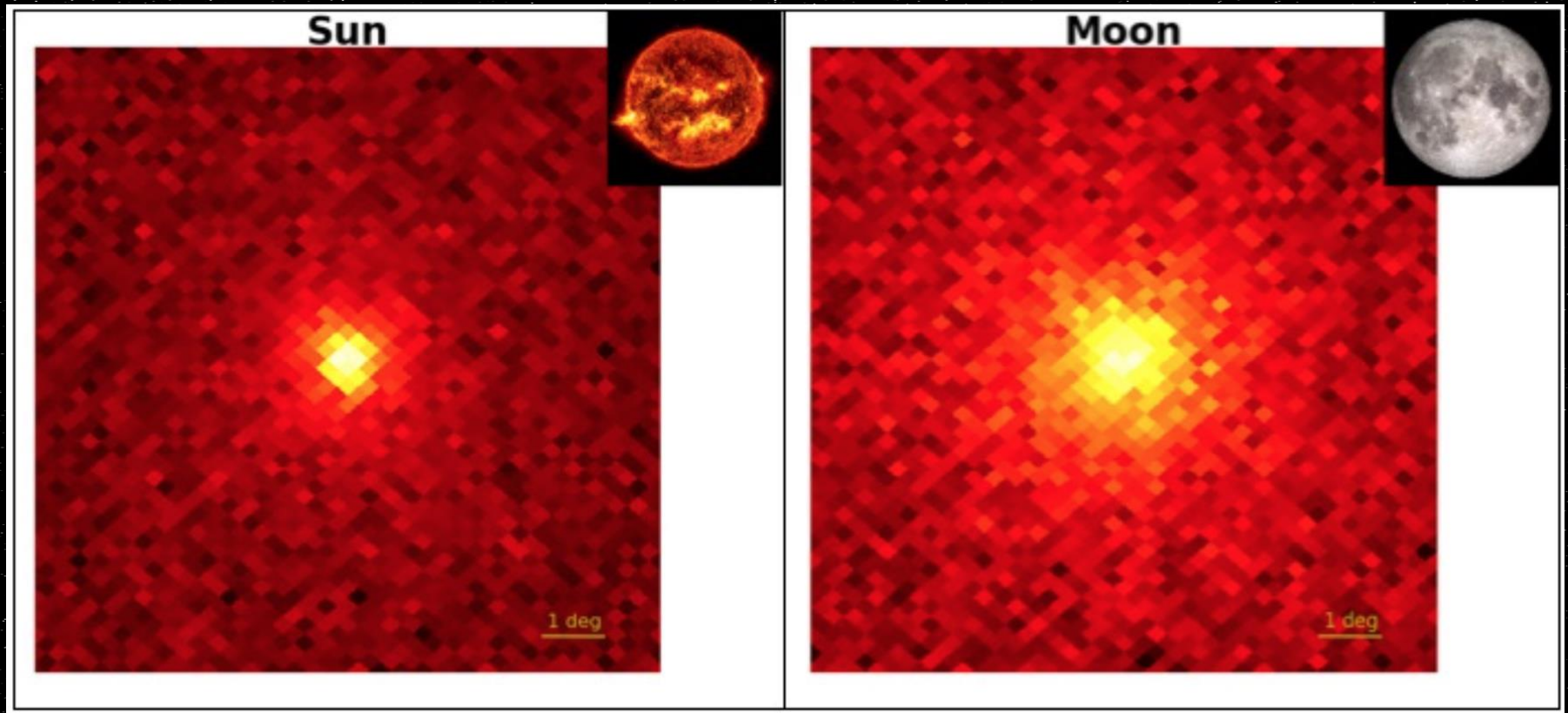
La nascita dell'astronomia «multimessenger»

- Il 17/08/2017 gli osservatori di onde gravitazionali **LIGO** e **VIRGO** hanno osservato un'onda gravitazionale prodotta dalla fusione di due stelle di neutroni di circa $2M_{\odot}$ e $1M_{\odot}$ nella costellazione dell'Idra
- Dopo circa **1,7s**, il **GBM** ha osservato un gamma-ray burst
- È subito partita una campagna di osservazioni sull'intero spettro elettromagnetico
 - Scoperta di un transiente nella regione dell'ottico nella galassia NGC 4993 11 ore dopo l'onda gravitazionale
 - Scoperta di un transiente nella regione UV, che si è attenuato in 48 ore
 - Osservazioni nell'ottico e nell'IR di un segnale che è durato 10 giorni
 - Rivelazione di un segnale nei raggi X dopo 9 giorni
 - Rivelazione di un segnale radio dopo 16 giorni
 - Nessun ulteriore segnale gamma rivelato
 - Nessun neutrino rivelato

Sorgenti gamma nel Sistema Solare

- Il Sole
 - Emissione stazionaria
 - Interazioni dei nuclei dei raggi cosmici con l'atmosfera solare
 - Scattering Compton inverso degli elettroni e positroni cosmici con i fotoni solari
 - «Flare» solari
 - Radiazione emessa su tutto lo spettro elettromagnetico
 - Protoni, elettroni e ioni accelerati nell'atmosfera solare
- La Terra
 - Interazioni dei raggi cosmici carichi con l'atmosfera
 - Terrestrial gamma-ray flashes (TGF)
 - Associati con le tempeste
- La Luna
 - Interazioni dei raggi cosmici carichi con la superficie lunare
- Pianeti e asteroidi
 - Stesso meccanismo dell'emissione lunare e solare
 - Emissione non ancora osservata (corpi celesti troppo lontani e di dimensioni ridotte)

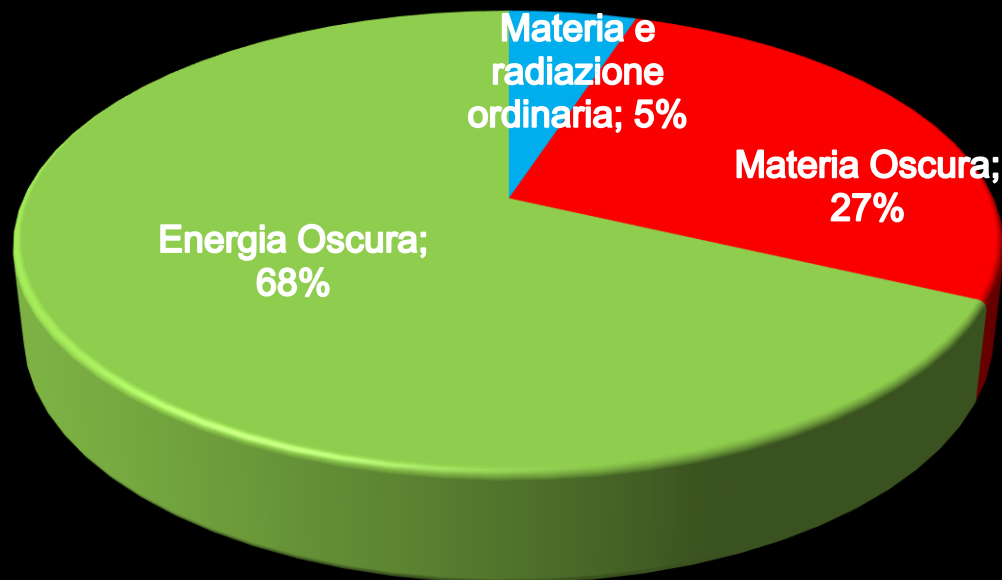
Il Sole e la Luna visti nei raggi gamma



- ▶ I raggi gamma provenienti dalla Luna sono dovuti all'interazione dei raggi cosmici con la sua superficie
- ▶ La Luna appare più luminosa del Sole perché non ha un campo magnetico che respinge i raggi cosmici di bassa energia

Che altro c'è nel nostro Universo?

- Materia oscura
 - Materia che non vediamo in quanto non emette radiazione elettromagnetica, ma che si manifesta per i suoi effetti gravitazionali
- Energia oscura
 - Ipotesi di una forma di energia che «spinge» l'Universo nella sua espansione accelerata

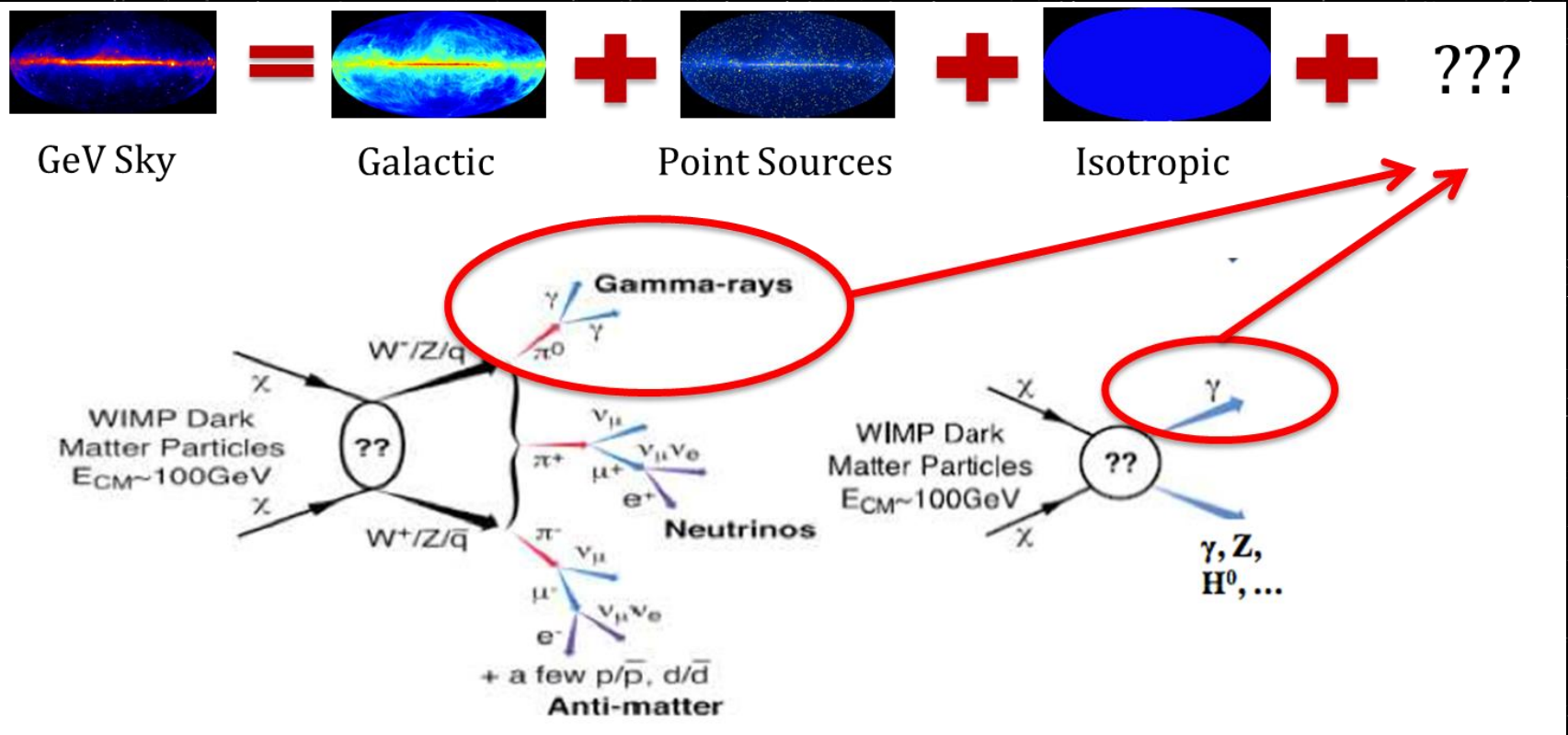


Materia oscura

- Esistono varie prove dell'esistenza di materia oscura nel nostro Universo
- **Curve di rotazione delle galassie:**
 - Studio della velocità di rotazione delle stelle in funzione della loro distanza dal centro
 - Le osservazioni non combaciano con le predizioni della teoria gravitazionale
 - C'è una massa «mancante»
- Effetto di **«lente gravitazionale»:**
 - La luce di stelle lontane è deflessa da oggetti molto massivi
 - La massa degli oggetti visibili non è sufficiente per spiegare l'effetto osservato
- Collisioni tra **«cluster di galassie»:**
 - La radiazione emessa non combacia con la distribuzione di materia calcolata

Ricerche di materia oscura

- Le **WIMP**, particelle la cui esistenza è prevista da varie teorie oltre il Modello Standard, sono un buon candidato per comporre la materia oscura
 - Quando si annichilano potrebbero produrre coppie di raggi gamma, osservabili da Fermi



Ricerche di materia oscura con Fermi

- Esistono vari «target» per le ricerche di segnali di materia oscura con i raggi gamma:
 - Centro Galattico (Galactic Center, GC)
 - Alone Galattico (Galactic Halo)
 - Dwarf Spheroidal Galaxies (dSph)
 - Emissione diffusa
 - Un eventuale segnale di materia oscura apparirebbe sotto forma di righe nello spettro dei raggi gamma
 - Sole
- Tutte queste ricerche non hanno fornito evidenza di un segnale di materia oscura, ma hanno permesso di stabilire importanti limiti sui modelli

Conclusioni

- Fermi ha aperto una finestra sull'Universo alle energie più elevate
- Il LAT è uno strumento senza precedenti, che osserva il cielo nei raggi gamma da oltre 13 anni
- I risultati di Fermi hanno rivoluzionato le nostre conoscenze sull'Universo
- Cosa ci riserva il futuro?
 - Interessanti prospettive nel campo dell'astrofisica «multimessenger»
 - Sinergia con rivelatori di onde gravitazionali e neutrini
 - Sinergia con rivelatori di radiazione elettromagnetica nell'intero spettro
 - Sinergia con gli osservatori di raggi cosmici carichi
 - Nuovi strumenti per estendere l'osservazione del cielo nelle regioni energetiche finora meno esplorate