

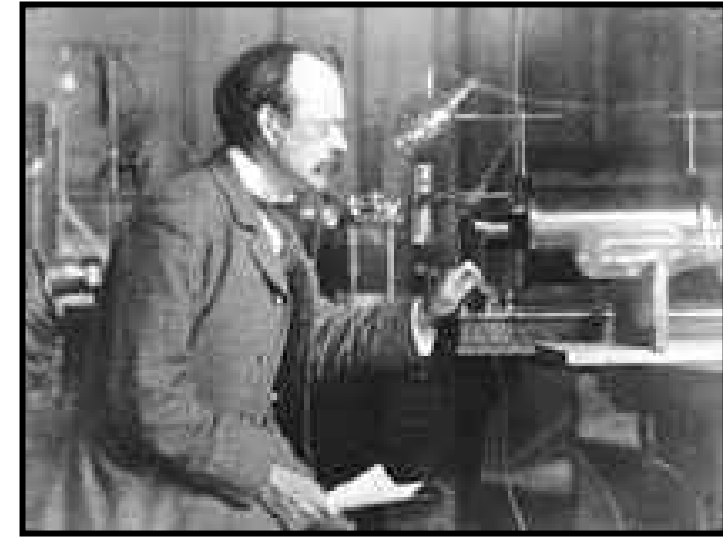
V. Formato - INFN Sezione di Tor Vergata - 10/02/2025

INTRODUZIONE AI RAGGI COSMICI

Radioattività
Becquerel
M. and P. Curie

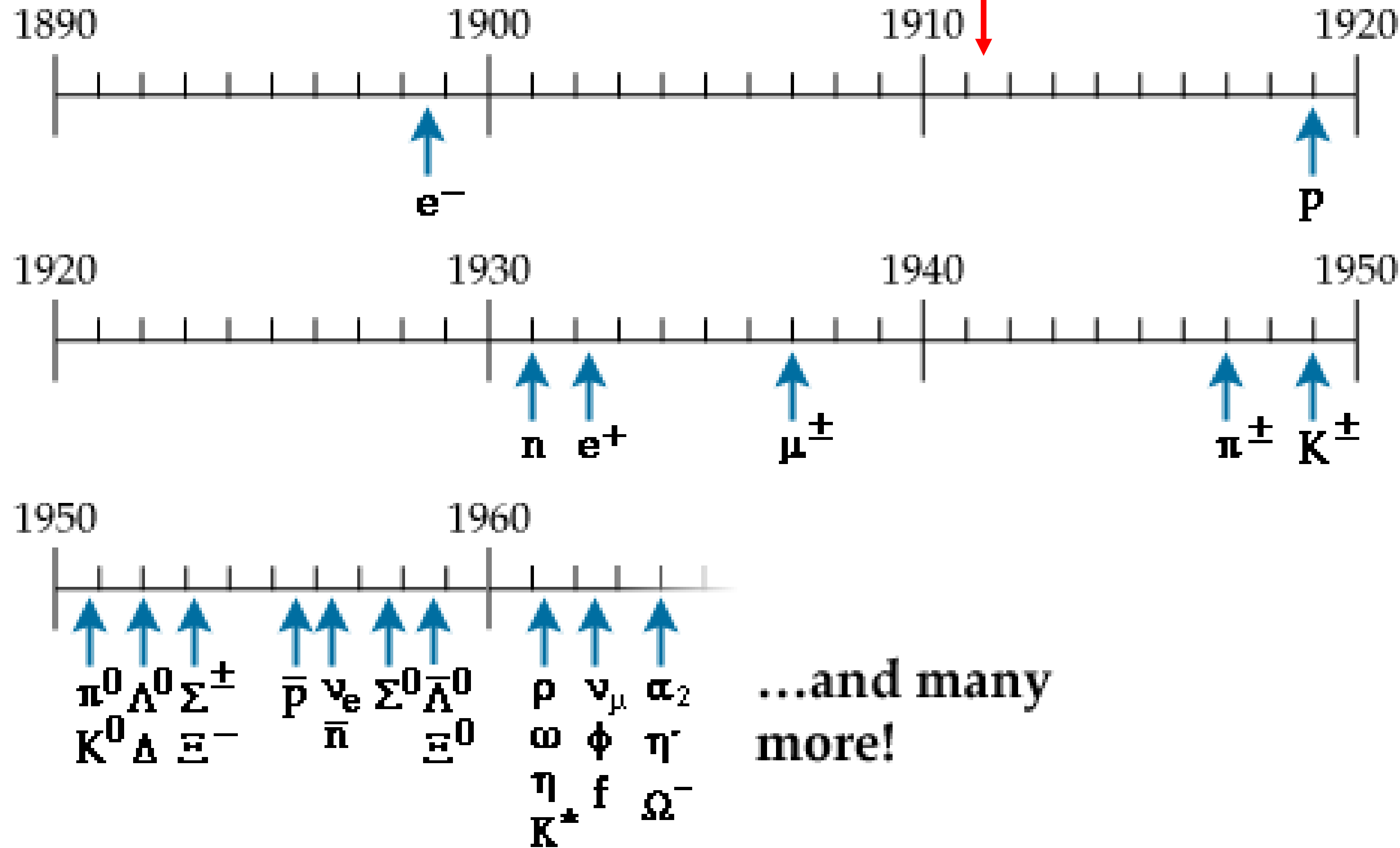
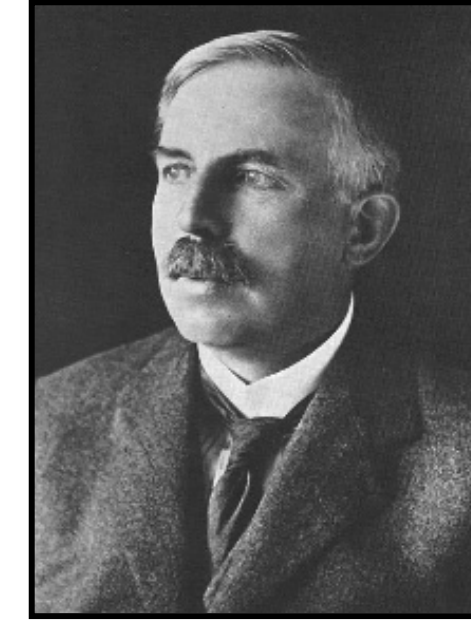


Elettrone
Thomson

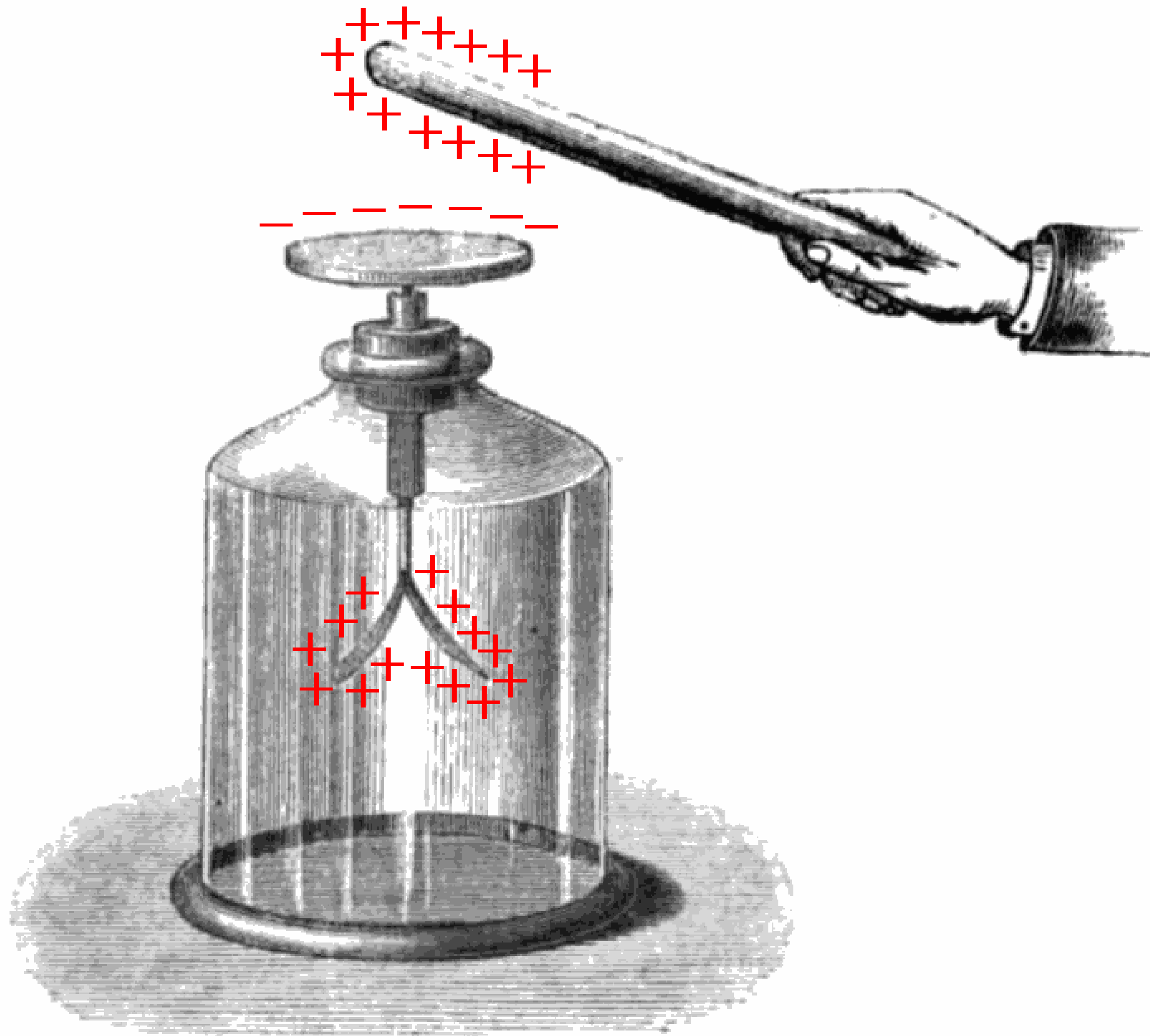


**RAGGI
COSMICI**
Hess

Protone
Rutherford



Elettroscopio a foglie



Strumento chiave nella scoperta dei raggi cosmici

Quando la piastra superiore si carica, le foglie si separano per repulsione coulombiana, e dovrebbero restare separate.

Invece, un elettroscopio si “scarica” spontaneamente, per via della presenza di radiazione ionizzante. Ma quale tipo di radiazione?

Radiazione naturale?
O qualcos'altro?

Theodor Wulf



Gesuita – Insegnante di Fisica

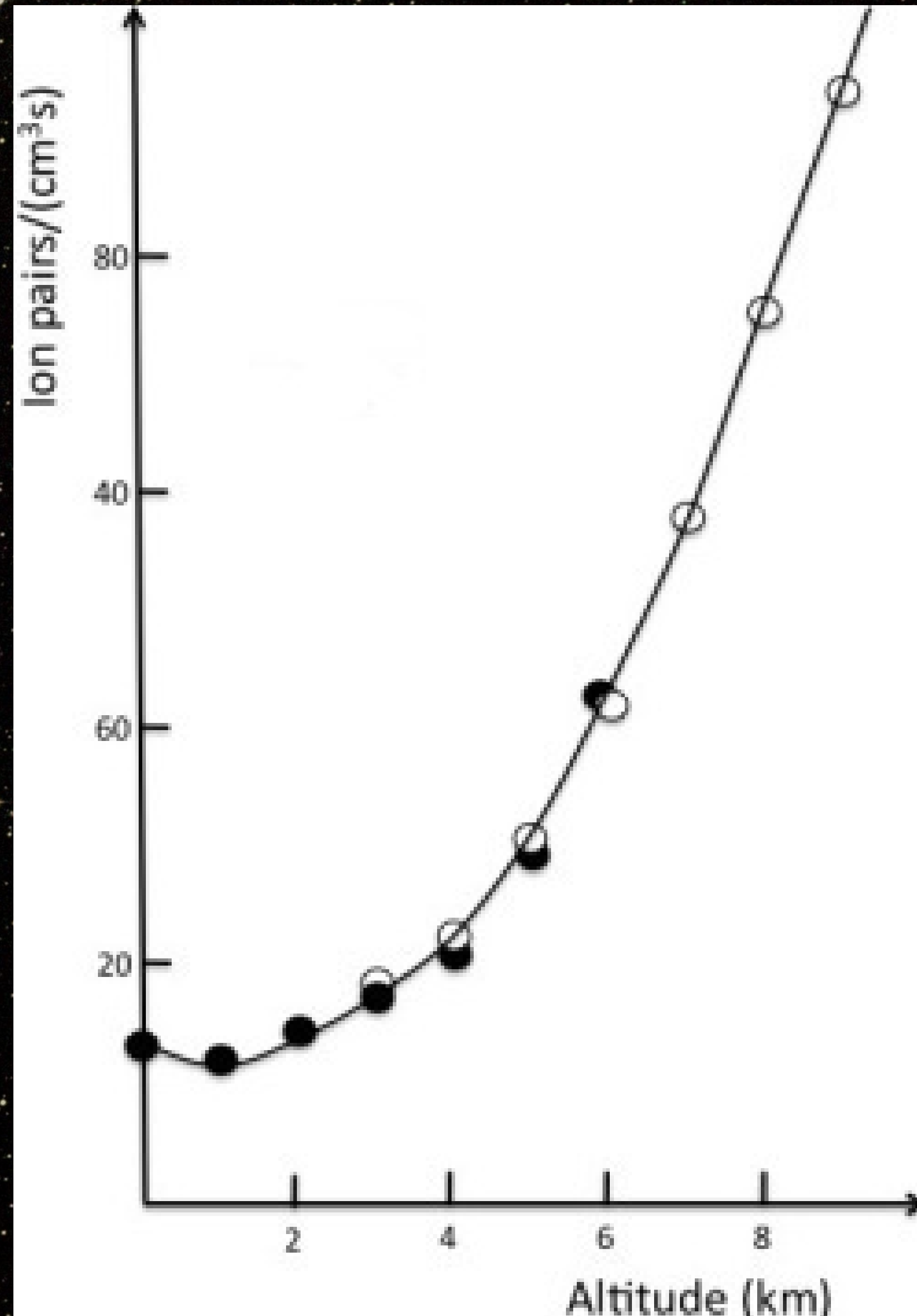
Nel 1910 costruisce un elettroscopio e misura il tasso di ionizzazione agli estremi della torre Eiffel

Nota una decrescita da 6 ions/cm³ alla base, a 3.5 ions/cm³ alla cima

Se si trattasse di radiazione gamma, avremmo un dimezzamento in ~80m, non 330m...

Tutta via i suoi risultati furono inizialmente ignorati

Pacini-Hess: Scoperta dei raggi cosmici



Domenico Pacini



Tra il 1910 e il 1912 condusse una serie di esperimenti con l'elettroscopio:

- Al suolo
- Al livello del mare, sulla nave della Marina Italiana "Folgore"
- Sottacqua, a 3m di profondità'

I suoi risultati mostrano livelli di ionizzazione simili tra suolo e livello del mare, e livelli significativamente inferiori sottacqua.

Se la ionizzazione fosse prodotta dalla radiazione ambientale nel terreno, l'acqua avrebbe dovuto assorbirla tutta, e la radiazione misurata a livello del mare sarebbe dovuta essere nulla. Il fatto che diminuisse sottacqua, invece, mostra che la radiazione viene dall'alto.

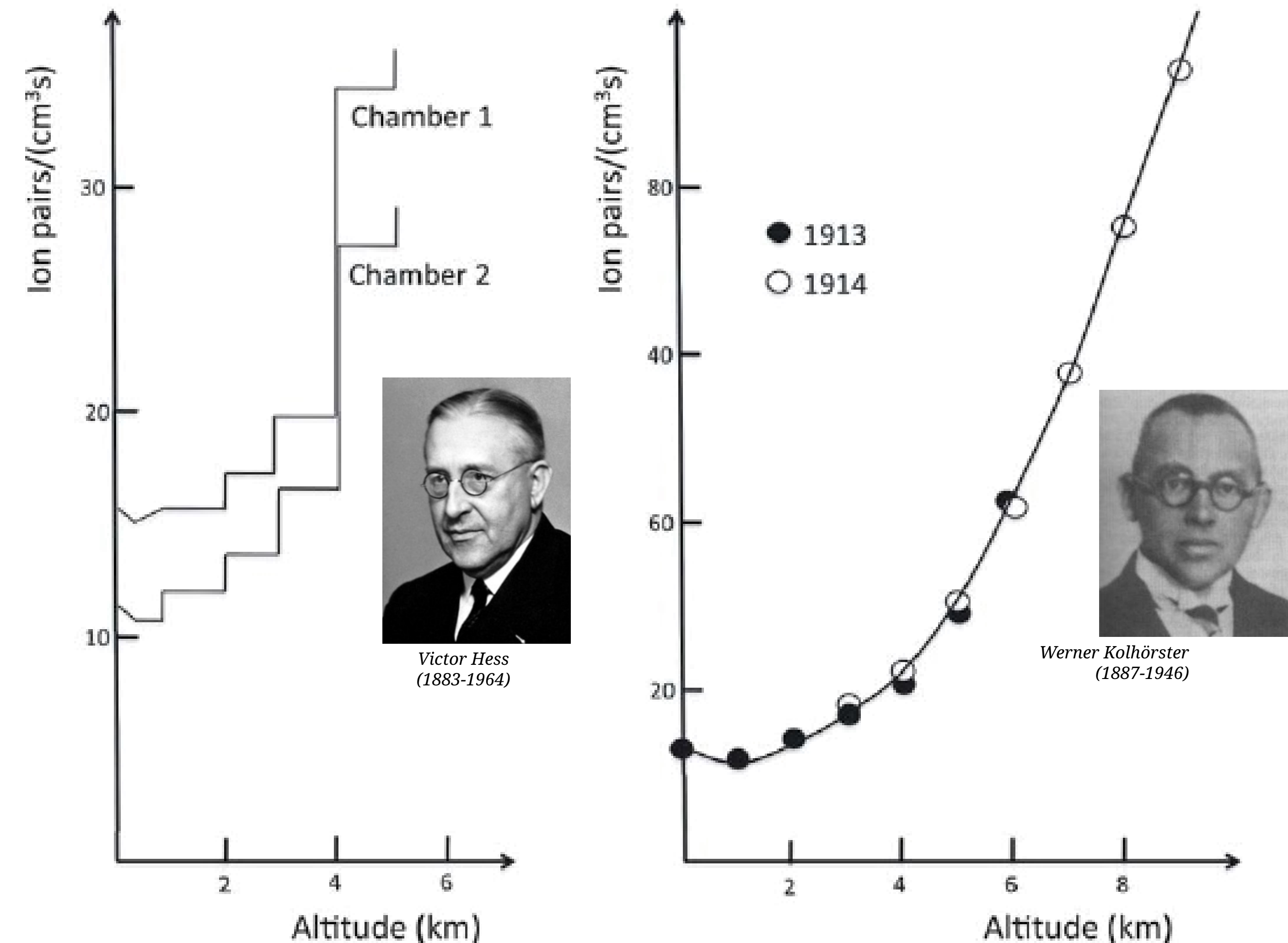
Victor Hess



Nel 1911 e 1912 condusse una serie di voli in mongolfiera fino a ~5km di altitudine, misurando il tasso di ionizzazione con l'elettroscopio.

Ripete' le misure sia di giorno che di notte (!)

Victor Hess / Werner Kolhorster



Nel 1911 e 1912 condusse una serie di voli in mongolfiera fino a ~5km di altitudine, misurando il tasso di ionizzazione con l'elettroscopio.

Ripete' le misure sia di giorno che di notte (!)

Misuro' un aumento del tasso di ionizzazione con l'altitudine, poi confermato da Kolhörster in voli seguenti ad altitudine maggiore.

Fig. 6. Variation of ionisation with altitude. Left panel: Final ascent by Hess [43], carrying two ion chambers. Right panel: Ascents by Kolhörster [46]. Original drawing by A. De Angelis.



Paul Dirac: predice l'esistenza del positrone

Dirac Equation : spin 1/2

$$i\hbar\gamma^\mu\partial_\mu\psi - mc\psi = 0$$

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \gamma^i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^i \\ -\sigma^i & 0 \end{pmatrix}$$

Electrons

$$\psi(x) = ae^{-(i/\hbar)p \cdot x} u^{(s)}(p)$$

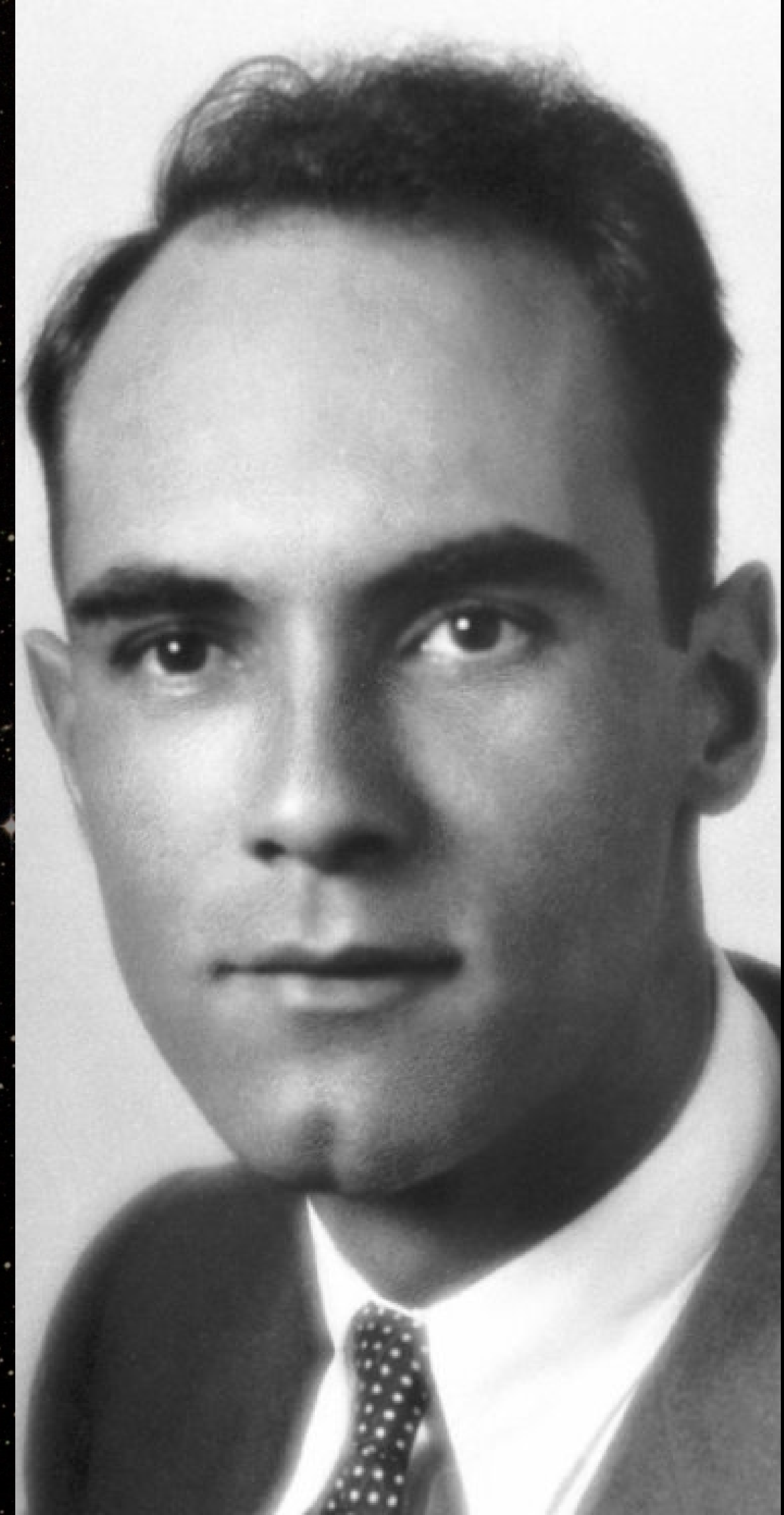
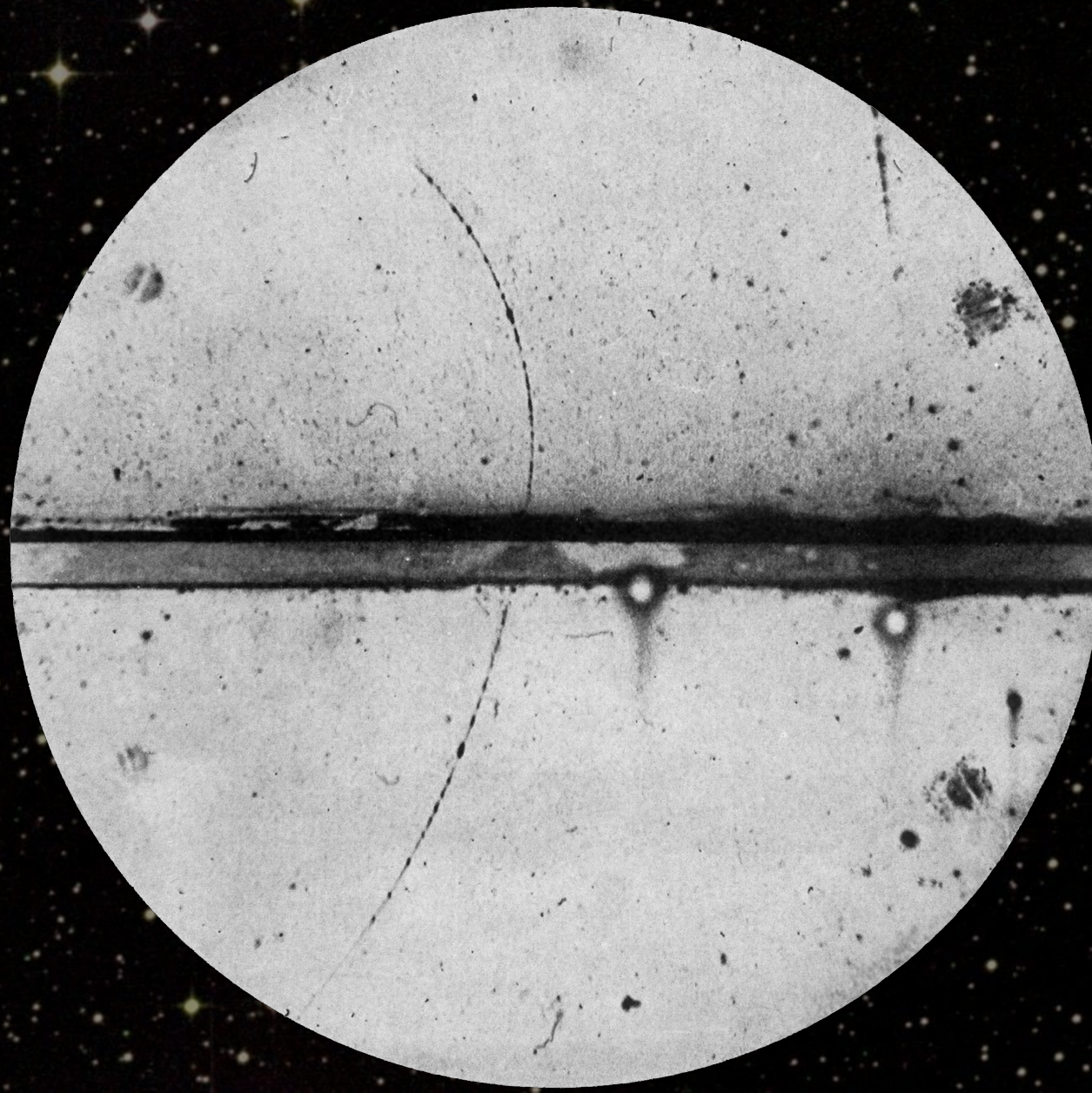
$$(\gamma^\mu p_\mu - mc)u = 0$$

Positrons

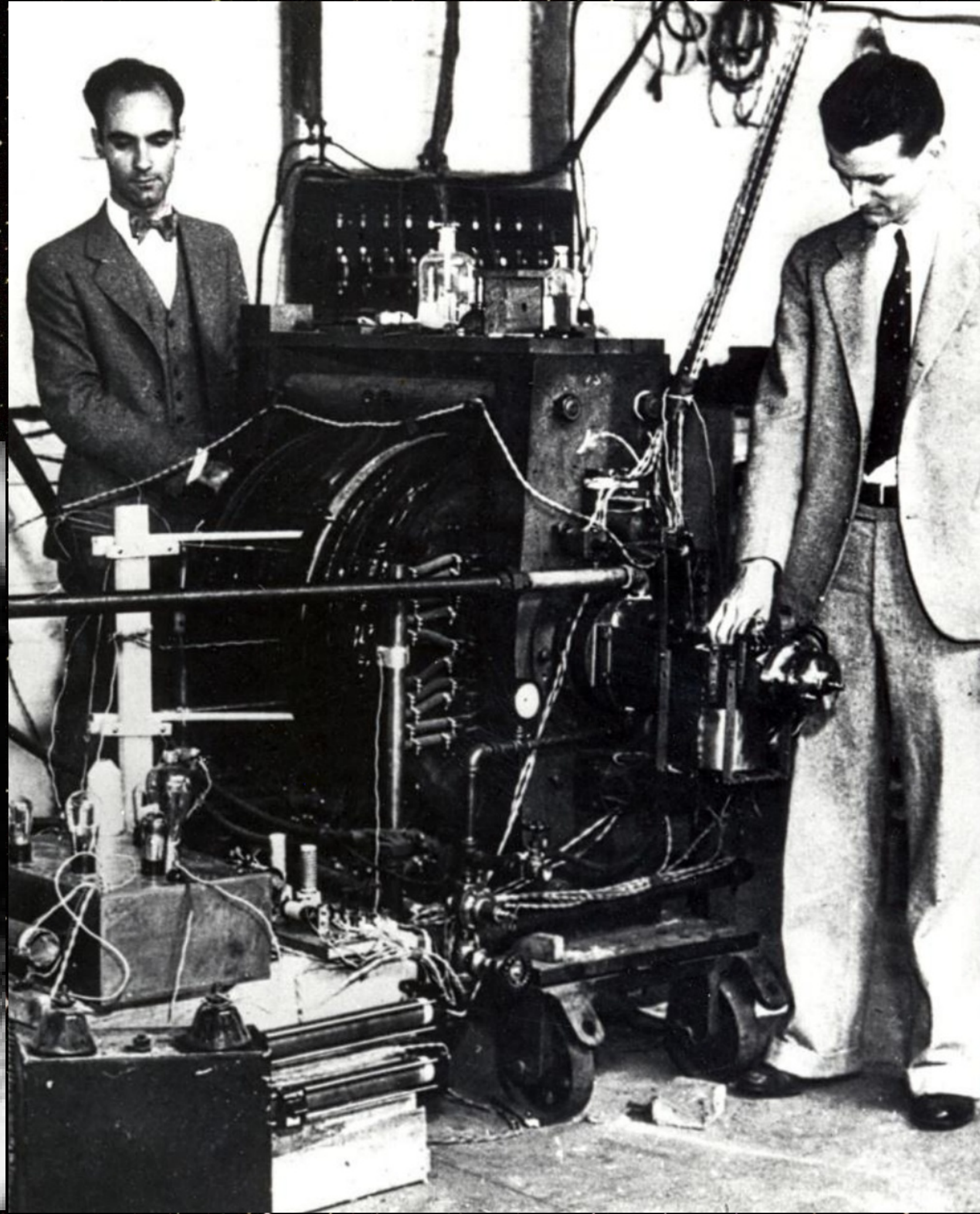
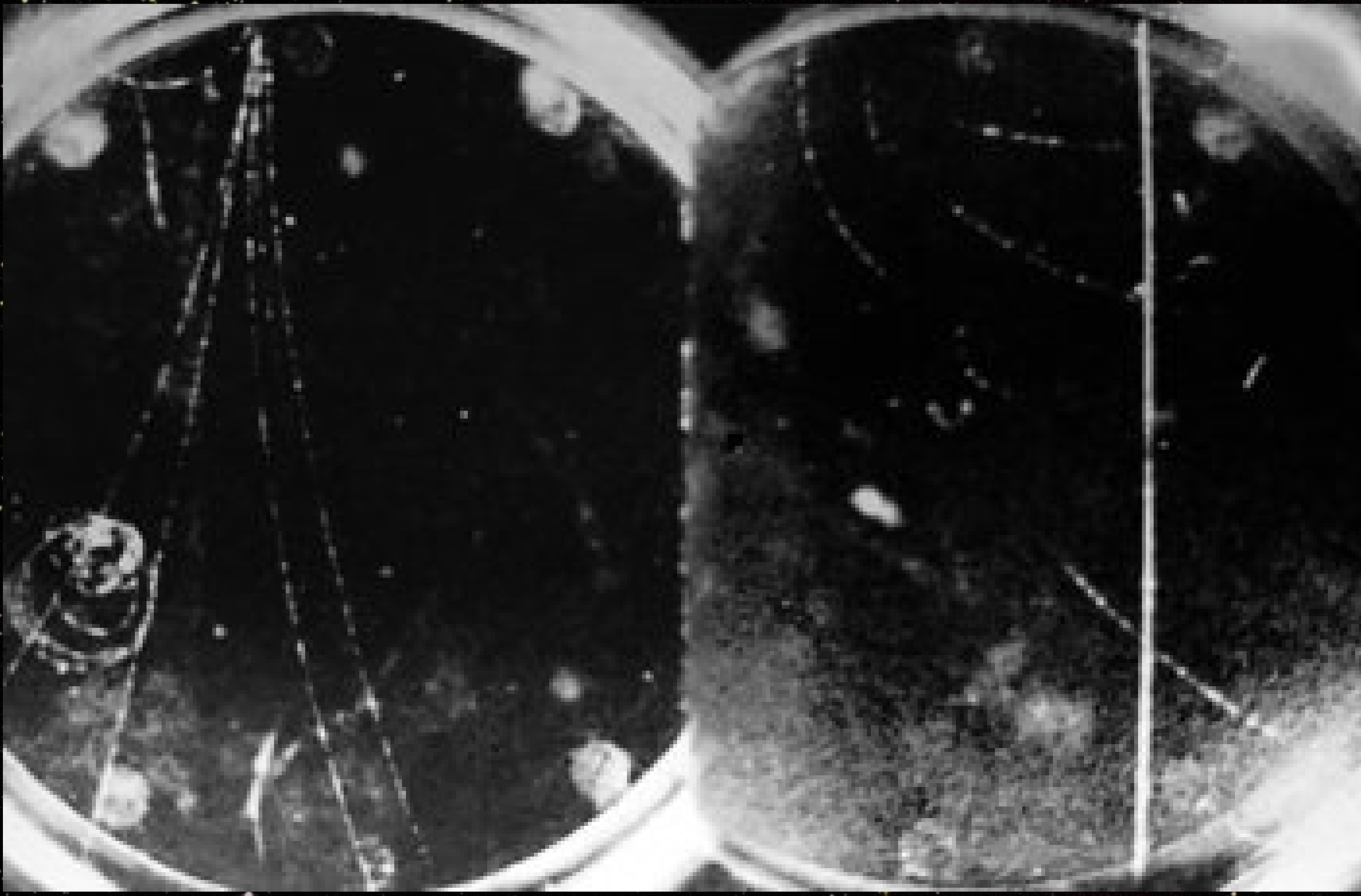
$$\psi(x) = ae^{(i/\hbar)p \cdot x} v^{(s)}(p)$$

$$(\gamma^\mu p_\mu + mc)v = 0$$

Carl Anderson: scoperta del positrone



**Seth Neddermeyer (+Anderson):
scoperta del muone**



Cecil Powel, Giuseppe Occhialini: scoperta del pione



E la lista continua...

Particle	Year	Discoverer (Nobel Prize)	Method
e^+	1897	J.J. Thomson (1906)	Discharges in gases
p	1919	E. Rutherford	Natural radioactivity
n	1932	J. Chadwick (1935)	Natural radioactivity
e^+	1933	C.D. Anderson (1936)	Cosmic Rays
μ^\pm	1937	S. Neddermeyer	Cosmic Rays
π^\pm	1947	C.F. Powell (1950)	Cosmic Rays
K^\pm	1949	C.F. Powell (1950)	Cosmic Rays
π^0	1949	R. Bjorklund	Accelerator
K^0	1951	R. Armenteros	Cosmic Rays
Λ^0	1951	R. Armenteros	Cosmic Rays
Δ	1952	C.D. Anderson (1936)	Cosmic Rays
Θ^-	1952	R. Armenteros	Cosmic Rays
Σ^\pm	1953	A. Bonetti	Cosmic Rays
p^-	1955	O. Chamberlain (1959) E. Segré (1959)	Accelerators
anything else	> 1955	various groups	Accelerators
ν oscillations	1998	SuperKamiokande	Cosmic Rays

Negli anni '50, con
l'avvento degli
acceleratori di particelle,
le due comunita' si
separano...

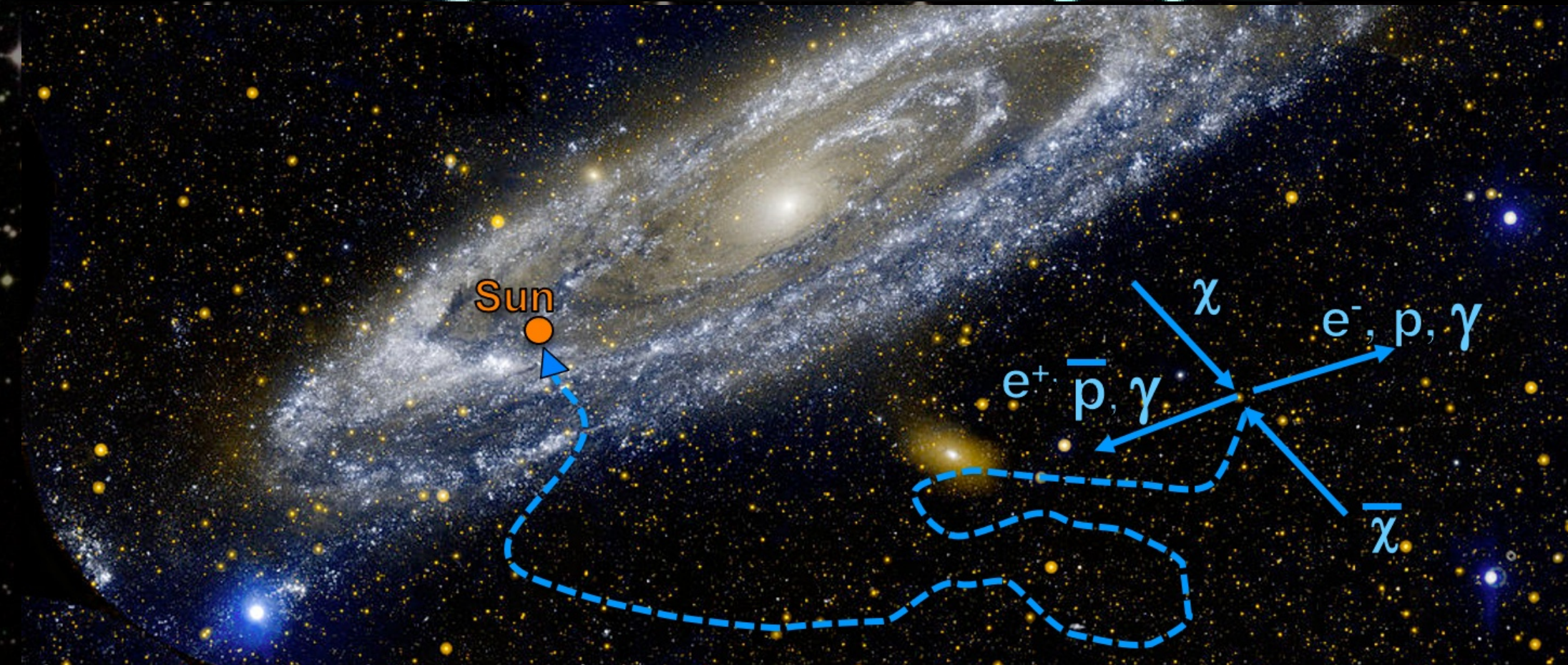
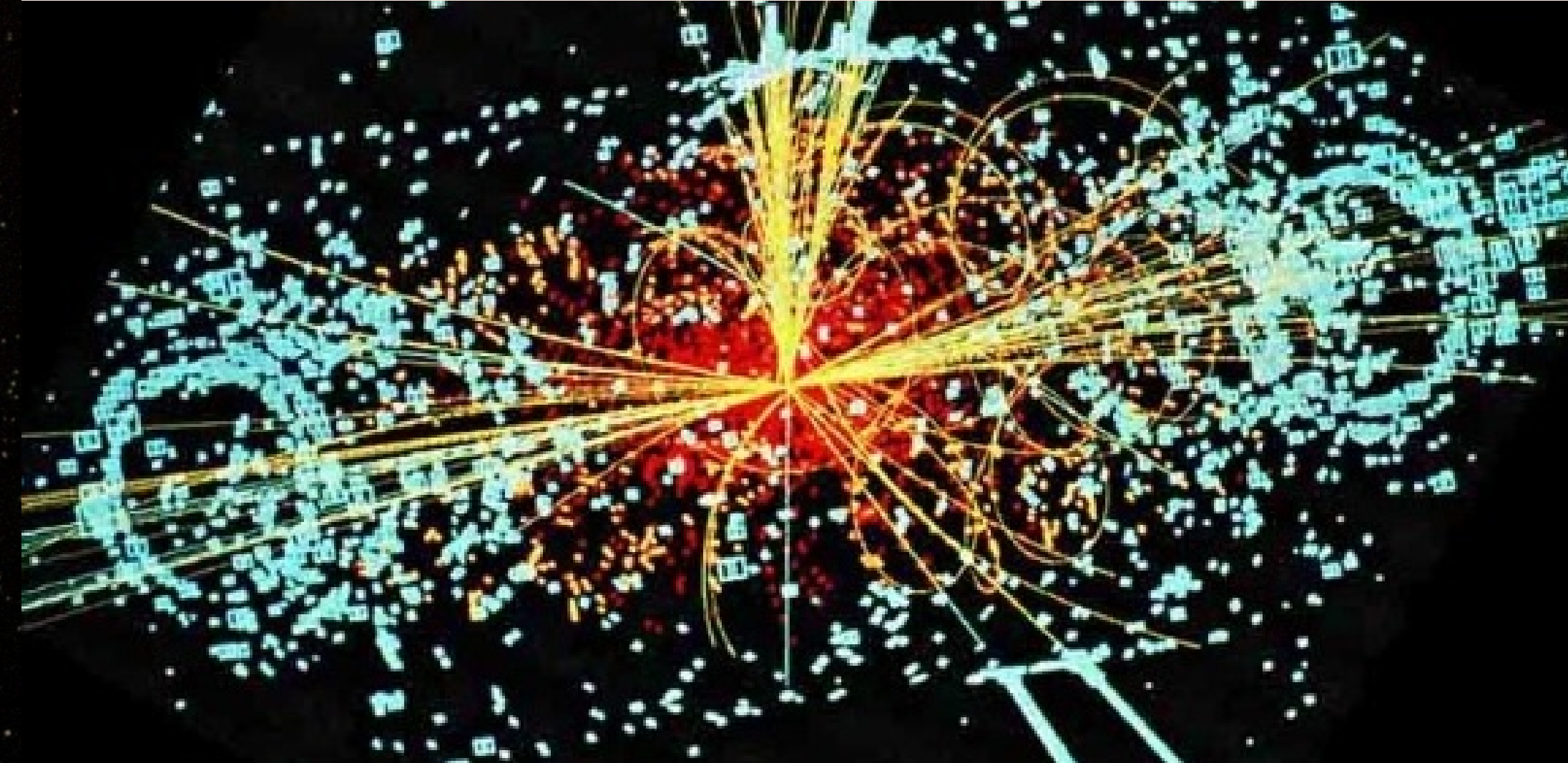


Raggi cosmici

Fisica delle particelle

Si inizia quindi a diffondere l'idea che il modo migliore di investigare la struttura interna di atomi e nuclei è quella di sparare particelle sonda e osservare come vengono deflesse.

Un po' come un meccanico che vuole studiare com'è fatto il motore di una macchina facendola scontrare con un'altra macchina e guardando i pezzi volar via dallo scontro.

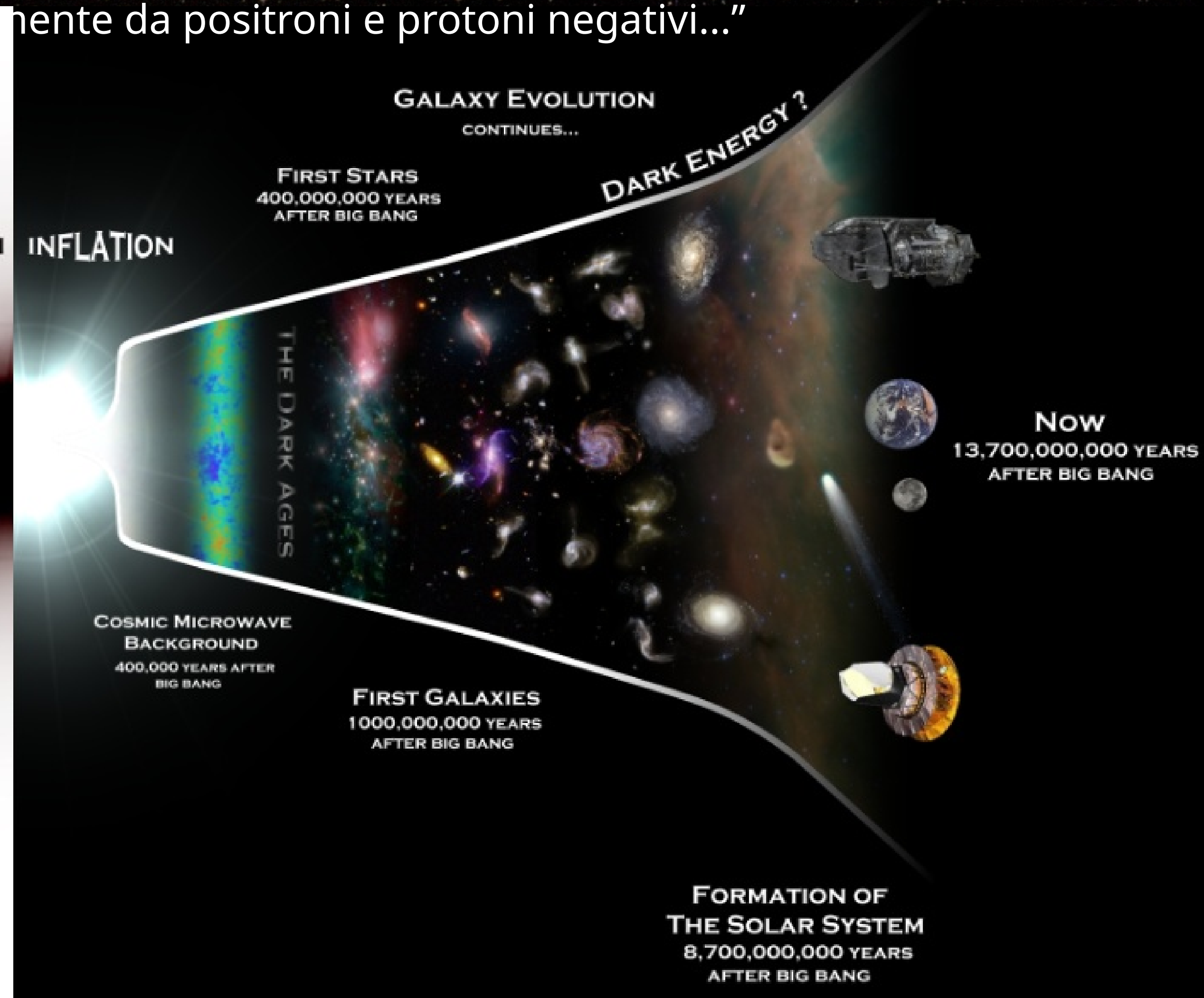
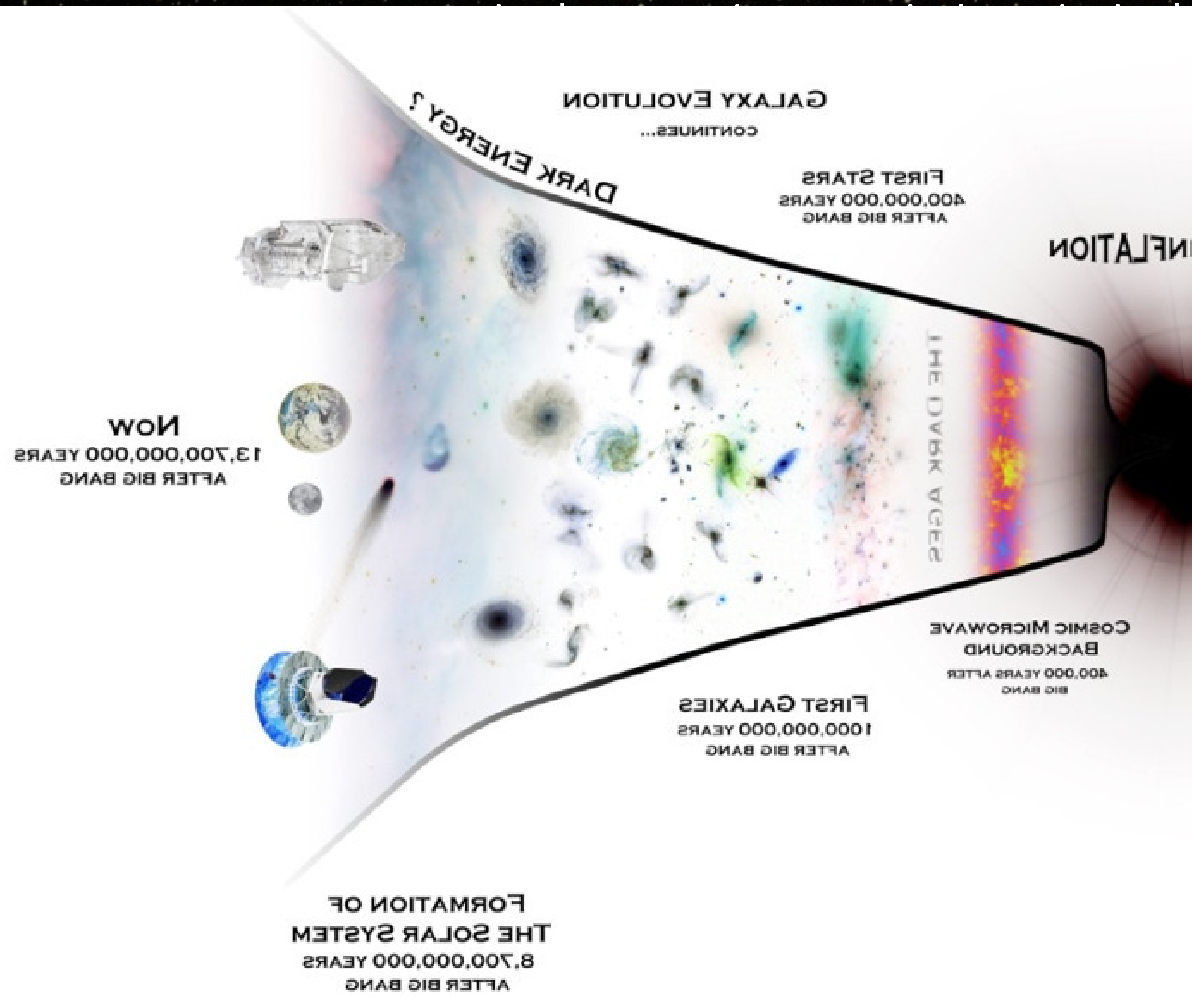


Dov'è finita l'antimateria???

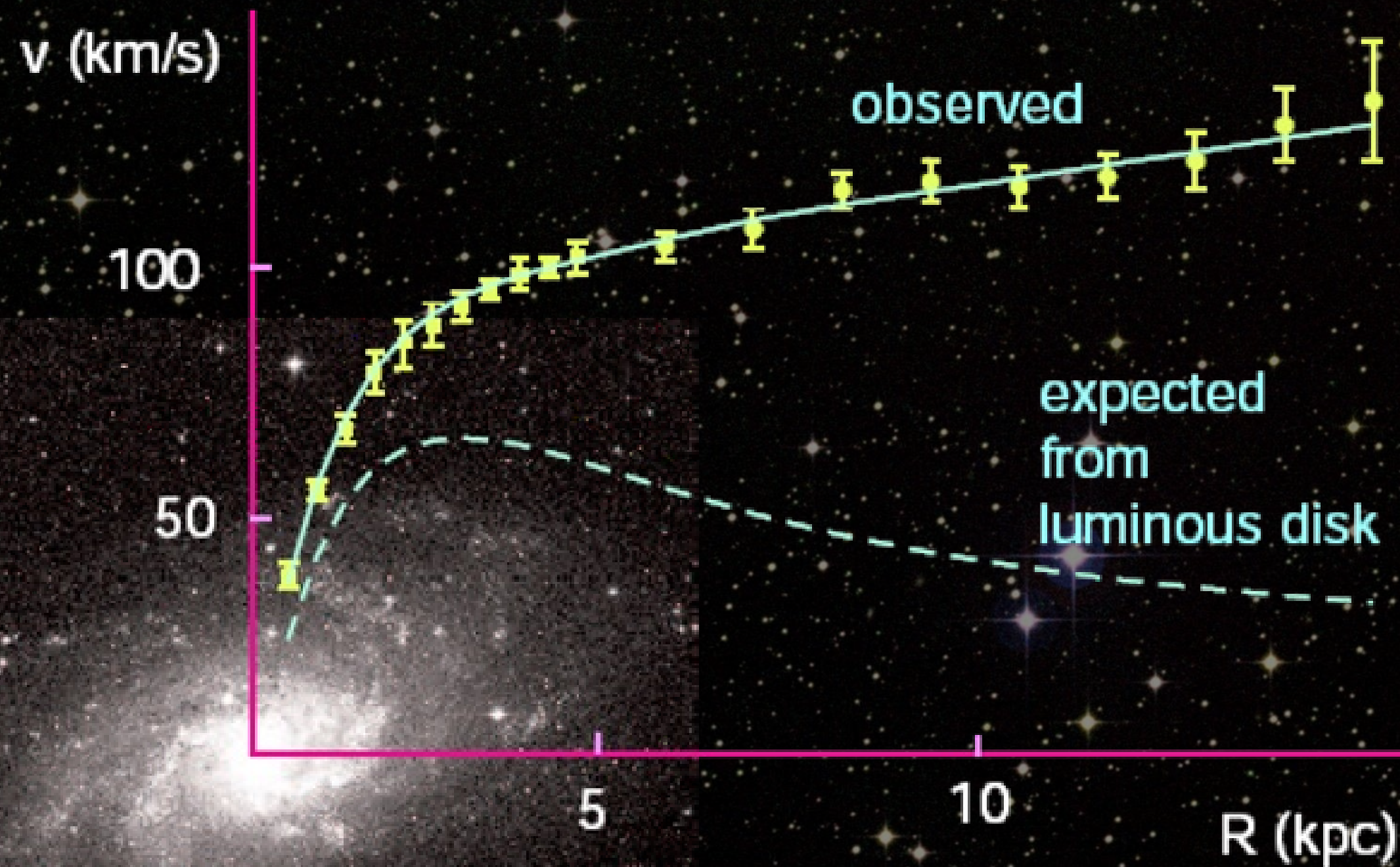
Paul Dirac, discorso in occasione del conferimento del premio Nobel, 12/12/1933

"[...] dobbiamo considerare un puro caso, che la Terra (e presumibilmente l'intero sistema solare) contenga una preponderanza di elettroni negativi e di protoni positivi. Tuttavia, è possibile che per alcune stelle valga il contrario,

mentre da positroni e protoni negativi..."

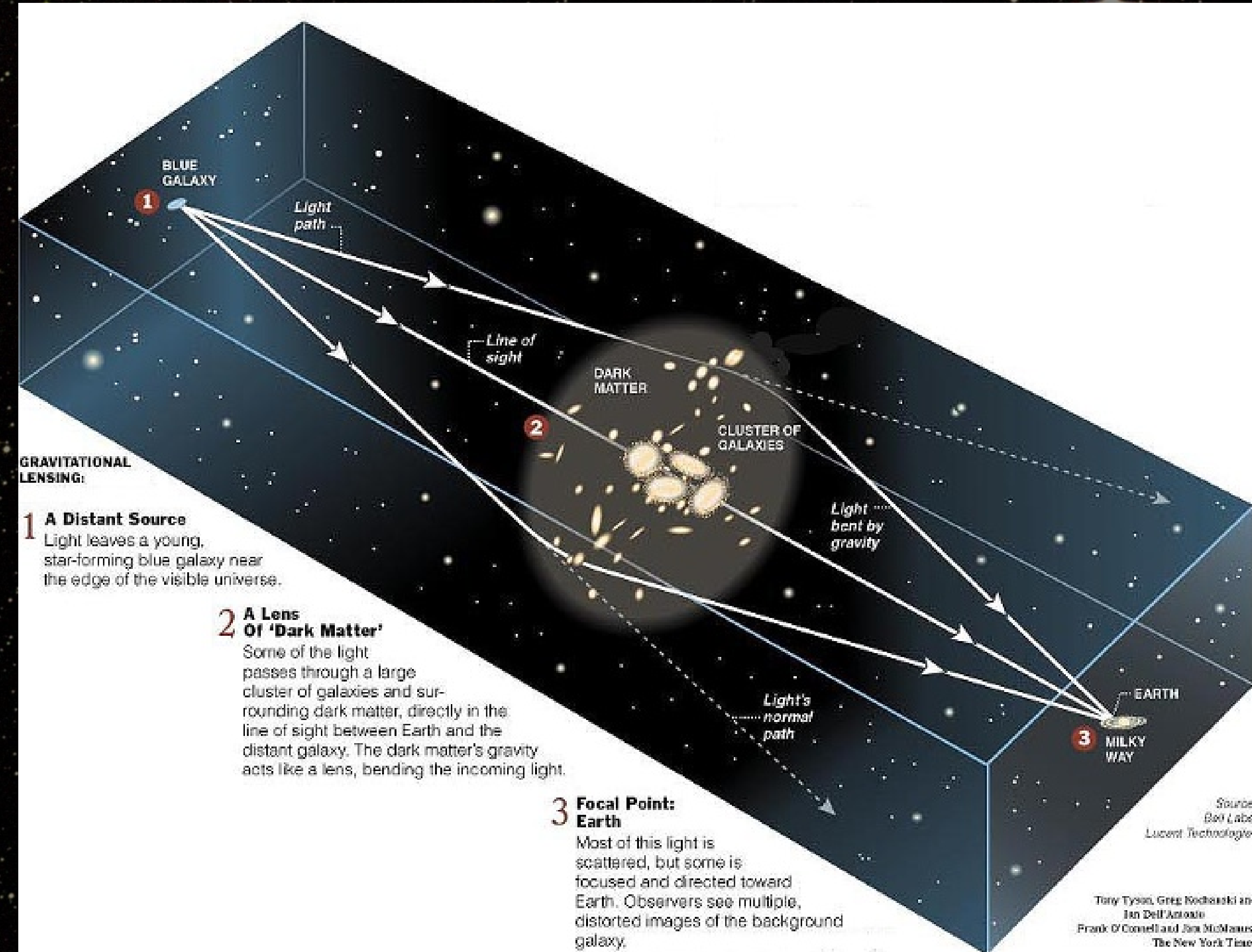


Materia oscura



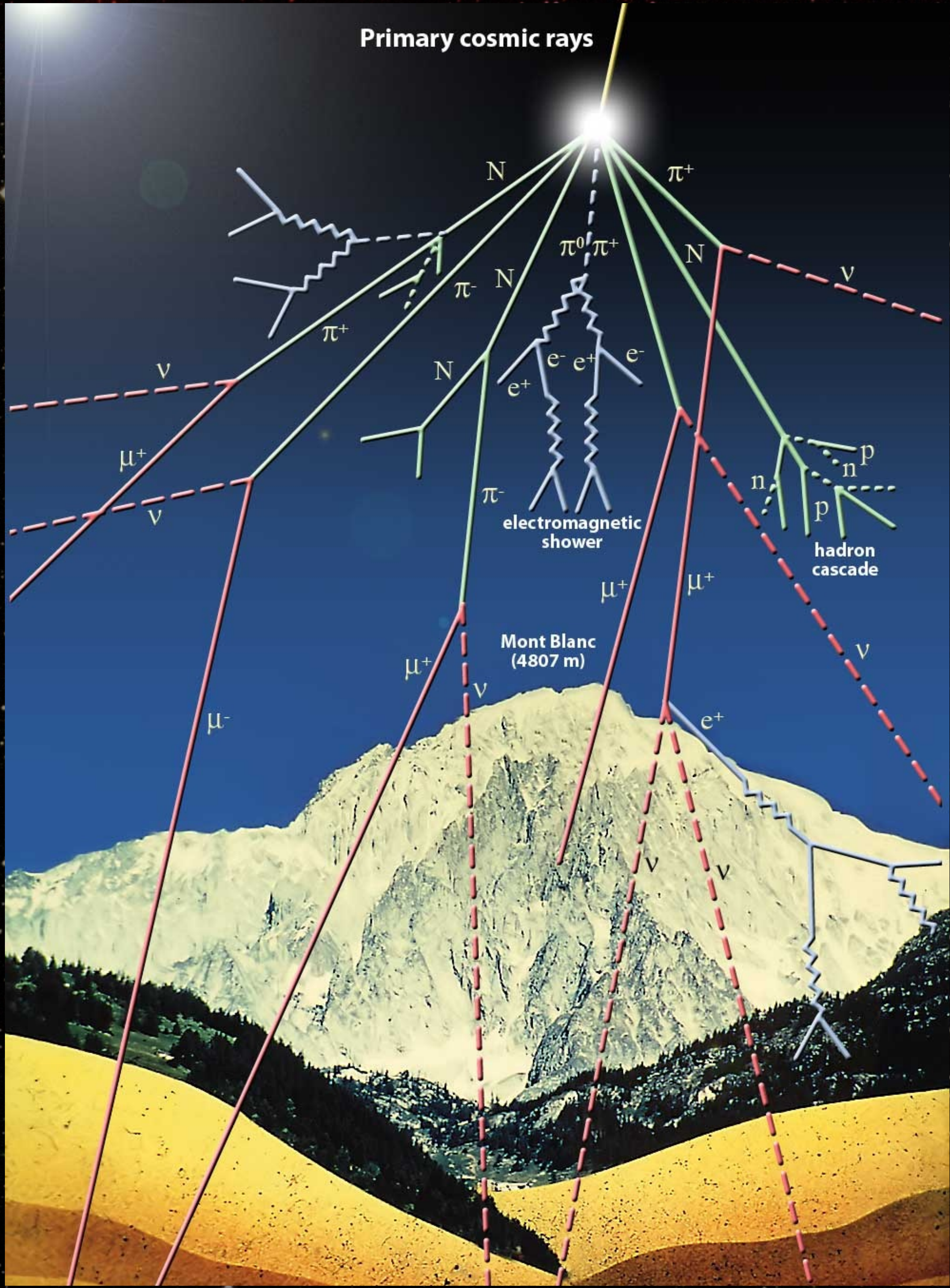
M33 rotation curve

(fig. 1)



La velocità di rotazione degli "oggetti" nelle galassie è in contraddizione con quella prevista assumendo

Un "agglomerato", invisibile, di materia oscura può agire come "lente gravitazionale" e deformare



La maggior parte dei CR non raggiunge terra per via dell'interazione con l'atmosfera



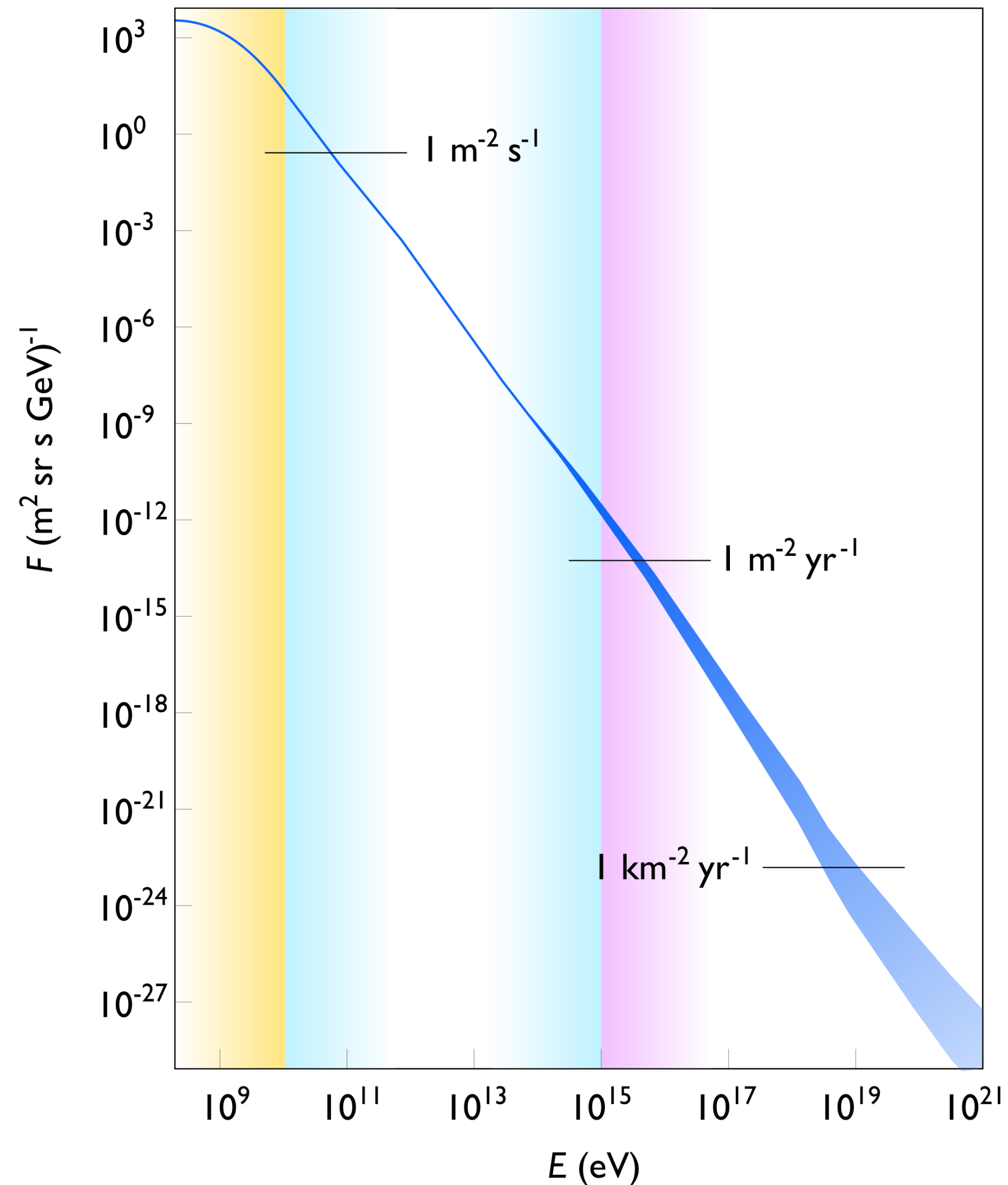
Andiamo sopra l'atmosfera (almeno sopra la troposfera, nella stratosfera, raggiungibile anche via pallone)!



Fisica delle Particelle nello spazio!



Osservazioni iniziali



Quantita' principale: Flusso (n. di particelle per: tempo, superficie, angolo solido, energia)

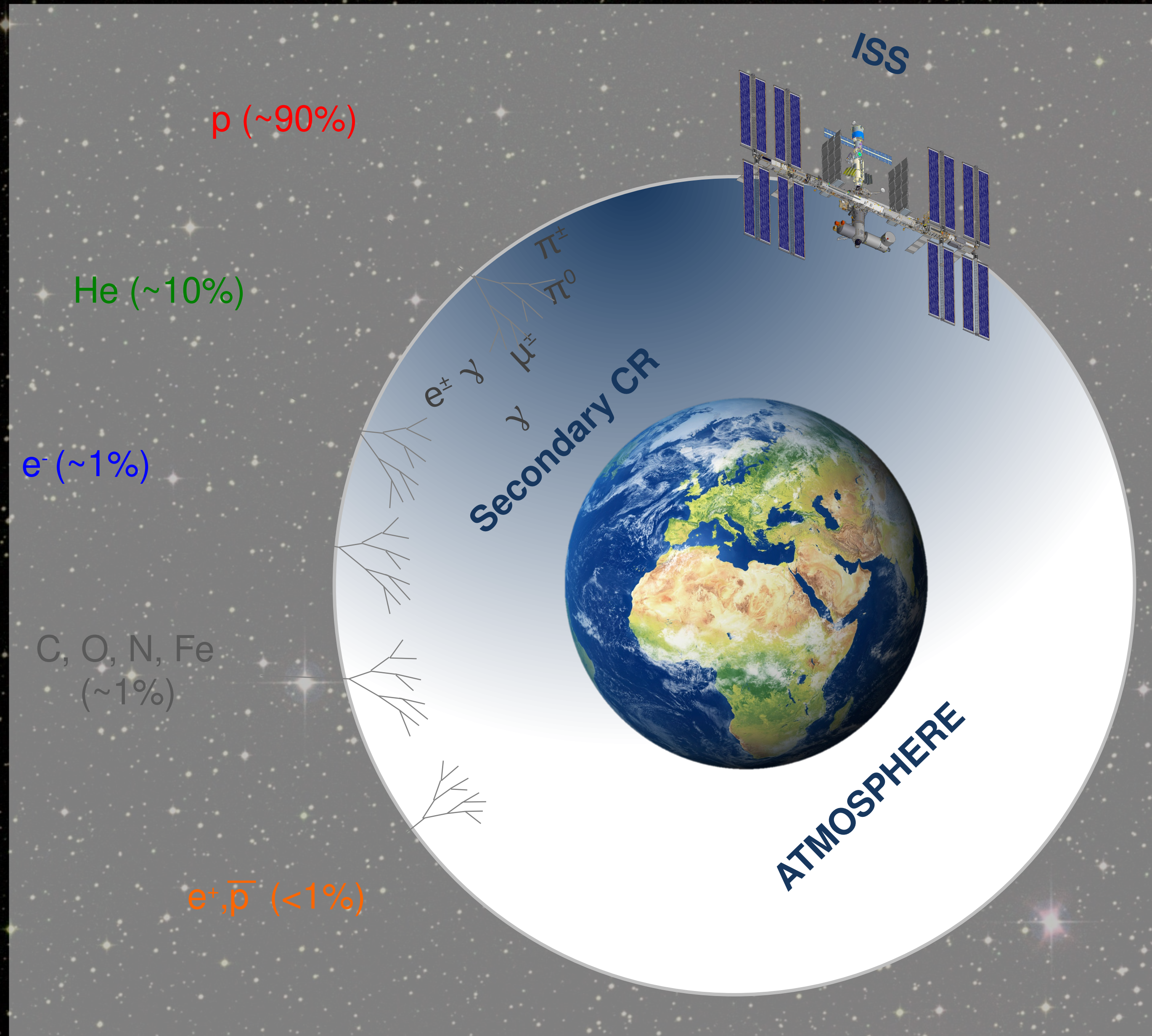
$$f = \frac{1}{A} \frac{dN}{dEdt}$$

A e' una quantita' dipendente dal rivelatore, chiamata solitamente "Accettanza"

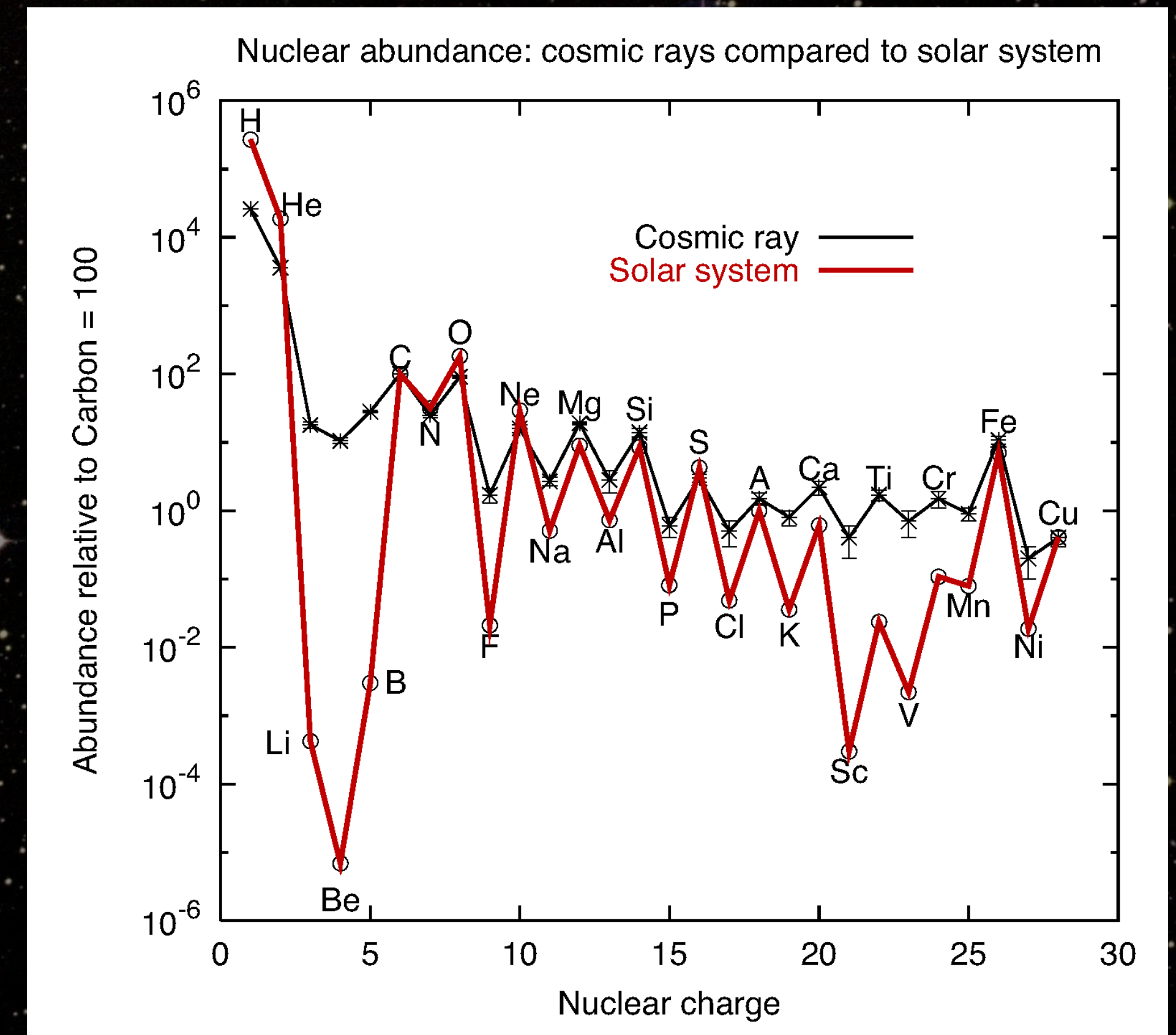
Segue approssimativamente una distribuzione a legge di potenza con indice -2.7

- Sotto ~ 1 MeV: origine solare
- Below ~ 30 GeV: origine galattica, influenzato fortemente dall'ambiente solare: non e' una legge di potenza, ma ci si avvicina...
- Sopra ~ 100 TeV: transizione tra origine galattica e extra-galattica
- Intorno $\sim 10^{21}$ eV: I RC non dovrebbero poter attraversare la galassia (interazione con i fotoni della CMB)

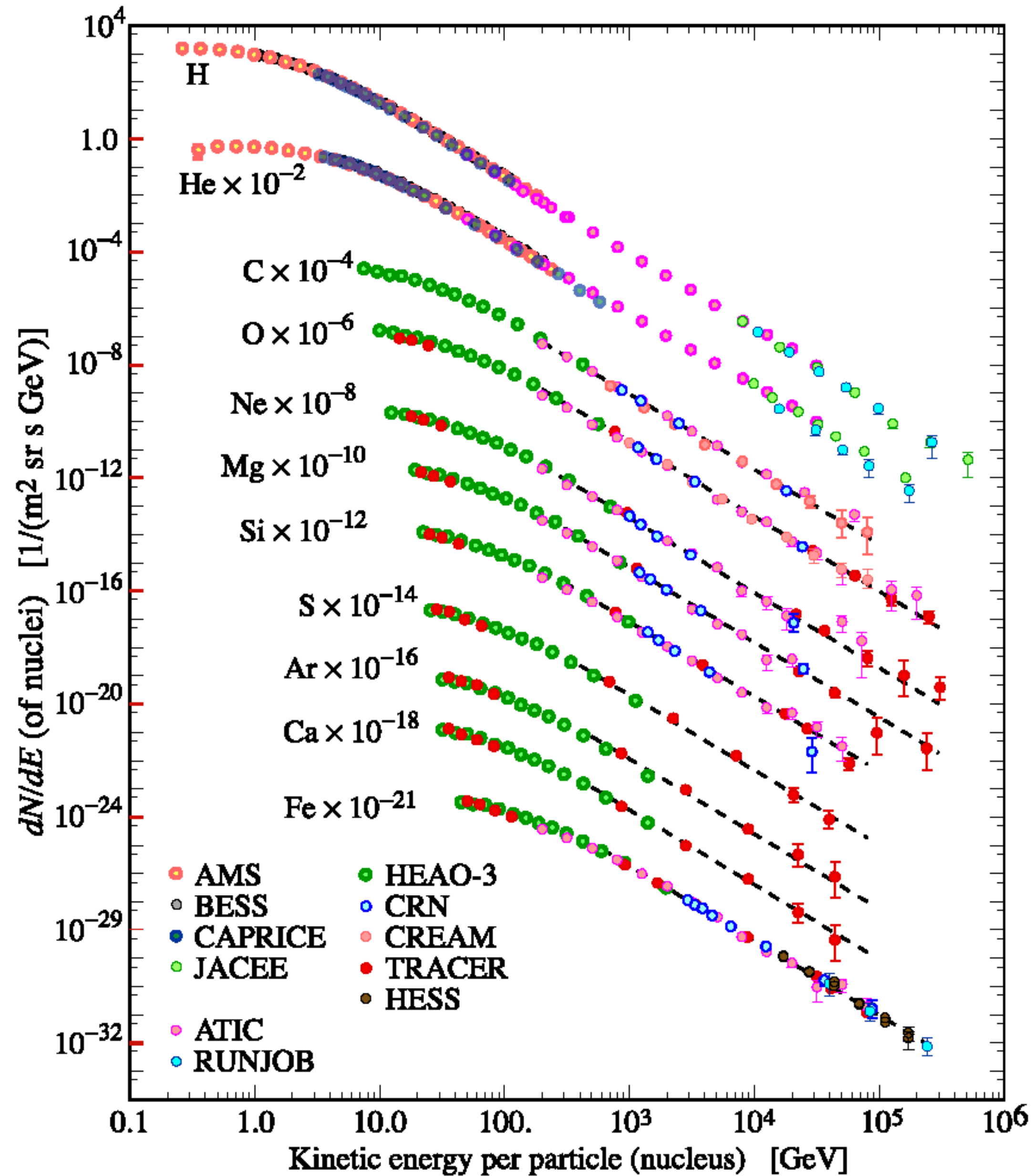
Composizione dei raggi cosmici



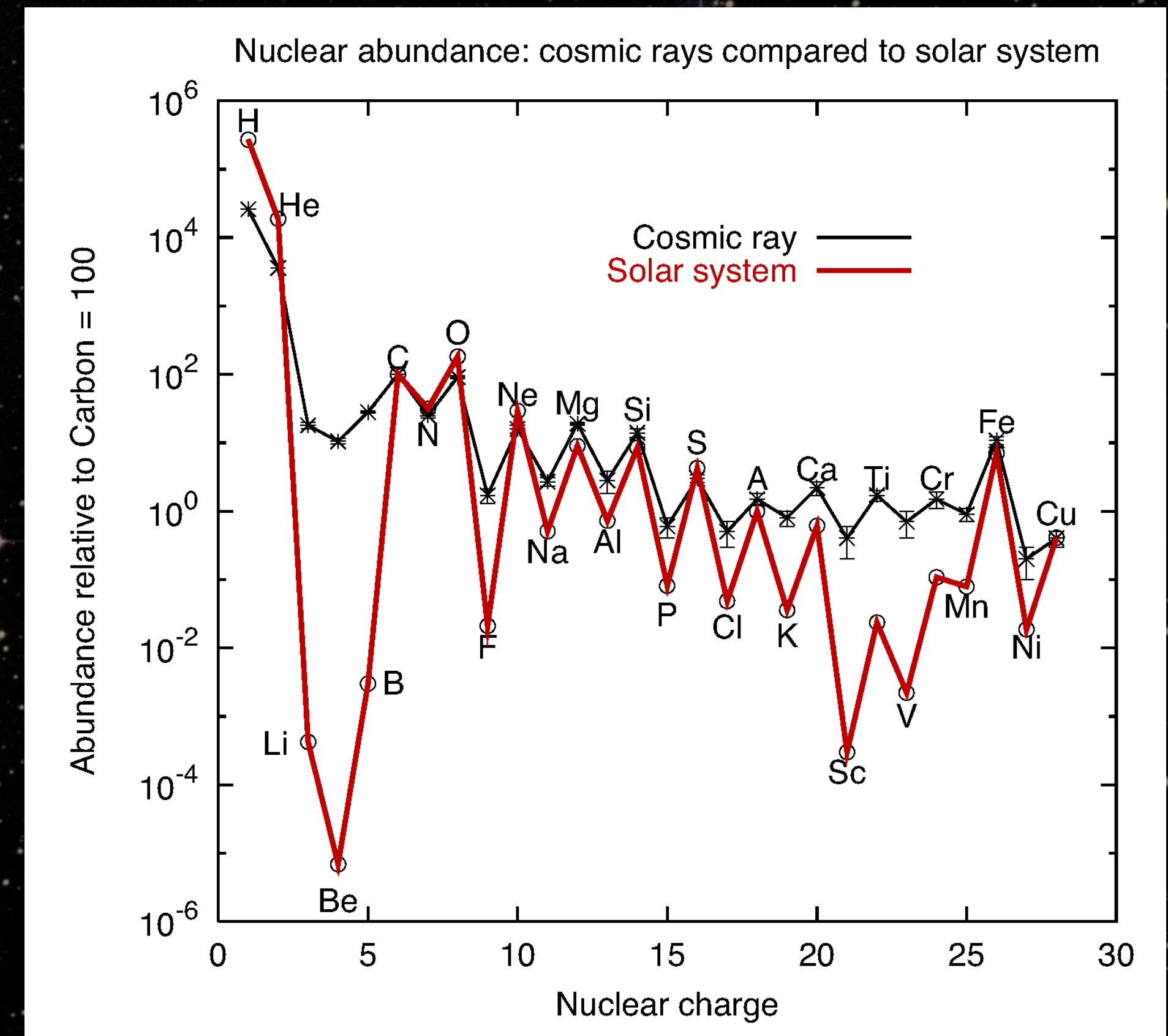
- **Protoni ~88%**
- **nuclei di He ~10 %**
- **~1% nuclei pesanti (principalmente C e O)**
- **~1% elettroni**
- **< 1% raggi γ (fotoni di alta energia), neutrini**
- **anti- p e e^+**



Composizione dei raggi cosmici

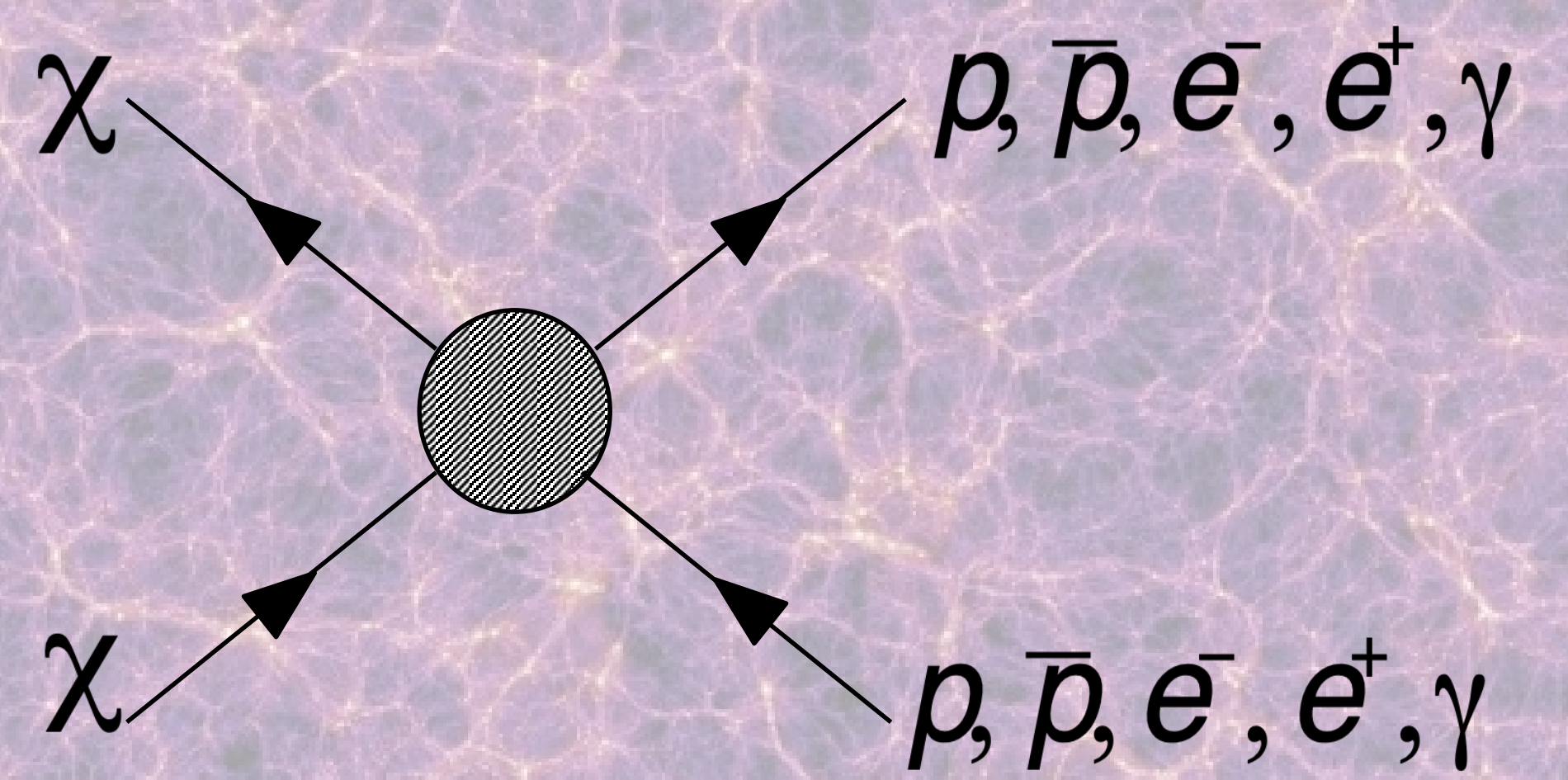


- **Protoni ~88%**
- **nuclei di He ~10 %**
- **~1% nuclei pesanti (principalmente C e O)**
- **~1% elettroni**
- **< 1% raggi γ (fotoni di alta energia), neutrini**
- **anti-p e e^+**

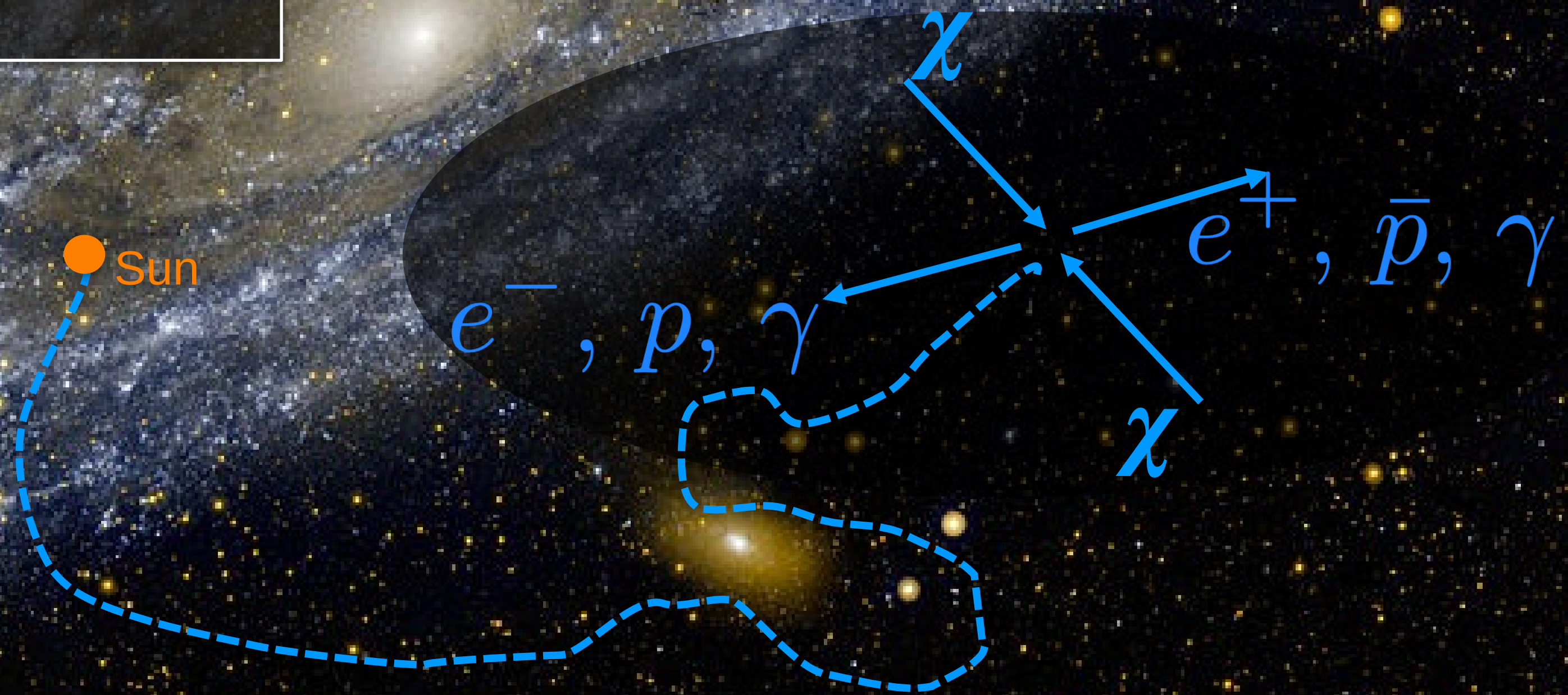
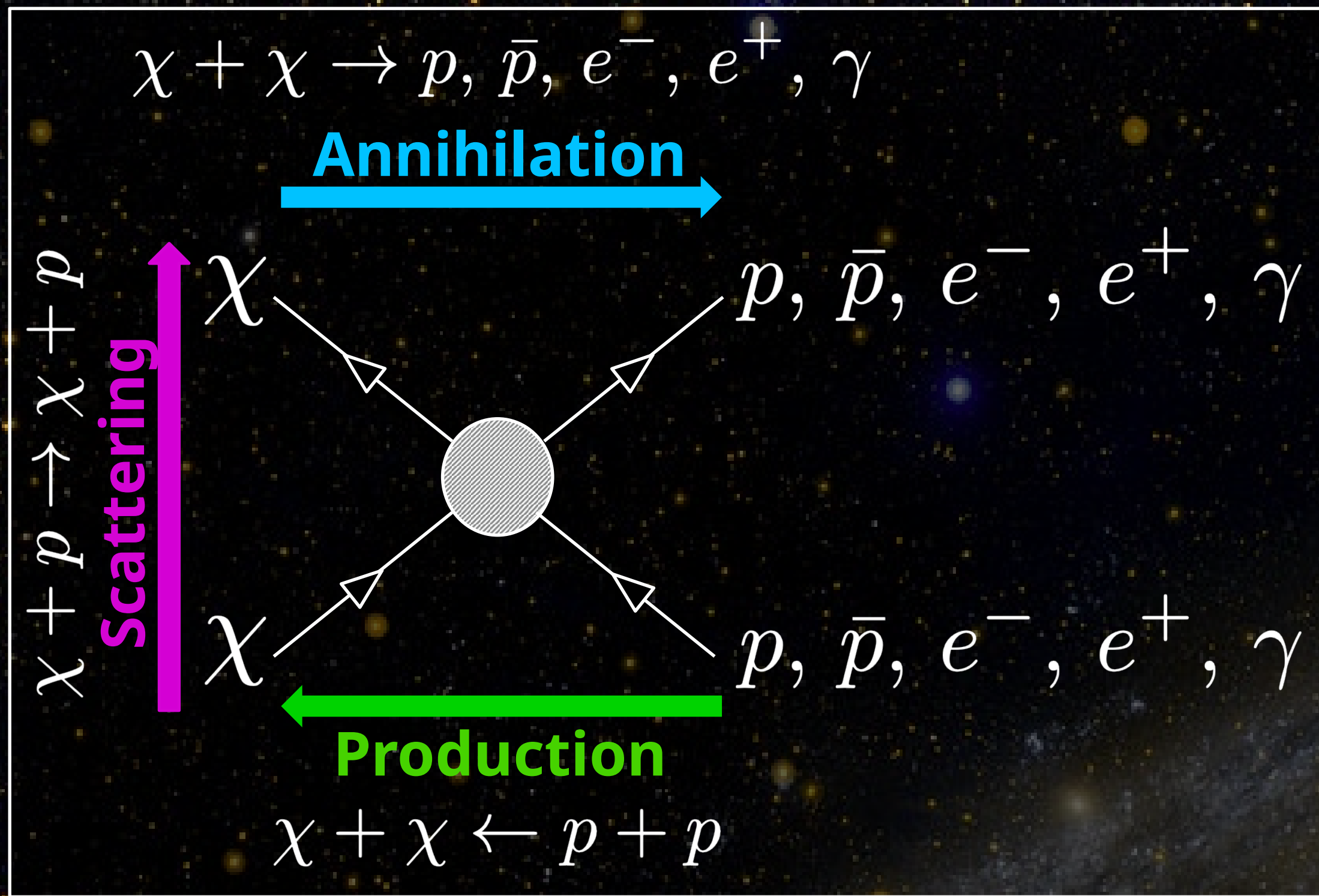


- Fisica fondamentale

- Antimateria primordiale (antinuclei)
- Stati "esotici" (SQM)
- Nuova fisica (materia oscura)

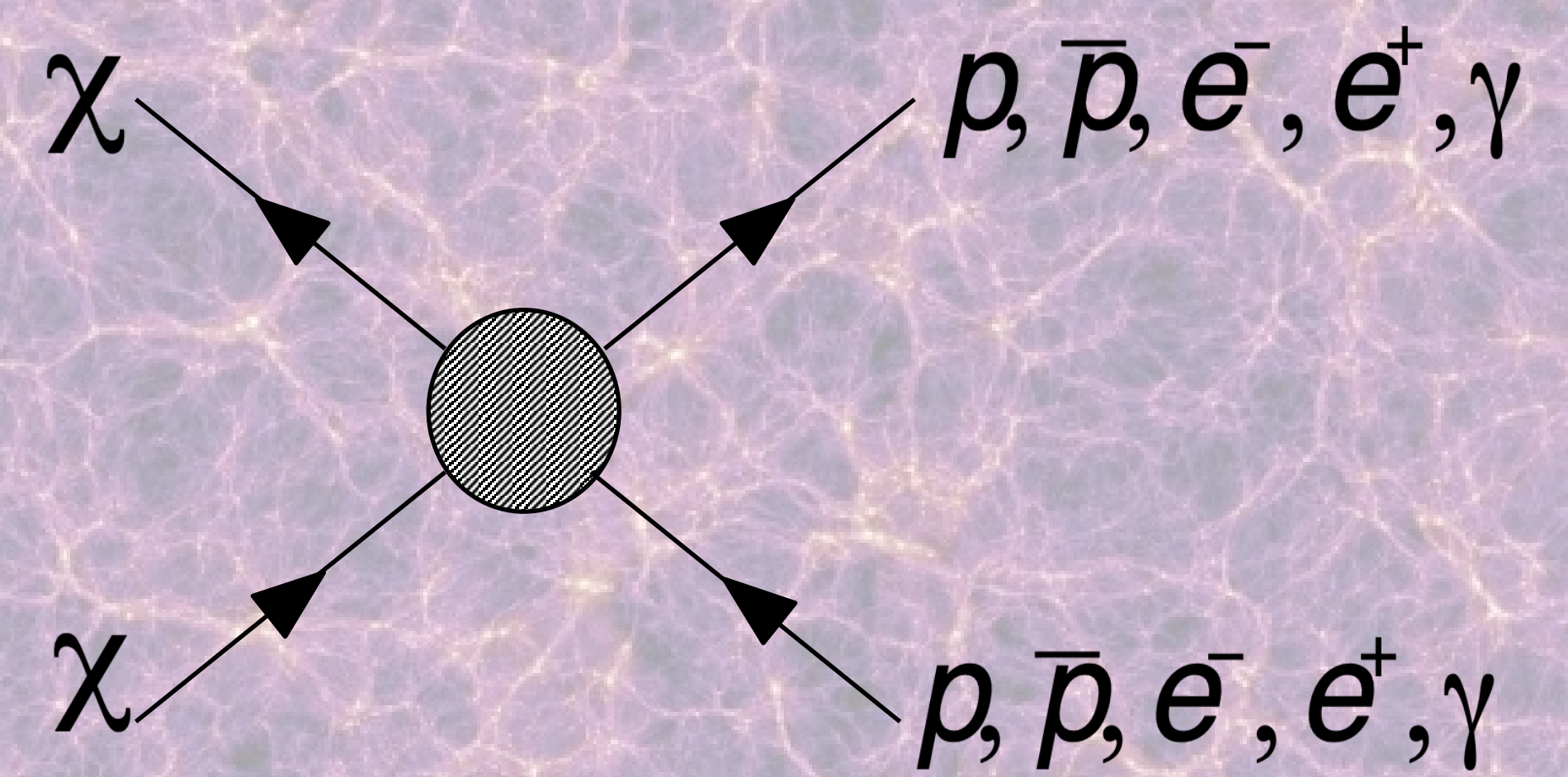


RICERCA DI NUOVA FISICA



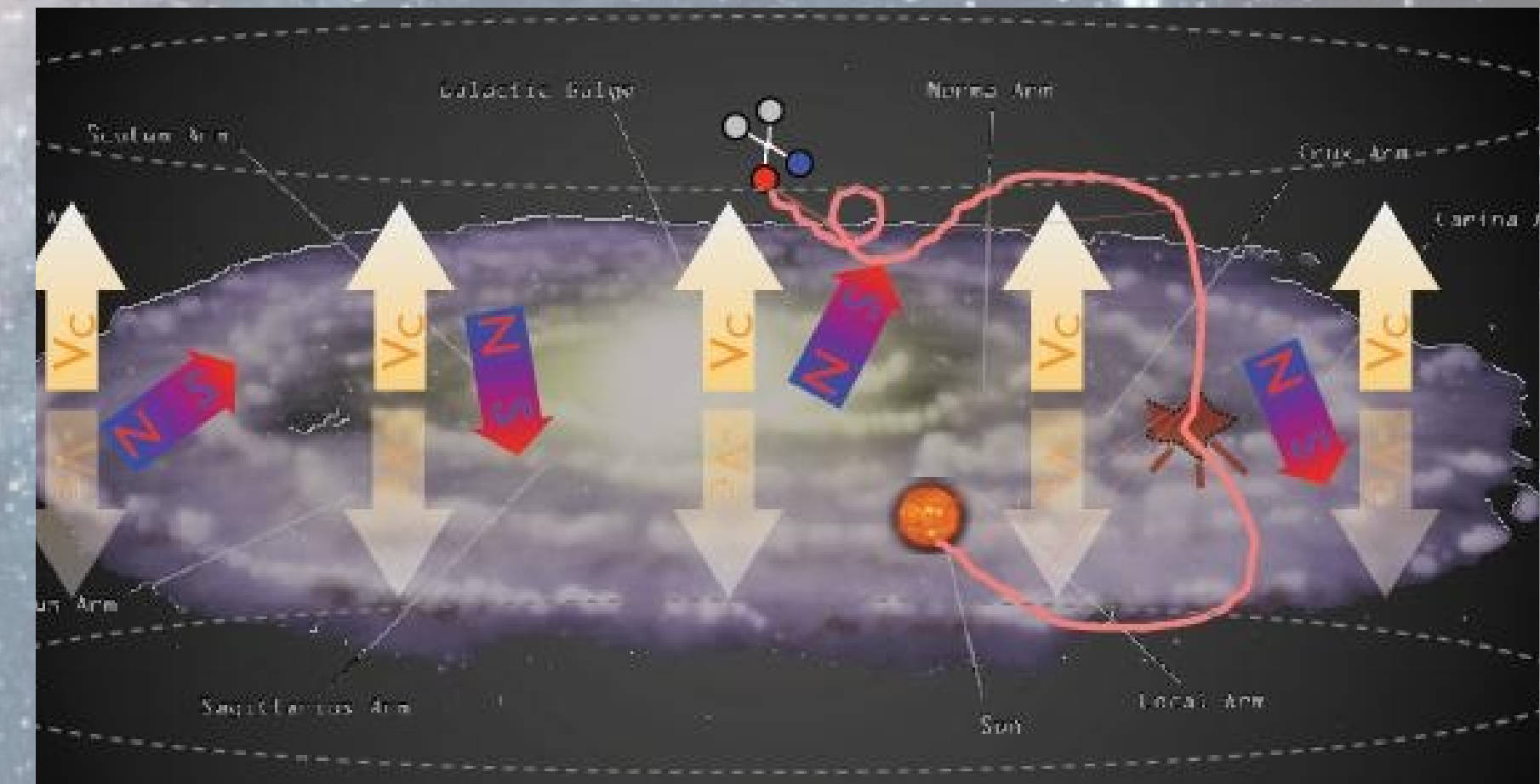
- Fisica fondamentale

- Antimateria primordiale (antinuclei)
- Stati "esotici" (SQM)
- Nuova fisica (materia oscura)

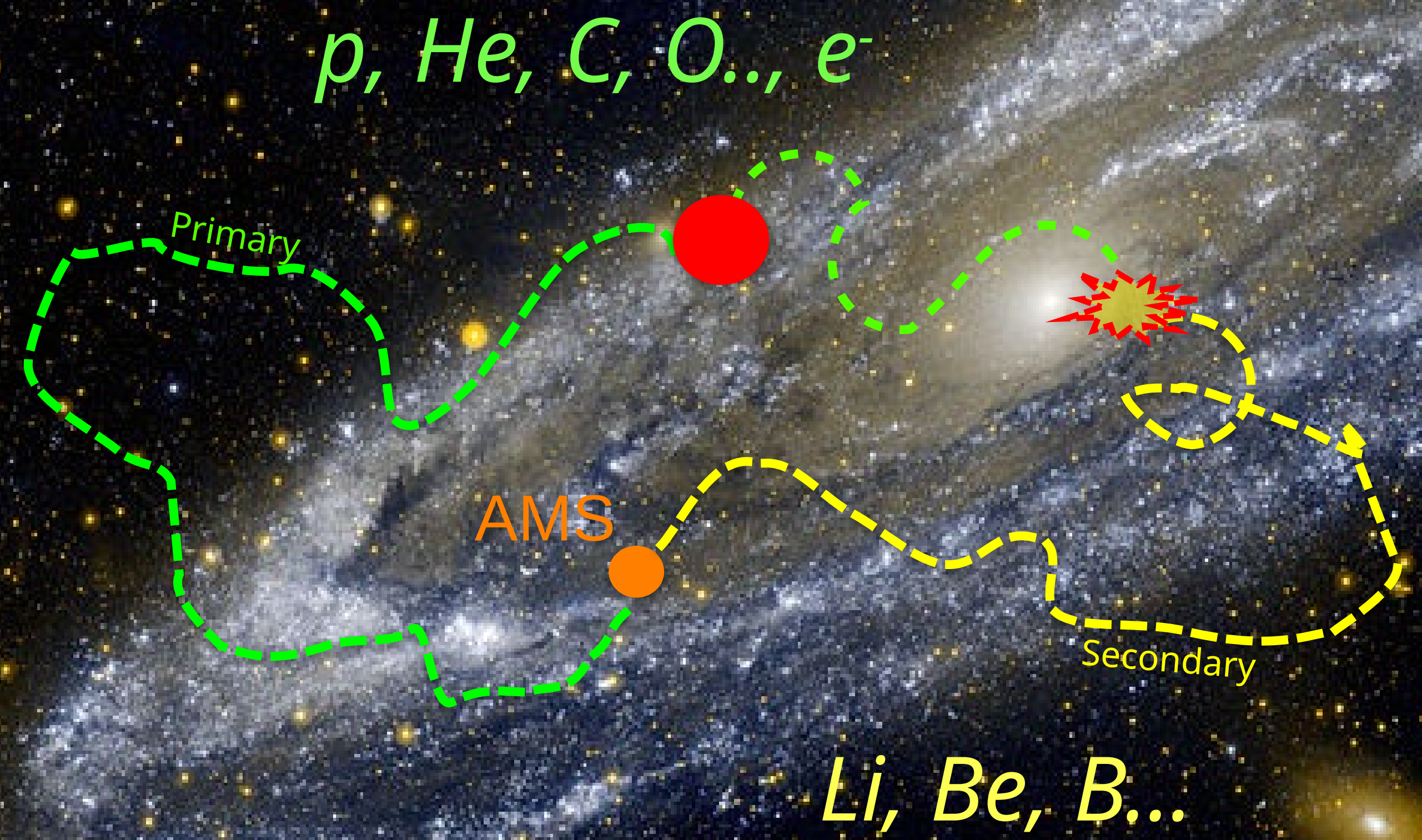


- Fisica dei raggi cosmici

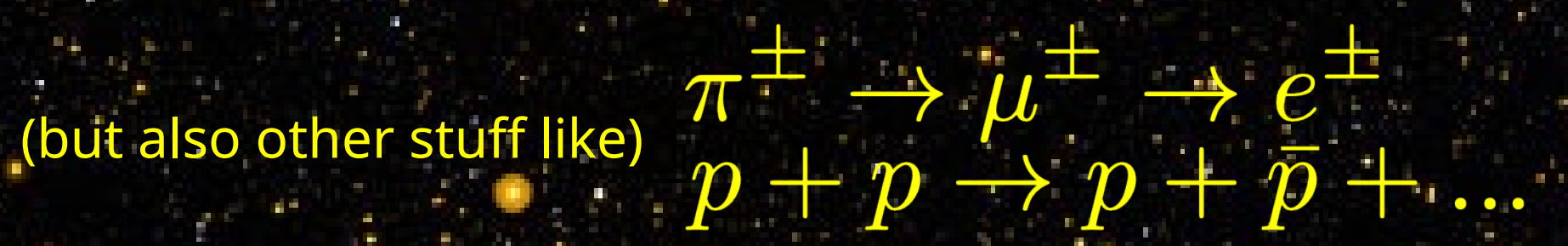
- Origine e accelerazione (r.c. primari: p, He, C, O, ...)
- Propagazione nella Galassia (r.c. secondari: Li, Be, B, ...)



I RAGGI COSMICI NELLA GALASSIA

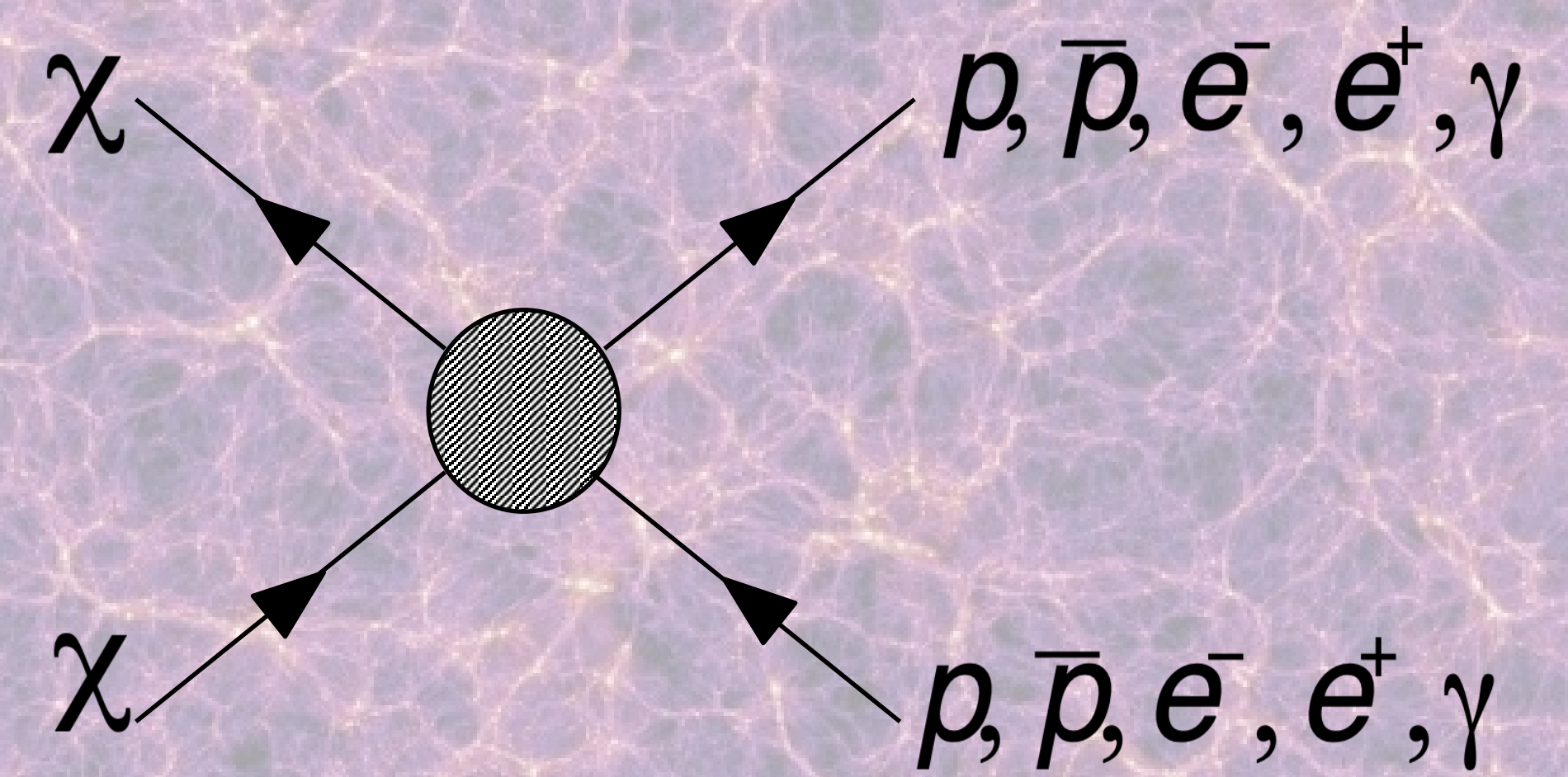


Nell'universo esistono acceleratori di particelle (es. supernovae) che accelerano la materia circostante ad alte energie, superiori a quelle raggiunte finora dagli acceleratori sulla Terra



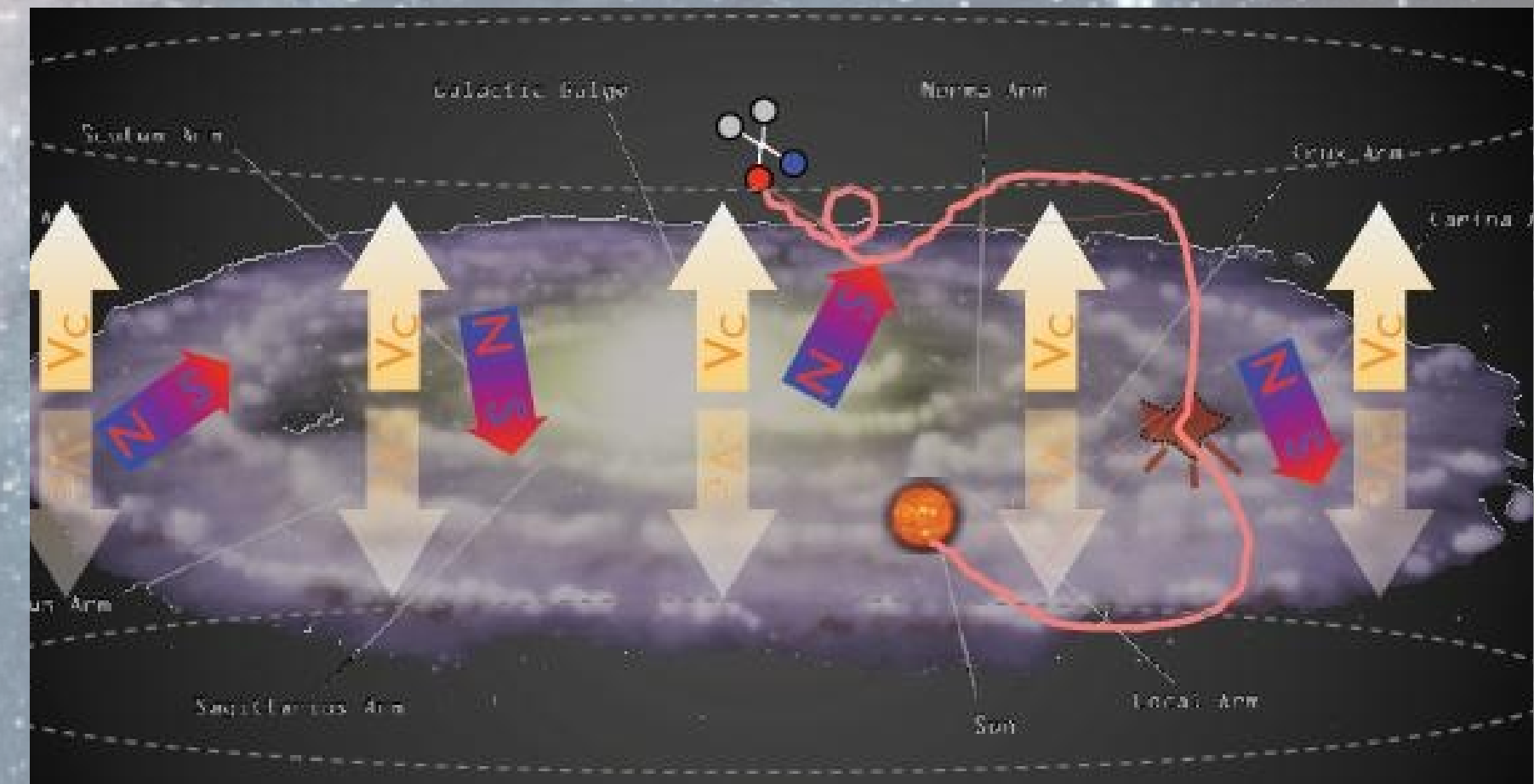
- Fisica fondamentale

- Antimateria primordiale (antinuclei)
- Stati "esotici" (SQM)
- Nuova fisica (materia oscura)



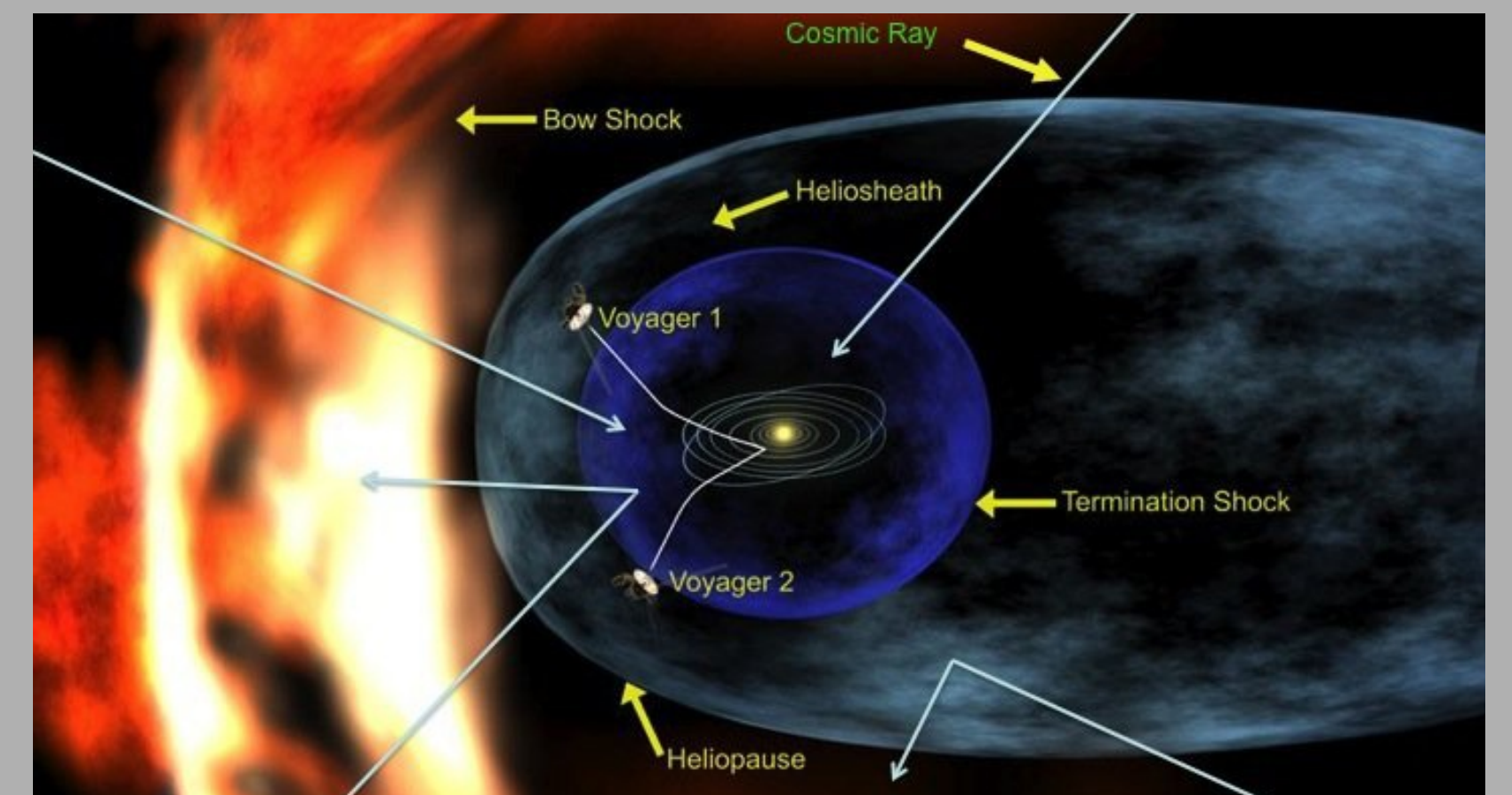
- Fisica dei raggi cosmici

- Origine e accelerazione (r.c. primari: p, He, C, O, ...)
- Propagazione nella Galassia (r.c. secondari: Li, Be, B, ...)

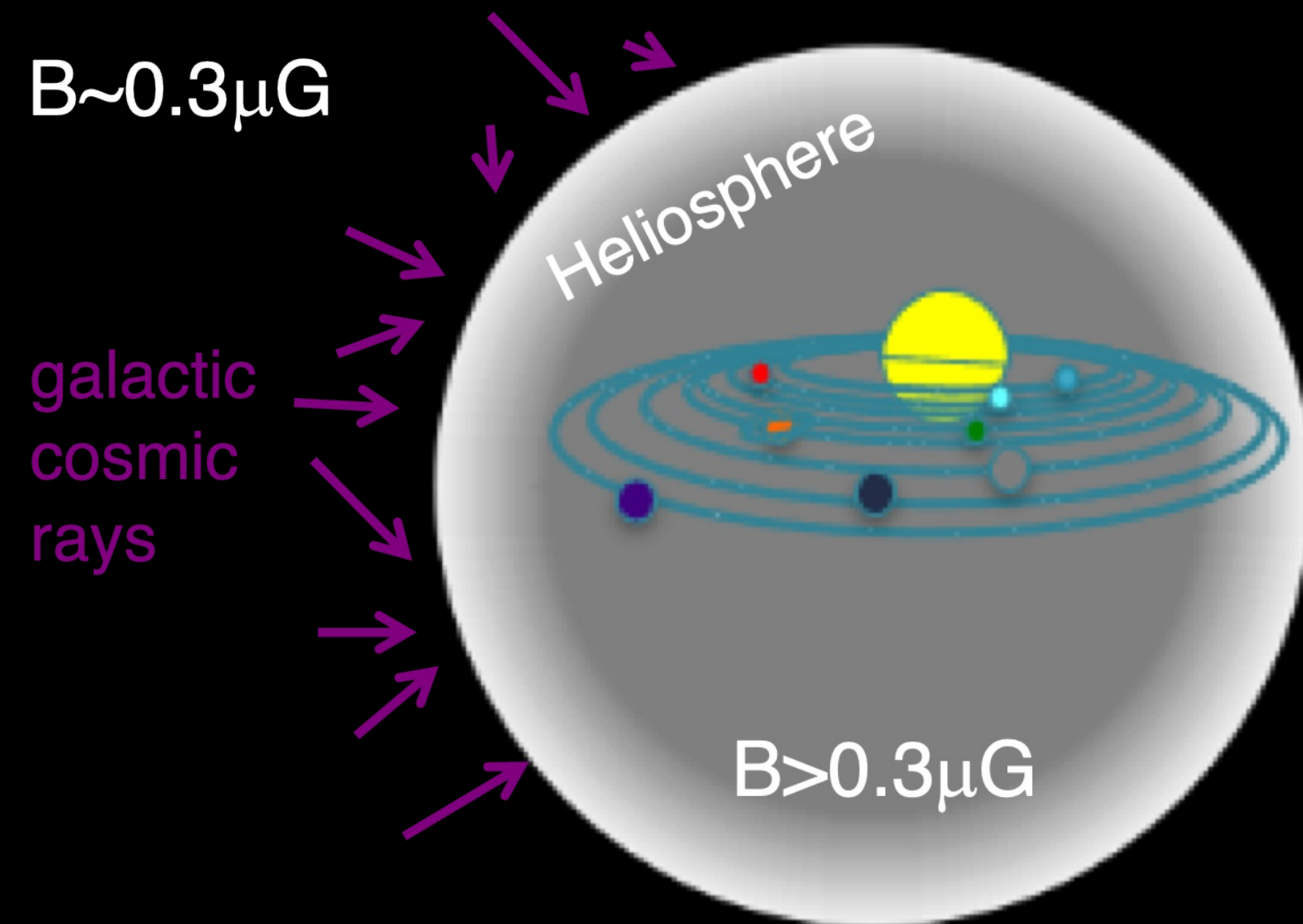


- Fisica solare e geomagnetica

- Propagazione nell'eliosfera
- Effetti del campo geomagnetico



RAGGI COSMICI NELL'ELIOSFERA

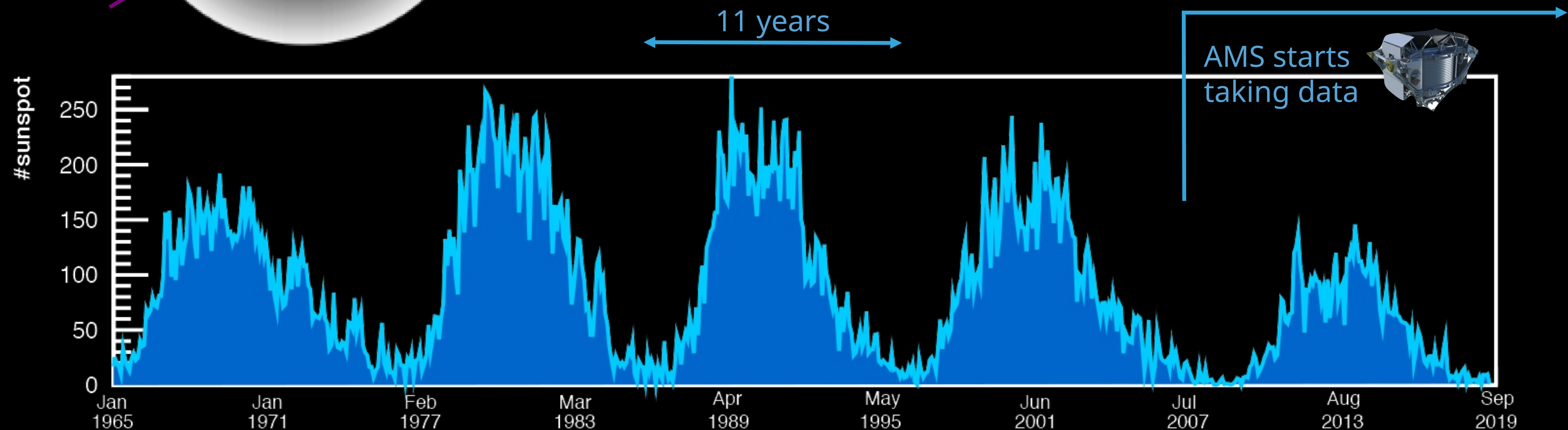


1. Effetti su scale temporali lunghe (~anni):

- ▶ variazione di intensità dei RC
- ▶ dipendenza dal segno della carica:
 - ⊙ massimo solare: diffusione
 - ⊙ minimo solare: diffusione+drift magnetico

2. Effetti su scale temporali brevi (~giorni):

- ▶ Forbush decrease & Solar Energetic Particles (SEP)



RAGGI COSMICI NELL'ELIOSFERA

