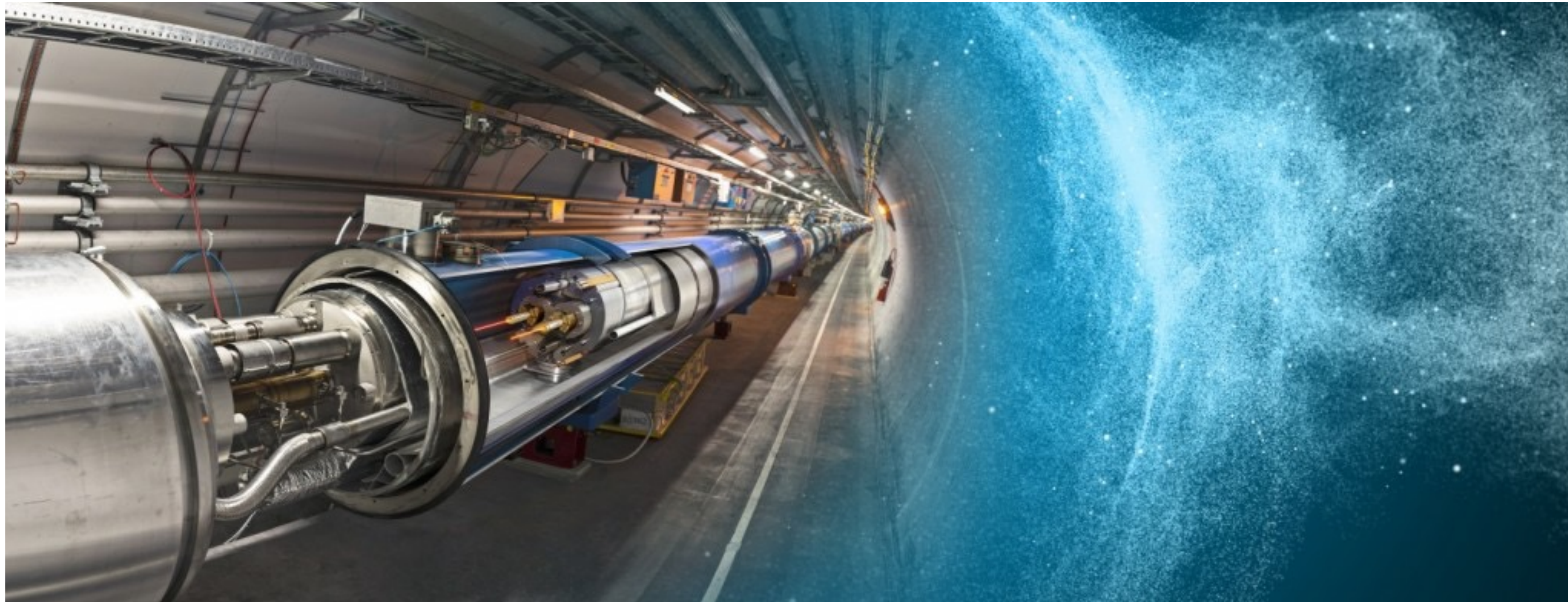


E luce fu... ma non troppo! Cos'è la materia oscura?

Mattia Di Mauro



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
SEZIONE DI TORINO



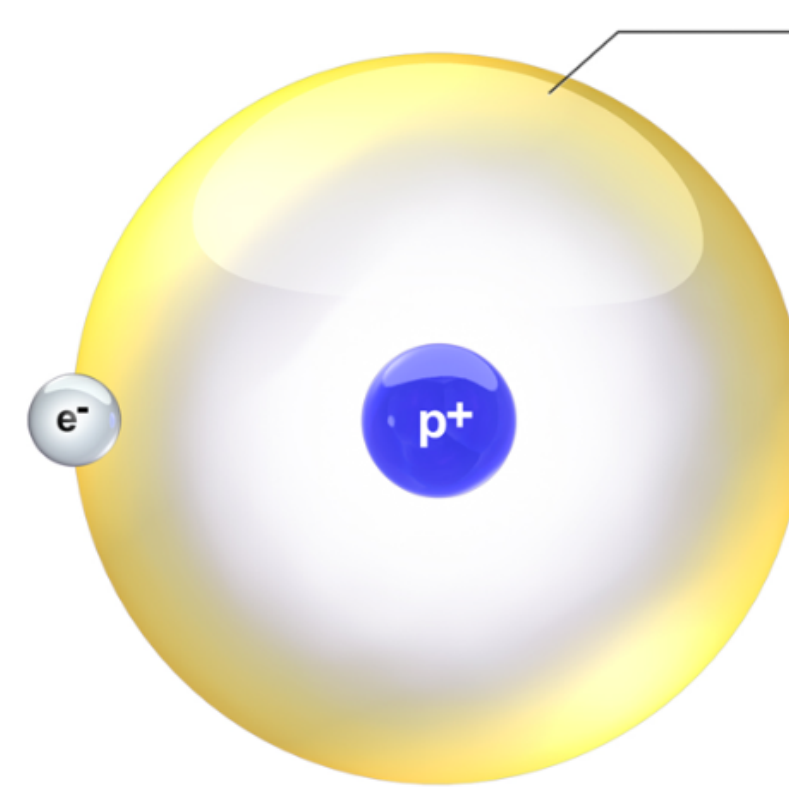
Incontro Art and Science Liceo Copernico 18 Marzo 2025

Via lattea



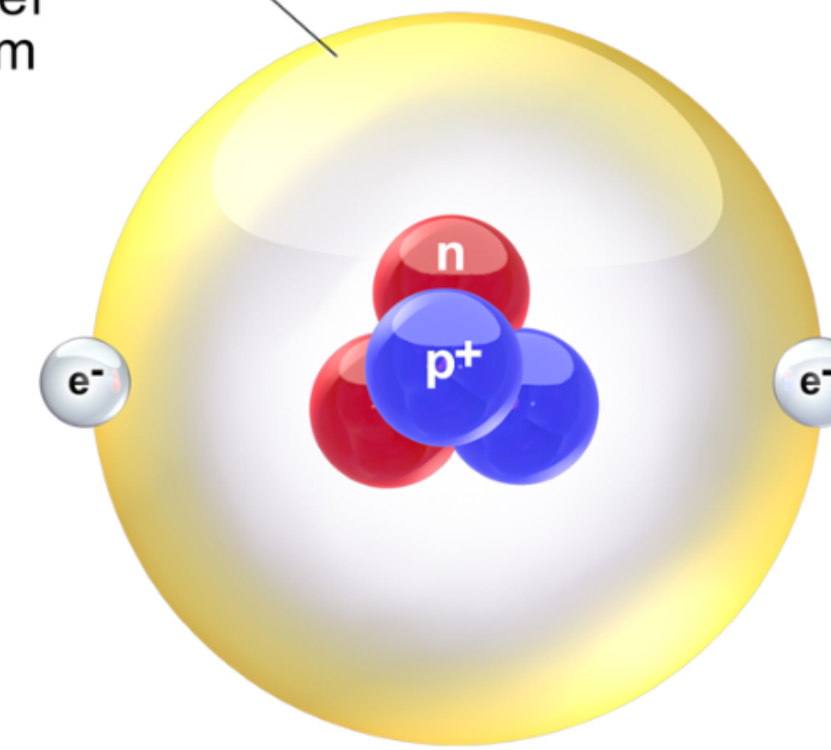
ph. O. R. Alberti

Elementi più leggeri

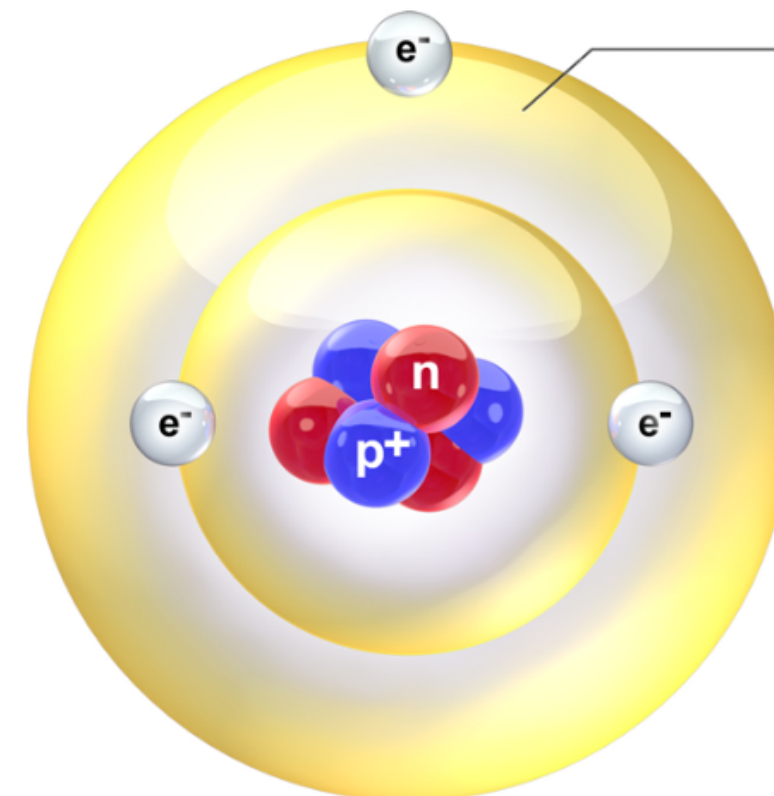


Hydrogen, H
Atomic number: 1
Mass number: 1
1 electron

The first energy level
can hold a maximum
of two electrons.

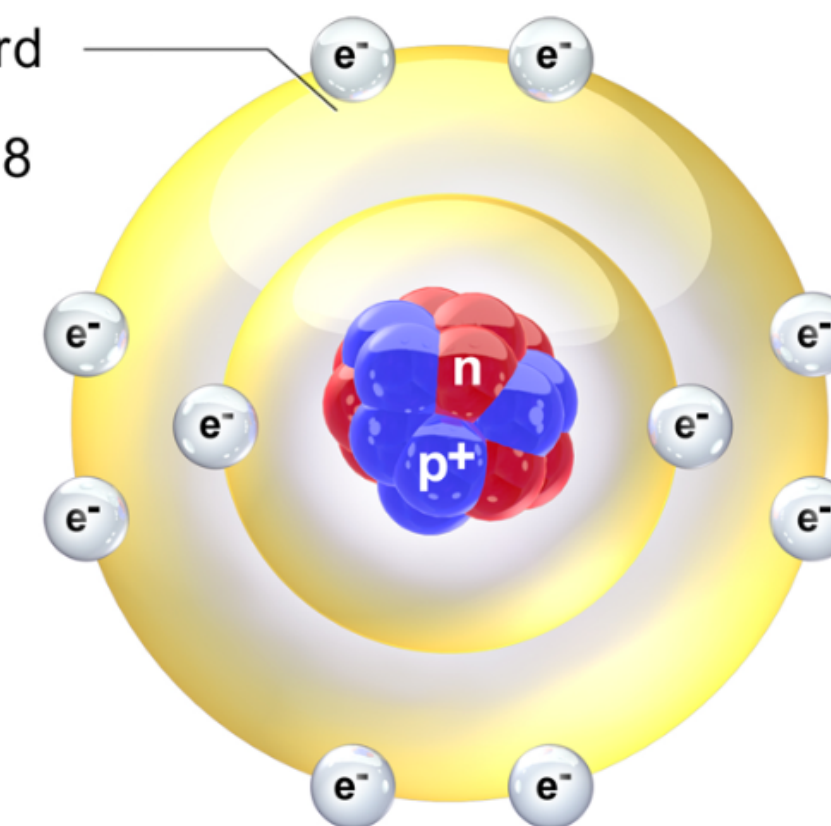


Helium, He
Atomic number: 2
Mass number: 4
(2 protons + 2 neutrons)
2 electrons



Lithium, Li
Atomic number: 3
Mass number: 6
(3 protons + 3 neutrons)
3 electrons

The second and third
energy levels can
each contain up to 8
electrons.

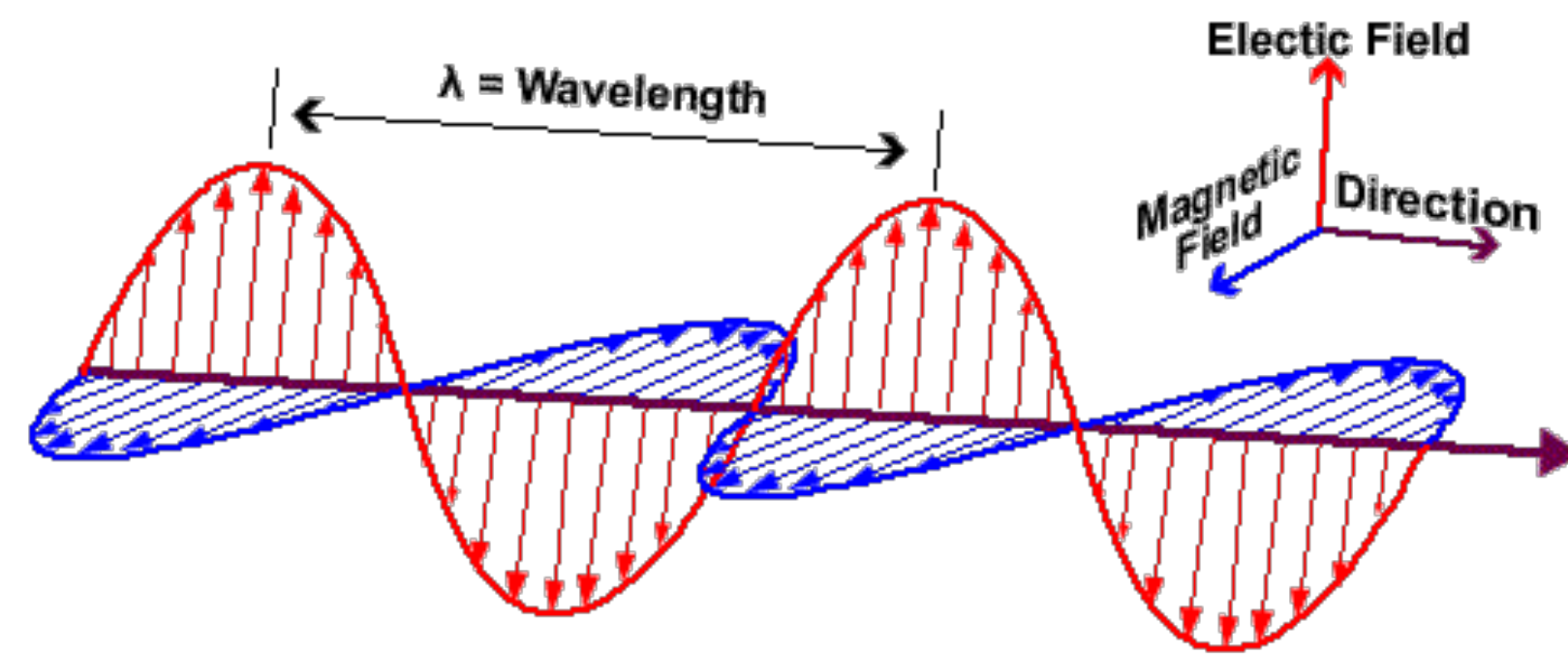


Neon, Ne
Atomic number: 10
Mass number: 20
(10 protons + 10 neutrons)
10 electrons

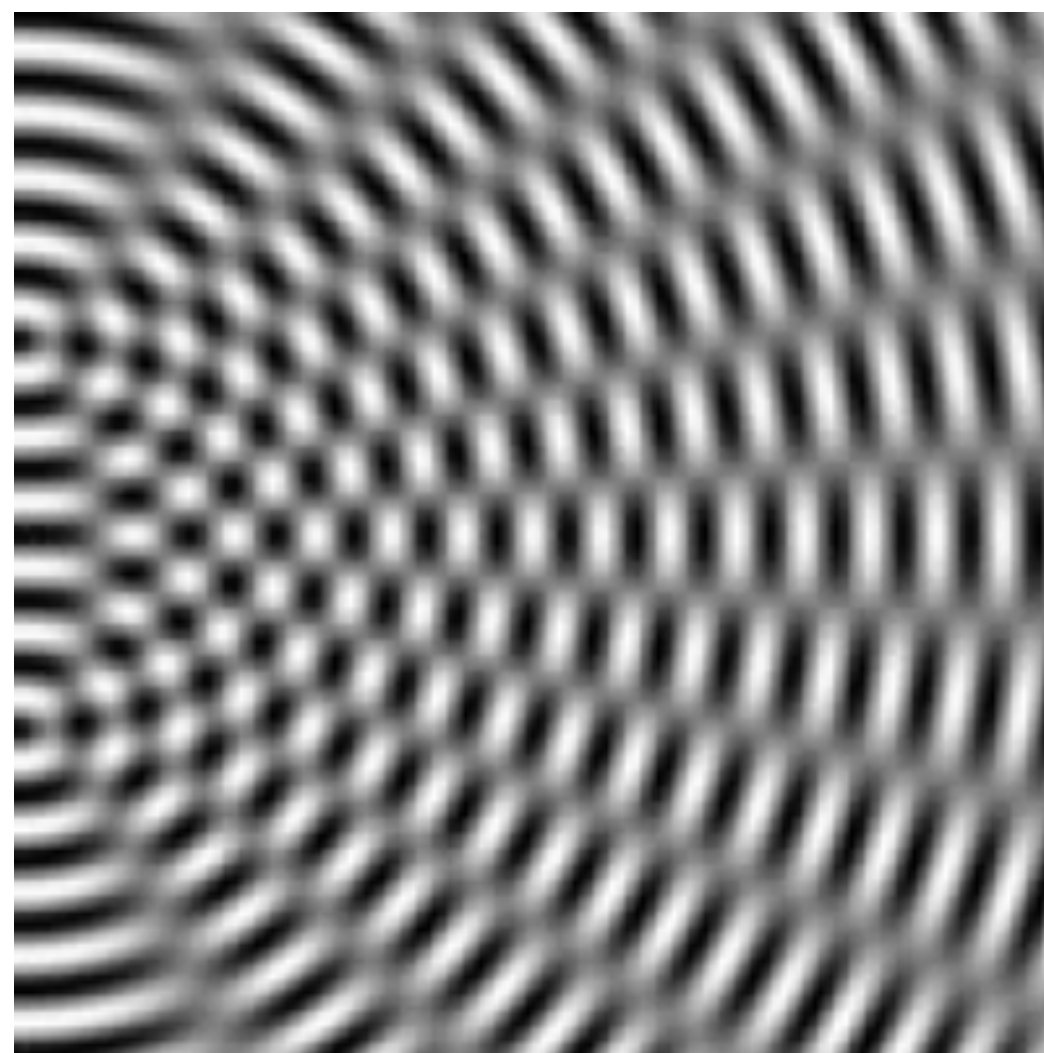
Fotone come particelle ed onda

Onda elettromagnetica

Un fotone è un'onda elettromagnetica con campi elettrici e magnetici che oscillano in direzioni perpendicolari, mentre l'onda si muove alla velocità della luce.

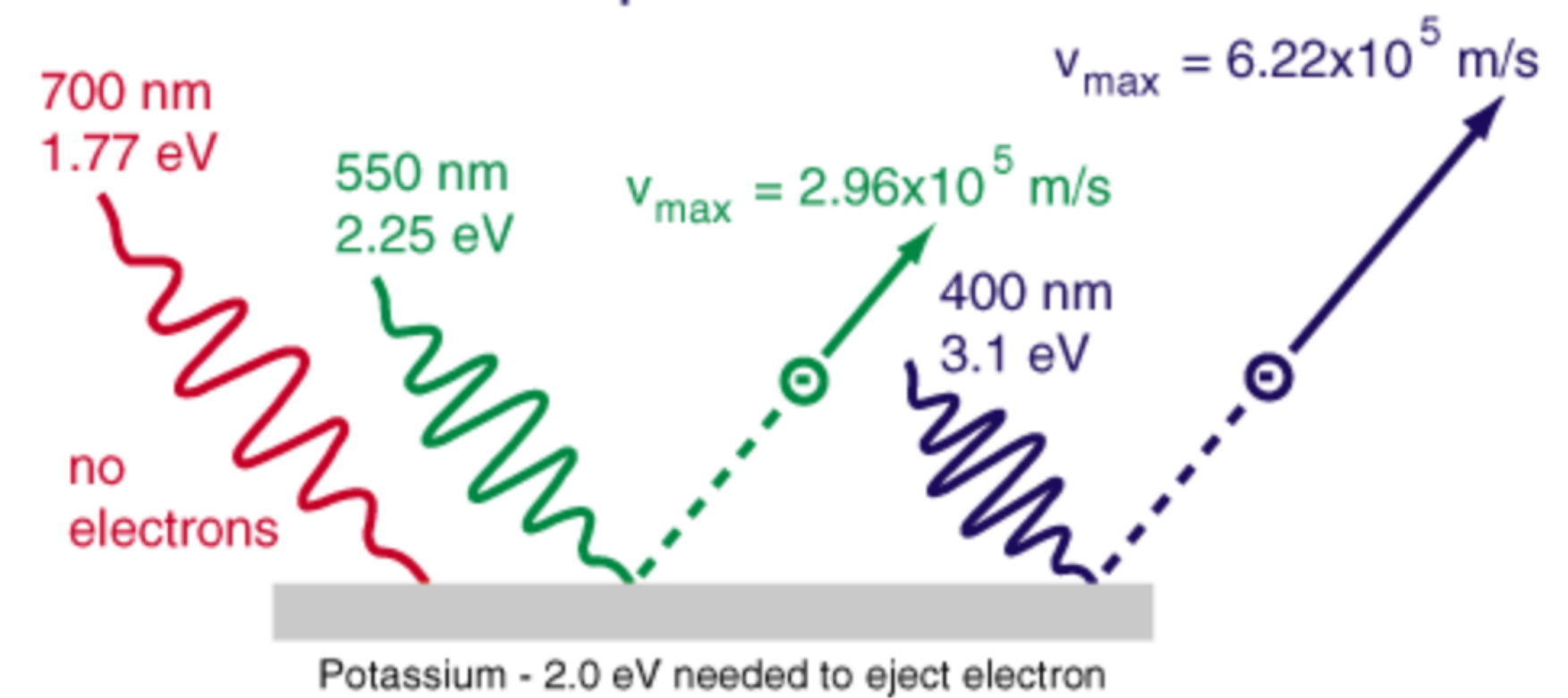


- **Interferenza:** double split experiment

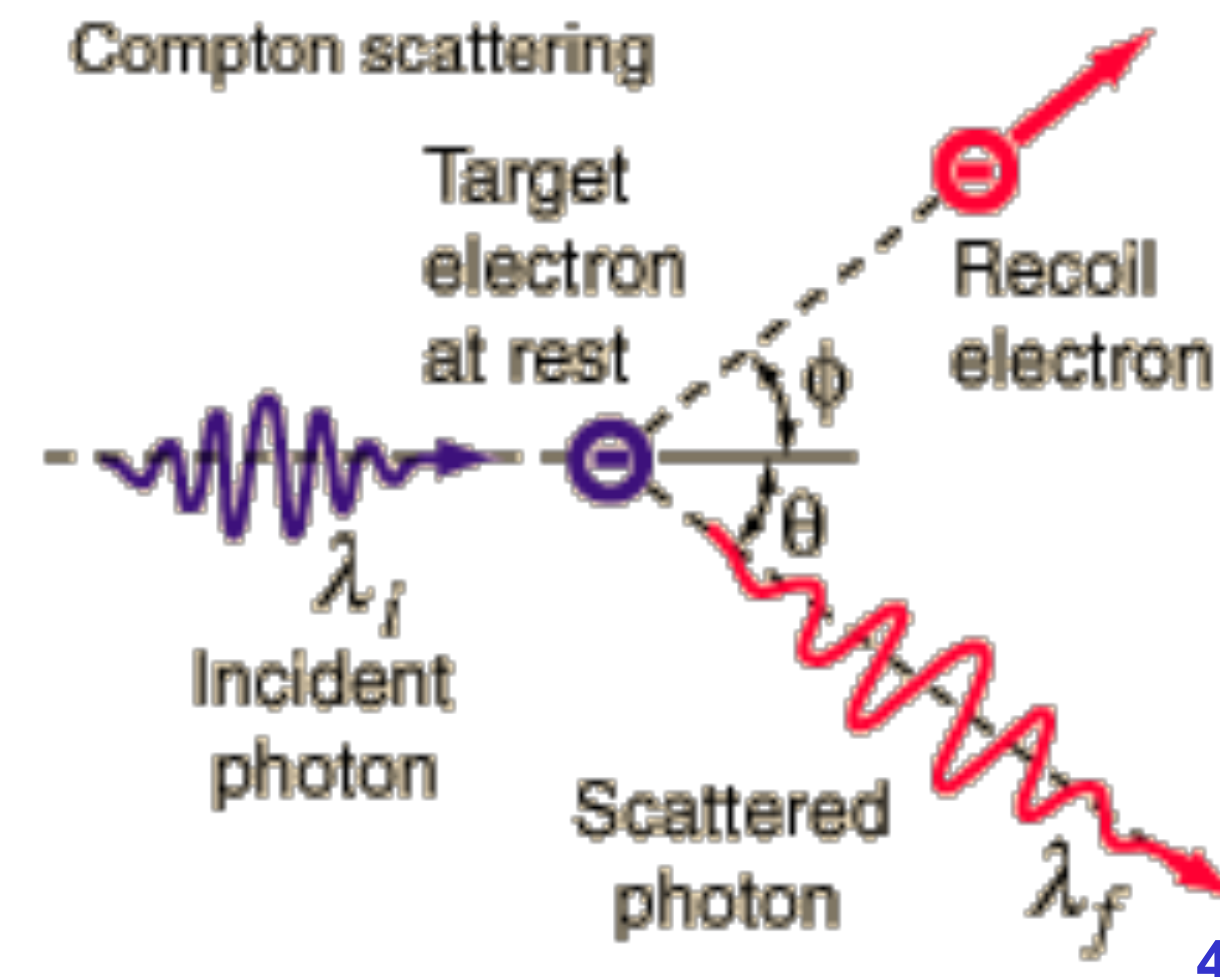


Particella

Effetto fotoelettrico: la diversa frequenza della luce produce diverse energie per gli elettroni, secondo la formula $E = h\nu$

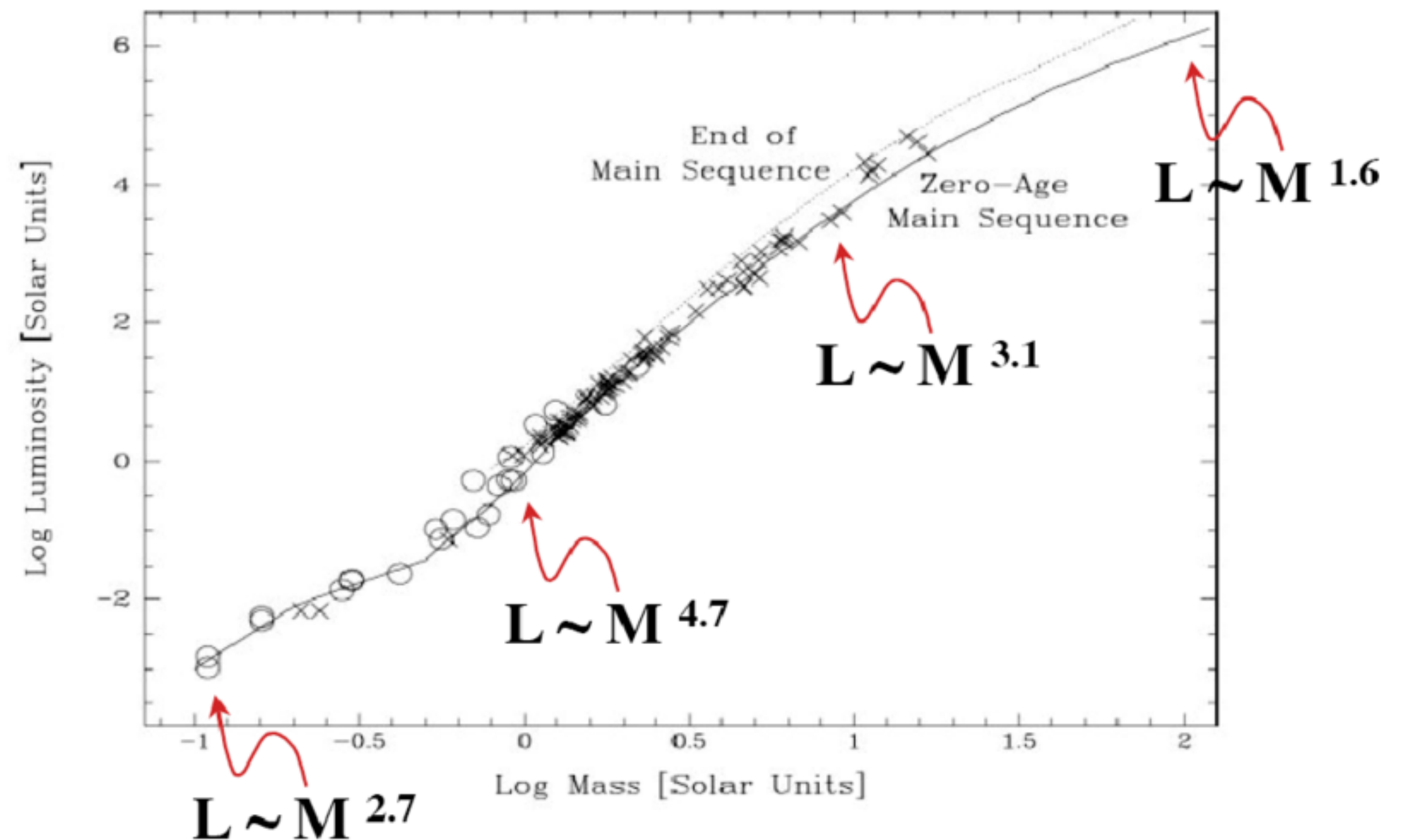


- **Scattering compton**

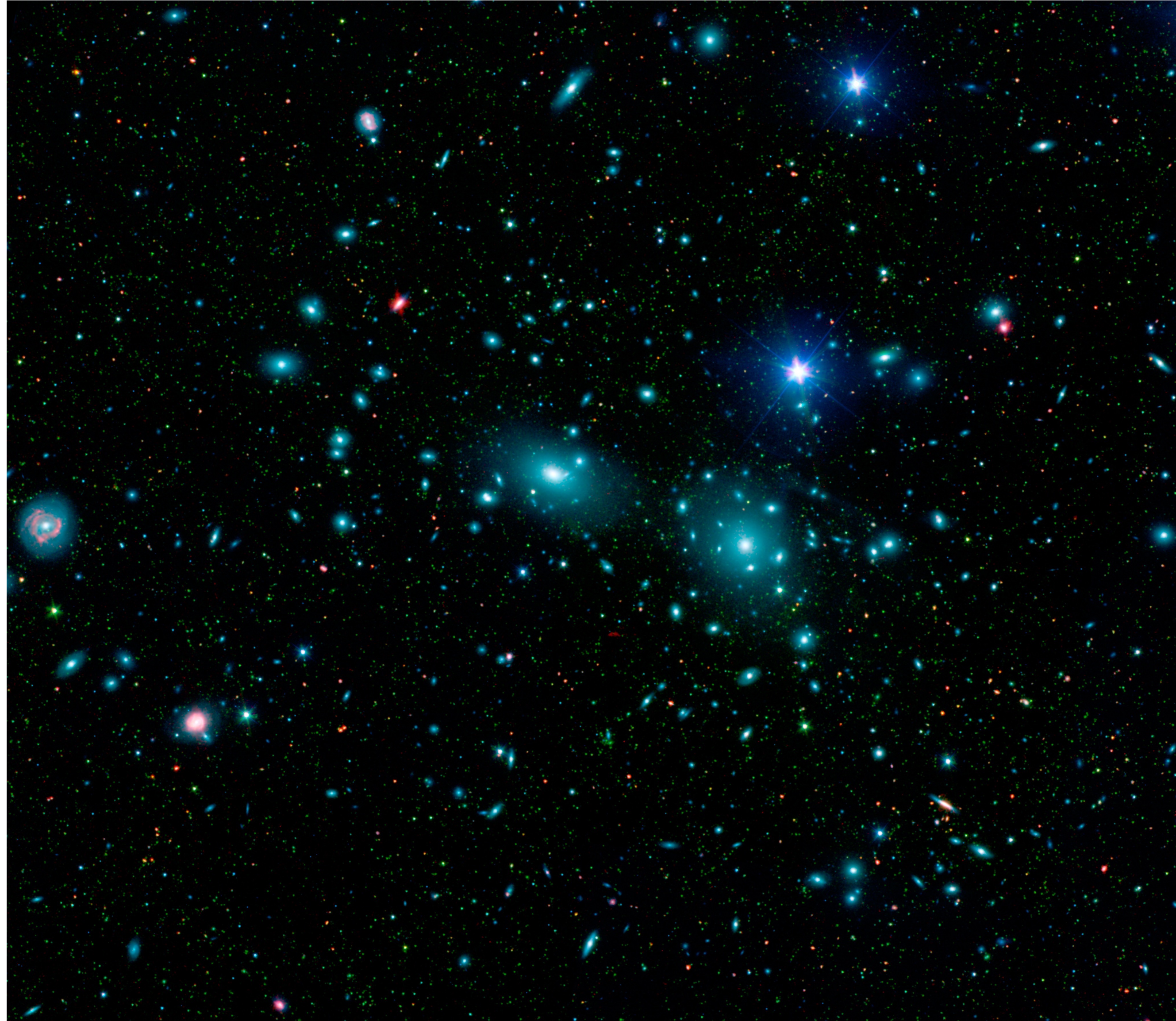


Misura della massa luminosa

- Gli astronomi si affidavano alla fotometria per ottenere stime sulla massa, ovvero sui rapporti massa-luminosità (M/L).
- Ad esempio, il rapporto M/L per il Sole è $M/L = 5.1 \times 10^3 \text{ kg/W}$, con la massa e la luminosità del Sole tali che $M_{\odot}/L_{\odot} = 1$ per definizione.

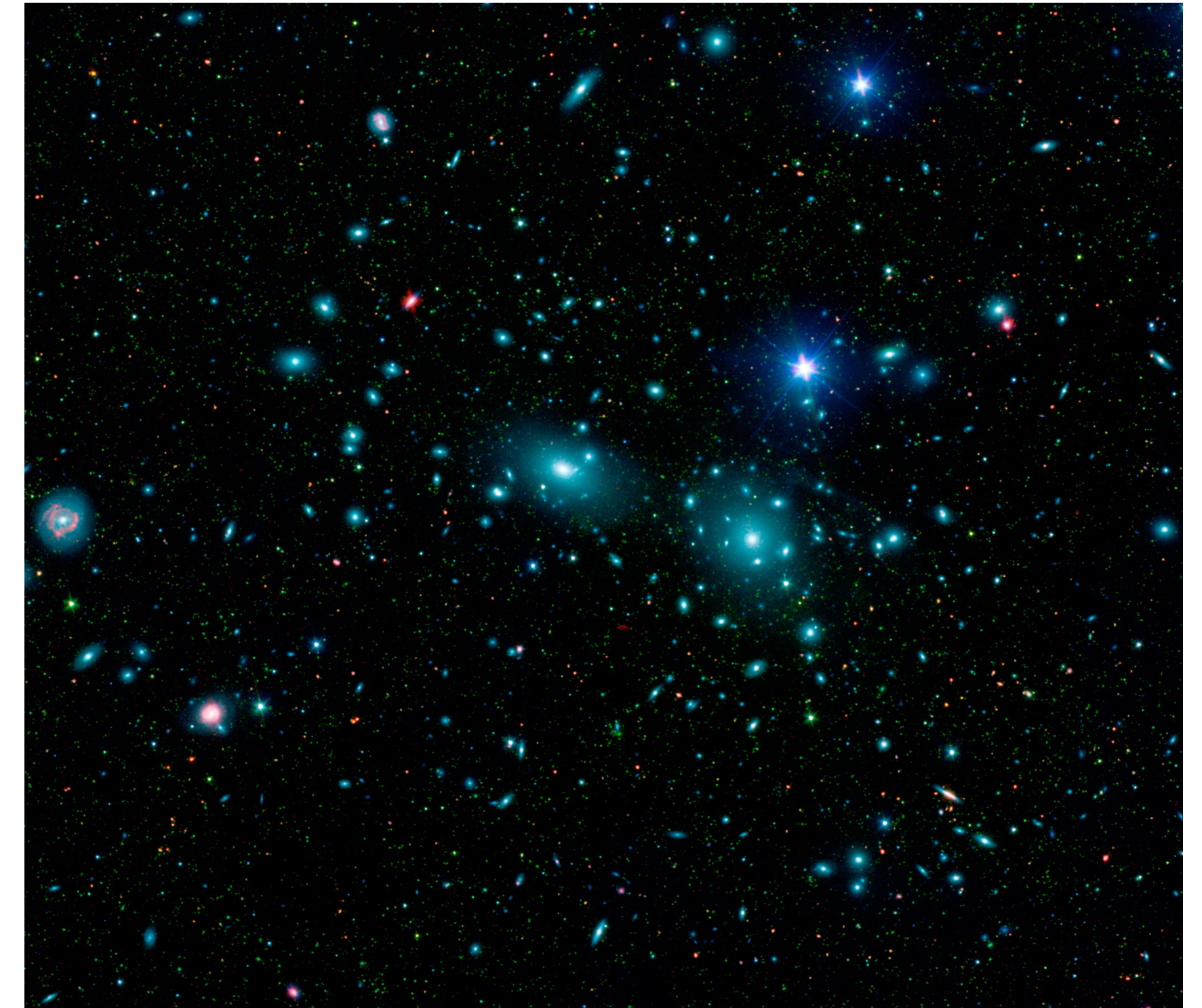


La scoperta di Zwicky

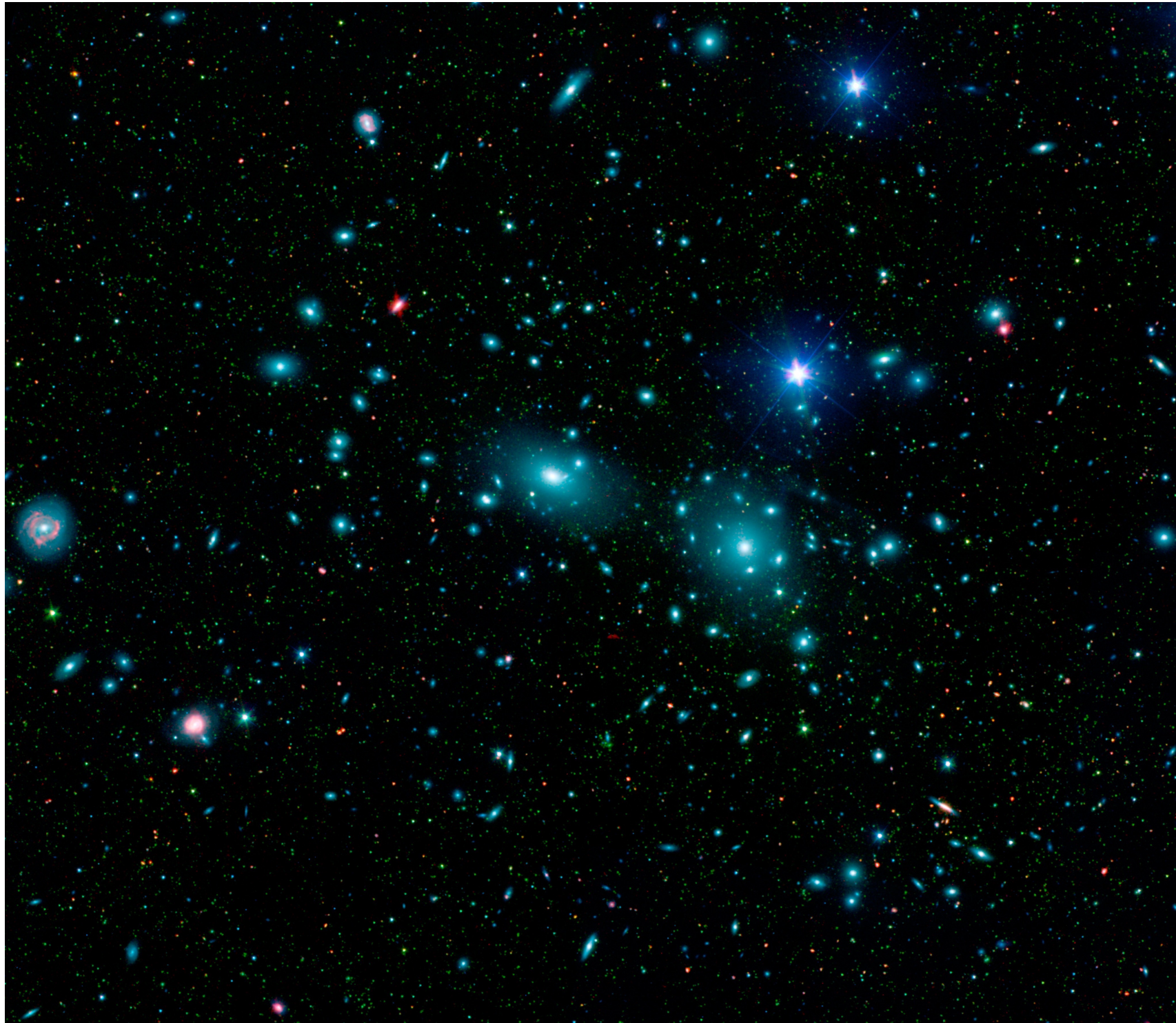


La scoperta di Zwicky

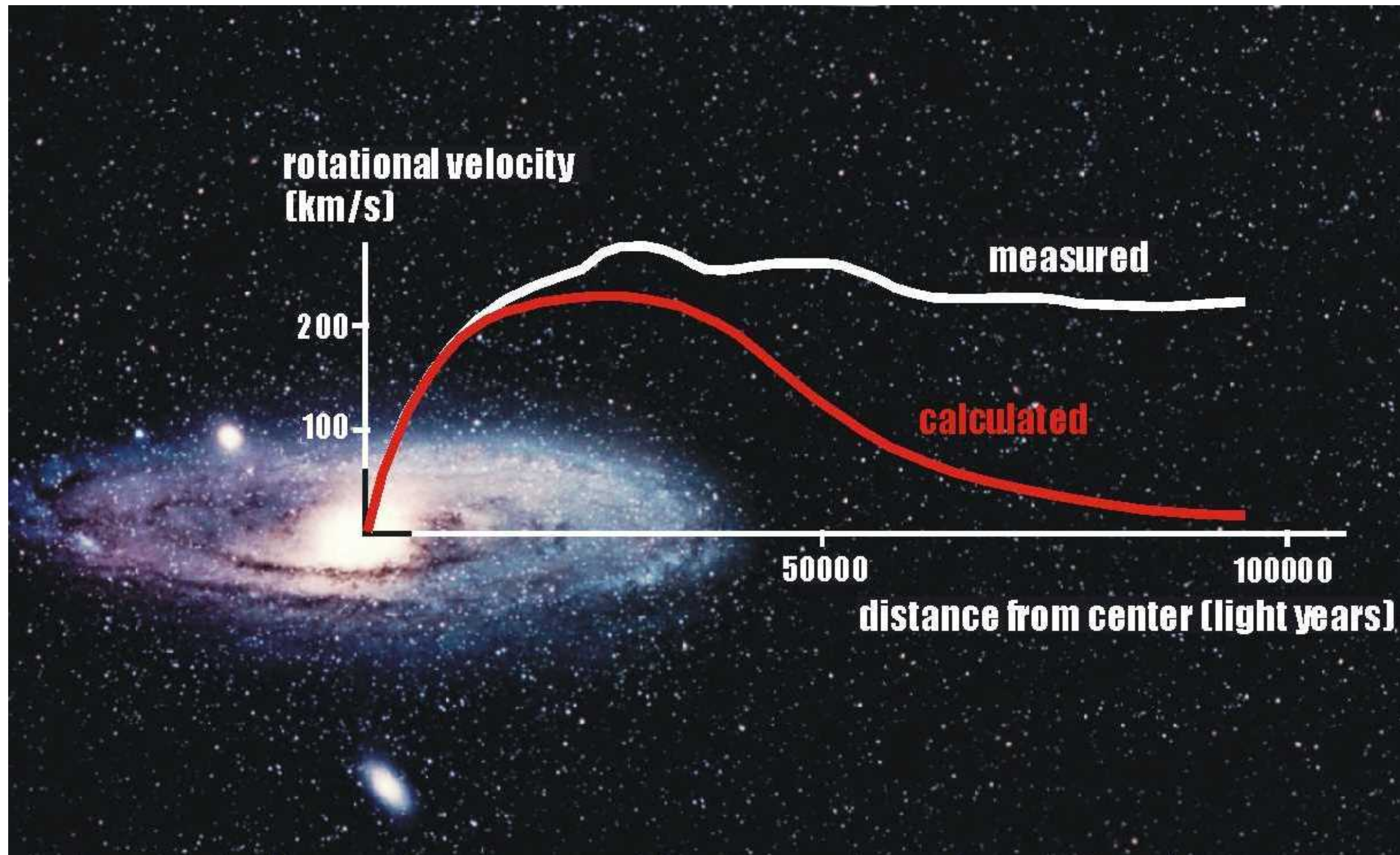
- L'astronomo svizzero F. Zwicky trovò indicazioni simili di massa mancante, ma su scala del cluster Coma, a una distanza di 99 Mpc (322 milioni di anni luce).
- Zwicky impiegò il teorema del viriale per calcolare la massa del cluster: $2\langle T \rangle + \langle U \rangle$, dove $\langle T \rangle$ è l'energia cinetica media e $\langle U \rangle$ è l'energia potenziale media.
- Zwicky scoprì che la massa totale del cluster era $M_{\text{cluster}} \approx 4.5 \times 10^{13} M_{\odot}$. Zwicky calcolò che la massa media di ciascuna nebulosa era $M_{\text{nebulosa}} = 4.5 \times 10^{10} M_{\odot}$.



Dark matter nel Coma Cluster



Curva di rotazione delle galassie



Curva di rotazione delle galassie

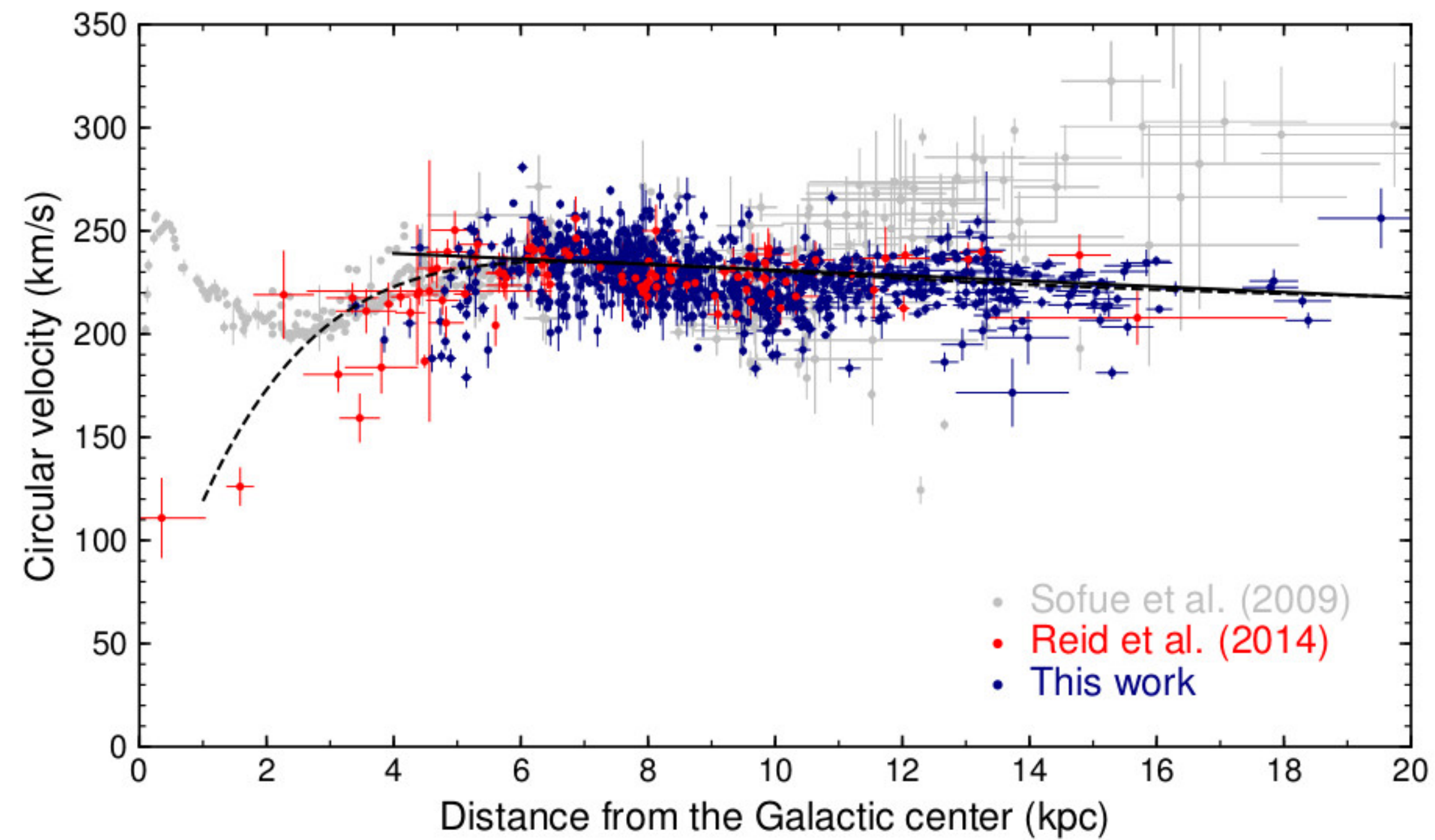
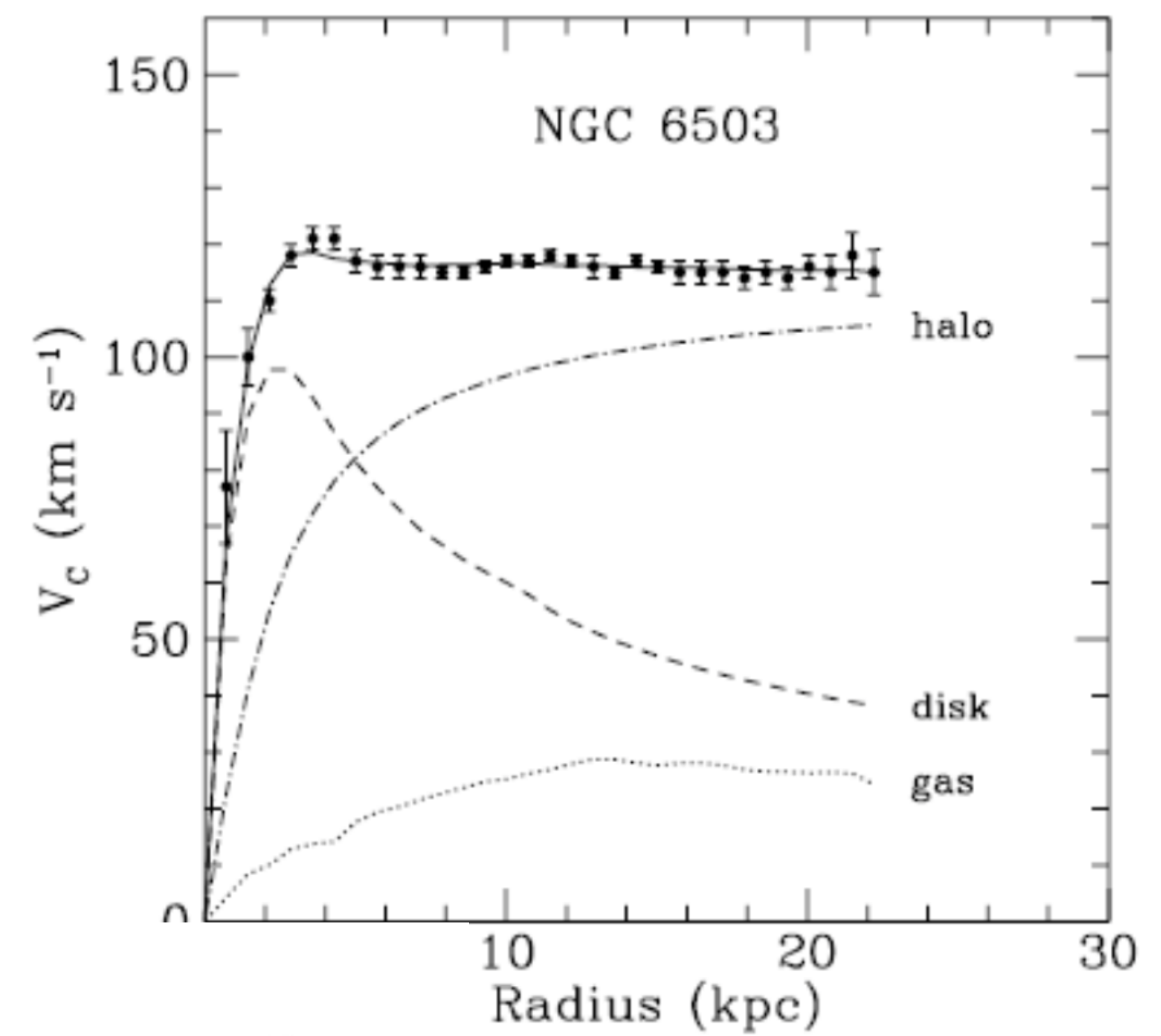
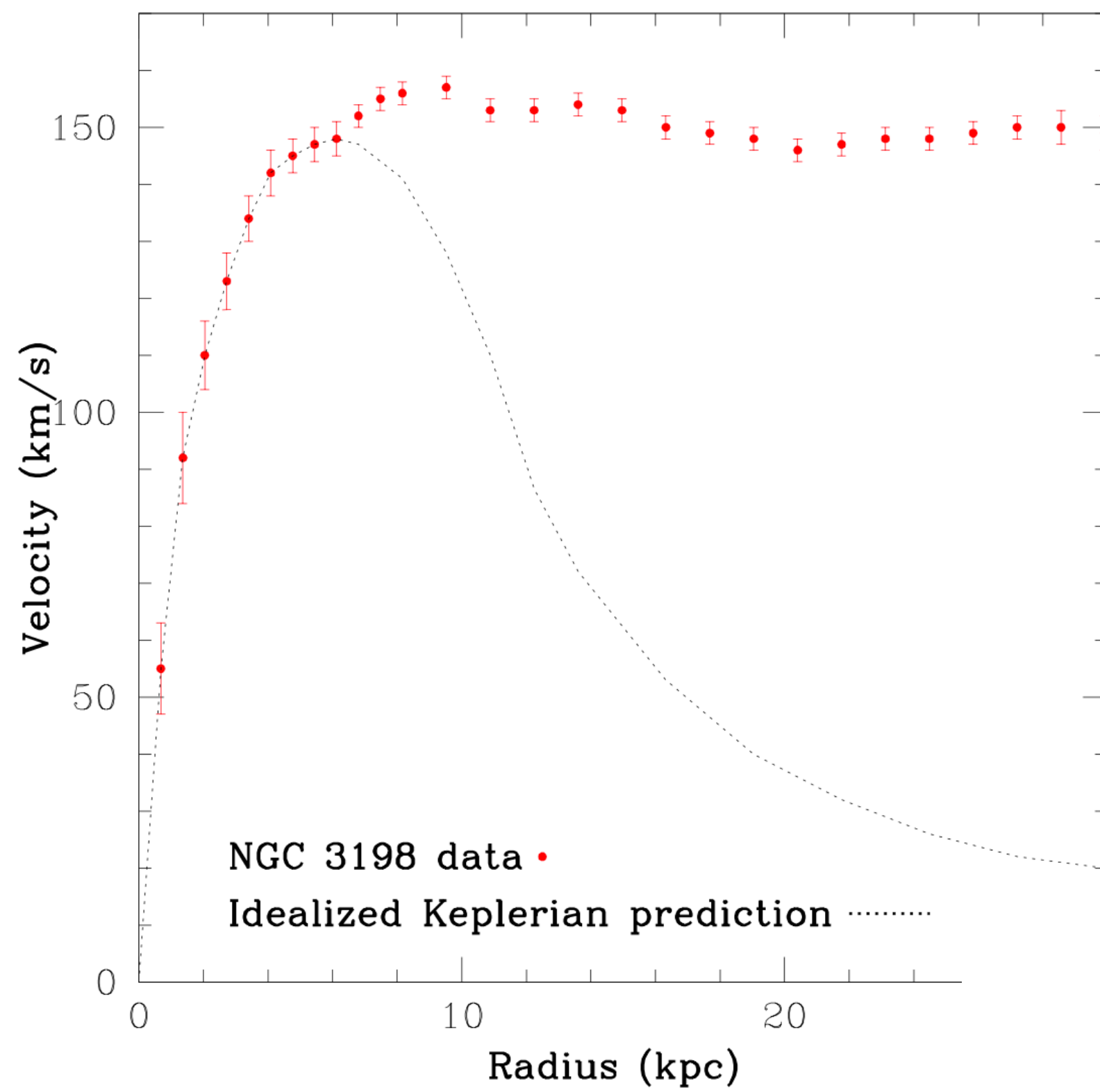
- Circa 40 anni dopo le scoperte di Oort, Zwicky e altri, Vera Rubin e i suoi collaboratori condussero uno studio approfondito delle curve di rotazione di 60 galassie isolate:

$$v(r) = \sqrt{G \frac{m(r)}{r}}, \quad v(r) \propto 1/\sqrt{r};$$

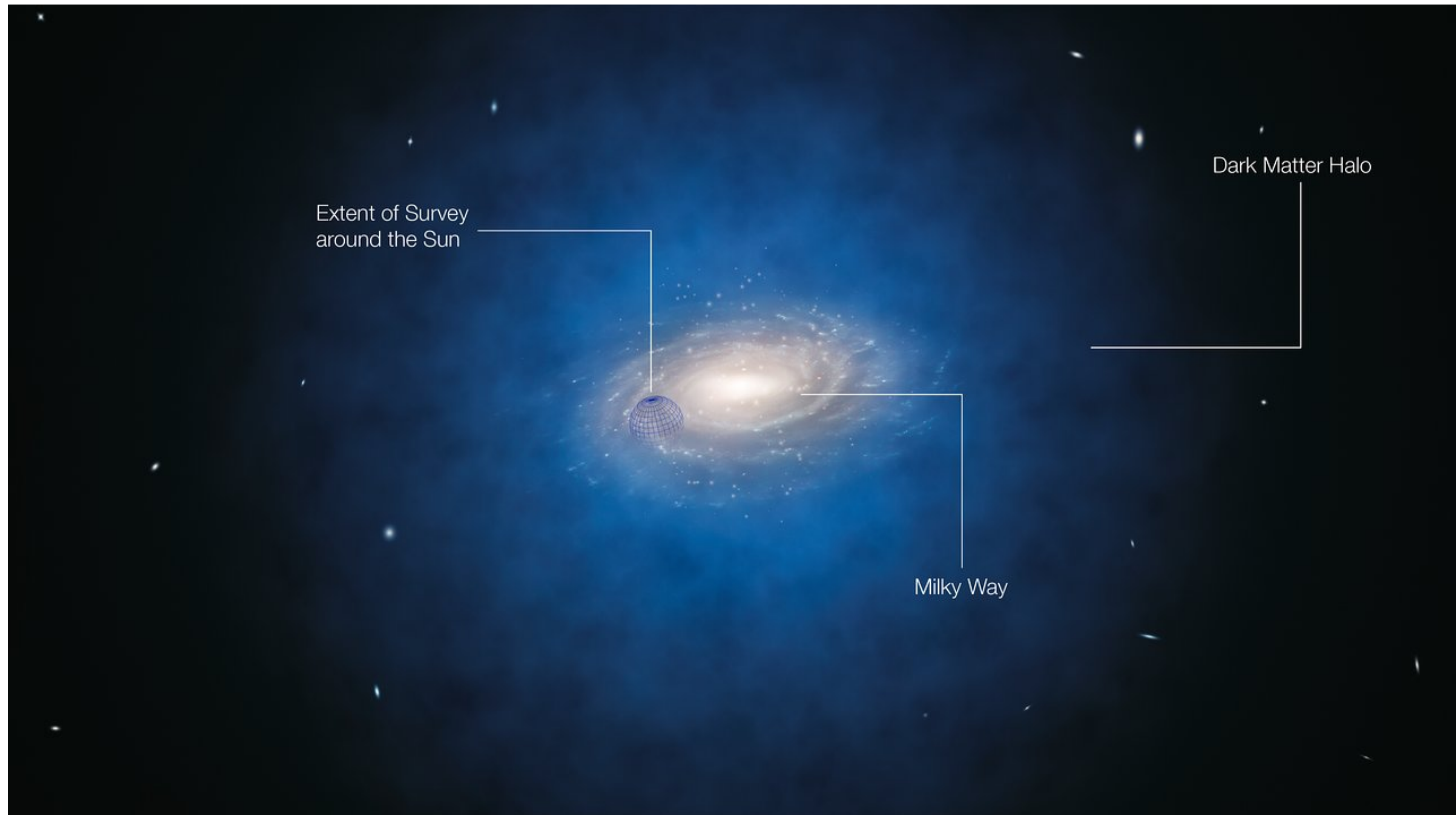
- dove: $v(r)$ è la velocità di rotazione dell'oggetto a una distanza G è la costante di gravitazione universale e $m(r)$ è la massa totale contenuta entro il raggio
- Secondo questo modello, la velocità di un corpo rotante dovrebbe diminuire man mano che aumenta la distanza dal centro, un comportamento comunemente definito "kepleriano". Tuttavia, Rubin e i suoi colleghi osservarono che le curve di rotazione delle galassie non seguivano questo modello, suggerendo l'esistenza di una massa non luminosa, come la materia oscura, che influenzava le dinamiche galattiche.

$$M(r)_{DM} \propto r \quad \rho(r)_{DM} \propto r^{-2}$$

Altri esempi

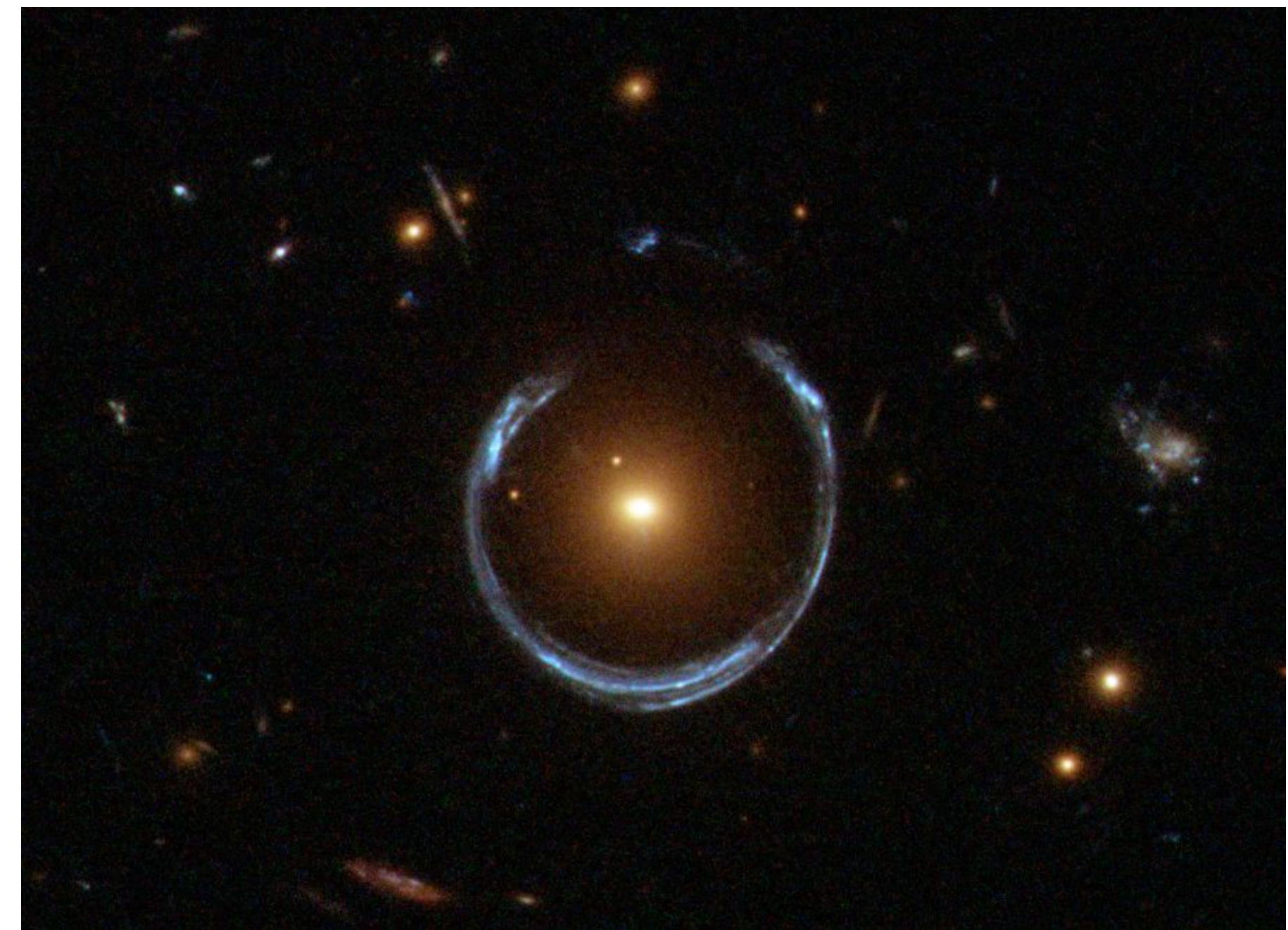
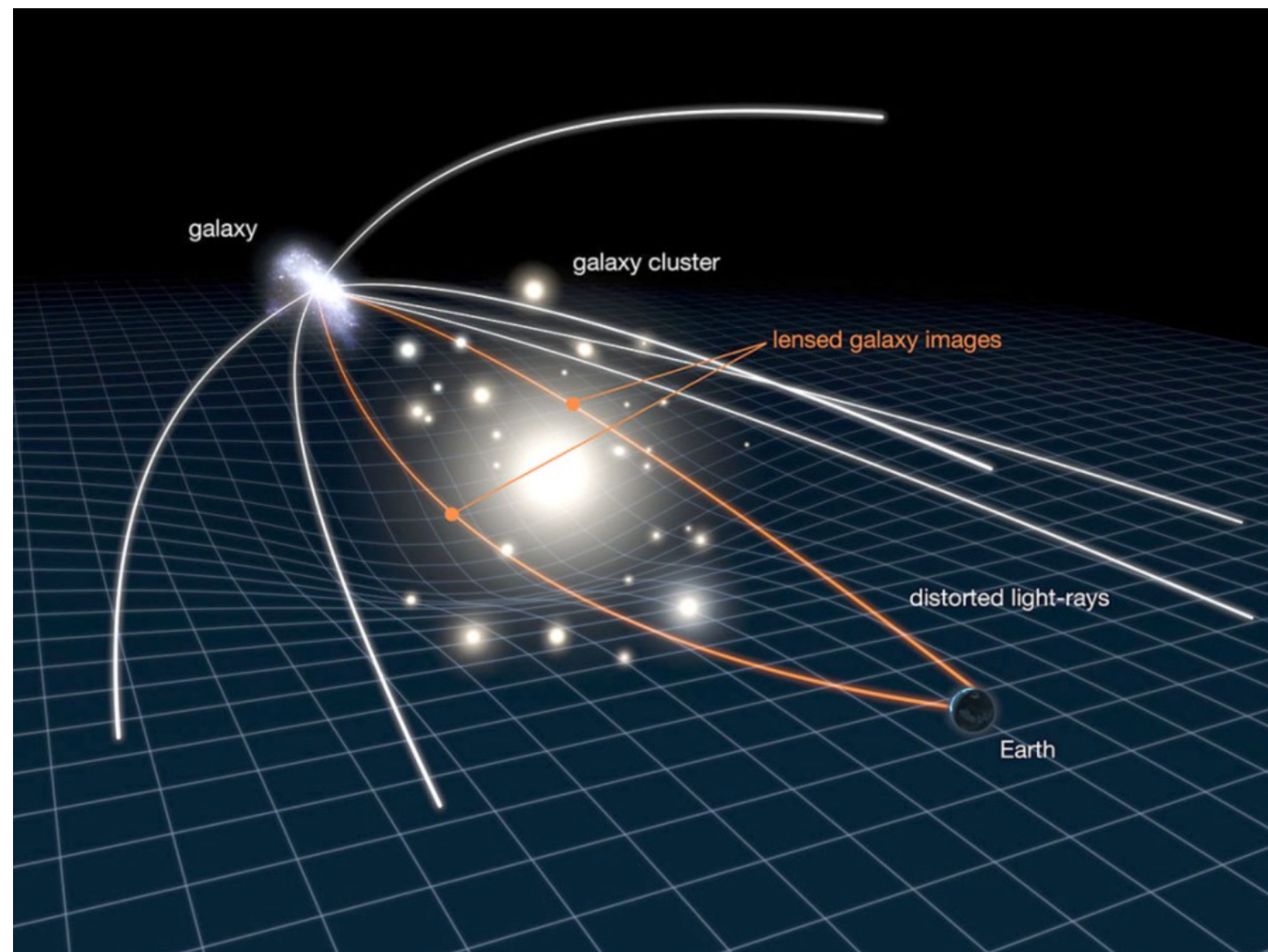


Alone di materia oscura



Lente gravitazionale

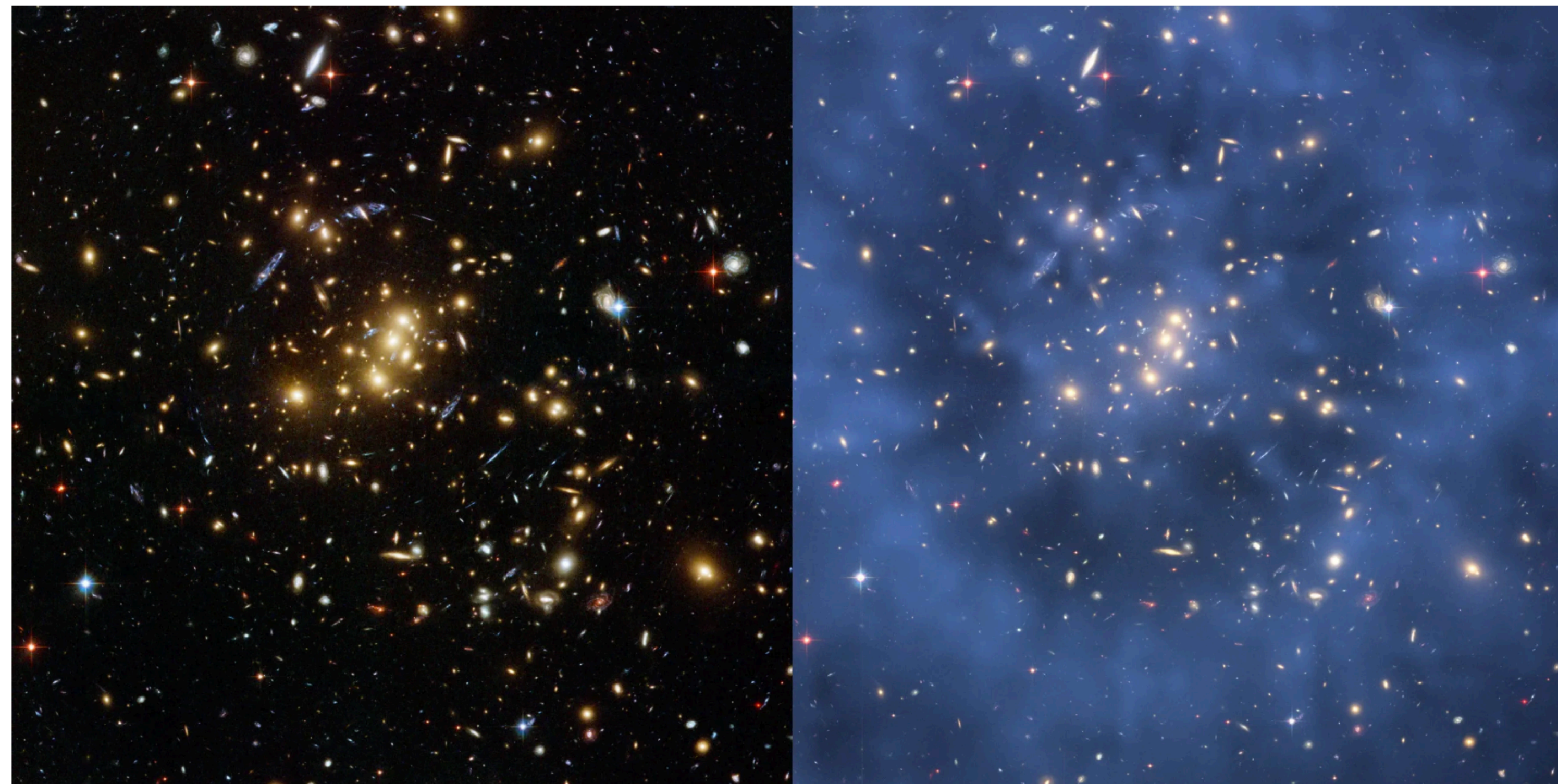
- Negli anni '70, fu scoperto un altro modo per sondare la quantità e la distribuzione della materia oscura: il lente gravitazionale.
- Il lente gravitazionale è un fenomeno che deriva dalla Teoria della Relatività di Einstein. Gli oggetti dotati di massa curvano lo spaziotempo, influenzando i movimenti dei corpi attorno a loro.



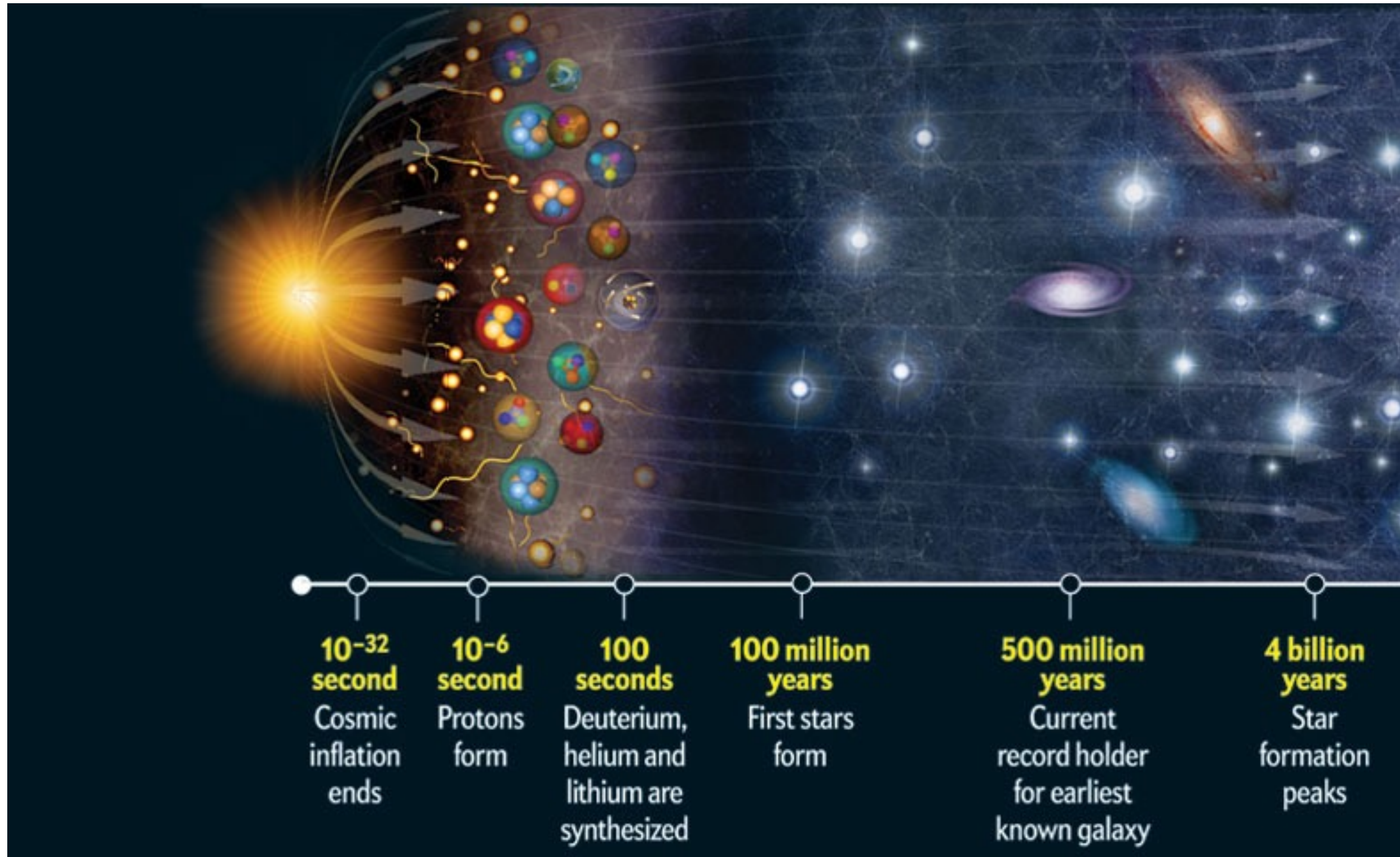
Misura della quantità di materia oscura

Bergmann, Petrosian e Lynds hanno determinato che il rapporto massa/luminosità (M/L) del cluster deve essere di circa 10^2 10^3 unità solari, il che implica la necessità dell'esistenza di grandi quantità di materia oscura nel cluster, oltre a fornire vincoli sulla sua distribuzione all'interno del cluster stesso.

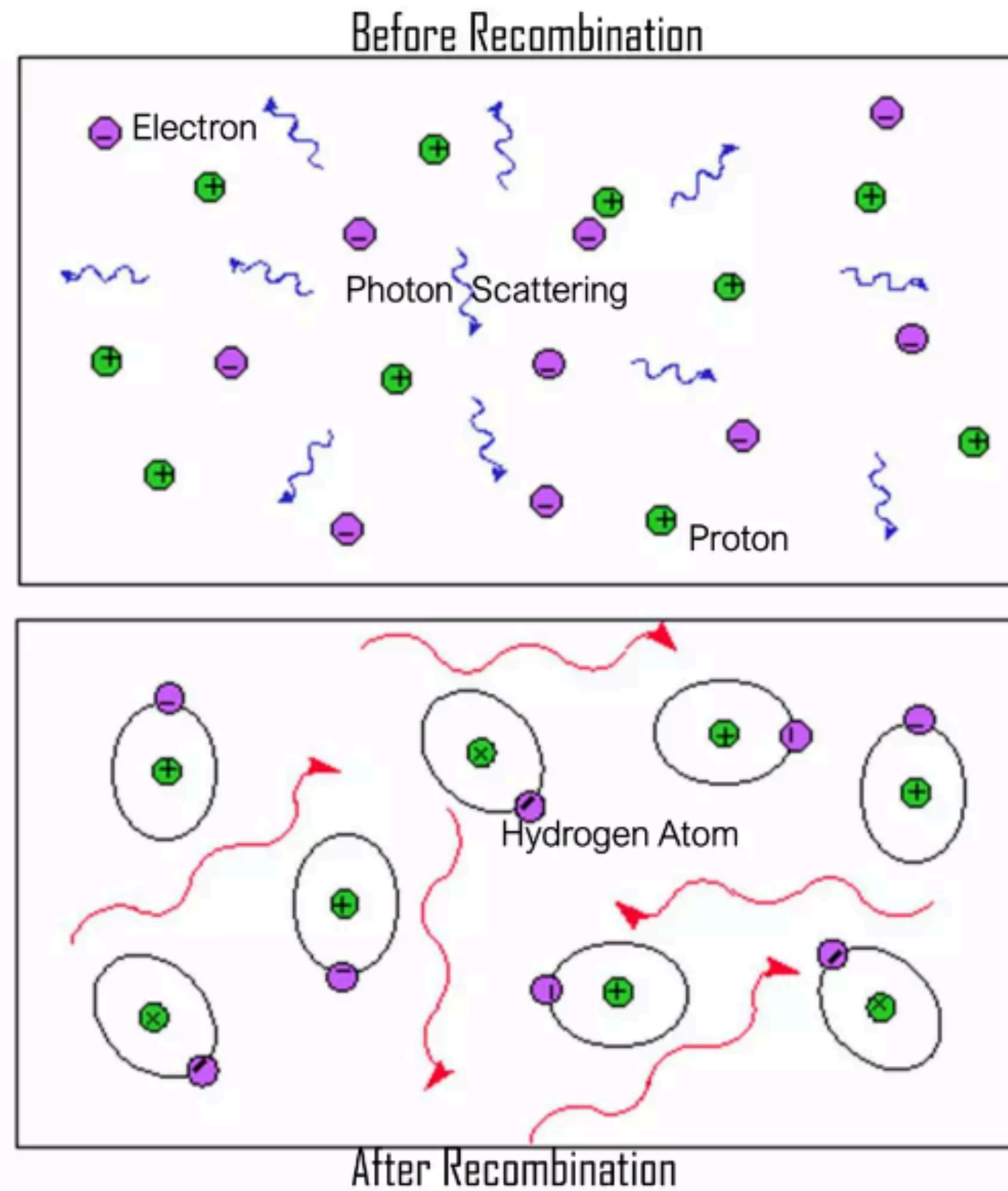
$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{d_{LS}}{d_L d_S}}$$



Big Bang nucleosynthesis

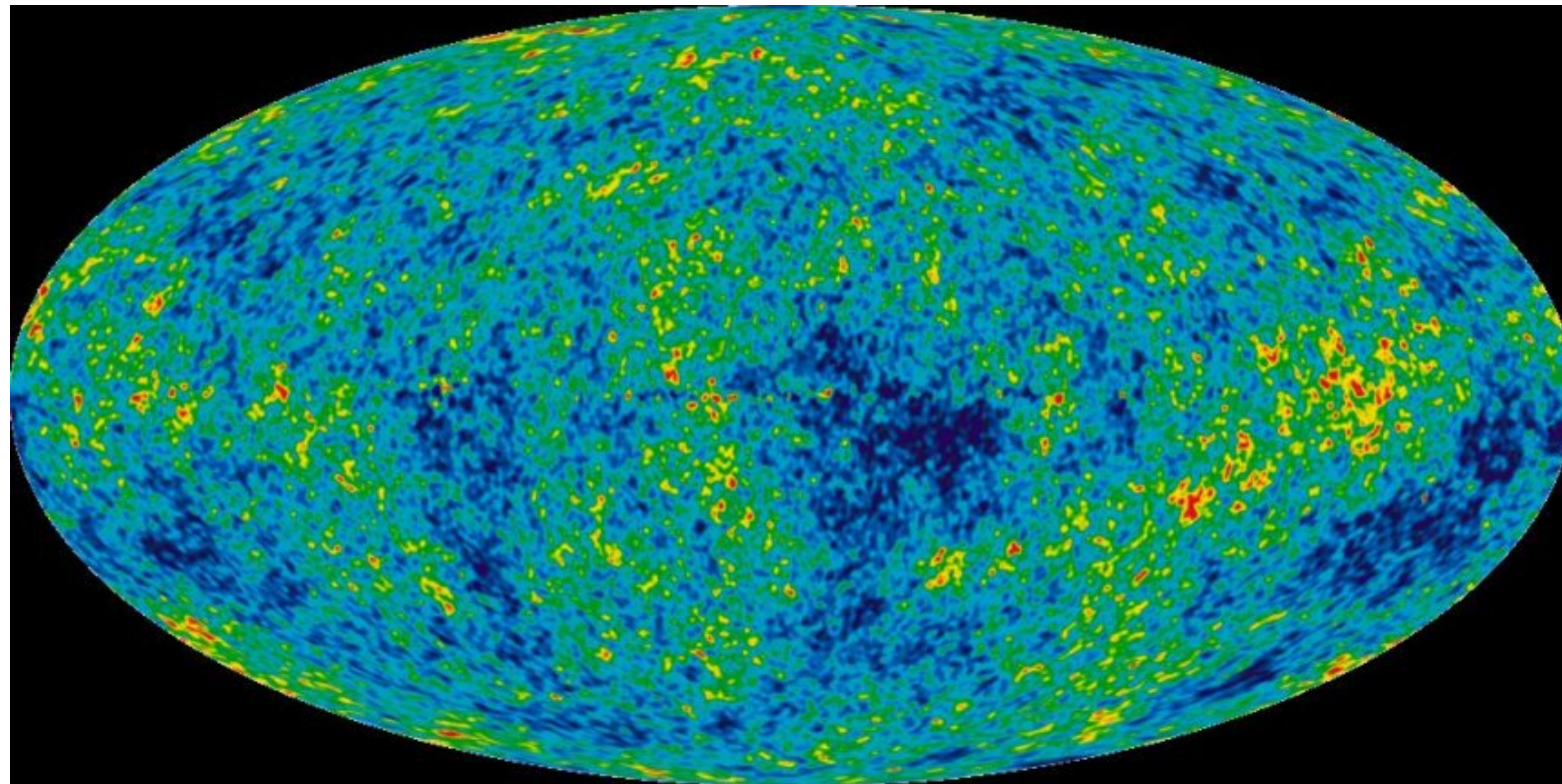


Epoca della ricombinazione



Radiazione cosmica di fondo

- La radiazione cosmica di fondo (CMB) è la radiazione termica rimasta dall'epoca della ricombinazione nella cosmologia del Big Bang.
- La CMB è una radiazione di fondo cosmico fondamentale per la cosmologia osservativa, poiché è la luce più antica nell'universo, risalente all'epoca della ricombinazione.
- La CMB rappresenta un'istantanea della luce più antica del nostro universo, impressa nel cielo quando l'universo aveva appena 380.000 anni.

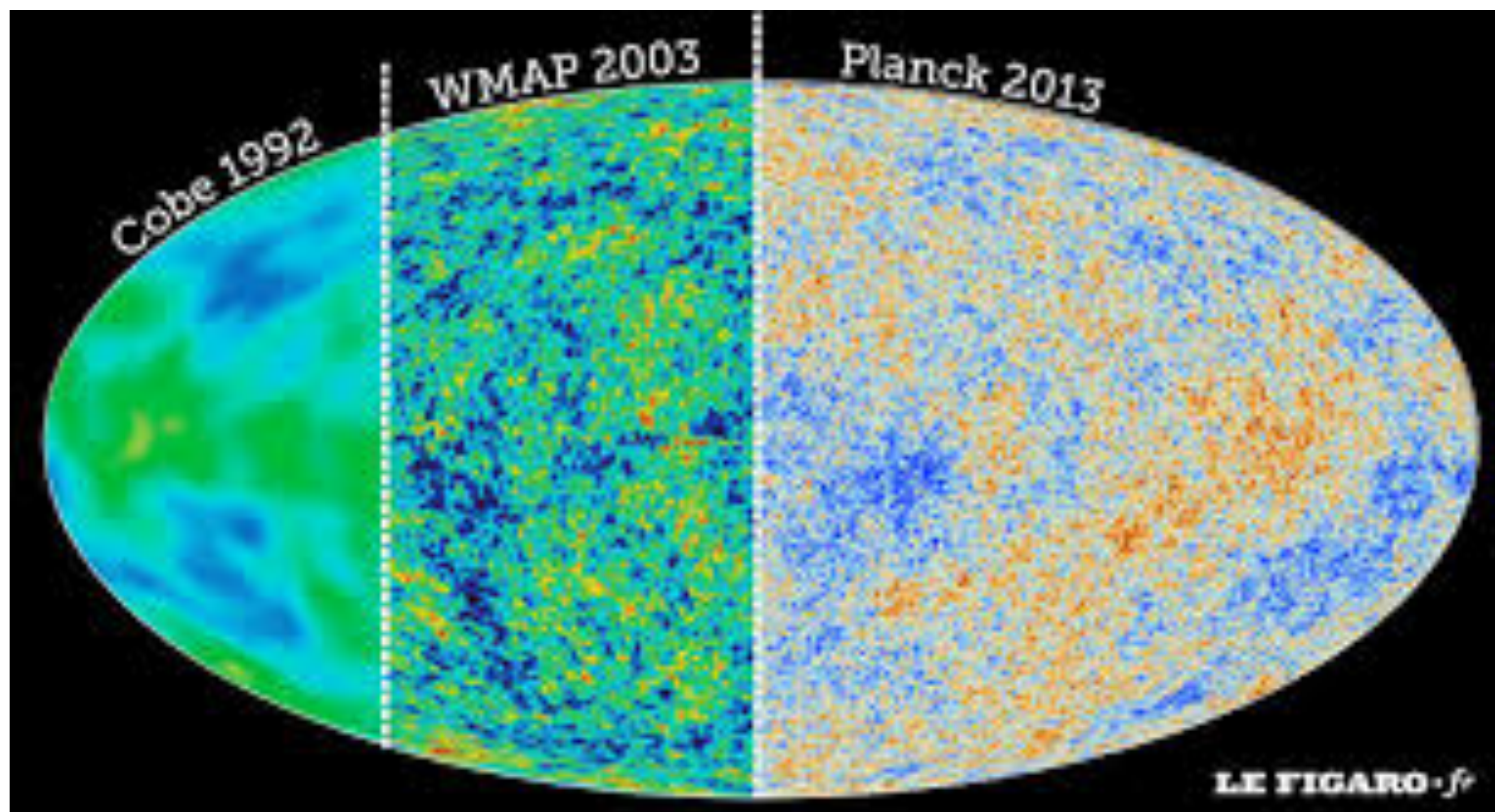


Penzias and Wilson

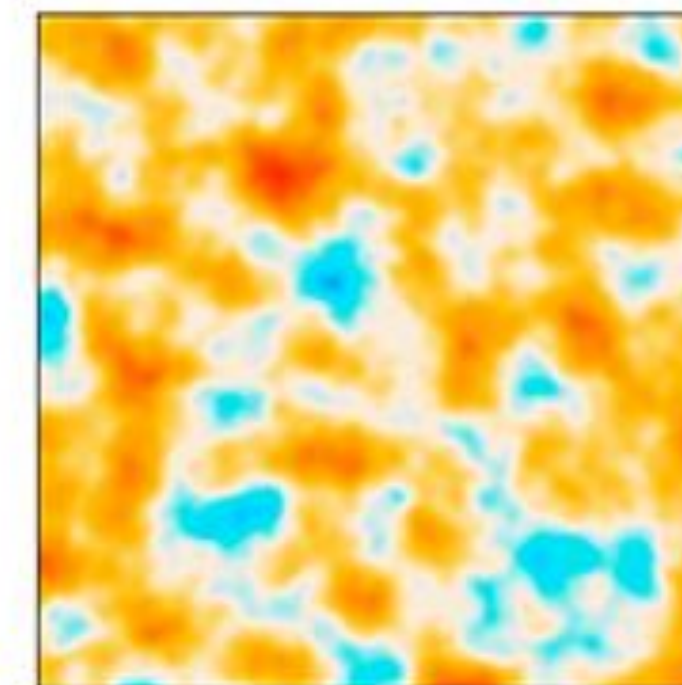
- La CMB, scoperta da Penzias e Wilson nel 1964 (ma teorizzata da altri molto prima), rappresenta un eccesso di temperatura di fondo di circa 2,73 K ed è un altro modo per apprendere la composizione dell'universo.
- Il satellite COBE ha verificato due proprietà fondamentali della CMB: 1) la CMB è straordinariamente uniforme (2,73 K su tutto il cielo) e 2) la CMB, e quindi l'universo primordiale, è un corpo nero quasi perfetto.



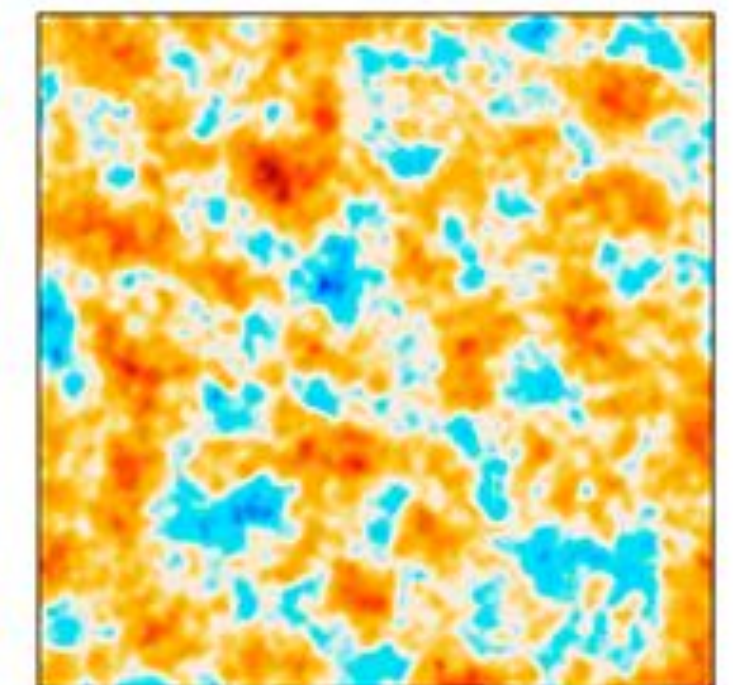
Anisotropia della CMB



COBE

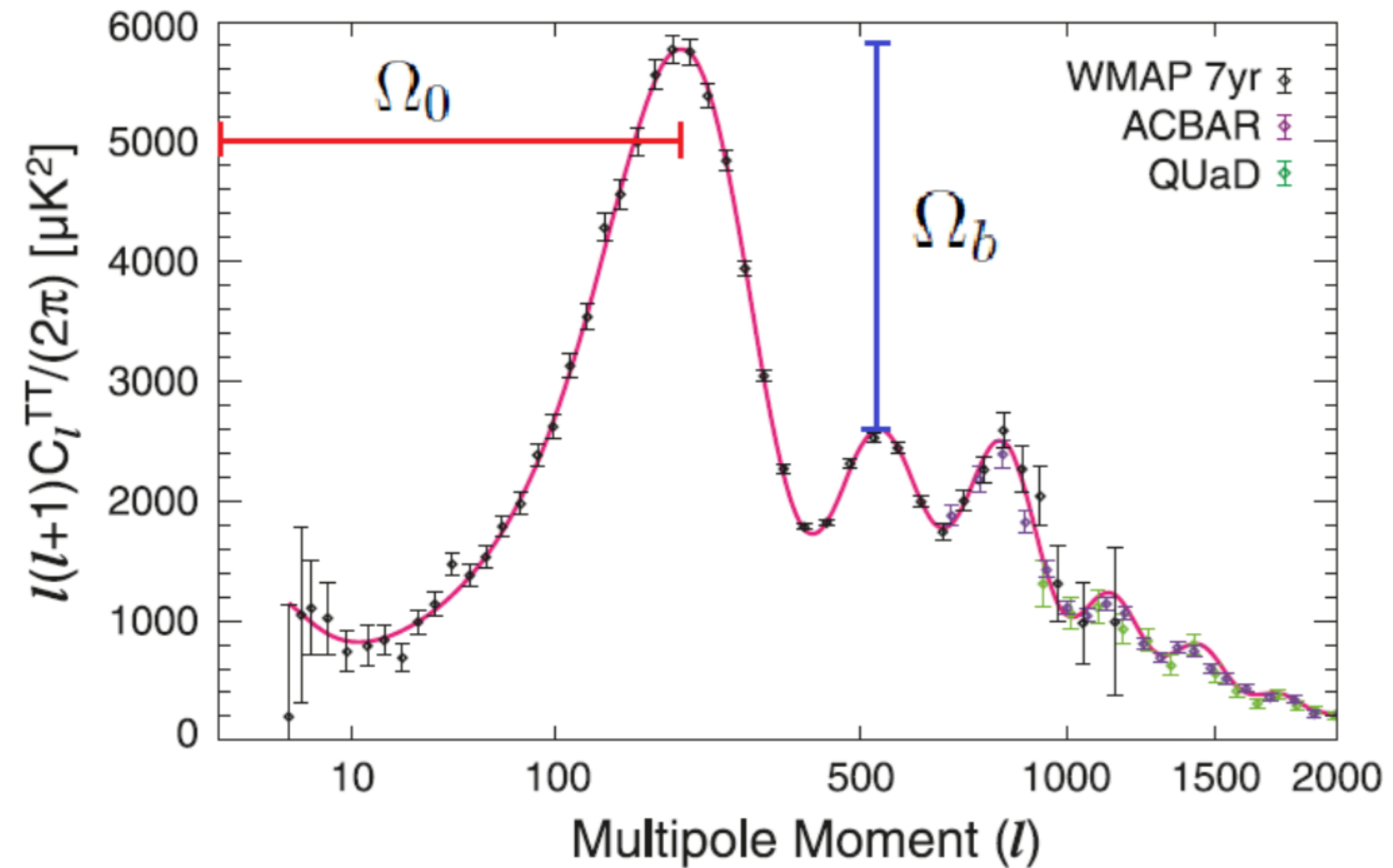
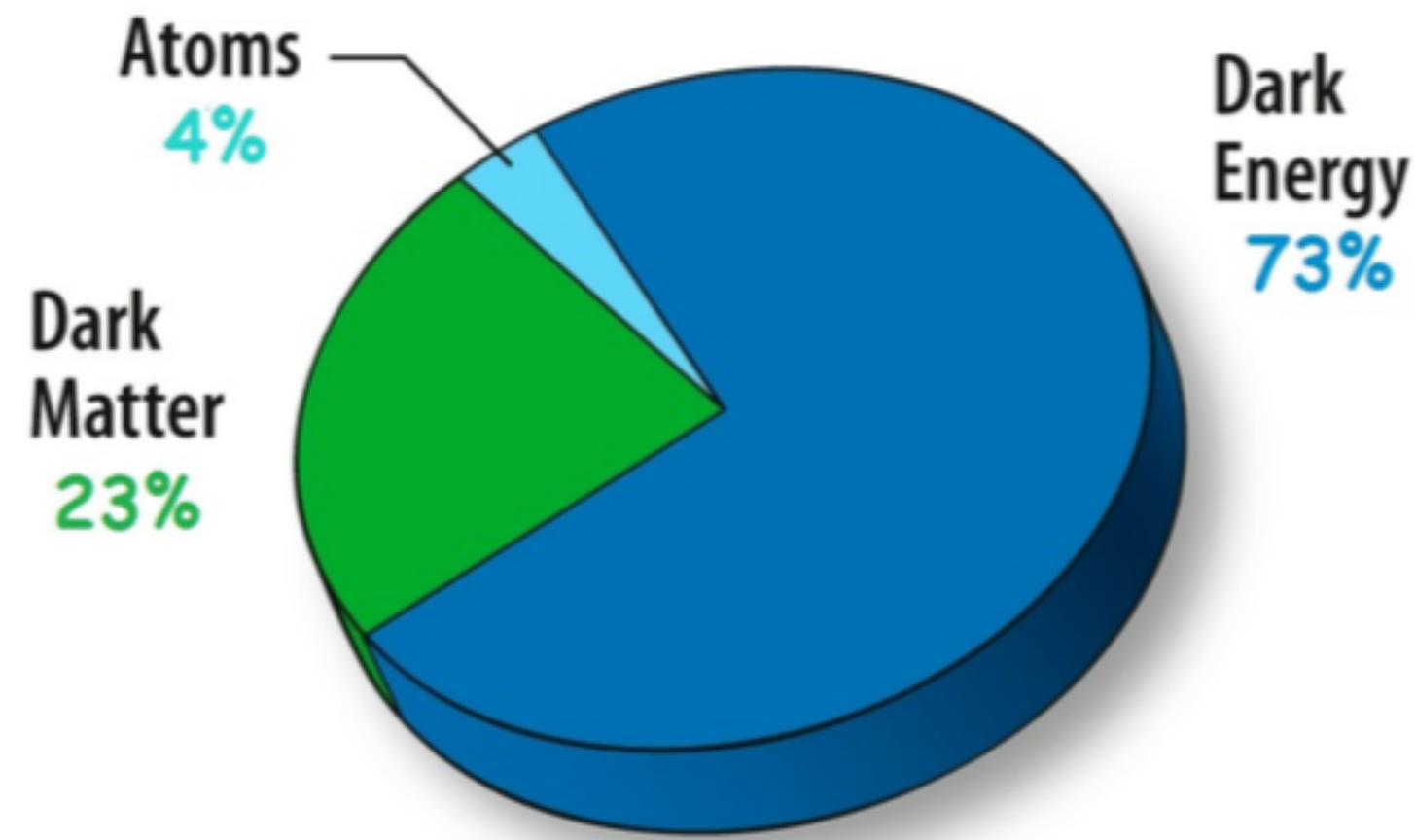


WMAP



Planck

Energia oscura dalla misura della CMB

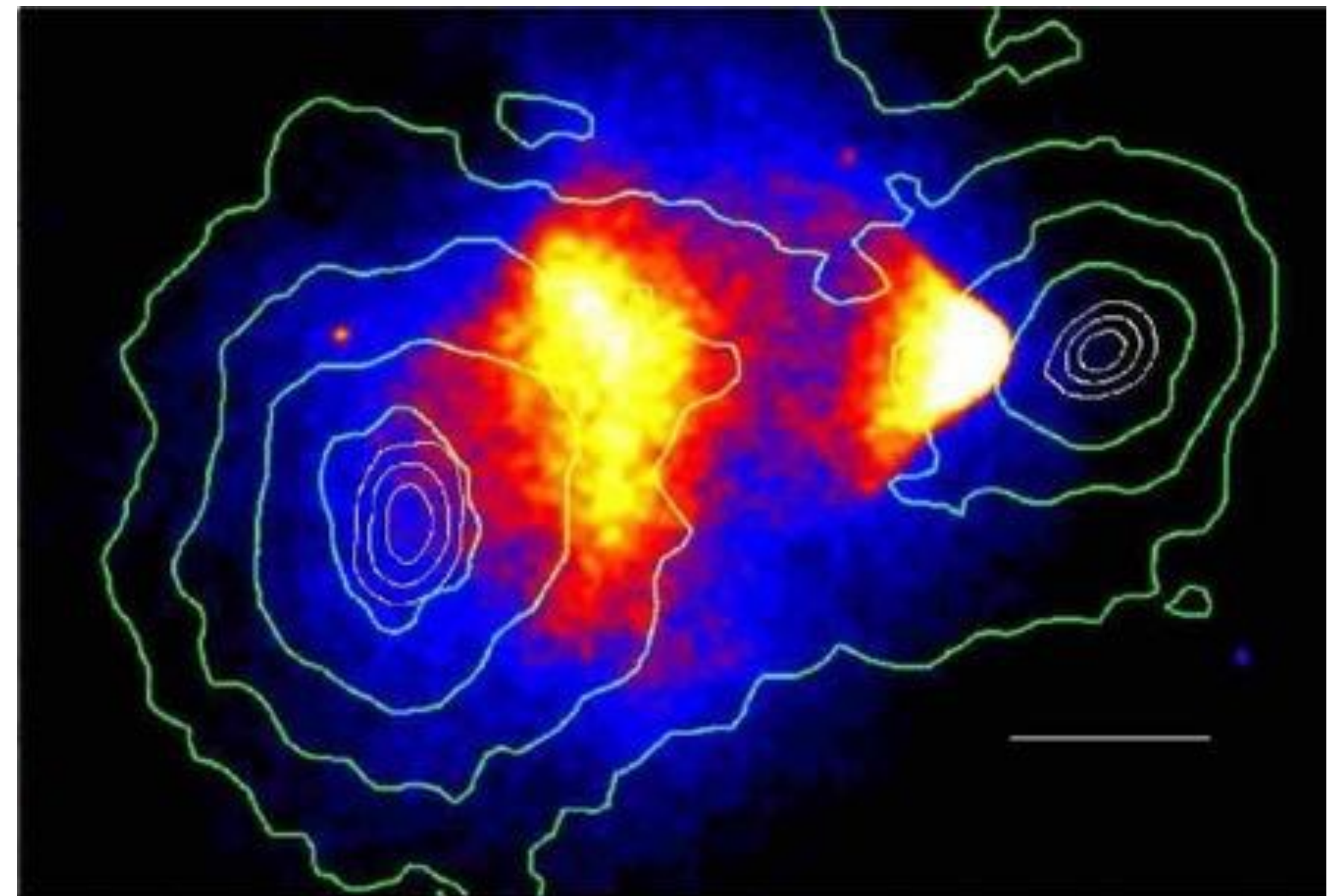
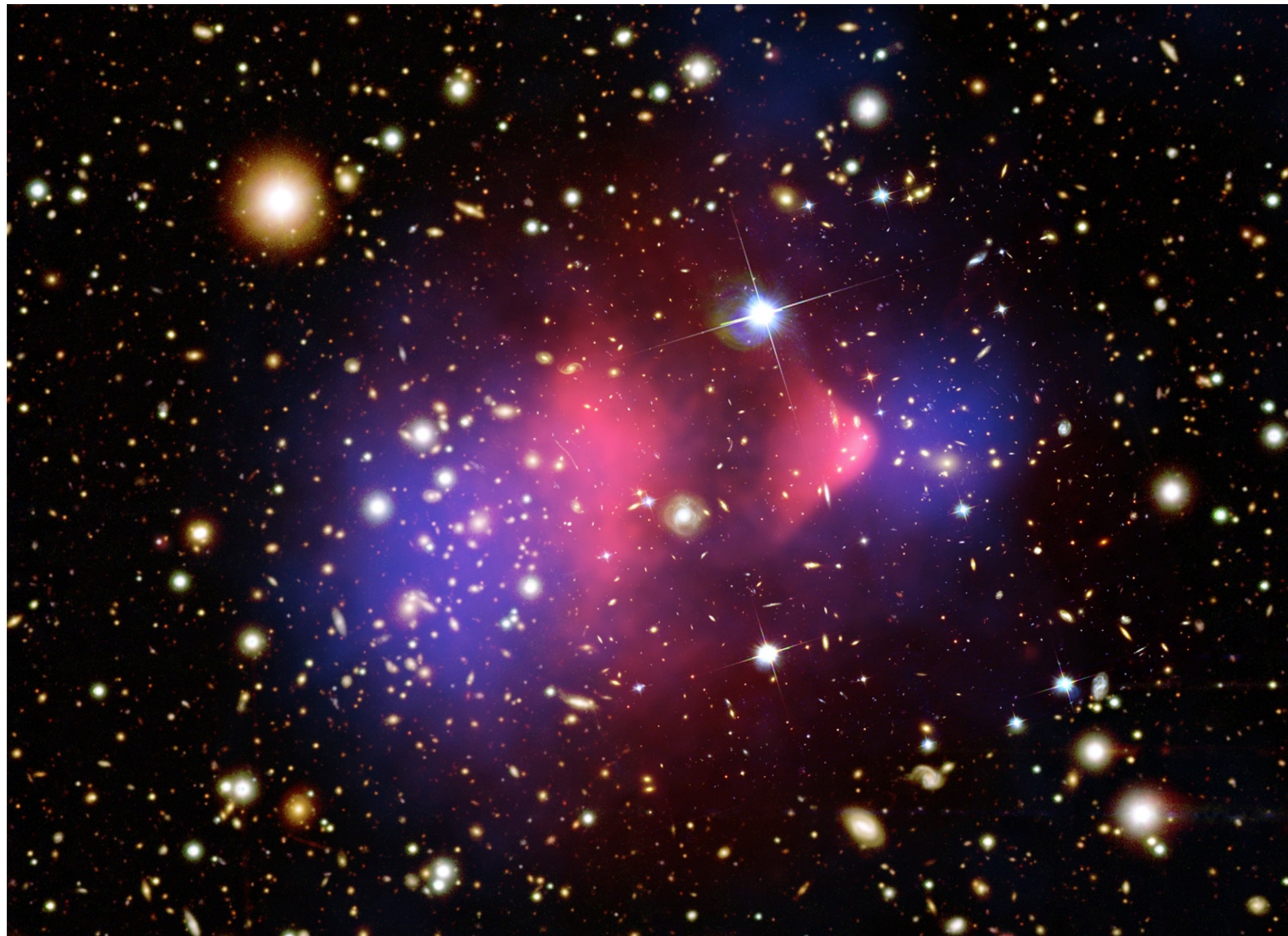


$$\Omega_b h^2 = 0.02249 \pm 0.00057 \quad \Omega_M h^2 = 0.1345 \pm 0.0056,$$

$$\Omega_{DM} = 0.229 \pm 0.015 \quad \Omega_{DE} = 0.725 \pm 0.016.$$

BULLET CLUSTER

- Il Bullet Cluster è il risultato di una collisione tra un sotto-ammasso (il "proiettile") e l'ammasso di galassie più grande 1E 0657-56.



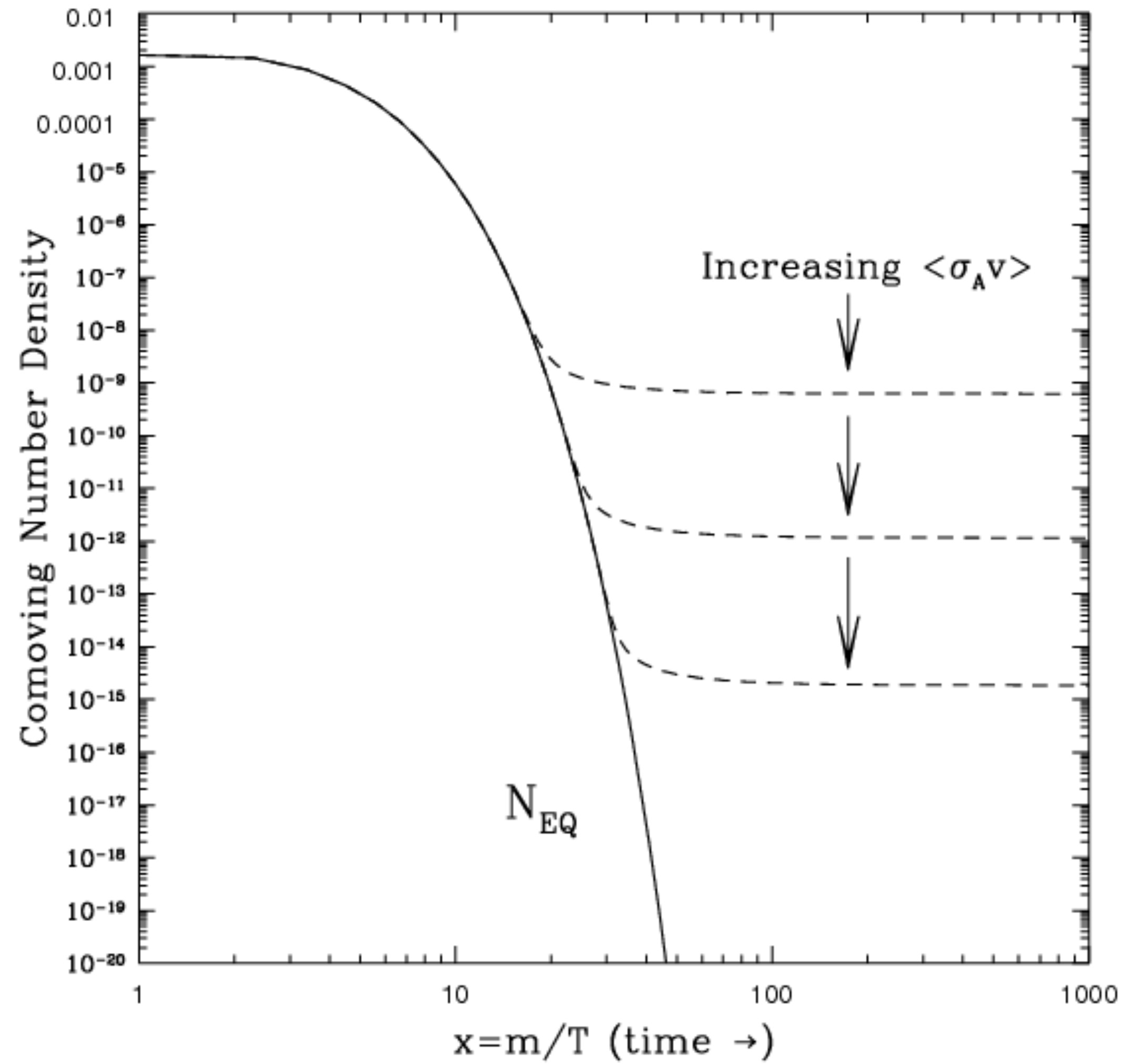
Weakly interacting massive particle

Un candidato ideale per la materia oscura (DM), rappresentato dai WIMP (Weakly Interacting Massive Particles), deve possedere le seguenti caratteristiche:

- *Non barionico*: per essere coerente con le osservazioni sperimentali che indicano la DM come materia che non emette radiazione.
- *Debolmente interagente*: con corrente neutra e senza carica di colore, in modo da essere disaccoppiato dall'elettromagnetismo e dalla forza nucleare.
- *Particella massiva e non relativistica* al momento del disaccoppiamento dal plasma, per rispettare le osservazioni della struttura su larga scala. Per questo motivo, il neutrino viene escluso come candidato.

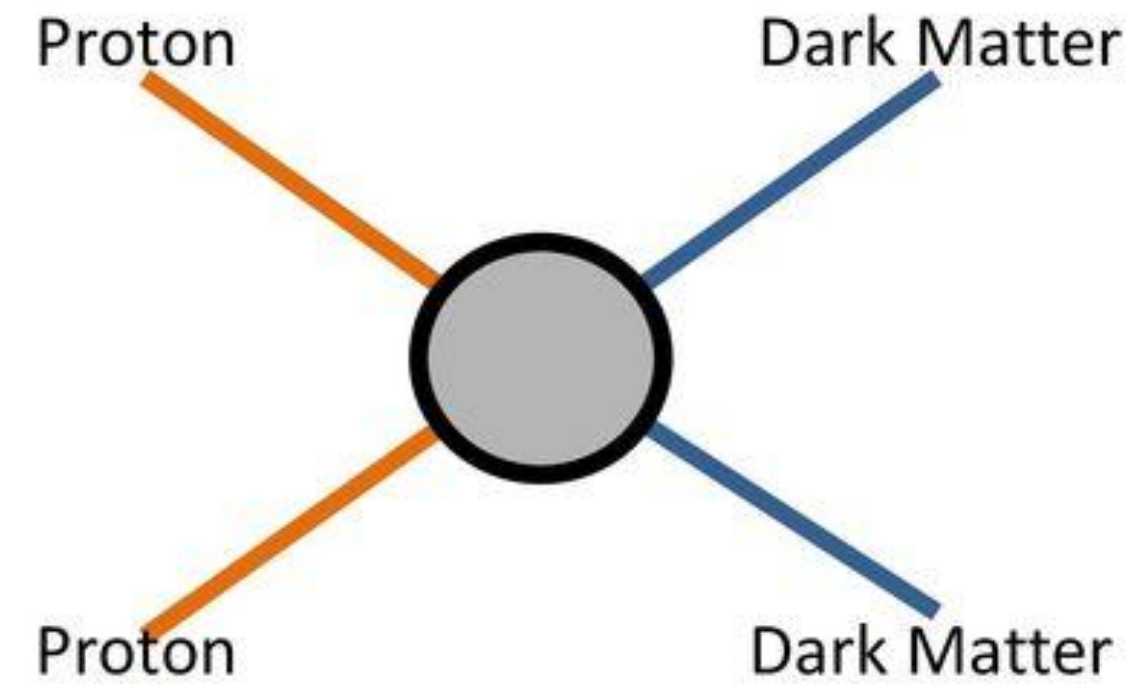
L'unico possibile candidato alla DM nel Modello Standard (SM) è il neutrino, il quale può contribuire solo in piccola parte alla quantità totale di DM. Pertanto, i candidati per la DM devono essere ricercati in modelli oltre il Modello Standard (BSM).

Miracolo WIMP

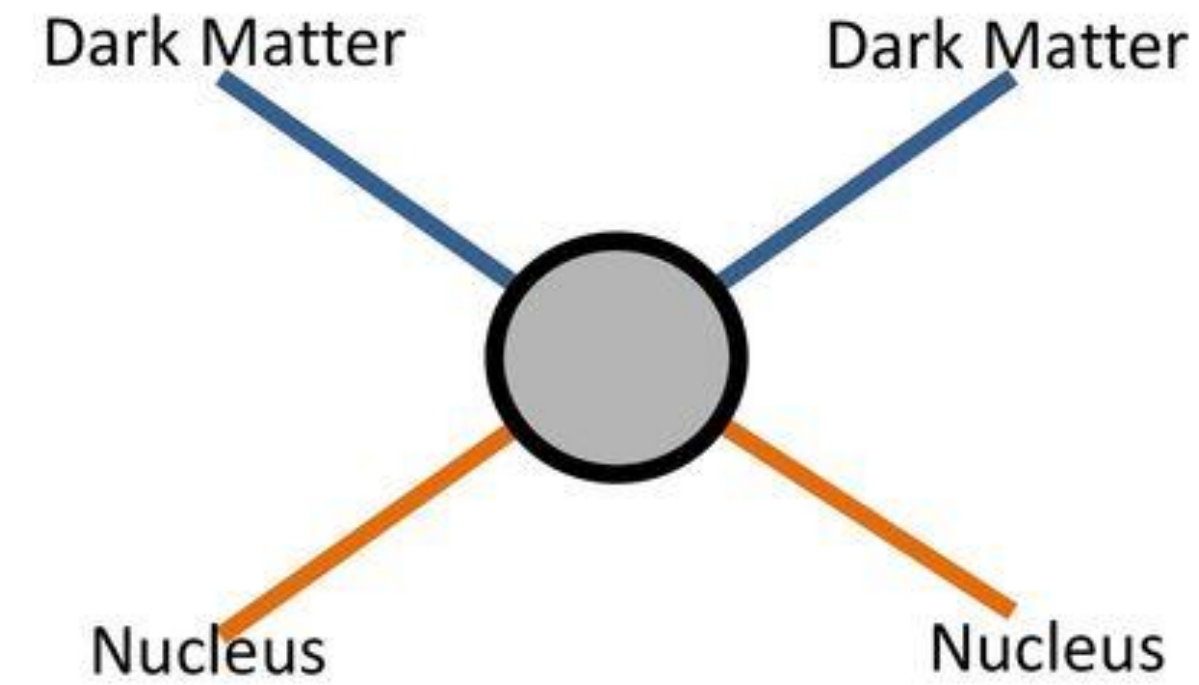


Rilevazione WIMP

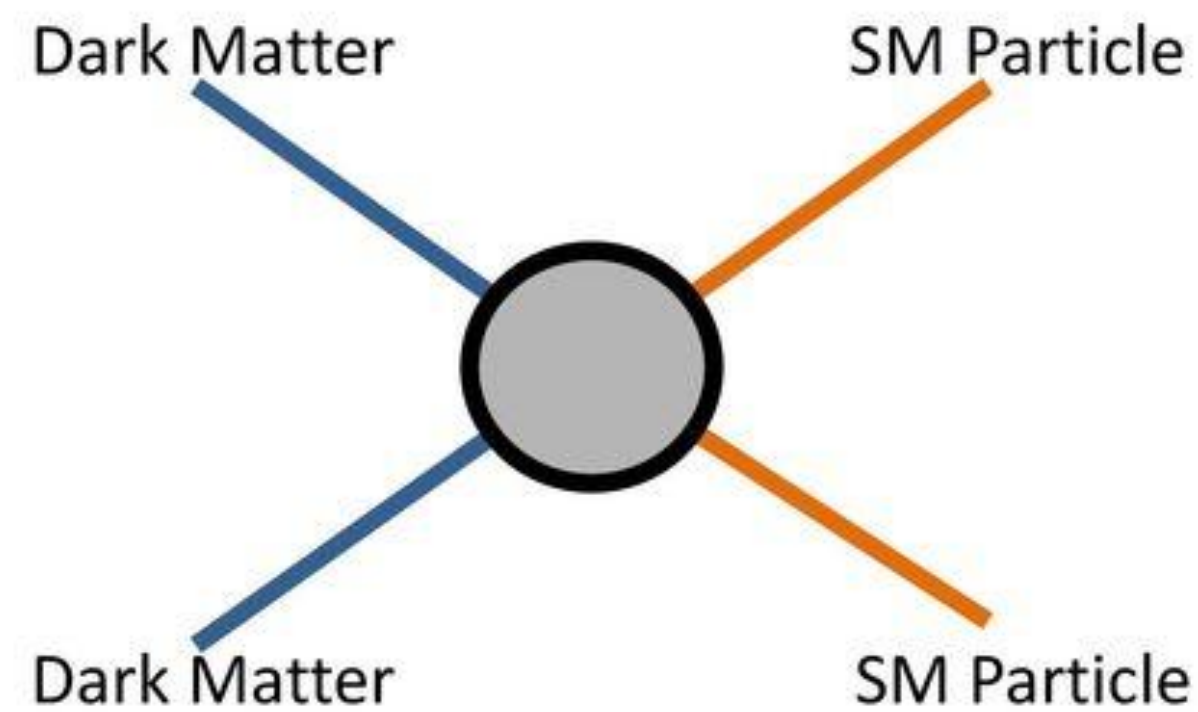
Ways to Detect Dark Matter – *Make, Shake and Break*



Make – collider production

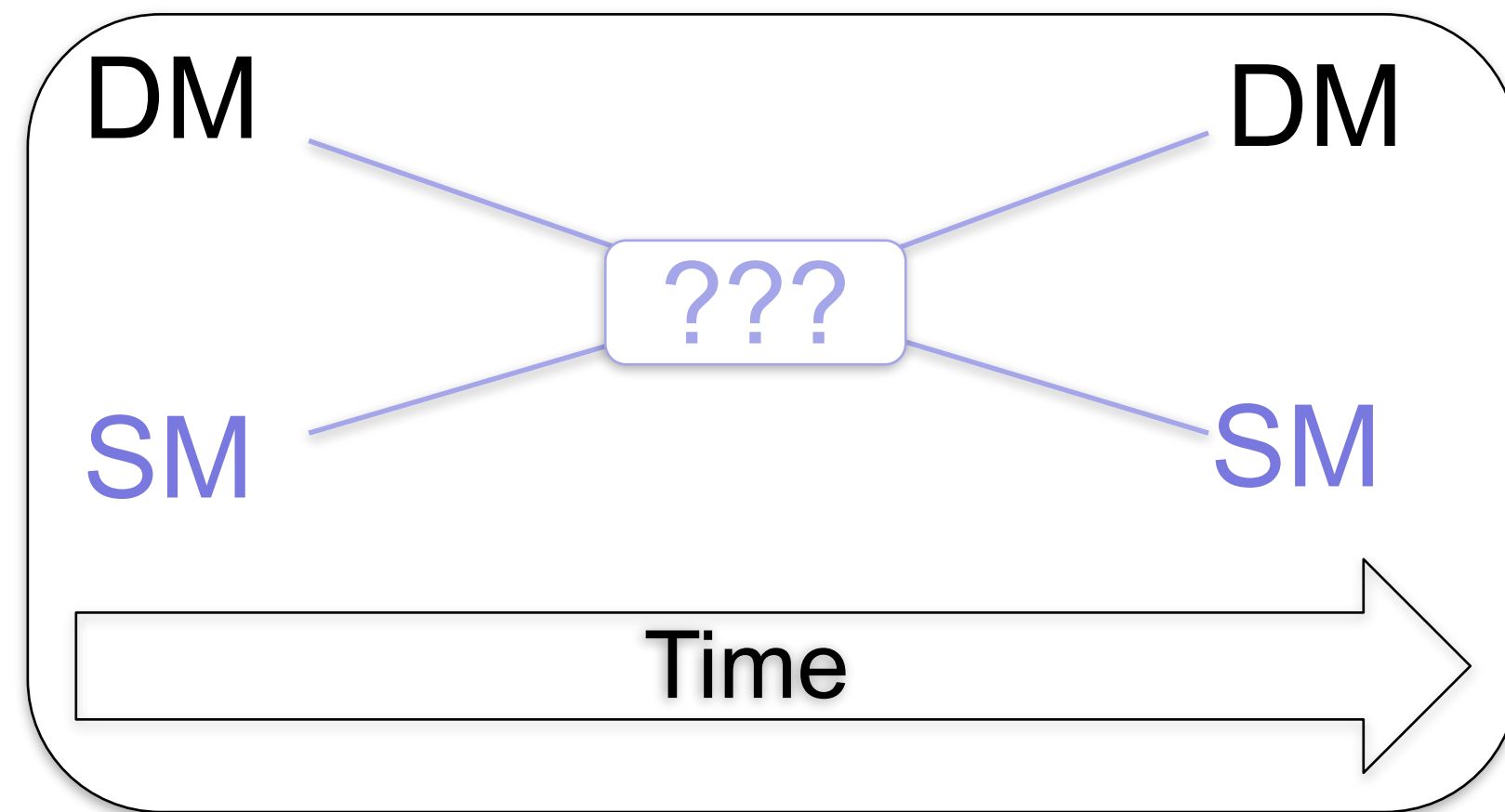


Shake – direct detection scattering



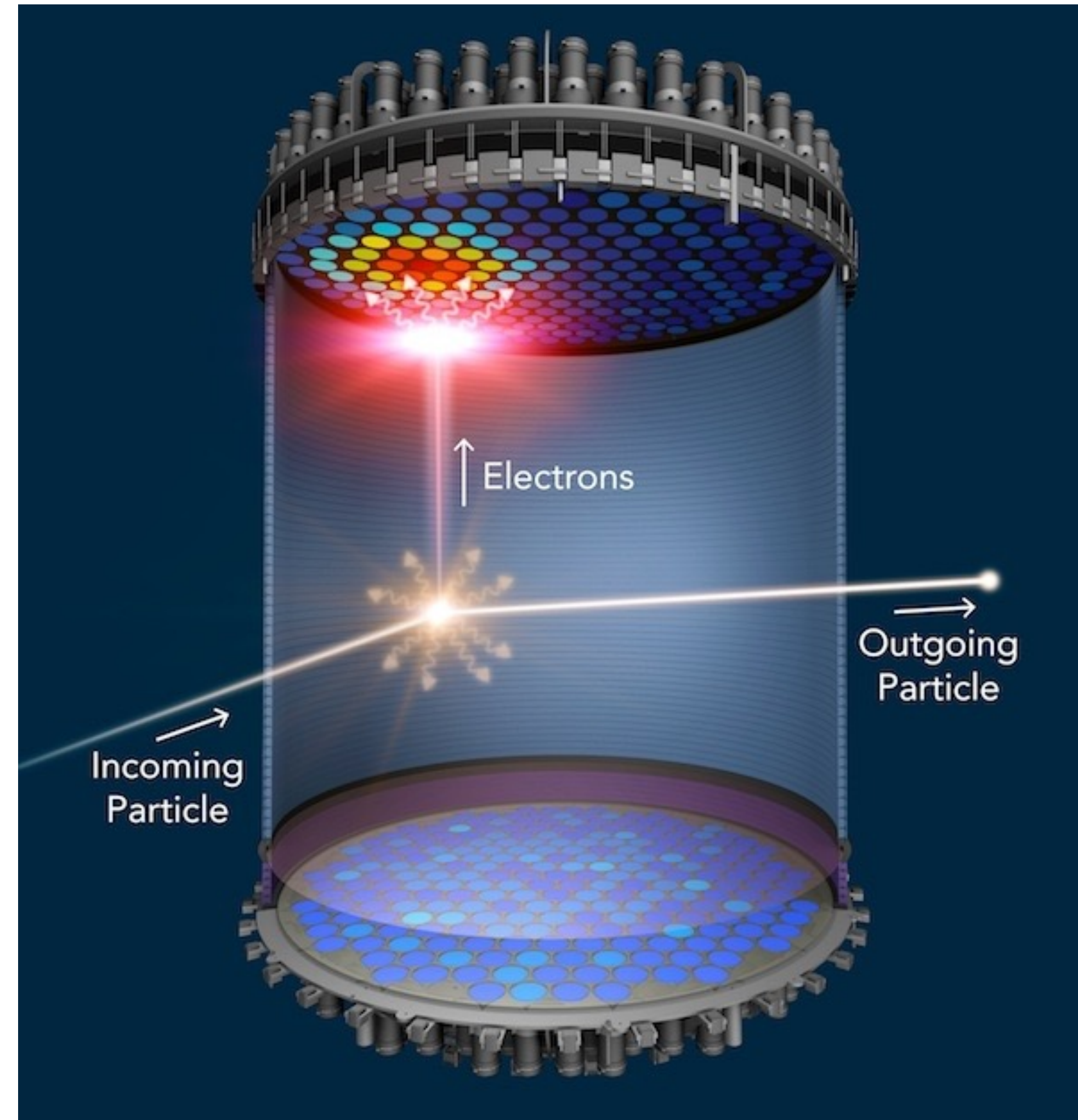
Break – indirect detection of annihilation

Ricerca diretta

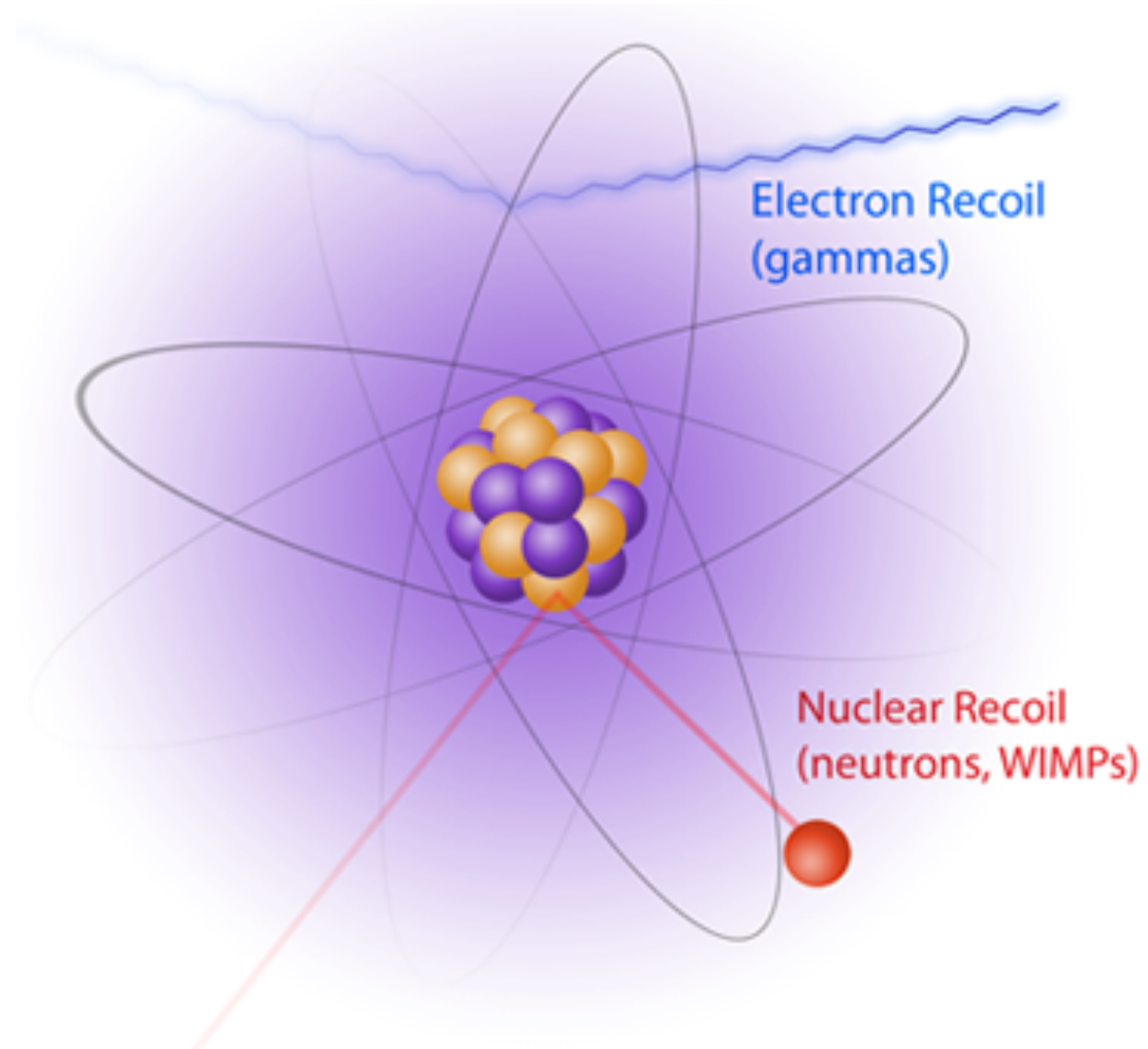


In questo caso, una particella di materia oscura interagisce con la materia ordinaria e lascia segnali che potremmo rilevare.

Tipicamente, è necessario che i rilevatori siano molto freddi e schermati (circa 1 km sottoterra) per poter distinguere questi segnali.

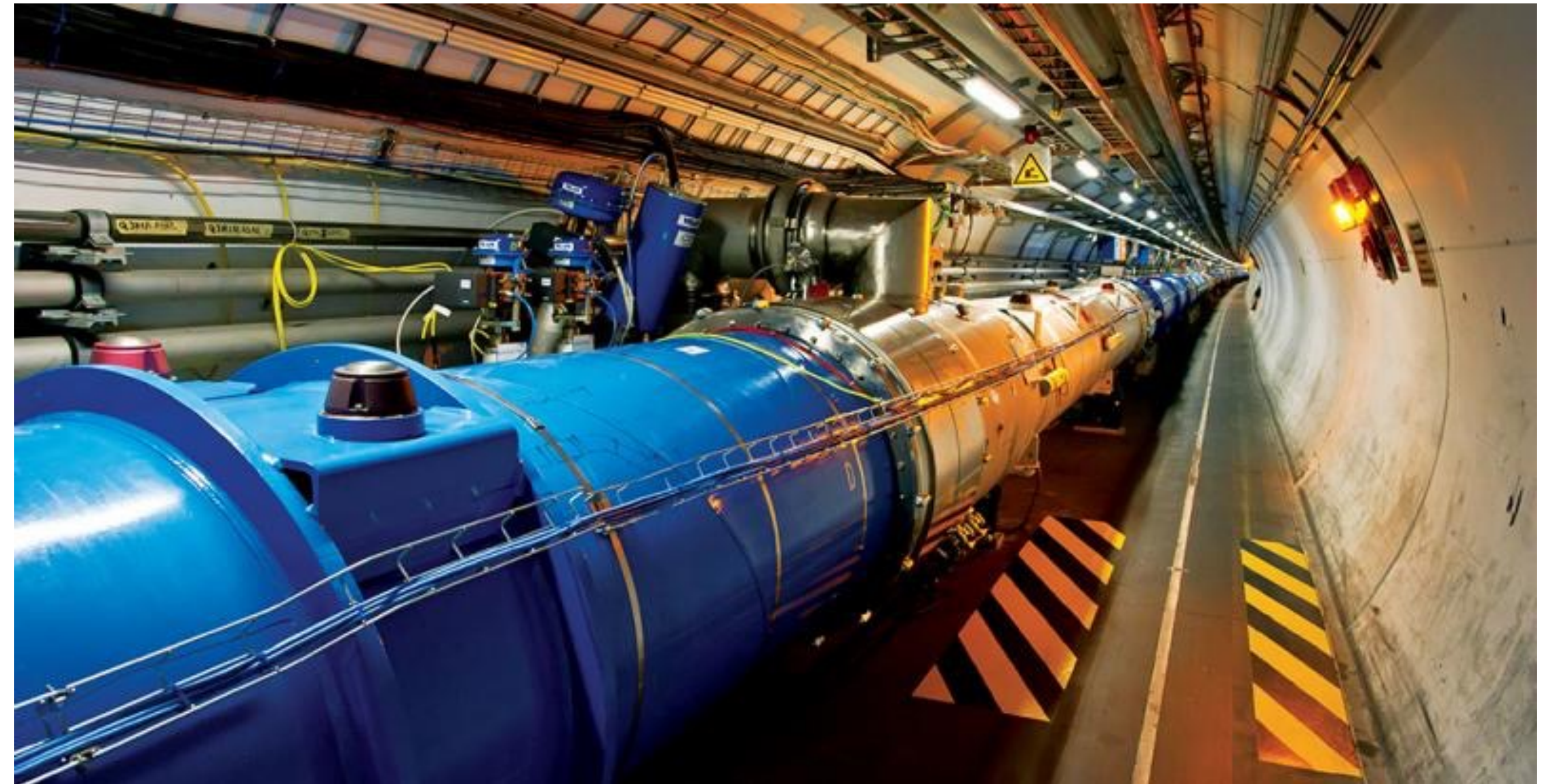
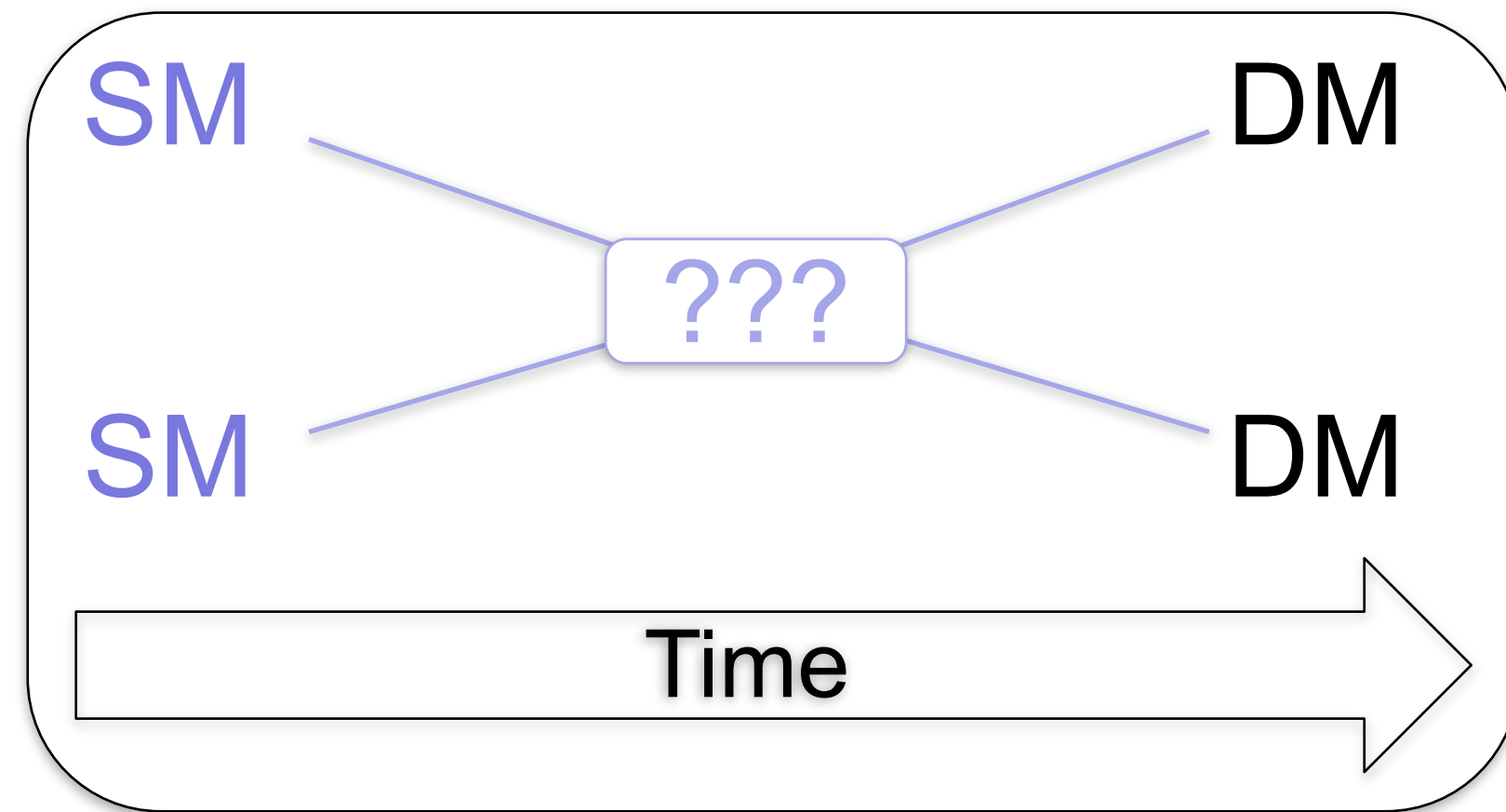


Ricerca diretta



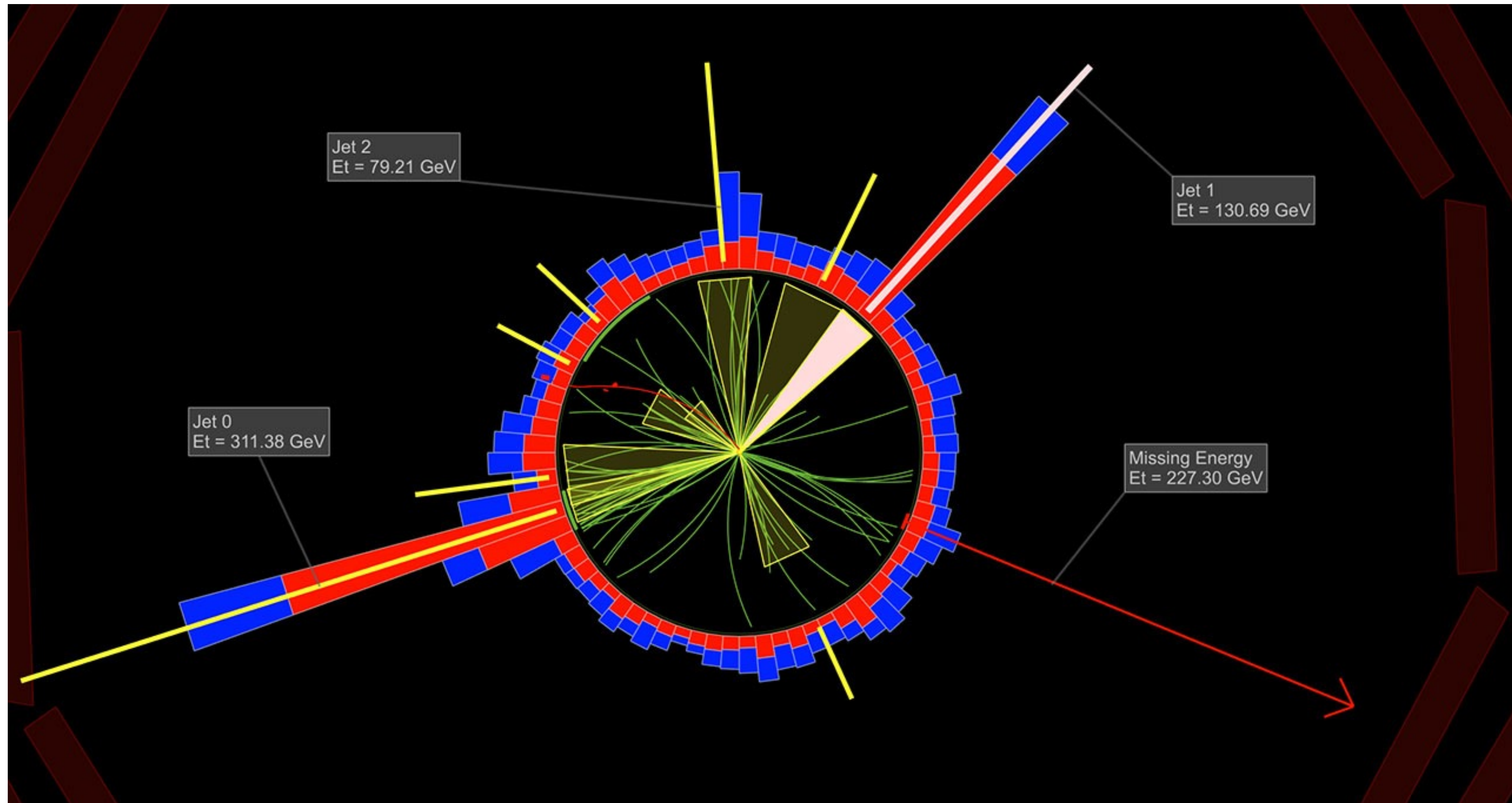
Produzione di materia oscura ai collisori

View down the Large Hadron Collider (LHC) Tunnel

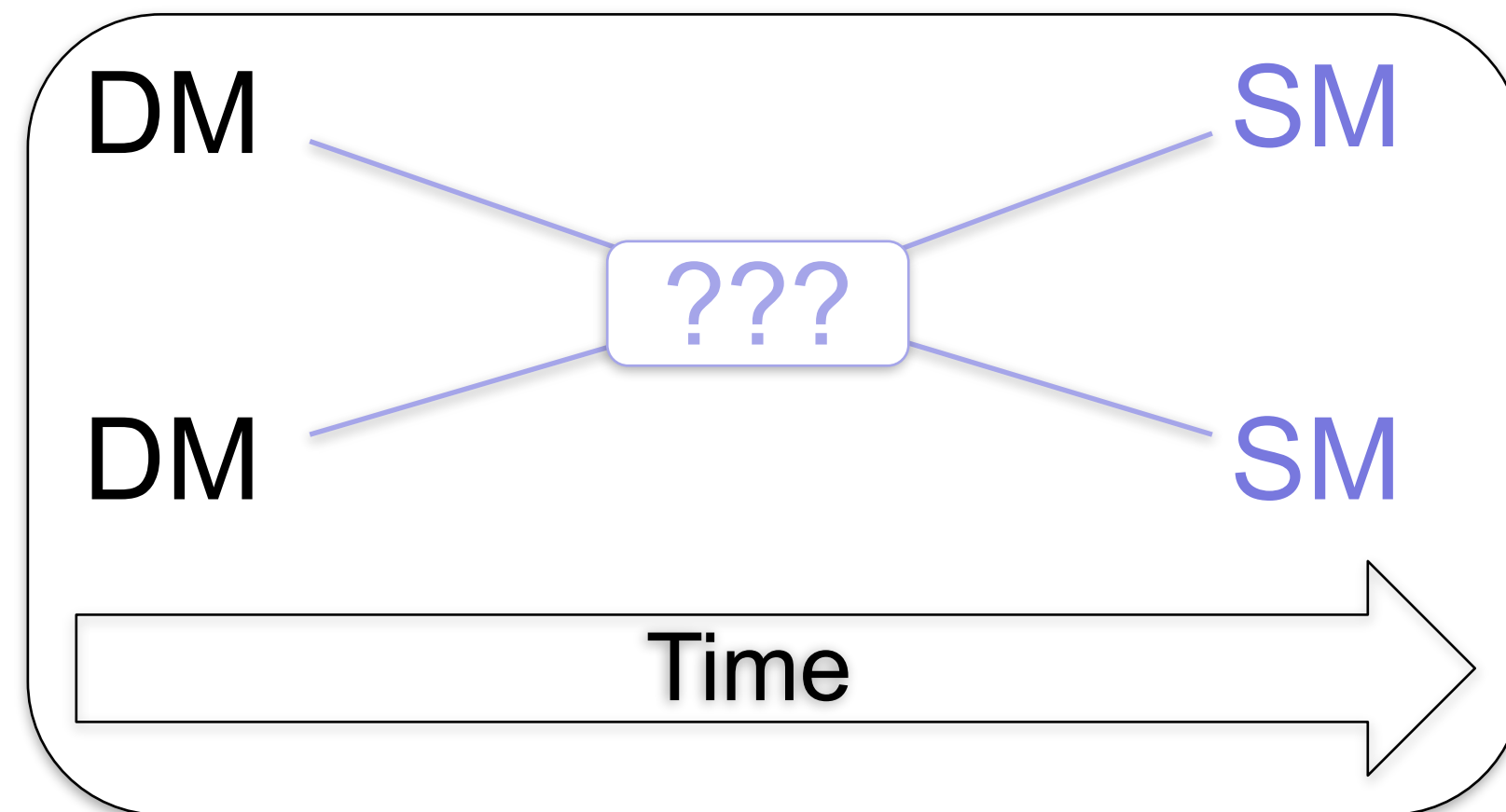


- In questo caso, le particelle di materia ordinaria si annichilano per produrre particelle di materia oscura.
- Questo potrebbe essere il modo in cui la materia oscura è stata creata nell'universo primordiale.
- Oggi, abbiamo bisogno di acceleratori di particelle per raggiungere le energie necessarie per produrre la materia oscura.

Energia mancante

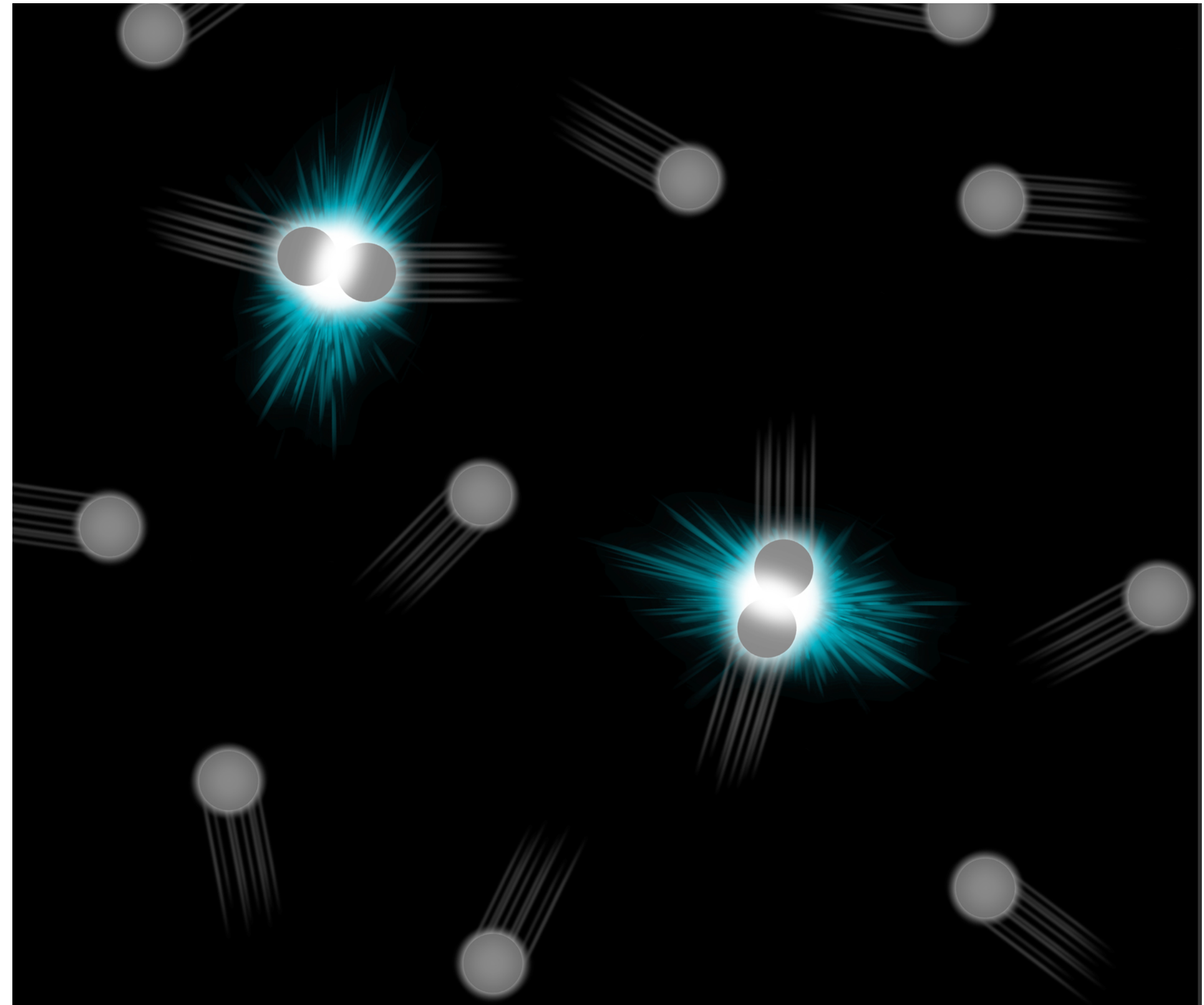


Ricerca indiretta di materia oscura



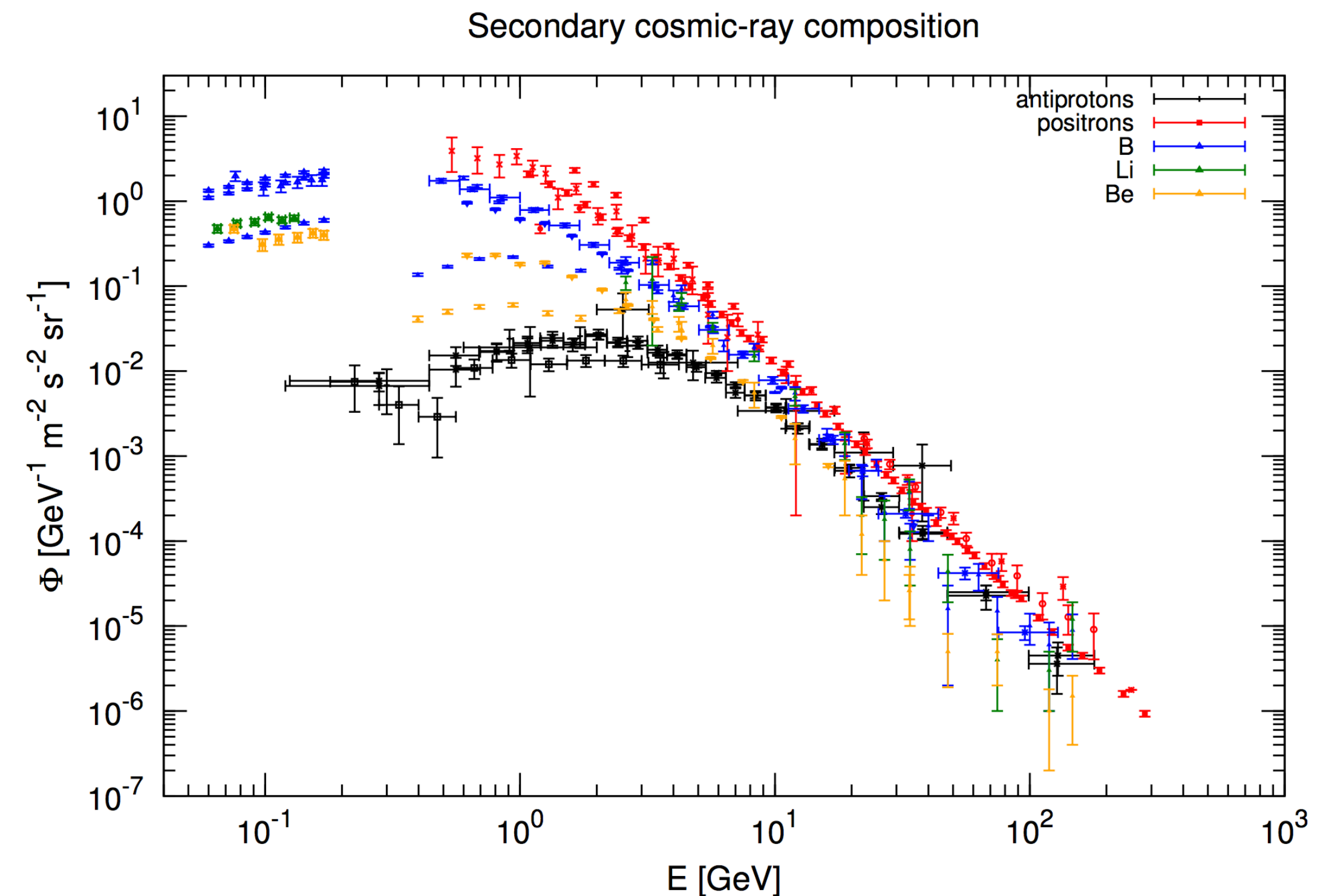
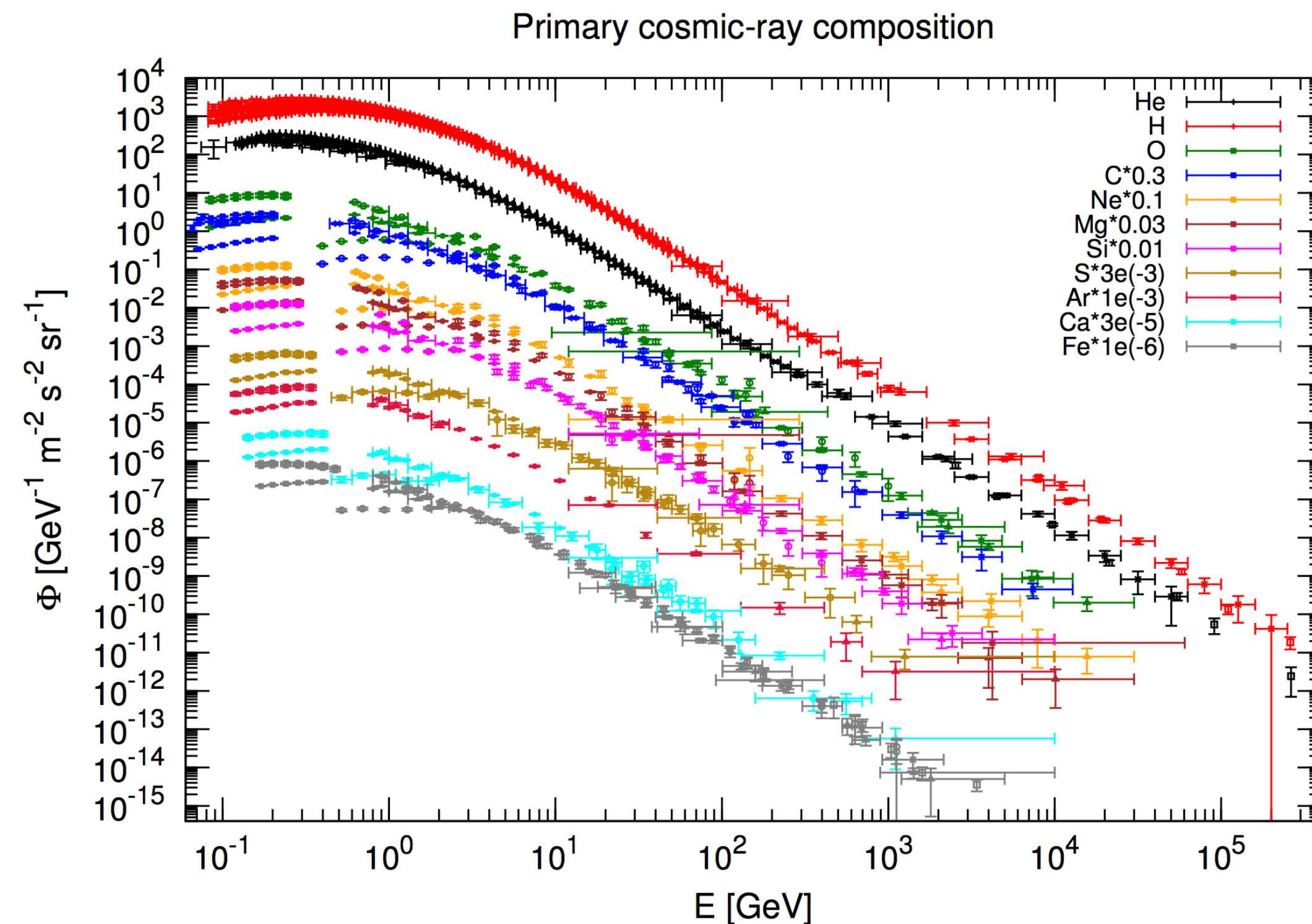
In questo caso, le particelle di materia oscura si annichilano tra loro e producono materia ordinaria.

In generale, i prodotti secondari dell'annichilazione includeranno molti tipi diversi di particelle.

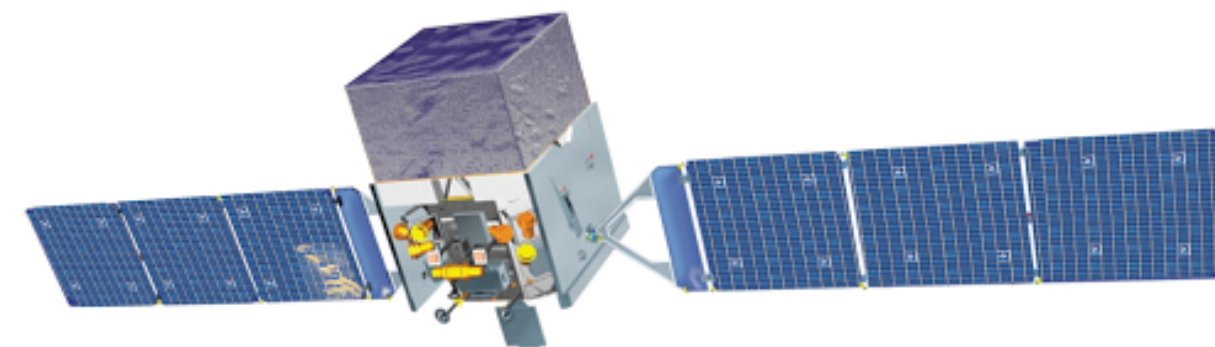
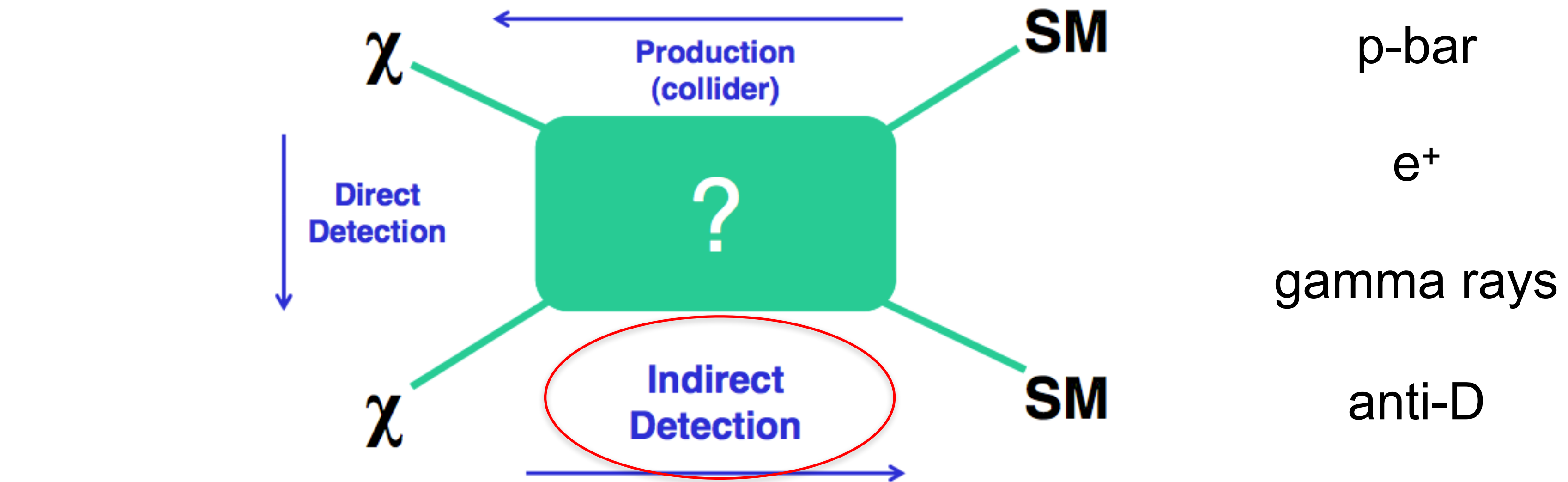


Spettro dei raggi cosmici

- Gli antiprotoni secondari, i positroni e i raggi gamma sono tra le particelle più rare nell'universo.
- La ricerca di firme di una produzione di materia oscura di queste particelle di raggi cosmici è una delle strategie più promettenti per rilevare queste particelle elusive.



Esperimenti rilevazione raggi cosmici



Fermi-LAT



AMS-02



CALET



DAMPE

Raggi gamma

Satellite galaxies

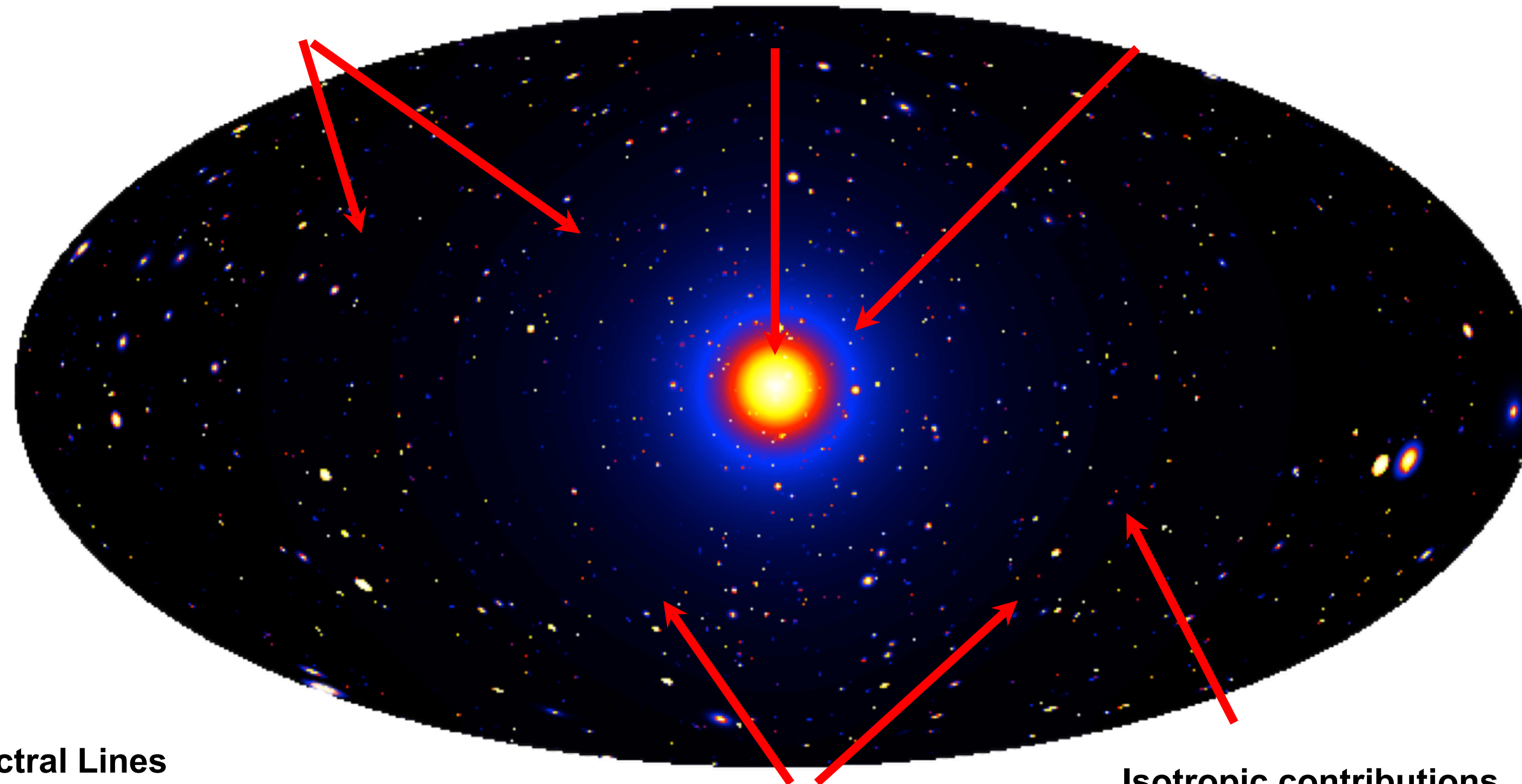
Low background and good source id, but low statistics

Galactic Center

Good statistics, but source confusion/diffuse background

Milky Way Halo

Large statistics, but diffuse background



Spectral Lines

Little or no astrophysical uncertainties, good source id, but low sensitivity because of expected small branching ratio

Galaxy Clusters

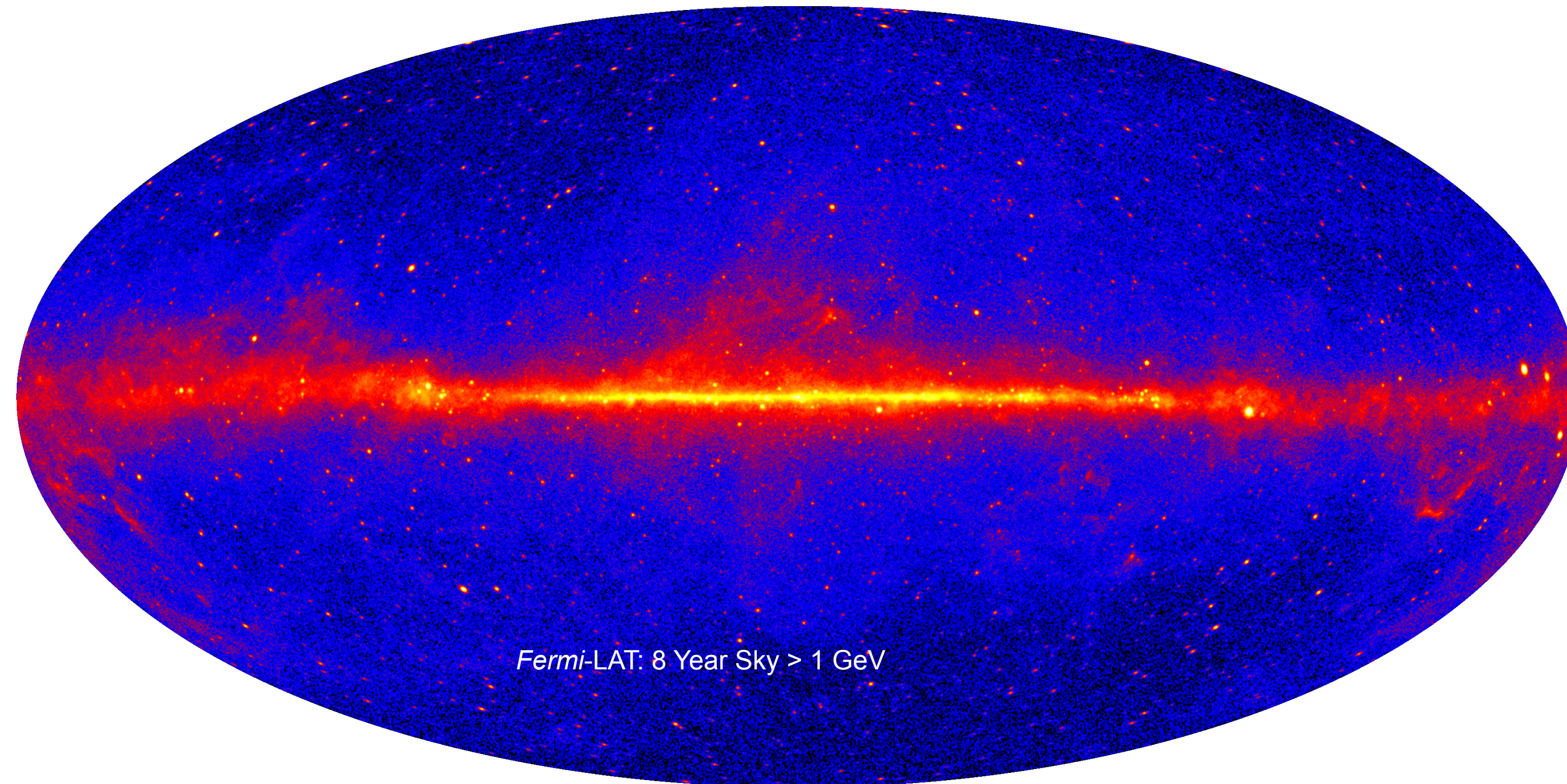
Low background, but low statistics

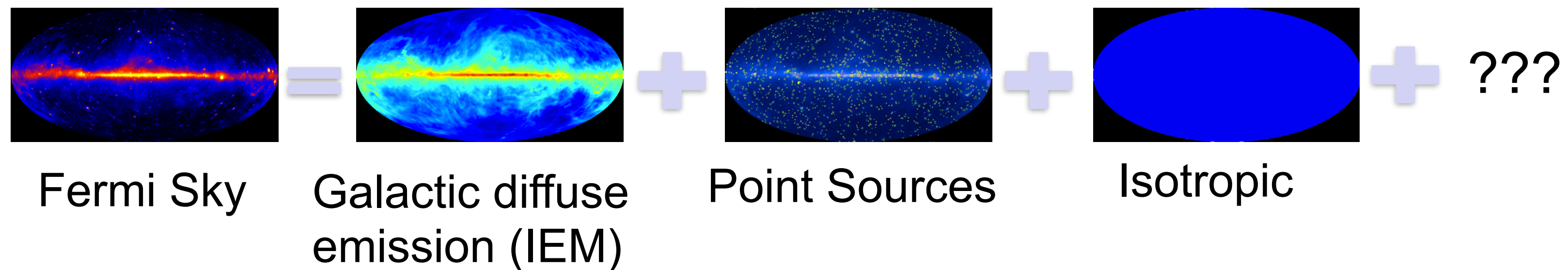
Isotropic contributions

Large statistics, but astrophysics, Galactic diffuse background

Mappa Fermi-LAT

LAT sees the whole γ -ray sky every 3 hours with [0.02,2000] GeV energy range and a good angular resolution at the GeV scale.





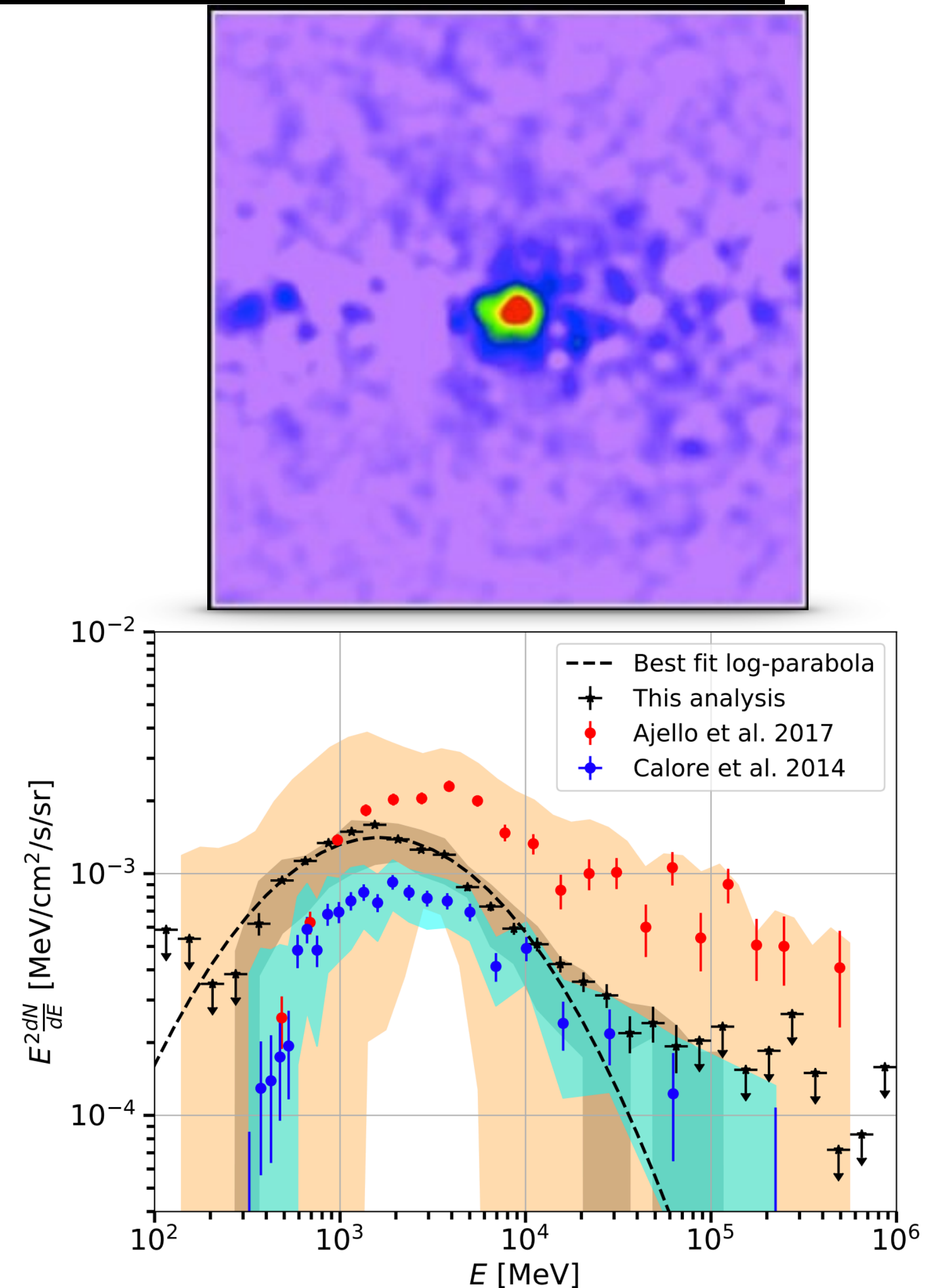
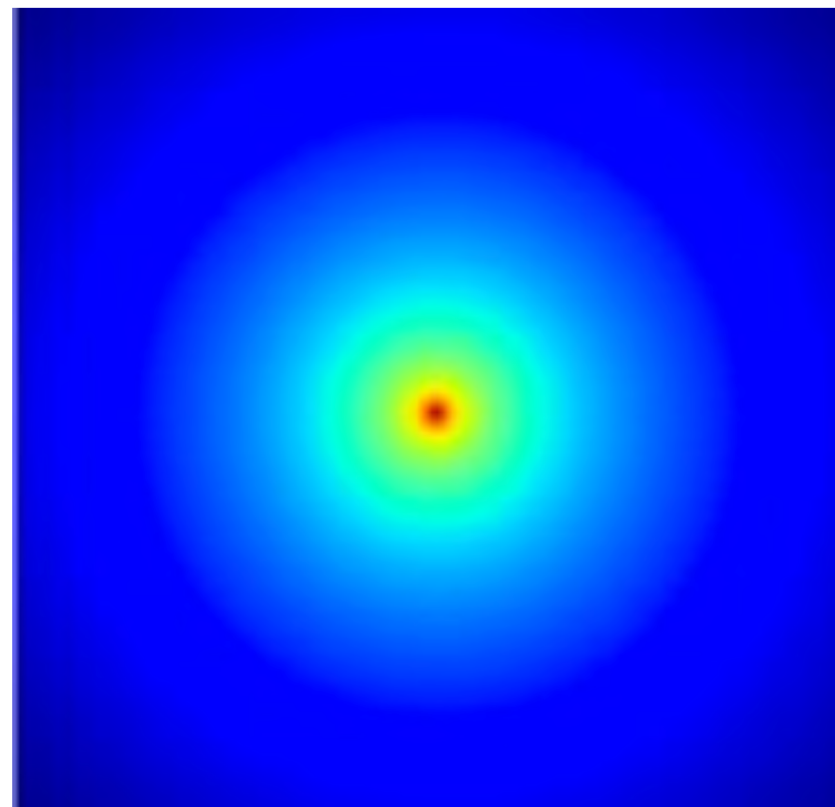
The diagram illustrates the decomposition of the Fermi Sky map into its constituent parts. It shows a sequence of four maps: the full Fermi Sky, the Galactic diffuse emission (IEM), the Point Sources, and the Isotropic component. These are combined using mathematical operators to show how the full sky map is constructed.

$$\text{Fermi Sky} = \text{Galactic diffuse emission (IEM)} + \text{Point Sources} + \text{Isotropic} + ???$$

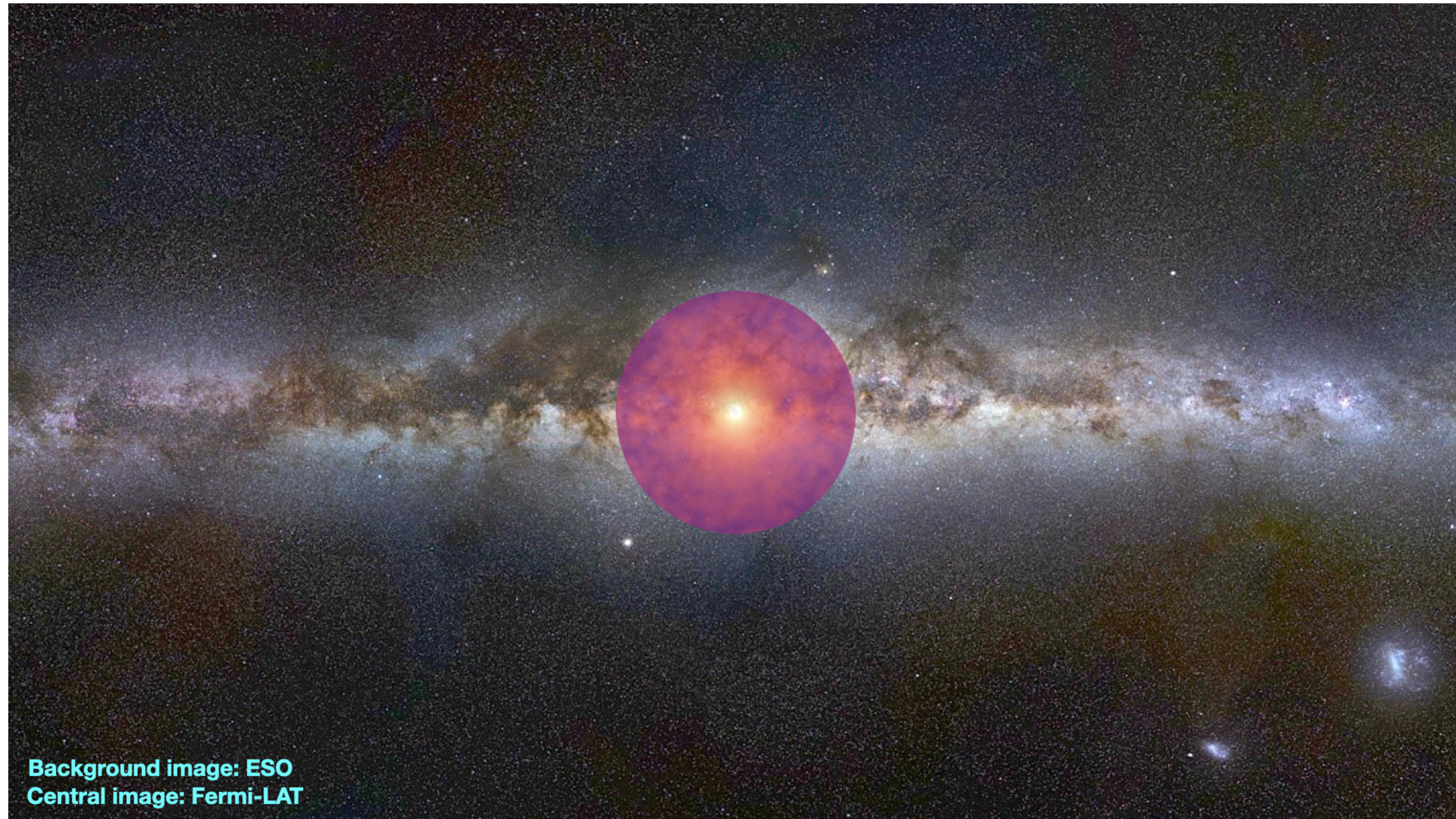
Fermi Sky Galactic diffuse emission (IEM) Point Sources Isotropic ???

Eccesso nella direzione del centro Galattico

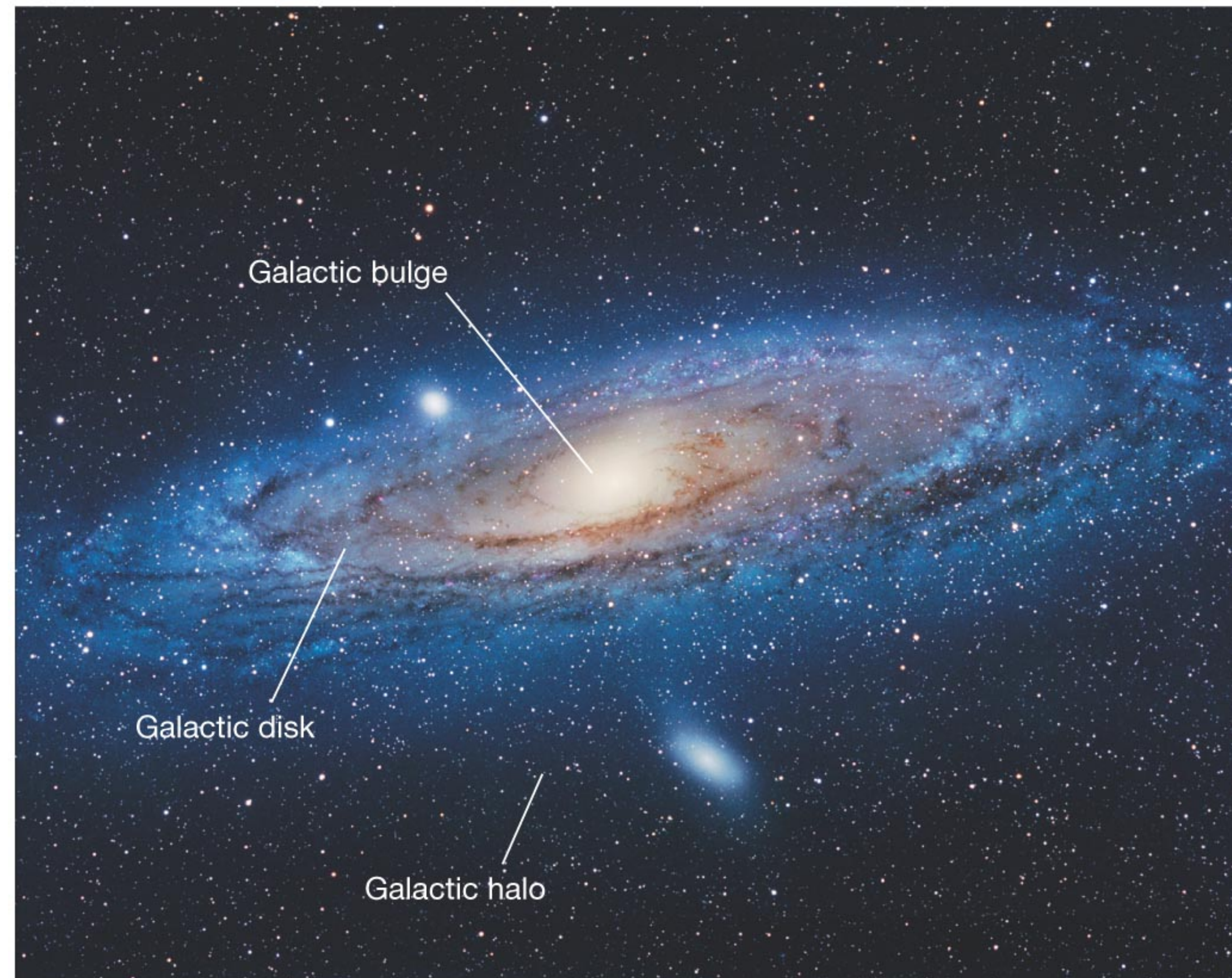
- Luminoso e altamente significativo.
- Spazialmente simmetrico attorno al centro galattico: $dVdN \propto r^{-2.5} \rightarrow$ compatibile con un profilo gNFW.
- Spettro energetico con un picco a pochi GeV $\rightarrow$ materia oscura che si annichila in un bottom-antibottom (bb) con MDM =40 GeV.
- È necessaria una sezione d'annichilazione approssimativamente uguale alla sezione d'annichilazione termica.



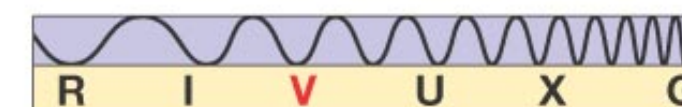
Eccesso nella direzione del centro Galattico



Pulsar nel bulge



(a)



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Pearson Addison-Wesley.