

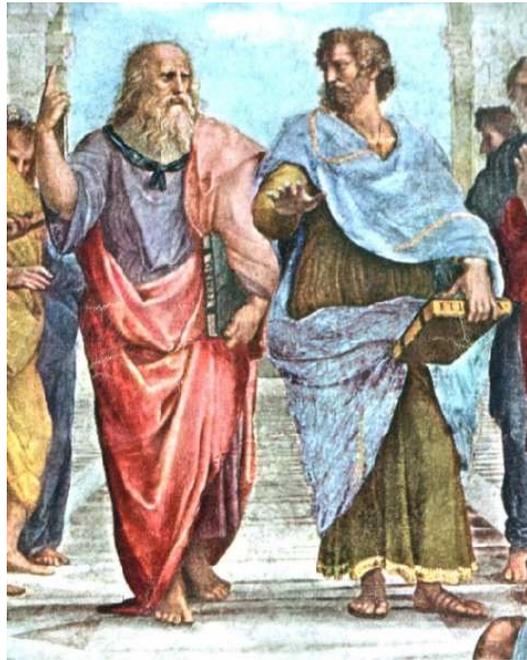
A graphic of a spotlight is positioned on the left side of the slide. The spotlight is dark grey and black, with a bright yellow beam of light shining downwards and to the right. The beam illuminates the title text.

Materia Oscura

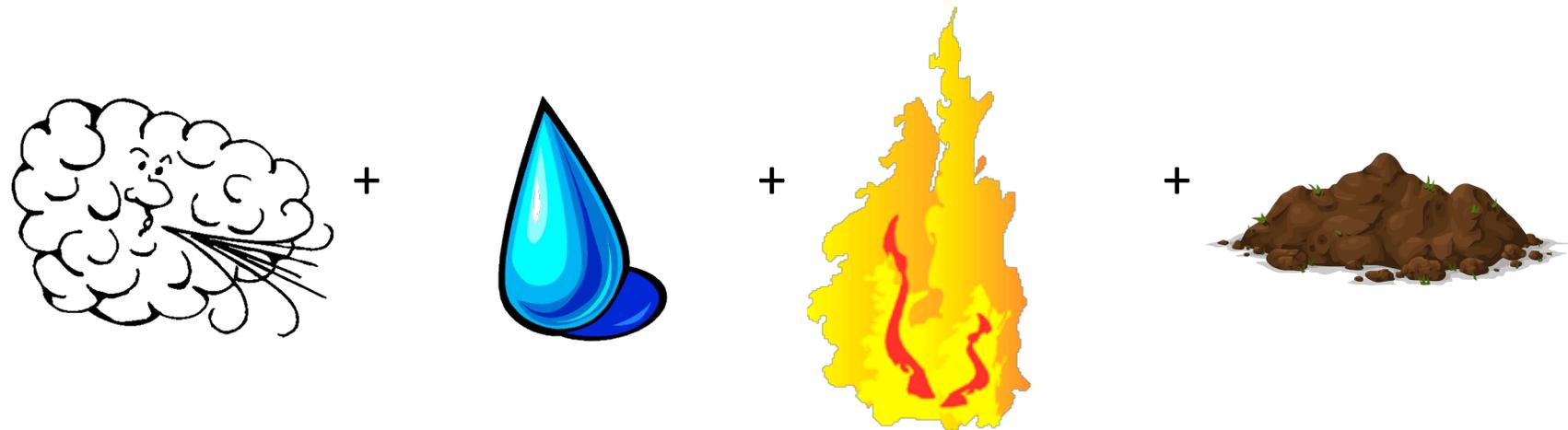
La moderna quintessenza dell'universo

La Quintessenza

È stato Aristotele che per primo ha introdotto questo concetto.



Gli studiosi dell'antica Grecia credevano che in natura ci fossero 4 elementi. Un "quinto elemento" l'**etere** era quello che, secondo Aristotele, costituiva l'essenza del mondo celeste.



L'idea di un fondo di materia invisibile che pervade l'universo si è riproposta a più riprese nella storia della scienza.

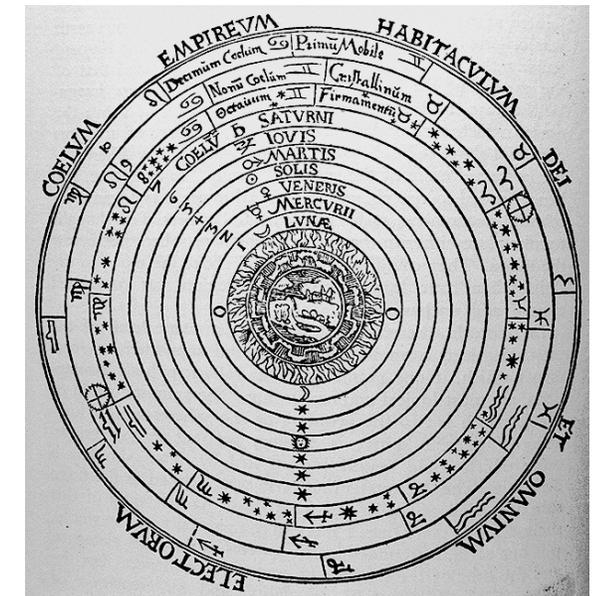
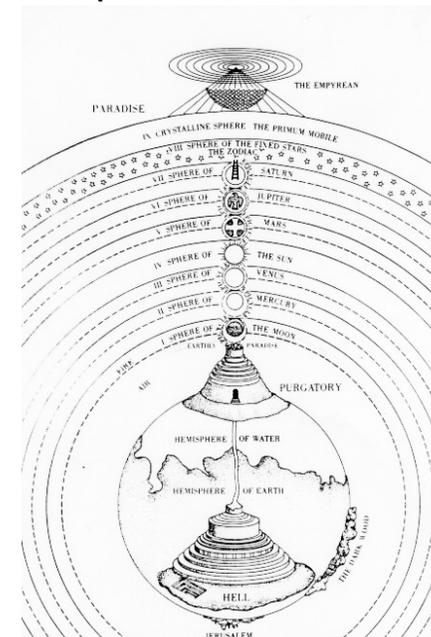
Storia della cosmologia

La **cosmologia** è lo studio dell'Universo, dei suoi componenti, come si è formato e come evolve. La cosmologia nasce con l'uomo ed è spesso stata legata alla religione.



In occidente il Sistema Tolemaico geo-centrico (200 D.C.) è stato la prima teoria scientifica che ha cercato di classificare e predire le posizioni dei corpi celesti.

Ma esistevano anche teorie elio-centriche (Aristarco 270 A.C.)

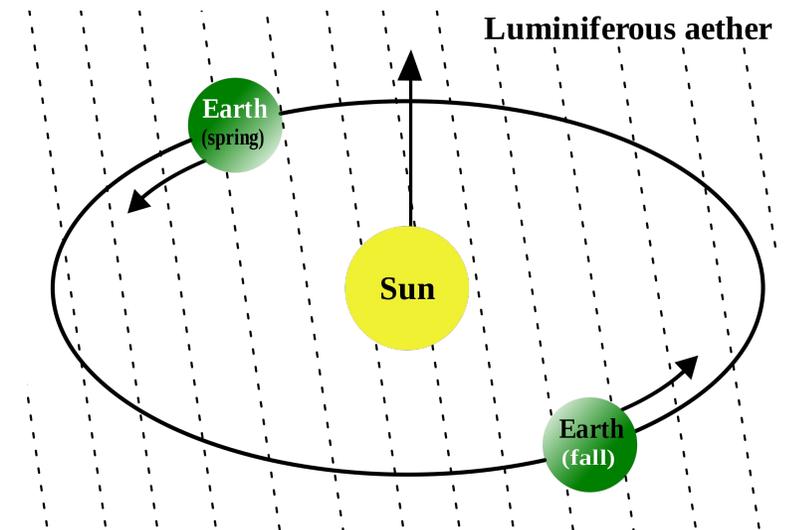


Sposata dalla chiesa cattolica con qualche modifica l'idea Tolemaica è stata in auge fino al 1600.

L'etere e la relatività

Dopo la scoperta delle onde elettromagnetiche, le conoscenze fisiche del tempo imponevano di trovare un elemento attraverso il quale le onde elettromagnetiche potessero propagarsi.

Si credeva che le onde elettromagnetiche non potessero propagarsi nel vuoto e si rispolverò l'esistenza dell'etere: una sostanza che permeasse l'universo permettendo alle onde elettromagnetiche di propagarsi.

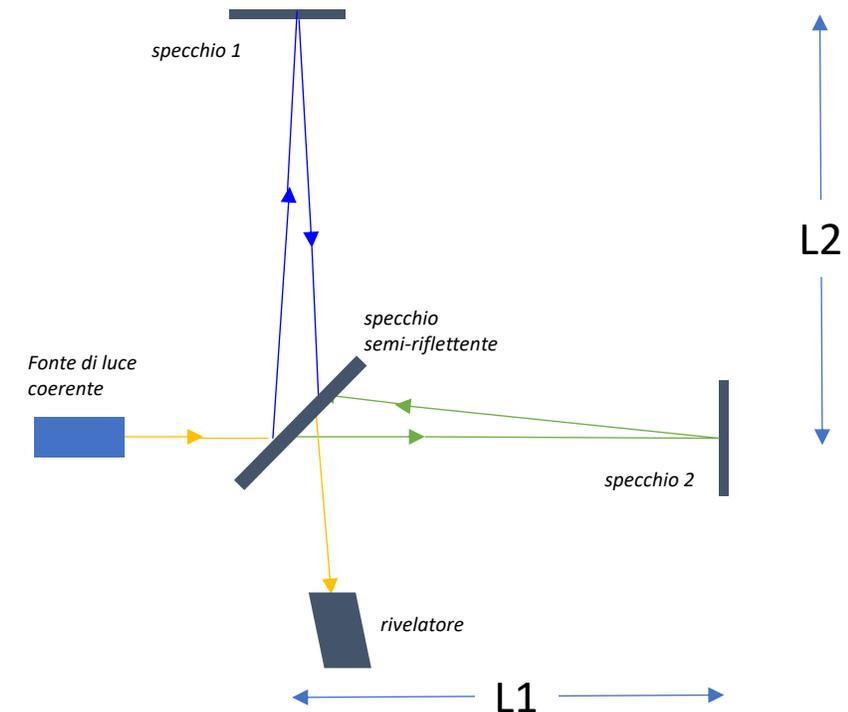


L'esperimento di Michelson e Morley

Nel 1887 Albert Michelson ed Edward Morley si proposero di verificare l'esistenza dell'etere.

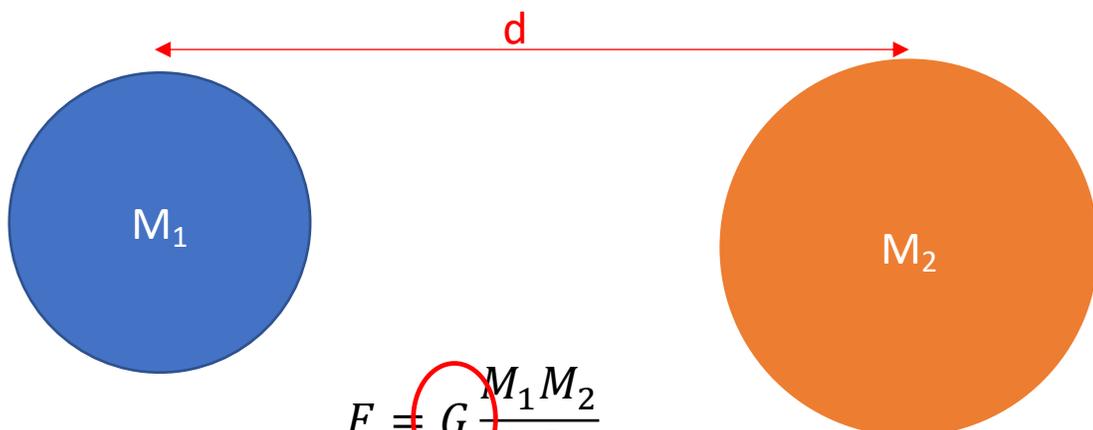
Essi pensarono che se tutto lo spazio è pervaso dall'etere, il moto della terra attraverso l'etere poteva essere misurato.

L'esperimento, non diede i risultati previsti in quanto non esisteva alcuna differenza nella velocità dei due raggi luminosi, qualunque fosse la direzione in cui essi si propagavano.



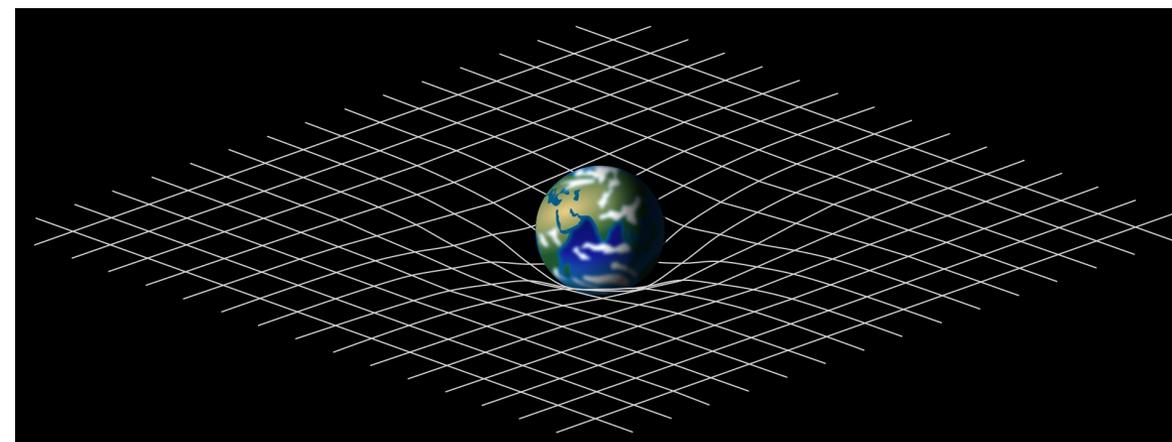
Gravità newtoniana - Gravità einsteniana

Con l'affermarsi della **teoria della relatività generale** si sono costruiti nuovi modelli dell'universo e si è passati a considerare lo spazio-tempo in modo diverso. La gravità non è più vista come un'azione a distanza fra corpi massivi, ma **l'effetto di una legge fisica che determina una curvatura dello spazio-tempo**.



Costante gravitazionale di Newton

$$G = 6.673 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$$

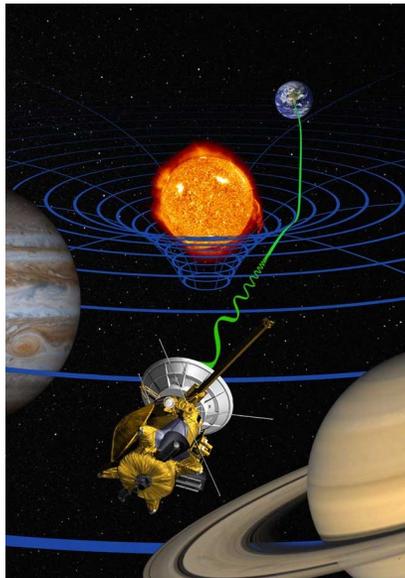


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

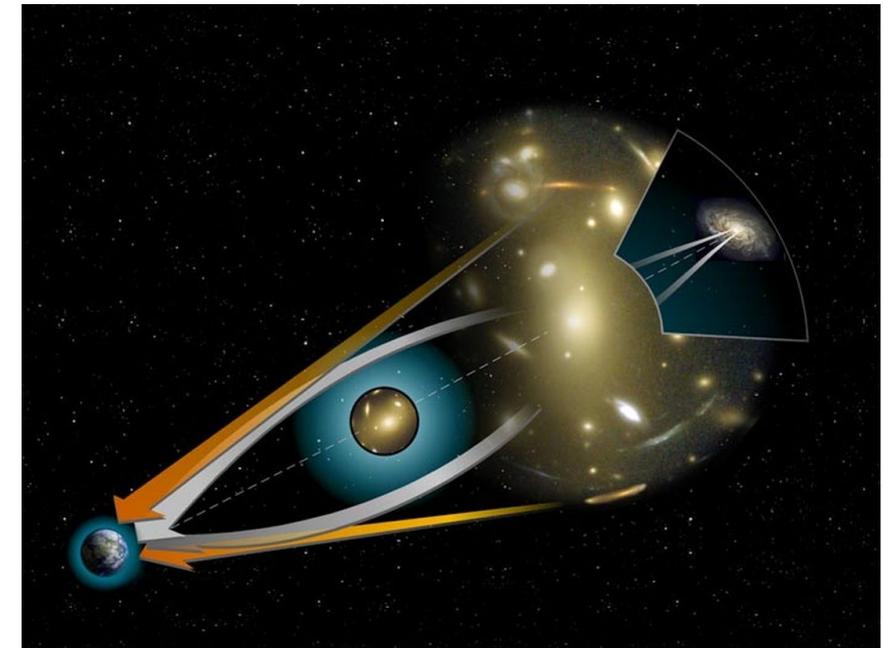
Costante gravitazionale di Einstein

Effetto lente

Sulla base della teoria della gravità di Einstein non solo gli **oggetti massivi**, ma anche quelli **privi di massa**, come la luce, **subiscono un effetto gravitazionale** quando si trovano ad attraversare le deformazioni dello spazio.



La deflessione della luce per effetto della gravità genera immagini distorte analoghe a quelle prodotte da una lente.
La presenza di un corpo massivo sulla traiettoria della luce provoca distorsioni o, addirittura, immagini multiple della stessa sorgente.



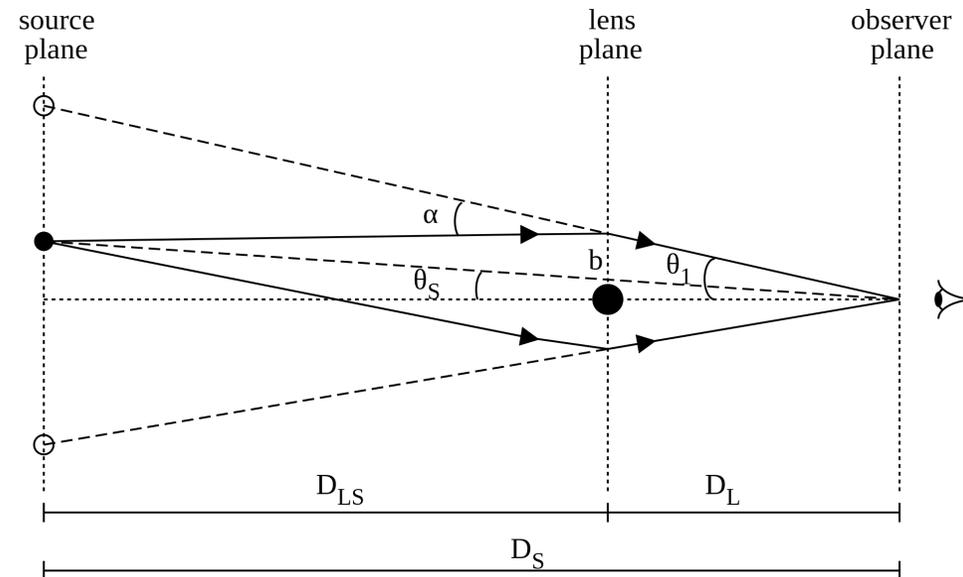
Le similitudini con l'ottica hanno fatto sì che il fenomeno sia stato battezzato **lente gravitazionale**, o *lensing* gravitazionale.

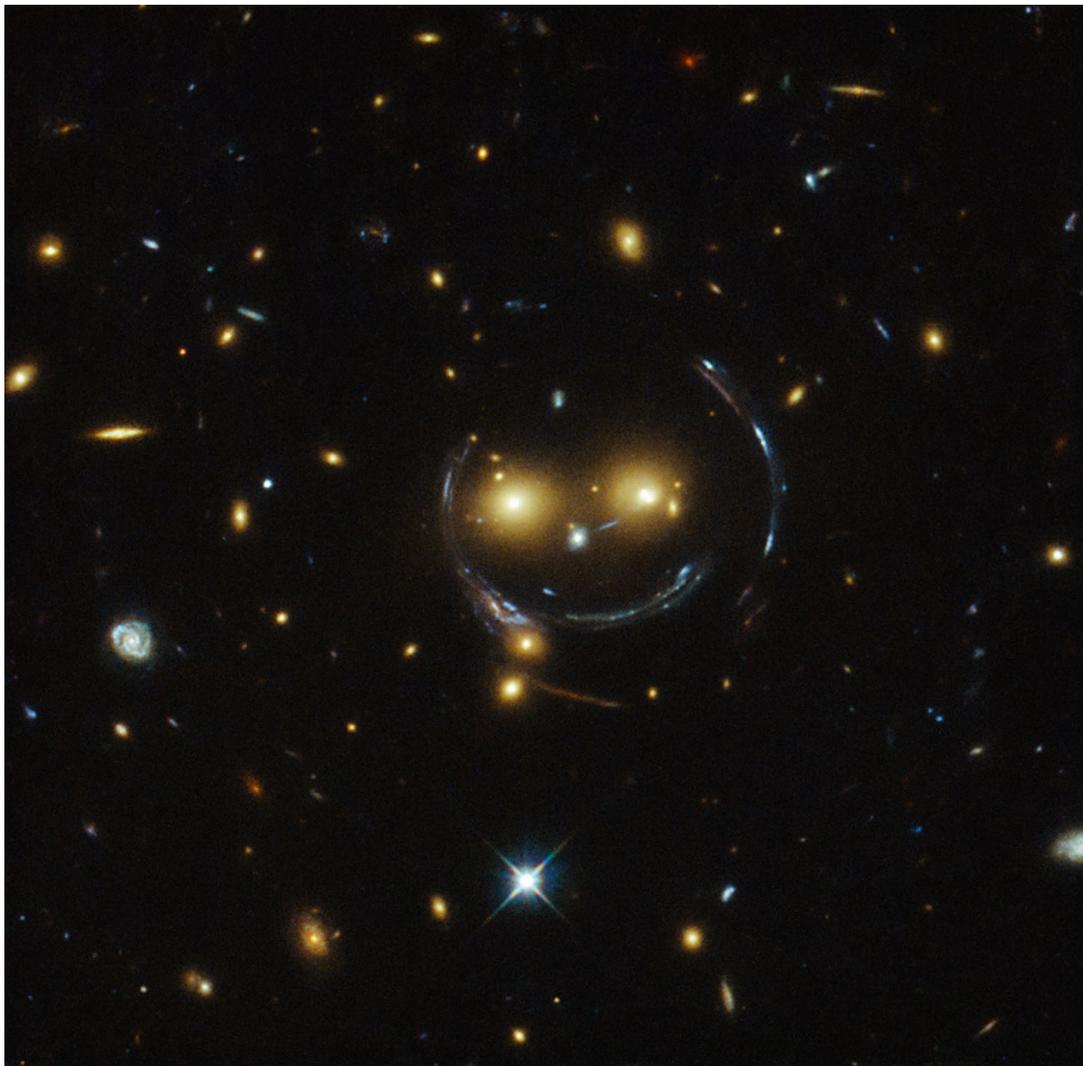
L'anello di Einstein

La luce proveniente da una stella o una galassia se sul suo tragitto passa in prossimità di un oggetto molto massiccio viene deviata.



Quando la stella, l'oggetto e l'osservatore sono perfettamente allineati, si ha un anello completo





Lo **Stregatto** fenomeno di lente gravitazionale
osservato nel cluster di galassie SDSS J1038+4849

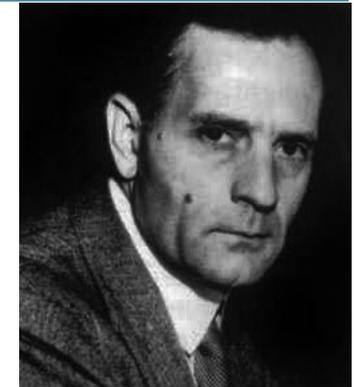


Cosmologia moderna

La cosmologia moderna nasce fra il 1915 ed il 1929:

- 1915 Einstein pubblica la teoria della relatività generale
- Lemaître e Friedman risolvono le equazioni di Einstein e determinano l'espansione dell'Universo
- 1929 Hubble scopre il red-shift delle galassie, dimostrando che l'Universo si espande.

Edwin Hubble
1889 –1953

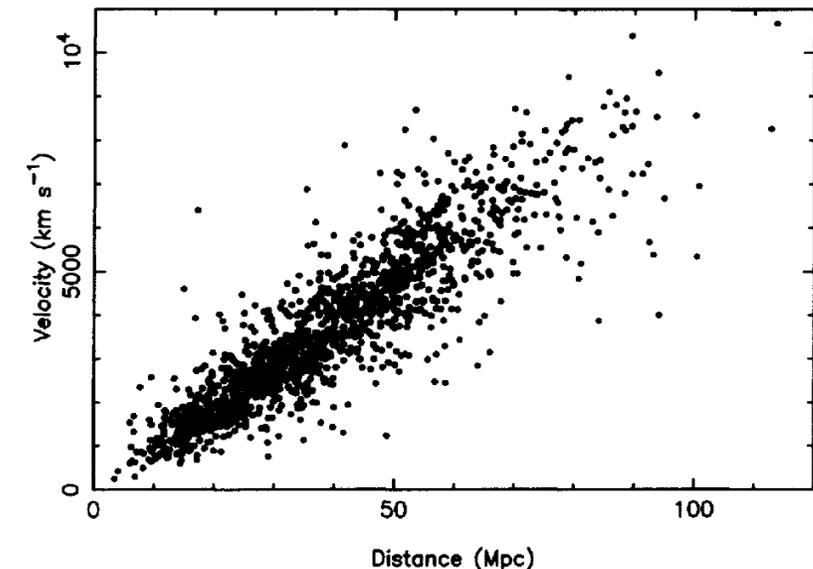


$$v = H_0 D$$

La velocità di allontanamento è proporzionale alla distanza.

Il red-shift è lo spostamento di alcune transizioni note verso frequenze più basse

$$z = \frac{f_{emis} - f_{oss}}{f_{oss}}$$

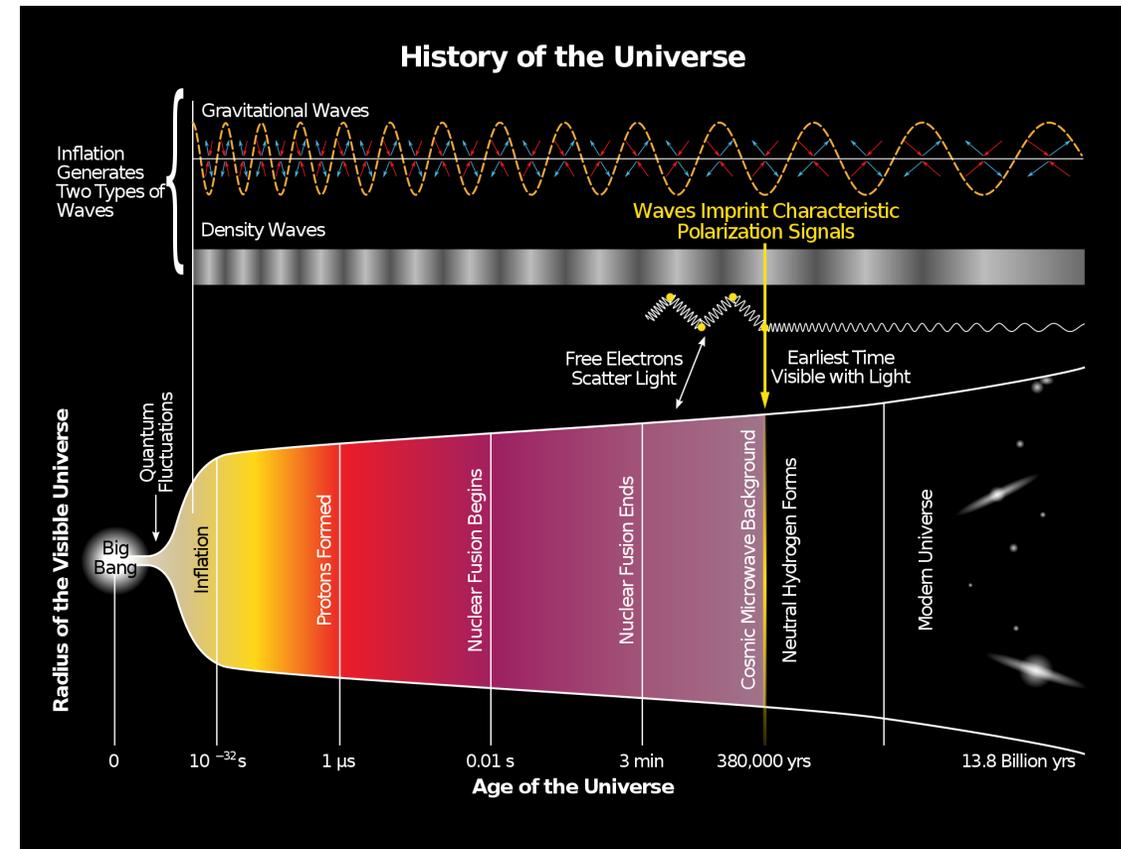


Velocità di allontanamento di 1355 galassie

La storia dell'Universo 1

La teoria del Big Bang ci dice che il nostro universo ha avuto inizio 13.7 miliardi di anni fa.

- Dopo «l'esplosione» per un tempo pari a 10^{-43} s l'universo si trovava in uno stato in cui le 4 forze che conosciamo avevano la stessa intensità e forse erano unificate (Planck Era).
- Si forma quindi lo spazio-tempo e la gravità si separa dalle altre forze (Grand-unification Era).
- Ad un tempo pari a 10^{-32} s si entra nell'era dell'inflazione. L'universo comincia ad espandersi e il campo di Higgs da origine alle coppie particella-antiparticella.
- A 10^{-6} s Inizia l'era degli adroni. Quark e antiquark cominciano a legarsi.
- Ad un tempo pari a ~ 350.000 anni la materia rallenta e i fotoni si separano



Osservazione il cosmo

Osservando le galassie si vede che sono più brillanti al centro che in periferia.

Questo implica che la maggioranza delle stelle, quindi della materia, si trovi nel centro.

Se questo fosse vero la velocità con cui si muovono i corpi celesti più lontani dal centro dovrebbe essere minore.

$$v_r(r) = \sqrt{\frac{G_N M(r)}{r}}$$

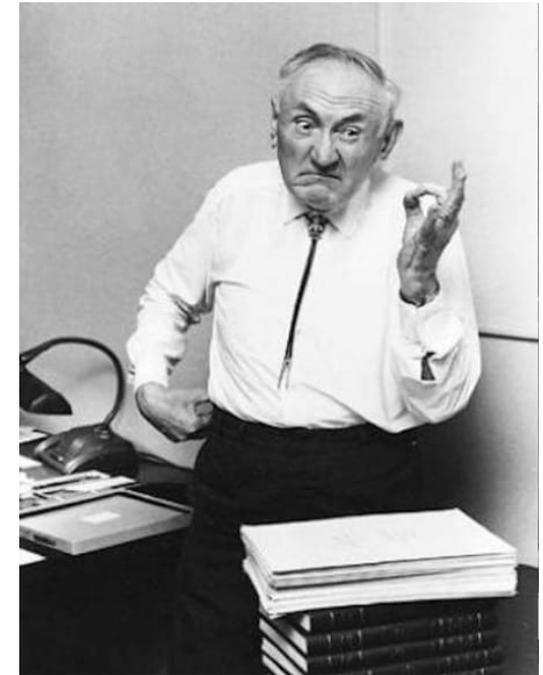


Materia Oscura

Nel 1933 Fritz Zwicky studiando il moto di ammassi di galassie stimò la massa di ogni galassia dell'ammasso basandosi sulla loro **luminosità** e sommò tutte le masse galattiche per ottenere la massa totale.

Una seconda stima indipendente della massa totale la ottenne studiando la dispersione delle velocità individuali delle galassie nell'ammasso.

Questa seconda stima era 400 volte più grande di quella basata sulla luce delle galassie.



Fritz Zwicky
1898 – 1974

Ne concluse che dovesse esserci «*dunkel materie*» per spiegare la discrepanza fra i due risultati.

Vera Rubin e la rotazione delle galassie

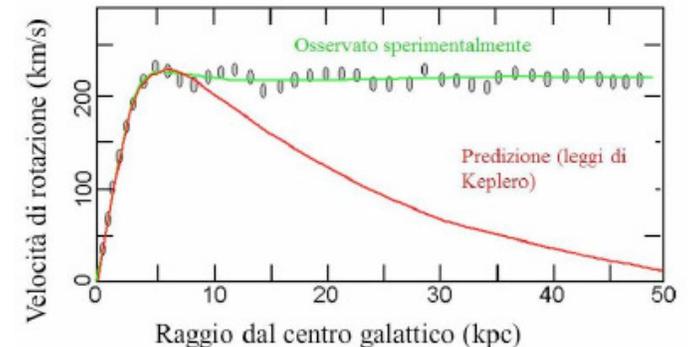


Vera Rubin
1928 – 2016

Negli anni '70, l'avvento dei radio telescopi rese possibile misurare le velocità di rotazione dei corpi celesti, in funzione della distanza dal centro di una galassia, non solo calcolarle con le leggi della meccanica come fatto da Zwicky.

Nello specifico la misura si fa usando l'effetto Doppler di una transizione dell'atomo di idrogeno.

Vera Rubin studiò la rotazione delle galassie spirali. Queste contengono una vasta popolazione di stelle poste su orbite quasi circolari attorno al centro galattico. Secondo la seconda legge di Keplero le stelle con orbite galattiche più grandi dovrebbero avere velocità orbitali minori.



Per dare conto dell'osservazione sperimentale si pensò che ci fosse della massa mancante che circondava le galassie.

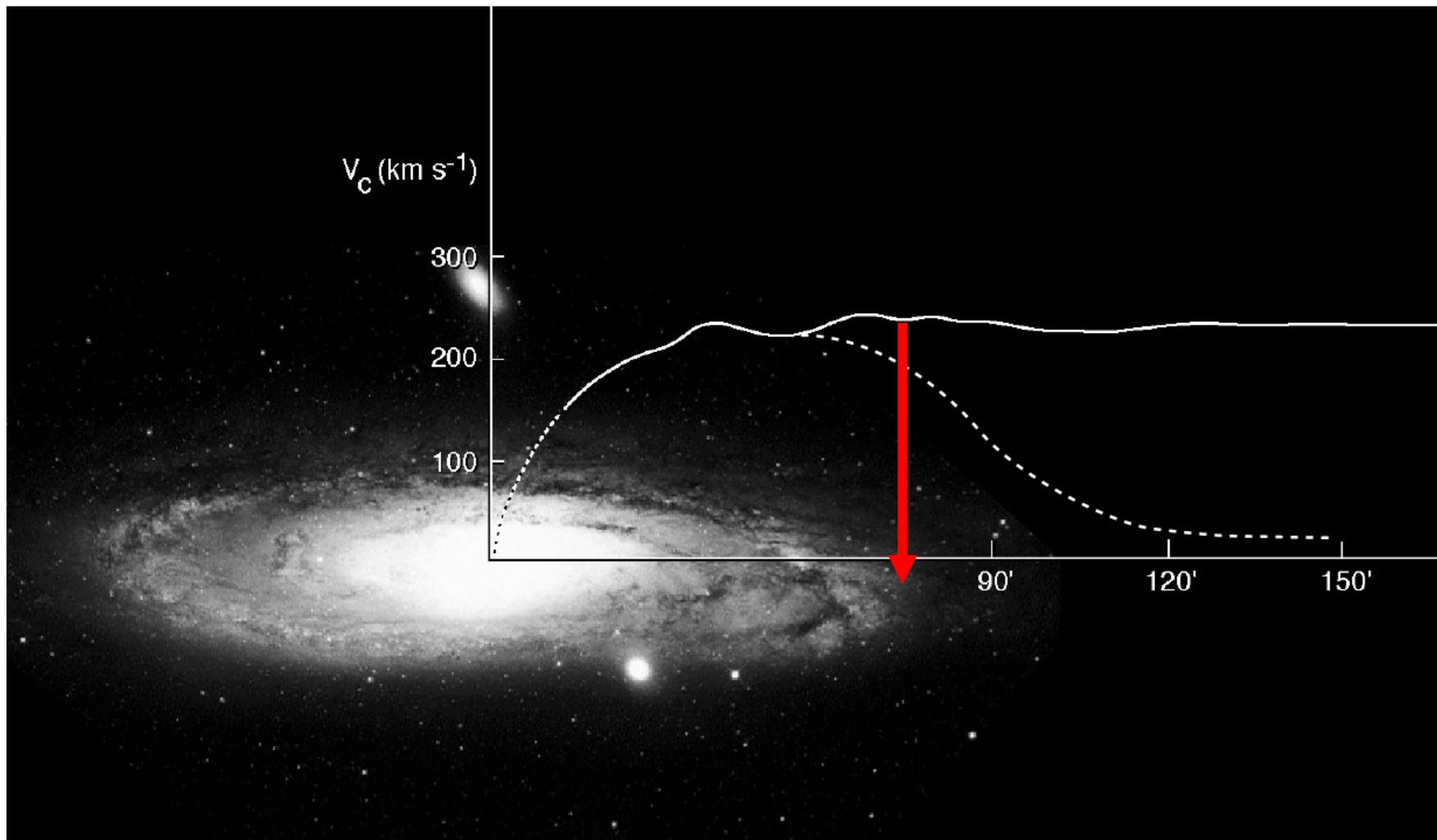
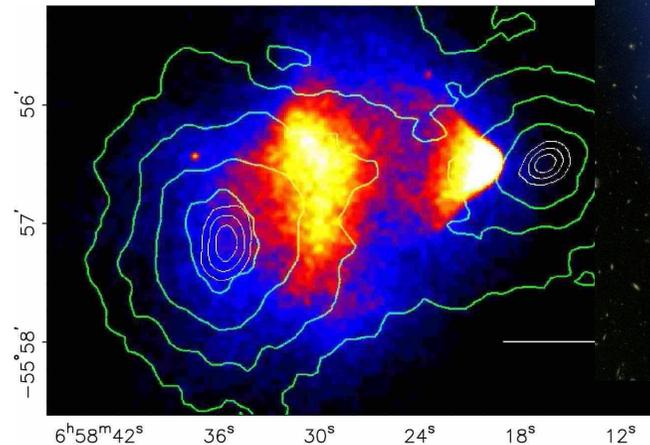


Immagine della galassia Andromeda. La curva tratteggiata indica le velocità di rotazione attese in assenza di materia oscura. Notate l'appiattimento in coincidenza della fine della materia luminosa!

Altro indicatore di materia oscura

Osservando il «Bullet Cluster» con telescopi ottici, a raggi X e studiando i fenomeni di lente gravitazionale sulle radiazioni, si evidenziano dei fenomeni spiegabili solo introducendo **materia oscura**.

In pratica la materia visibile osservata non giustifica i fenomeni di lensing che si osservano nelle osservazioni ai raggi X.

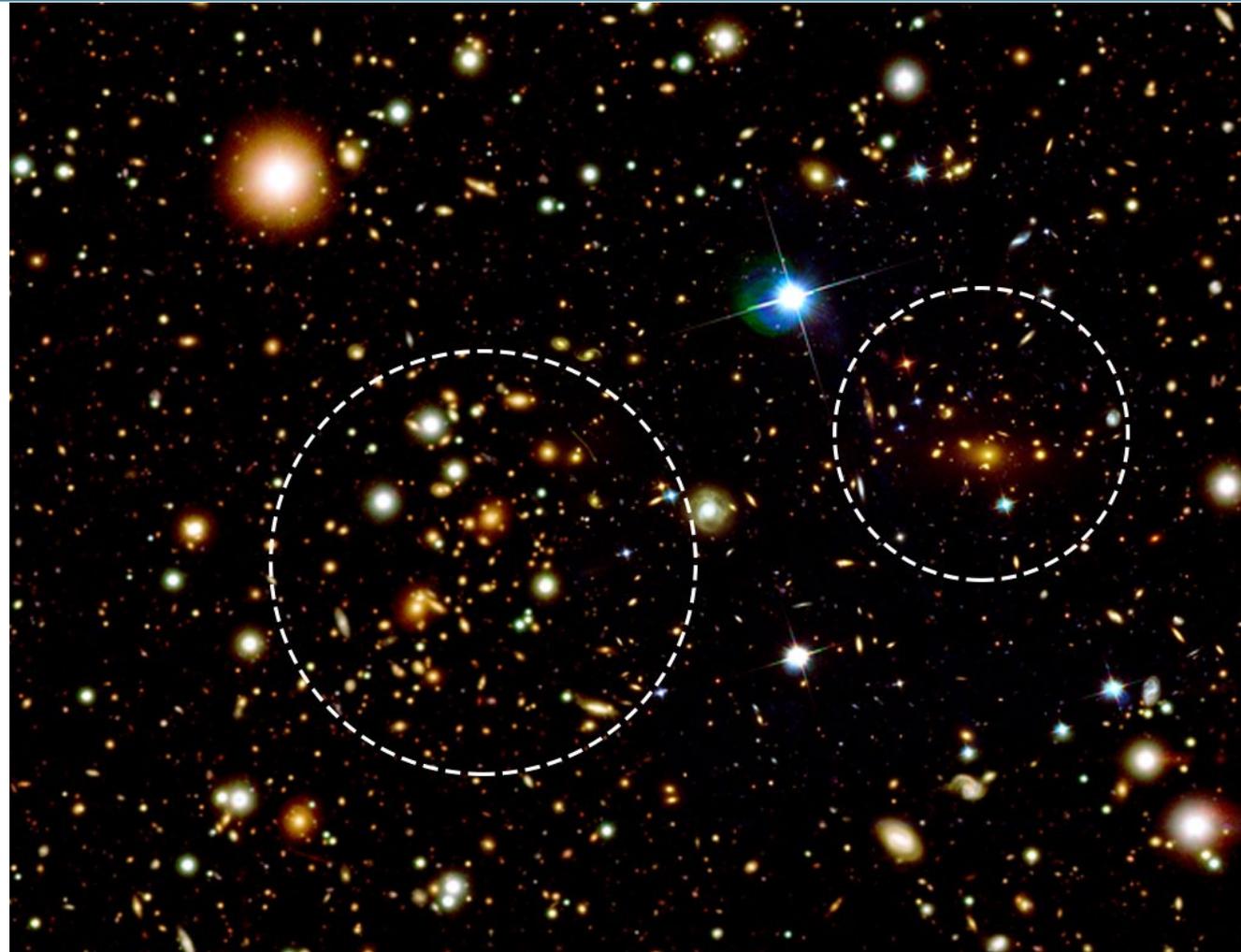


1E 0657-558

Bullet Cluster Visible



Bullet Cluster Visible



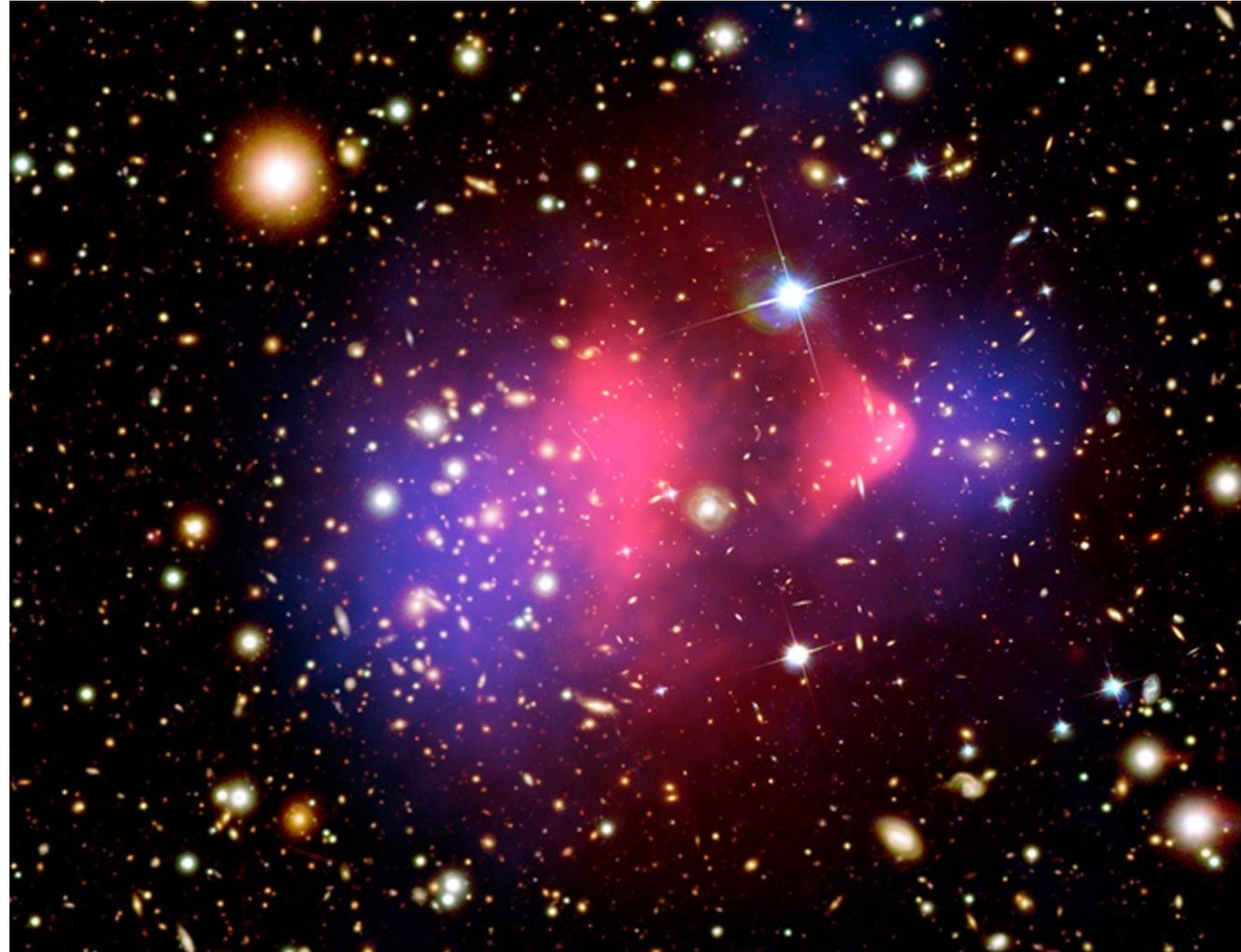
Bullet Cluster X-Rays



Bullet Cluster Dark Matter



Bullet Cluster Visible+X-Rays+Dark Matter



Ma cos'è la materia oscura



Lacca per capelli



Filo da pesca



Maschera viso



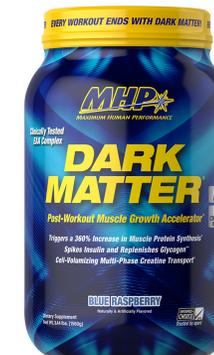
Smalto per unghie



Liquore



Birra

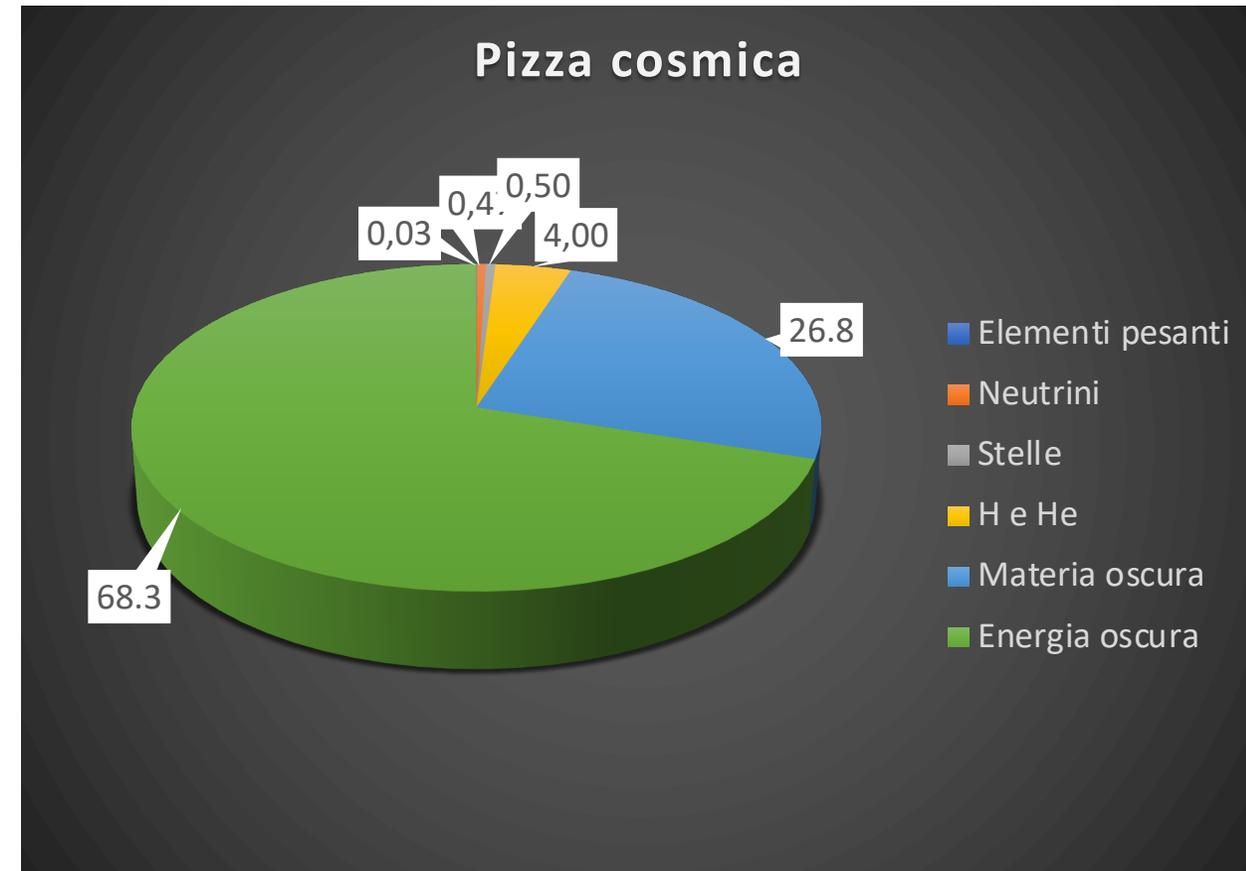
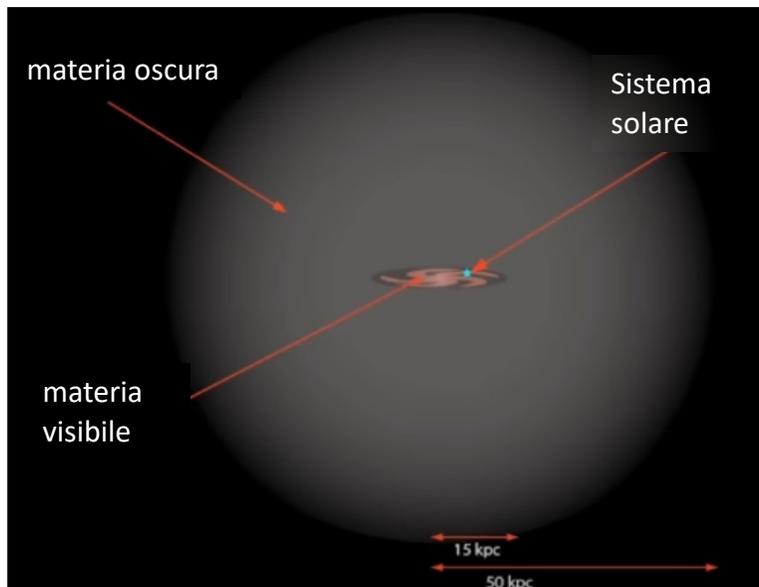


Integratore

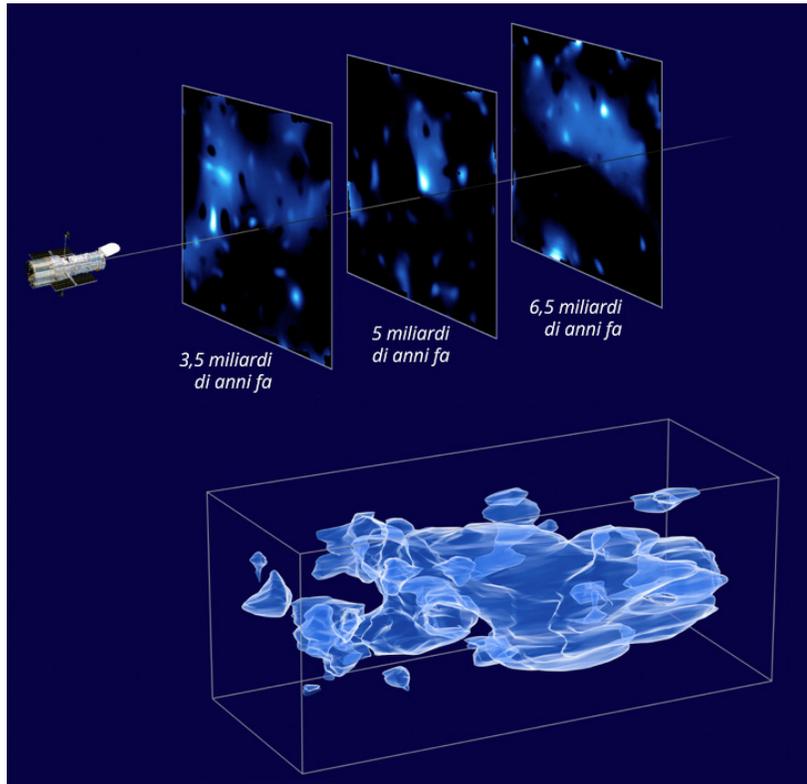
Ma cos'è la materia oscura

Sappiamo molto meglio **cosa non è** rispetto a cosa è:

- La materia oscura è scura
- Non si tratta di «materia ordinaria»
- La materia oscura non è antimateria
- Non si tratta di buchi neri
- Non si tratta dei neutrini



Materia oscura la nuova quint'essenza



Distribuzione della materia oscura misurata dalla survey Hst Cosmos utilizzando lenti gravitazionali

Si è cominciato a parlare di **materia oscura** intorno agli anni '30 per risolvere il problema della massa mancante negli agglomerati di galassie. Negli anni '70 si è capito che solo ipotizzando una nuova forma di materia si potevano spiegare le anomalie cosmiche. Infine lo sviluppo di modelli cosmologici basati sulla relatività generale, insieme a studi multi-messenger, hanno permesso di definire meglio le caratteristiche di questa forma di materia che su scala cosmica è dominante.

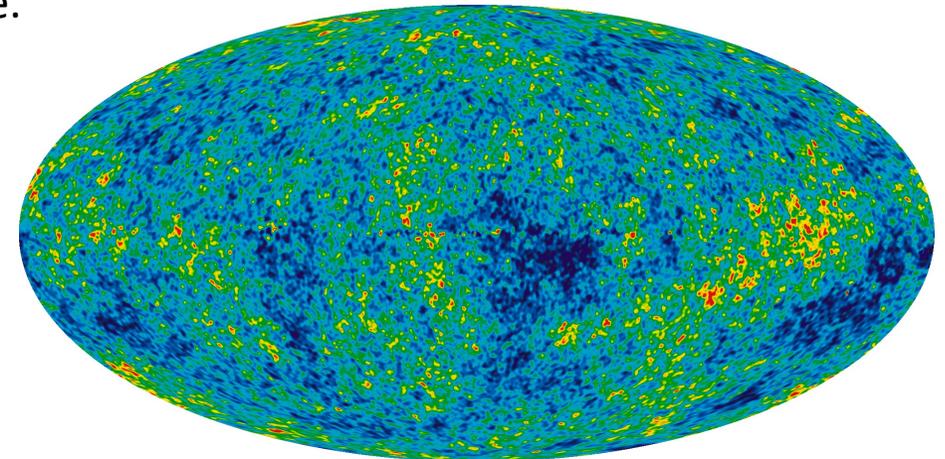
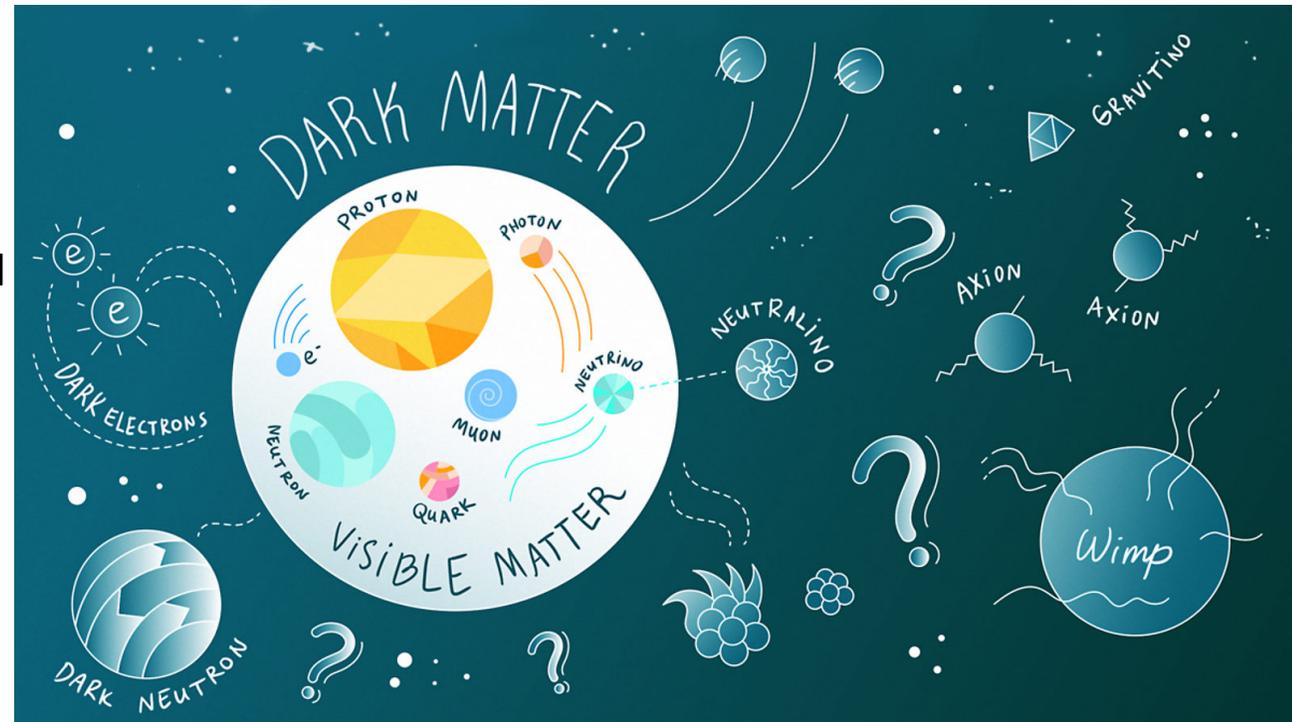


Immagine dell'universo ottenuta dalla radiazione cosmica di fondo (CMB)

Come immaginare la Materia Oscura

A priori tutte le teorie potrebbero essere buone. Ma in generale si considerano più accreditate quelle che, oltre a dare conto alla Materia Oscura, sono in grado di spiegare alcuni fenomeni non chiari nel nostro Modello Standard. Tra i problemi aperti abbiamo:

- L'asimmetria Materia-Antimateria
- La massa dei neutrini e la loro gerarchia
- La conservazione CP dell'interazione Forte
- Esistenza di nuove particelle oltre il Modello Standard
- Dimensioni extra dello spazio
-



Diverse ipotesi di materia oscura

Tra le diverse ipotesi c'è chi pensa che si tratti di particelle di alta energia (HDM) mentre altri pensano siano lente e poco energetiche (CDM).

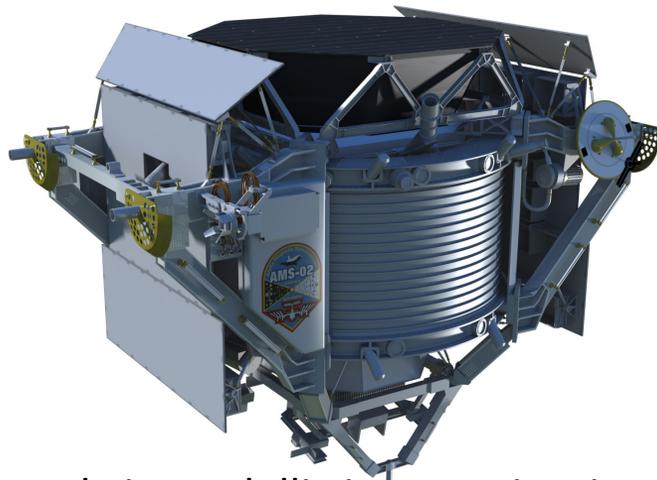
Nel caso di HDM si ipotizza siano particelle molto leggere e quindi facili da accelerare. Viceversa le CDM sono pensate particelle pesanti.

Weakly Interacting Massive Particles, o «WIMP» sono una nuova classe di particelle che possiedono solo interazione gravitazionale ed eventualmente una nuova debolissima forza. Devono essere state prodotte nel Big Bang e permeare tutto l'universo. Tra l'altro sono previste dalle teorie Super-Simmetriche

Assioni, si tratta di particelle leggere e lente che interagiscono debolmente con la materia ordinaria. Si prevede che possano «decadere» in coppie di fotoni rendendosi visibili. Spiegherebbero anche l'assenza di violazione CP della forza forte.

MACHO Massive Astrophysical Compact Halo Objects sono stati i primi candidati di materia oscura proposti. Si tratta di oggetti cosmici (stelle di neutroni, nane bianche e marroni) composti di materia ordinaria ma con densità enormi.

Un vento di materia oscura



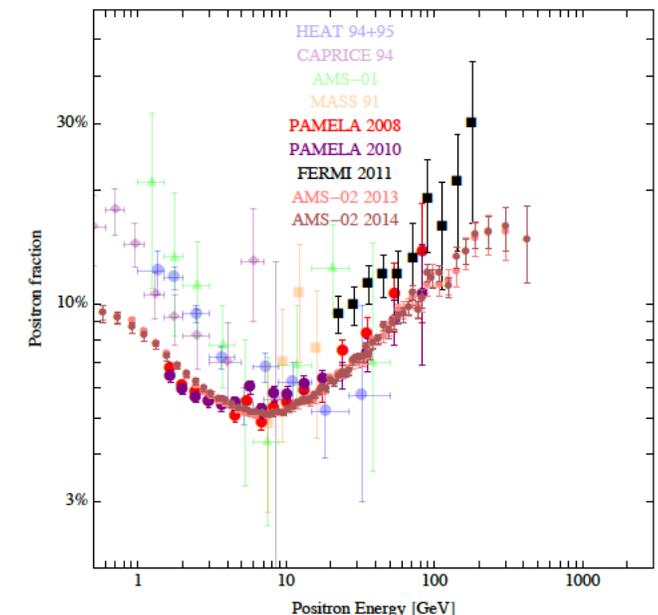
Per spiegare le osservazioni sperimentali del cosmo, si pensa che la materia luminosa delle galassie, per poter essere stabile dal punto di vista gravitazionale, sia circondata da un alone di materia oscura.

La Terra, nel suo moto intorno al Sole, attraversa l'alone di materia oscura della Via Lattea e dovrebbe essere possibile [rivelare interazioni delle particelle oscure con la materia ordinaria](#).

Altri modelli invece, ipotizzano che la materia oscura possa interagire producendo particelle di materia ordinaria.

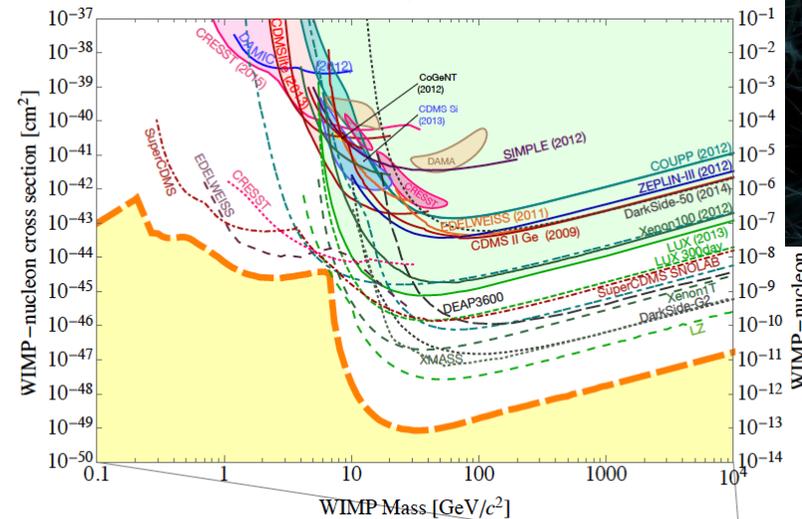
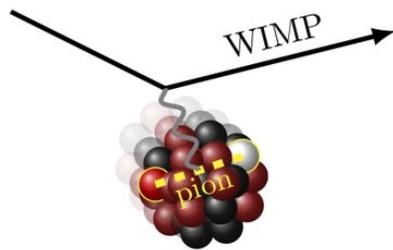
Per cercare di scovare la materia oscura ci sono esperimenti che cercano:

- anomalie nel flusso di raggi cosmici;
- sorgenti anomale di raggi gamma o di neutrini.



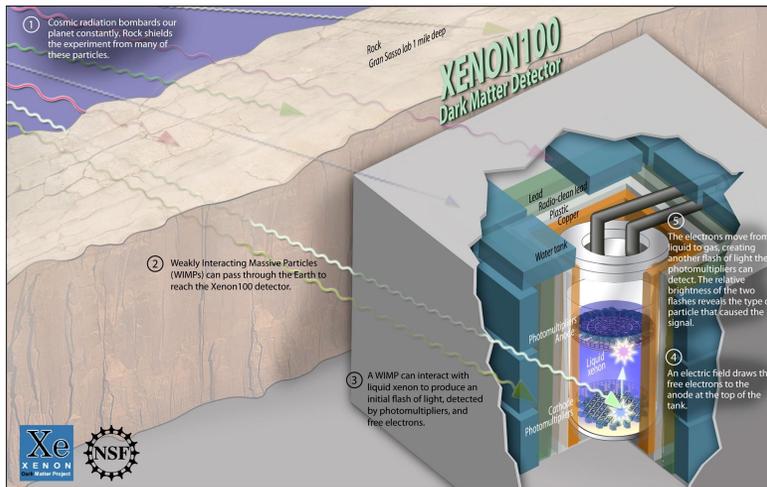
Weakly Interactive Massive Particles

Nell'universo primordiale le WIMP devono essere state prodotte come le altre particelle e fino a che la densità l'ha permesso hanno interagito fra di loro facendo sì che si annichilassero. Quando l'espansione è stata tale che le collisioni sono diventate improbabili hanno continuato ad esistere determinando la quantità di materia oscura che oggi osserviamo.



Per rivelare le WIMP si usa una tecnica indiretta, cercando di misurare l'energia del rinculo di un nucleo pesante.

Weakly Interactive Massive Particles



Interagiscono pochissimo con il resto della materia, un po' come i neutrini, che possono attraversare interi pianeti proseguendo indisturbati. A differenza dei neutrini, che praticamente non hanno massa, le WIMP dovrebbero avere una massa significativa (~ 1000 volte quella del protone) per costituire quel 25% della «massa mancante» dell'universo.

- frugare nello spazio mandando in orbita satelliti-rivelatori – è il caso di AMS-02, installato sulla ISS;
- andare nelle viscere della Terra e aspettare che le WIMP interagiscano con enormi rivelatori. Andando sotto terra tutte le altre particelle sono state assorbite riducendo il fondo.



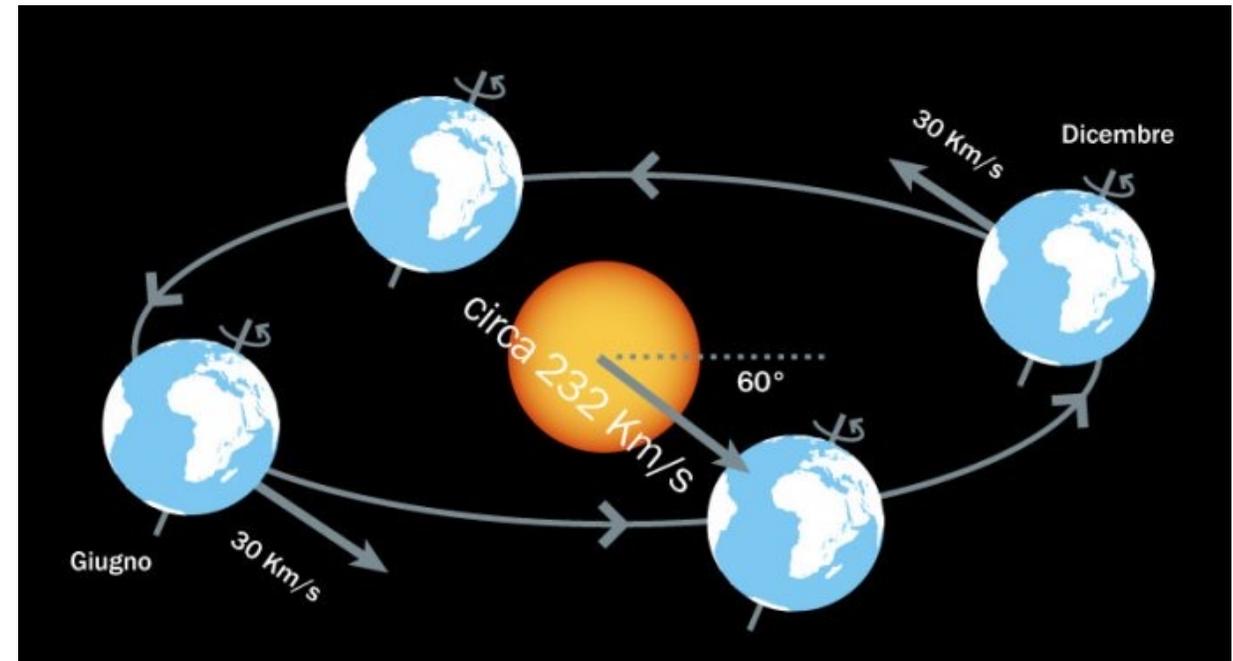
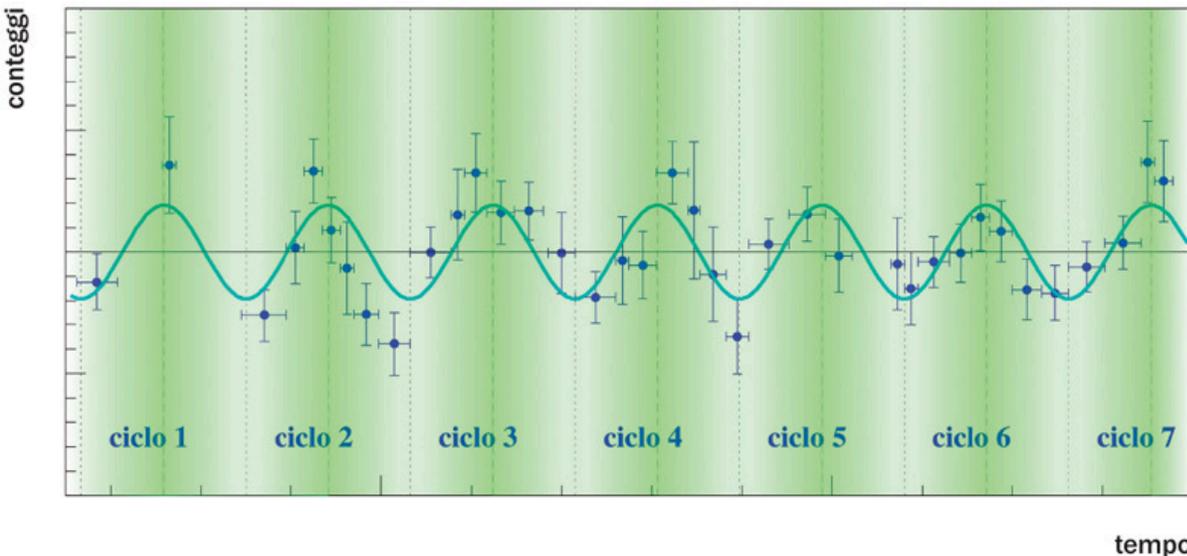
Ai laboratori dell'INFN del Gran Sasso, diverse collaborazioni internazionali si dedicano a questo – XENON sta facendo passi da gigante nella caccia alla materia oscura.

L'esperienza DAMA

Ad essere sinceri un esperimento che ha visto un segnale c'è: DAMA

Si tratta di un rivelatore di cristali di NaI (100Kg) purissimo collocato dal 2002 ai LNGS per misurare le interazioni delle WIMP.

La modulazione annuale dei segnali misurati da DAMA è compatibile con il «vento» di particelle di materia oscura previsto nella nostra Via Lattea.



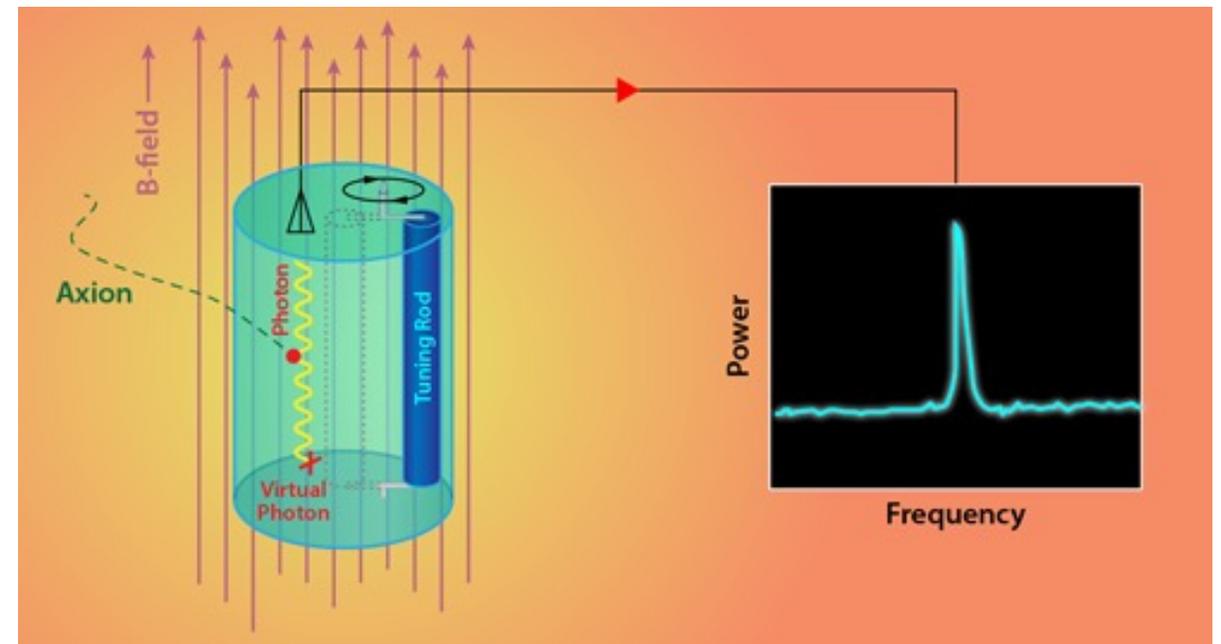
Assioni

Gli **assioni** occupano una posizione intermedia fra HDM a CDM. Si tratta di particelle leggere ($\sim \mu\text{eV}$) prodotte quando l'universo era denso e caldo, che in seguito ad interazioni gravitazionali hanno rallentato andando a formare quegli aloni che si «osservano» nelle periferie delle galassie.

Al contrario delle WIMPs l'intervallo delle masse permesse è molto piccolo.

Per rivelare gli assioni si tenta di stimolare la loro conversione in fotoni attraverso l'interazione con un forte campo magnetico.

Per aumentare la probabilità dell'interazione, si utilizzano cavità risonanti alle frequenze proprie dei fotoni che si stanno cercando (micro-onde).

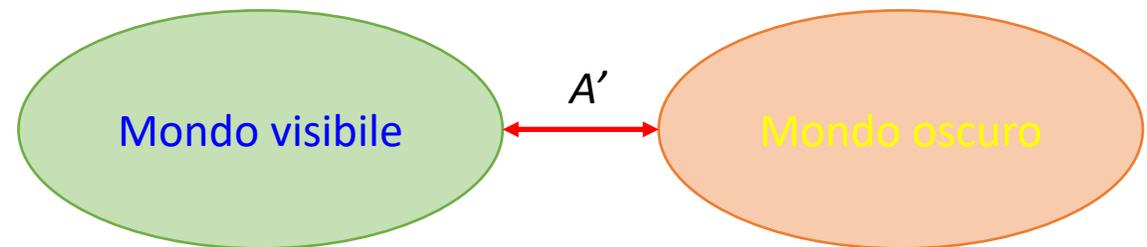
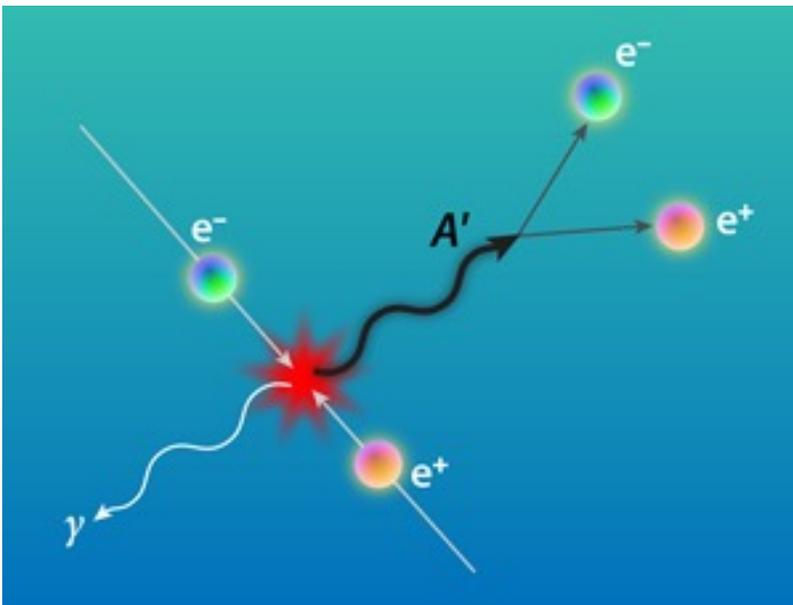


Fino ad oggi si è arrivati a ~ 650 MHz

E se esistesse una nuova forza?

Alcuni ricercatori ipotizzano l'esistenza di una nuova **quinta forza**. Questa sarebbe caratterizzata da un mediatore che comunemente si indica con A' .

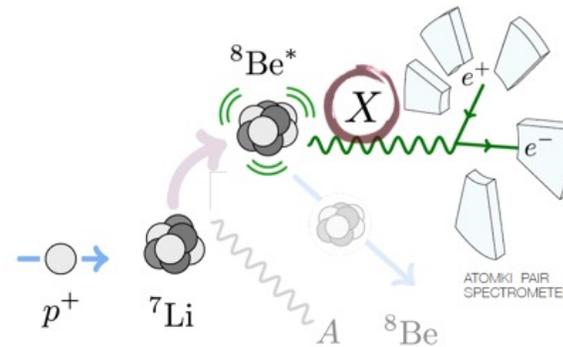
Questo **fotone oscuro** potrebbe interagire con quelli dello SM e rappresentare il punto di contatto fra il nostro mondo e quello oscuro.



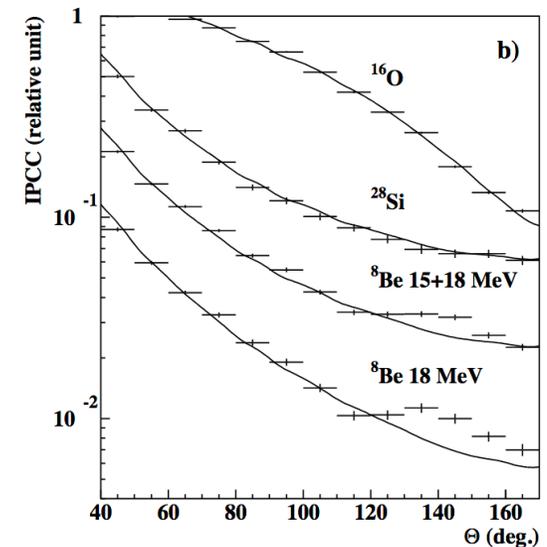
Altri fenomeni



L'idea di un **fotone oscuro** permetterebbe anche di spiegare le anomalie nelle rivelazioni di positroni dell'esperimento AMS-2 ed anche il risultato di un recente esperimento di fisica nucleare fatto in Ungheria.



I fisici di Debrecen hanno osservato un'anomala abbondanza di decadimenti in elettrone-positrone nei nuclei di ^8Be , ^4He e ^{12}C che hanno proprio le caratteristiche necessarie per derivare da un **fotone oscuro** leggero.



La caccia la fotone oscuro



I Laboratori INFN di Frascati



L'esperimento PADME

Positron Annihilation into Dark Matter Experiment, per gli amici

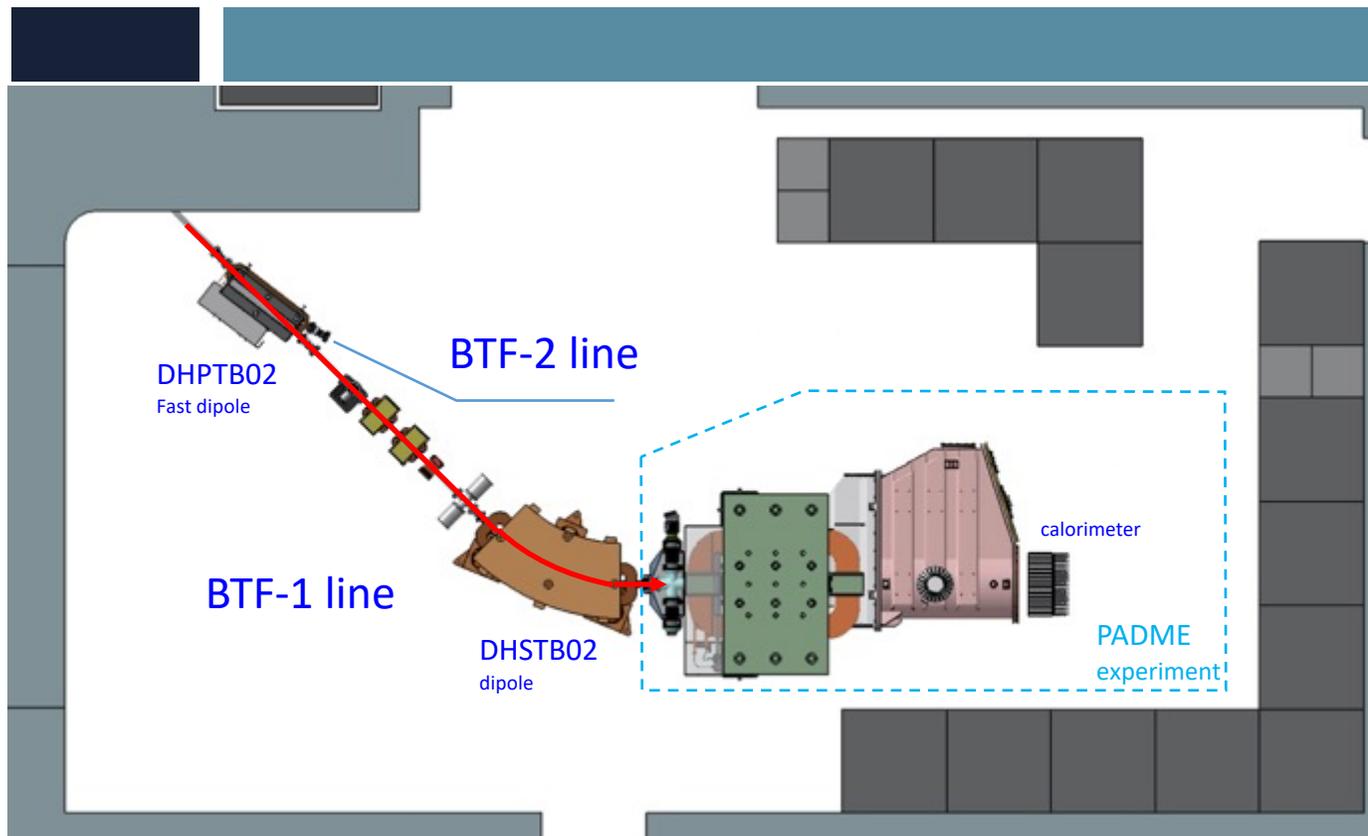


Si prefigge di testare l'ipotesi che la Materia Oscura sia confinata in un mondo parallelo e che l'unico contatto con il nostro, oltre all'interazione gravitazionale, sia attraverso una nuova forza.

Il fotone oscuro si potrebbe nascondere tra i fotoni ordinari (i fisici lo chiamano il fenomeno di «mixing cinetico») e solo uno sguardo molto attento ne potrebbe scorgere la presenza, il che spiegherebbe perché ci è sfuggito fino ad oggi.

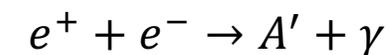


La tecnica di PADME

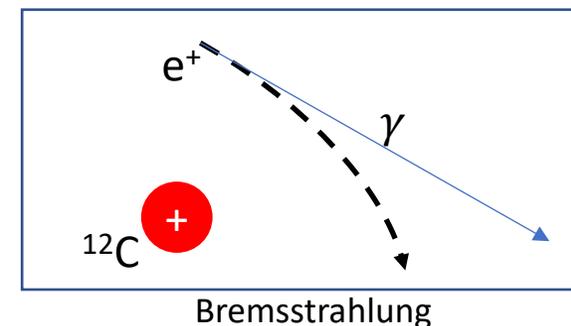
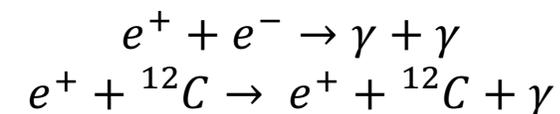


I **positroni** del LINAC LNF vengono accelerati ad un energia di ~ 500 MeV e sparati su un bersaglio sottilissimo ($100 \mu\text{m}$) di diamante.

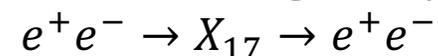
Il vero bersaglio sono gli elettroni dell'atomo di carbonio. Si vuole infatti produrre la reazione:



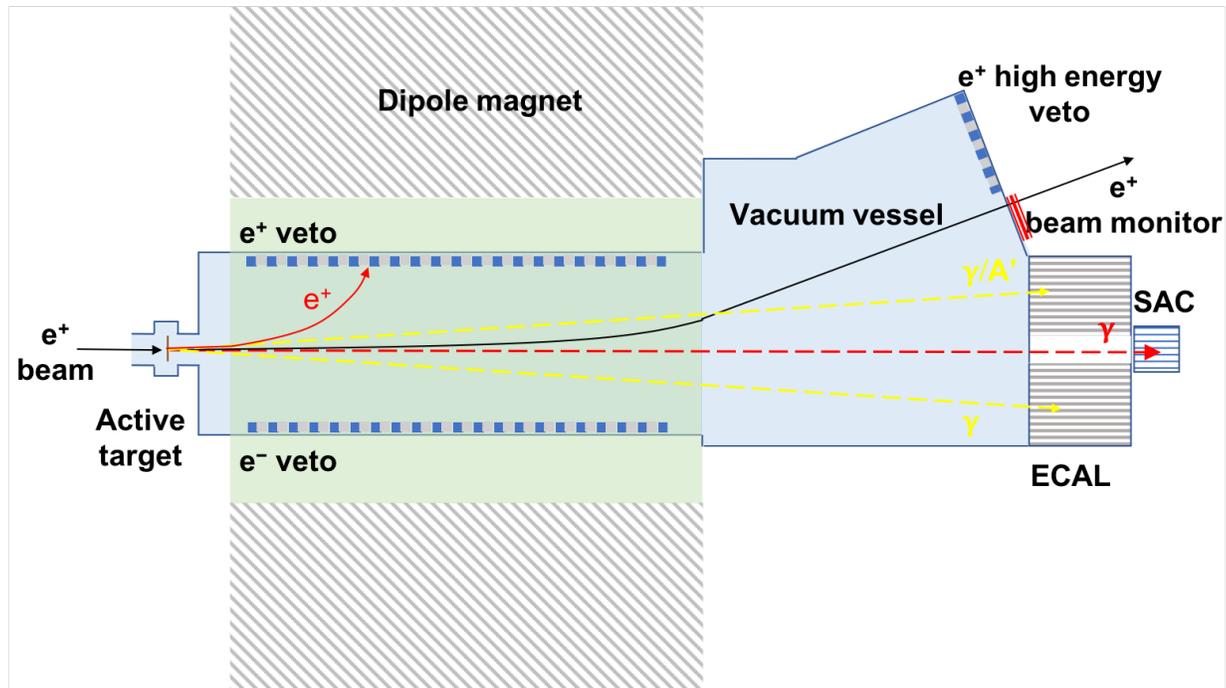
Questa va cercata nel mare di reazioni



Per studiare la presenza del X_{17} si varia l'energia dei positroni e si studia la reazione

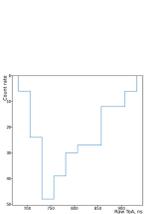


L'apparato sperimentale

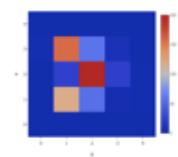


$$\frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow U\gamma)}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma)} = \frac{N(U\gamma)}{N(\gamma\gamma)} * \frac{Acc(\gamma\gamma)}{Acc(U\gamma)} = \epsilon^2 * \delta,$$

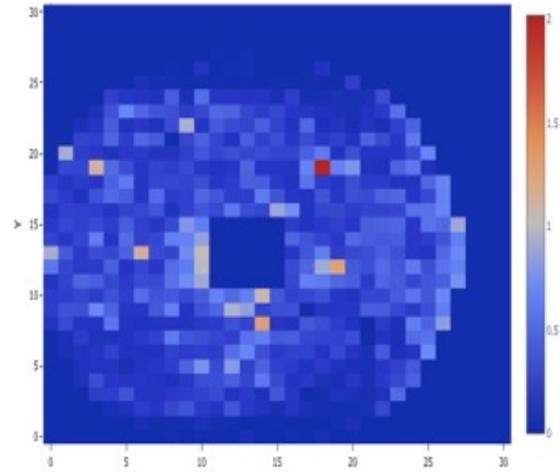
La tecnica di PADME



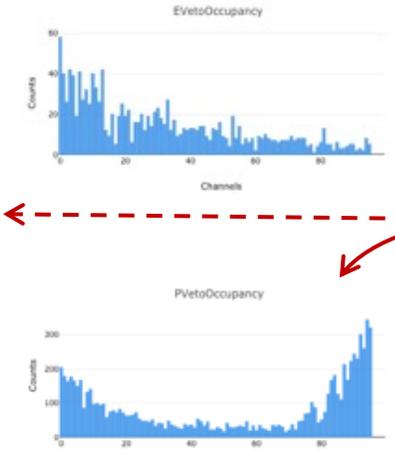
Beam monitor



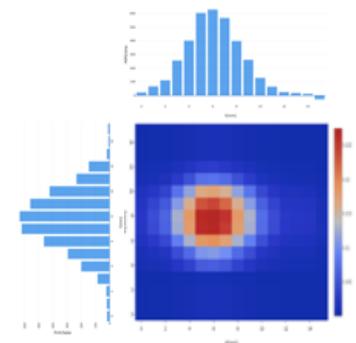
PbF₂ calorimeter



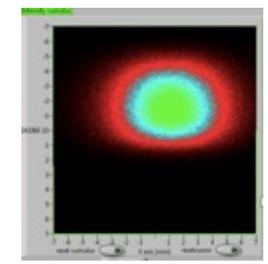
BGO calorimeter



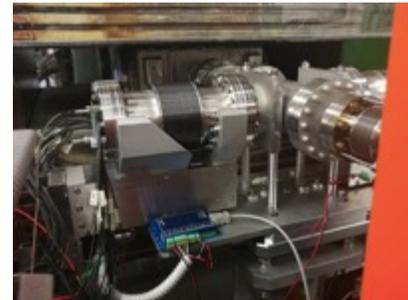
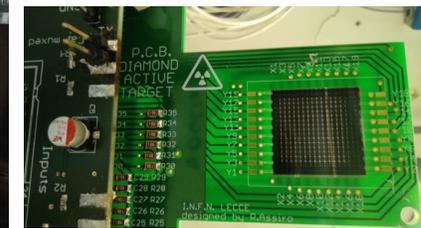
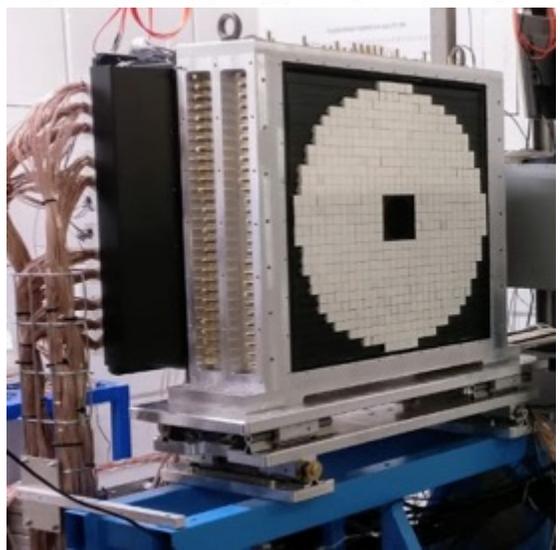
Scintillating bars veto



Diamond target



BTF beam



Conclusioni



- Da quando Tolomeo decretava che la Terra era al centro dell'Universo, la nostra conoscenza del cosmo è cambiata parecchio.
- Copernicus e Kepler, Galileo e Newton hanno spostato il centro sul Sole, ma nei secoli a venire abbiamo capito che anche questa stella non è che una della moltitudine e non ha nulla di speciale.
- Oggi sappiamo che la nostra collocazione nel cosmo non ha nulla di particolare. Siamo nella periferia di una galassia che non ha nessuna specificità rispetto alle altre.
- **Ma la scoperta più recente e più sorprendente è che siamo fatti di un tipo di materia che non è neanche quella dominante nell'Universo.**
- Dal momento che non conosciamo di cosa è fatto principalmente l'Universo stiamo cercando in tutti i modi di scoprirlo.
- L'idea di un «Mondo Parallelo» costituito da **Materia Oscura** è senz'altro affascinante e molte evidenze sperimentali ci fanno credere in quest'ipotesi.

Due parole sulla sottoscritta

Sono nata a Torino nel 1964



Mi sono laureata in fisica con lode a Torino nel 1988



Dopo la laurea ho passato 3 anni al CERN a fare ricerca sugli antiprotoni



Dal 1991 sono ricercatore, ai Laboratori Nazionali di Frascati dal 1993 e dal 2016 dirigo la divisione ricerca



Sono sposata dal 1992, ho due figlie e vivo a Rocca di Papa



Backup

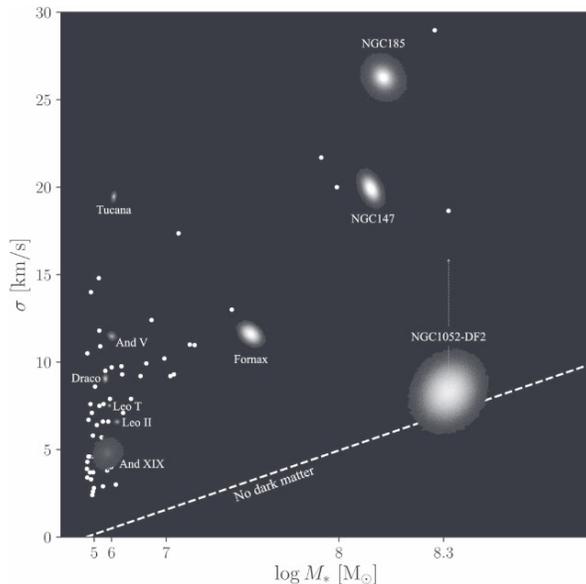


Nuove teorie sulla gravità

MOND, MODified Newtonian Dynamics, si ipotizza che la Forza di gravità sia proporzionale ad una potenza dell'accelerazione. Cioè che ci siano dei termini aggiuntivi di cui tenere conto nell'equazione di Einstein.

Proprio quest'anno un'osservazione ha messo in seria crisi le basi delle teorie MOND.

Astrofisici di Yale hanno studiato a fondo la galassia NGC 1052-DF2 che sembrerebbe formata esclusivamente da materia ordinaria.



Lo studio delle velocità di 10 cluster globulari sembra seguire le regole della gravità Newtoniana quindi escludendo in questo oggetto cosmico la presenza di Materia Oscura.

Spazio interstellare

Lo spazio interstellare è costituito principalmente da Idrogeno (91%), segue l'Elcio (8.9%) con tracce di Carbonio, Ossigeno e Azoto (0.1%).

La densità è $\sim 10^6$ molecole/cm³, La densità dell'acqua è 3×10^{22} molecole/cm³

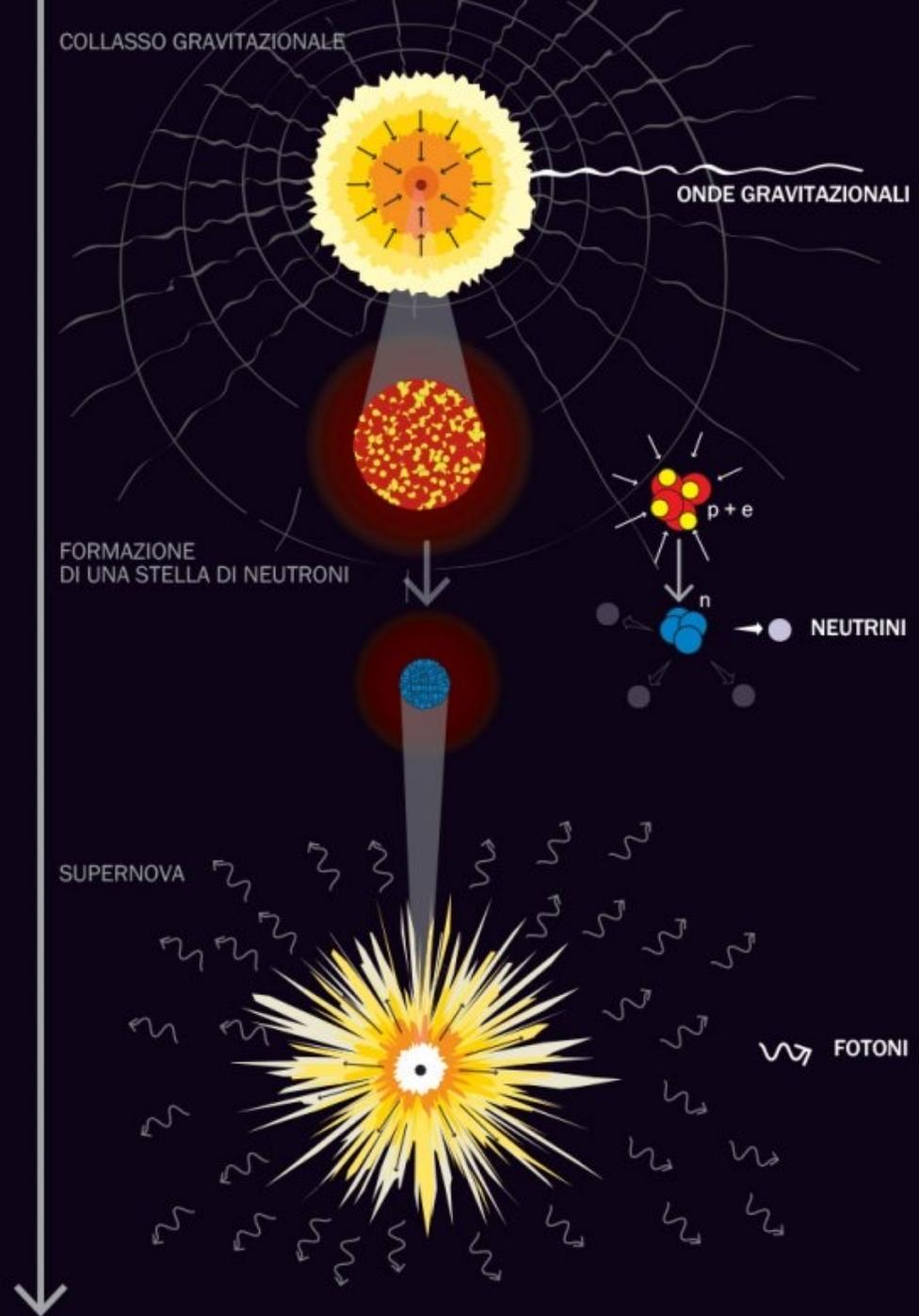
Il peso molecolare dell'acqua è 18 u (masse atomiche) quindi 18g di acqua contengono 6×10^{23} molecole d'acqua.
 $\rho = m/V$ il volume $V = 18 \text{ [g]} / 1 \text{ [g/cm}^3]$ quindi in 18 cm³ ci sono 6×10^{23} molecole in 1 cm³ ce ne saranno 3×10^{22}

A livello del mare l'aria ha una densità di 10^{19} molecole /cm³.

Idrogeno e Elcio sono il frutto della nucleo-sintesi primordiale, mentre gli elementi più pesanti dei processi di fusione stellari.

La densità media dell'universo è di 5.9 protoni/m³ (questo numero comprende anche la DM).

La densità critica dell'Universo è $\rho_c = 10^{-26}$ kg/m³ contro 10^3 kg/m³ densità dell'H₂O



Numeri e costanti

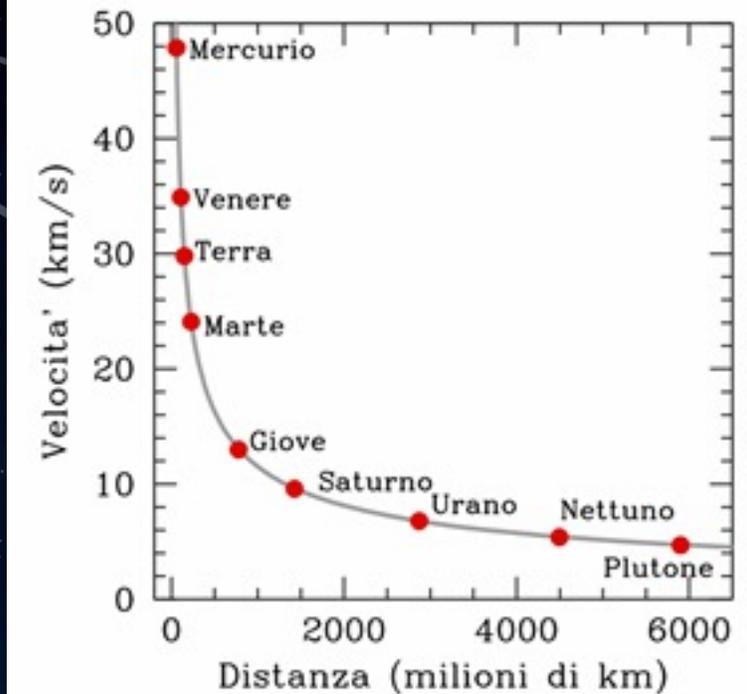
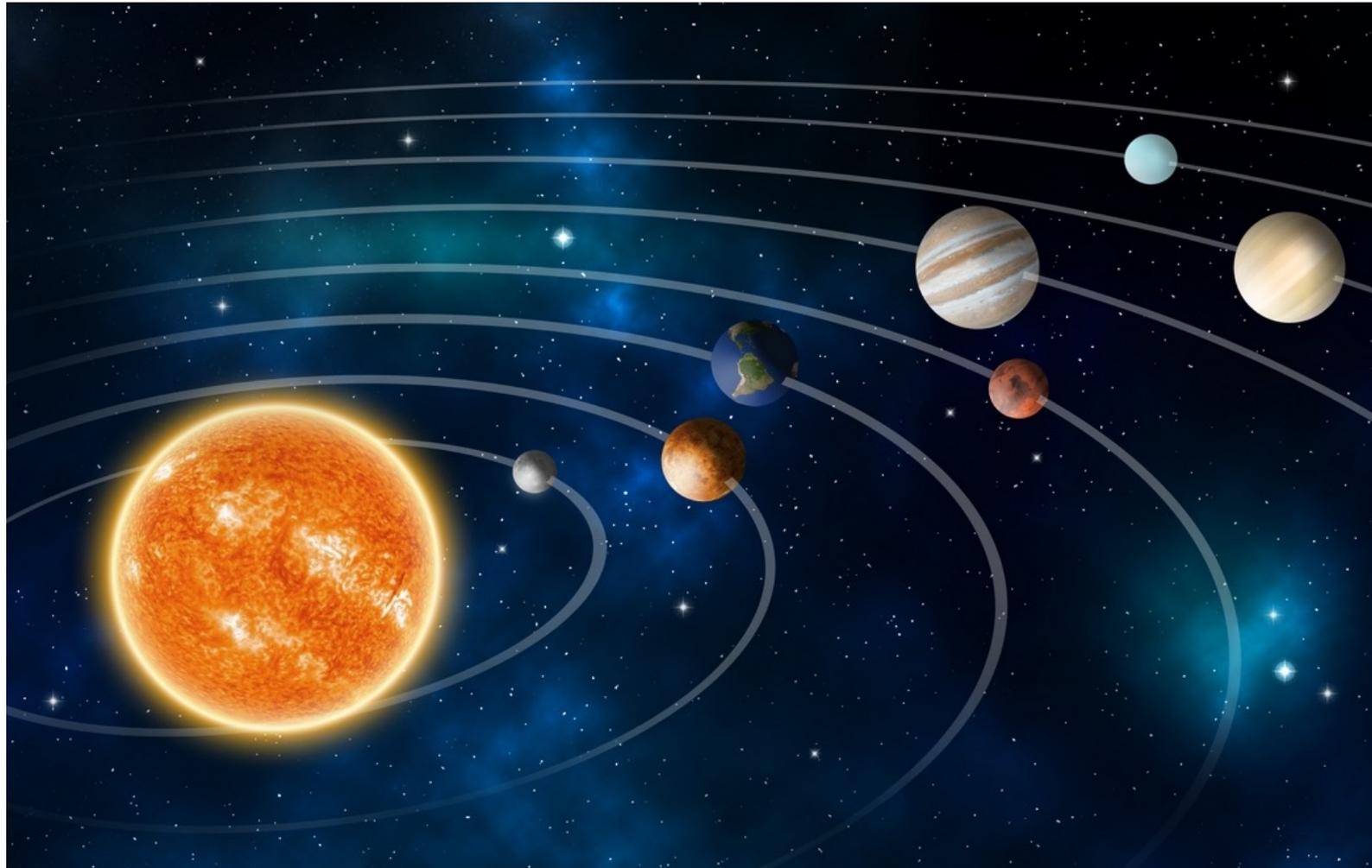
Alcune costanti fondamentali

Newton's constant	G	$6.672 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ sec}^{-2}$
Speed of light	c	$2.998 \times 10^8 \text{ m sec}^{-1}$
		or $3.076 \times 10^{-7} \text{ Mpc yr}^{-1}$
Reduced Planck constant	$\hbar = h/2\pi$	$1.055 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg sec}^{-1}$
Boltzmann constant	k_B	$1.381 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$
		or $8.619 \times 10^{-5} \text{ eV K}^{-1}$
Radiation constant	$\alpha = \pi^2 k_B^4 / 15 \hbar^3 c^3$	$7.565 \times 10^{-16} \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-4}$
Electron mass–energy	$m_e c^2$	0.511 MeV
Proton mass–energy	$m_p c^2$	938.3 MeV
Neutron mass–energy	$m_n c^2$	939.6 MeV
Thomson cross-section	σ_e	$6.652 \times 10^{-29} \text{ m}^2$
Free neutron half-life	t_{half}	614 sec

Alcune grandezze fondamentali

$$\begin{aligned}
 1 \text{ pc} &= 3.261 \text{ light years} = 3.086 \times 10^{16} \text{ m} \\
 1 \text{ yr} &= 3.156 \times 10^7 \text{ sec} \\
 1 \text{ eV} &= 1.602 \times 10^{-19} \text{ J} \\
 1 M_{\odot} &= 1.989 \times 10^{30} \text{ kg} \\
 1 \text{ J} &= 1 \text{ kg m}^2 \text{ sec}^{-2} \\
 1 \text{ Hz} &= 1 \text{ sec}^{-1}
 \end{aligned}$$

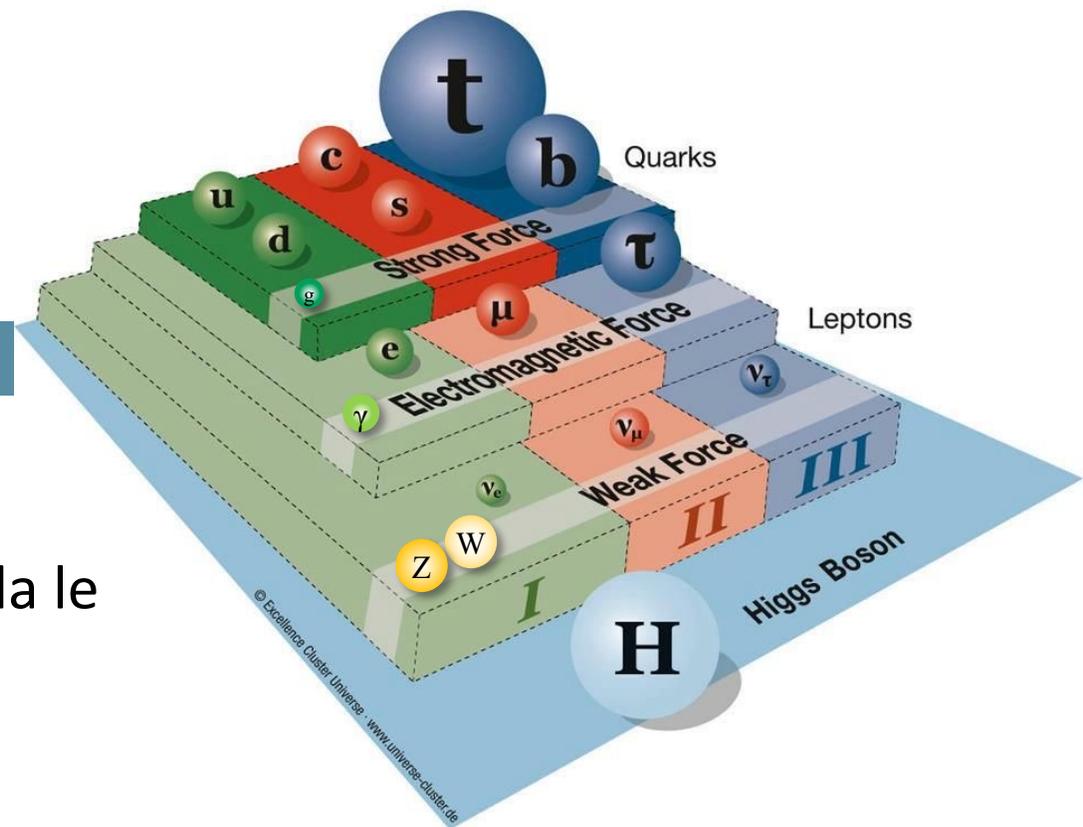
Velocità dei pianeti nel sistema solare



Vedere nell'infrarosso



Il Modello Standard



Il **modello standard** (MS) rappresenta la **sintesi** delle conoscenze accumulate fino ad oggi per quanto riguarda le **particelle elementari** e le loro **interazioni**.

A ciascuna delle 12 particelle corrisponde un **anti-particella** di **uguale massa**, ma **spin e numeri quantici opposti**.

I **quarks** esistono in **3 diversi stati di colore**

Tenuto conto di questo il numero complessivo di particelle materiali previste dal MS è

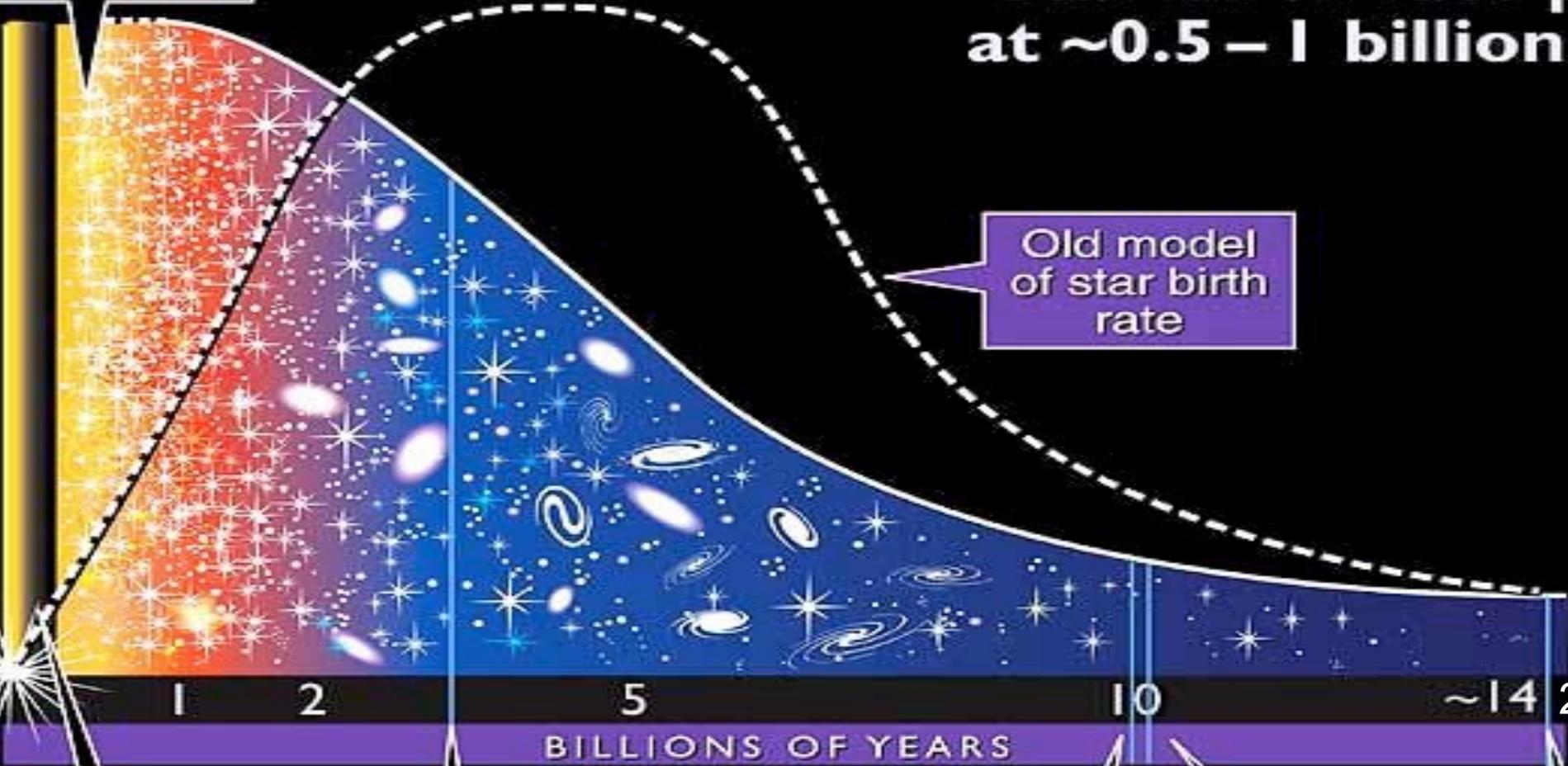
$$6(\text{leptoni}) \times 2 + [6(\text{quark}) \times 2] \times 3 = 48$$

A cui si aggiungono i mediatori delle 4 forze conosciute

Star birth begins

New model:
Star birth rate peaks at ~0.5 – 1 billion years

Old model of star birth rate



Big bang

Dark era

Milky Way galaxy forms

Our Solar System forms

Life appears on Earth

Humankind evolves