

A.R.I. - Sezione di Parma

Conversazioni del 1° Venerdì del Mese

COSMOLOGIA E RADIOAMATORI

Carlo, I4VIL

Da sempre l'Uomo ha rivolto gli occhi al cielo cercando di dare una spiegazione a quel firmamento irraggiungibile per lui.

Ogni civiltà ha sentito la necessità di un racconto delle origini e, molto spesso, queste hanno luogo nelle vastità del cielo dove possono risiedere solo gli dei.

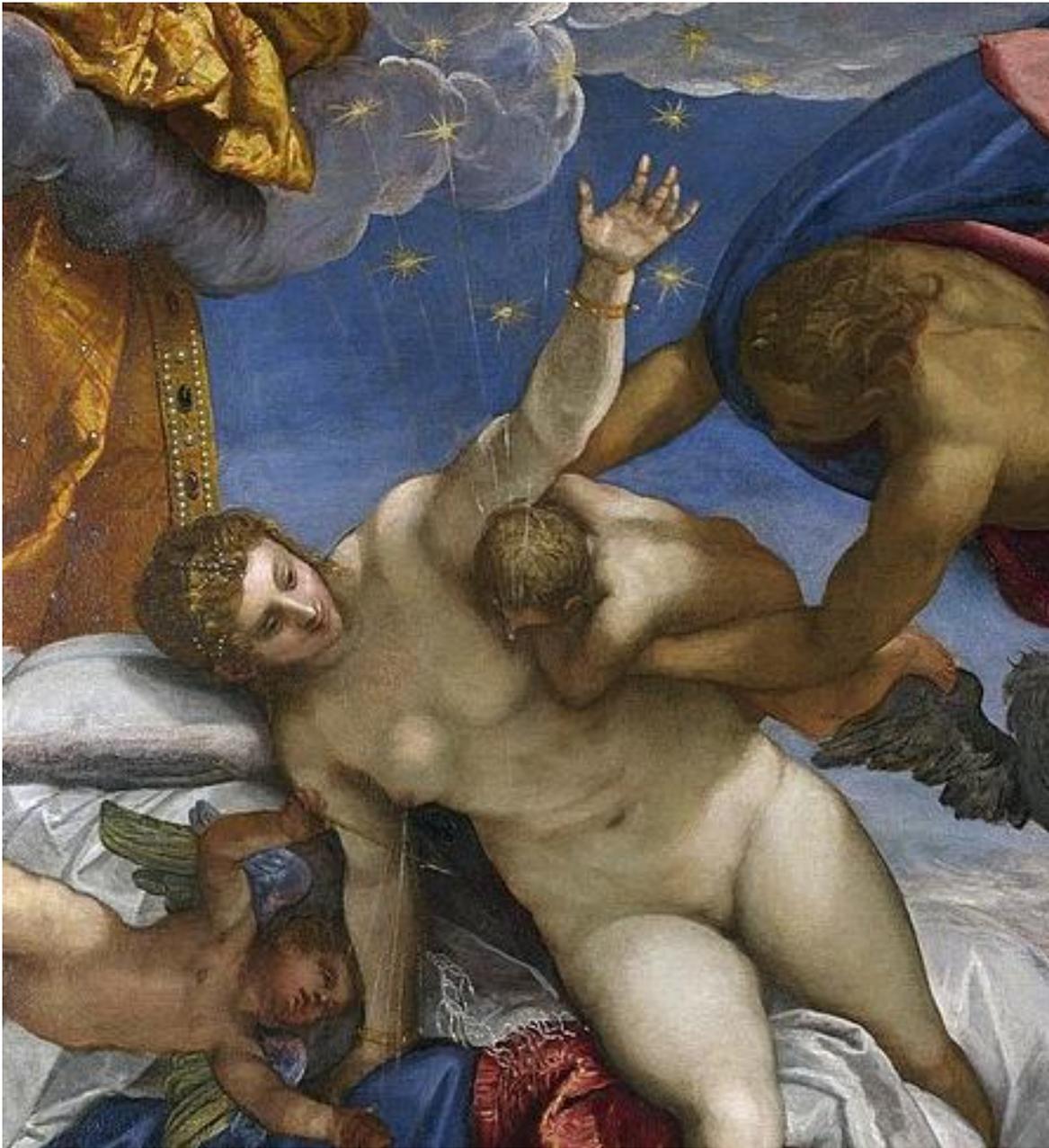
Cercando di interpretare i segni del firmamento, l'uomo ha trovato figure tra i raggruppamenti di stelle, quasi mai concordanti : l' Orsa Maggiore, il Grande Carro, i Sette tori (Septem Triones), ecc...

In ogni epoca, l'immaginazione è sempre un buon nutrimento per lo spirito...

L'Uomo scruta il cielo da migliaia di generazioni dandone via via spiegazioni mitologiche diverse e più disparate.

Secondo i Greci, la Via Lattea nacque dalle gocce di latte fuoruscite dal seno di Era, moglie di Zeus, mentre allattava Eracle.

Zeus lo attaccò al seno di Era mentre dormiva e questa, risvegliatasi, allontanò Eracle (che non era suo figlio) facendo schizzare un po' di latte verso il Cielo e creando la Via Lattea.



**Tintoretto,
Nascita della Via Lattea
(particolare) – circa 1575**

**The National Gallery -
London**

Ma non sempre è stato così per tutti.

Nel IV secolo A.C., Platone racconta di Socrate e questi spiega che la Terra è una sfera con grandi valli dove vivono gli uomini. Ma aggiunge: “non sono sicuro”.

Questa consapevolezza della limitazione del nostro sapere è la base del pensiero scientifico. Bisogna accettare che quello che crediamo di sapere possa essere incompleto od addirittura sbagliato.

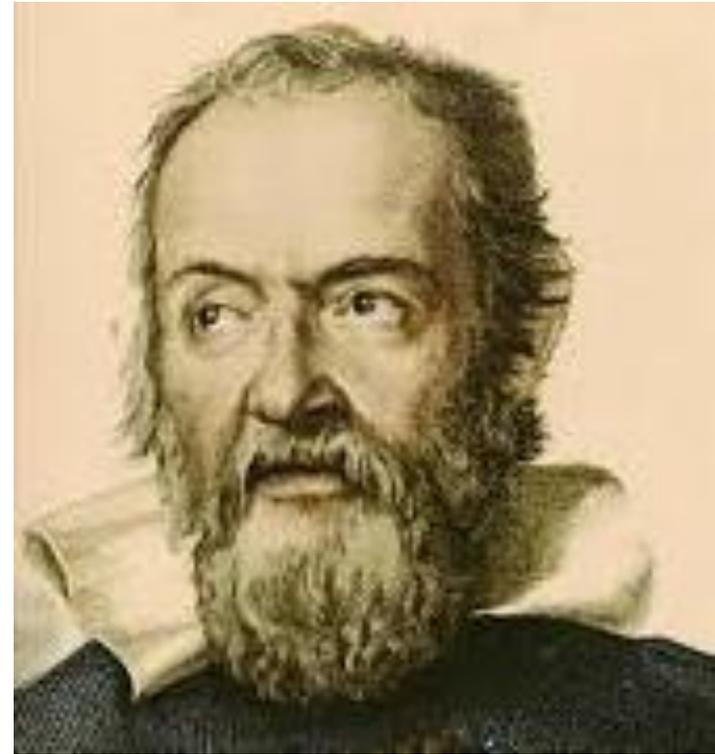
Se Galileo, Newton, Einstein ... non avessero messo tutto in discussione e si fossero accontentati delle tradizioni tramandate dai padri, non ci sarebbe stato progresso nel nostro sapere.

La scienza non dà risposte certe, ma è affidabile perché dà le risposte migliori che abbiamo al momento, e queste sono continuamente messe alla prova.

GALILEO GALILEI

Con Galileo nasce la scienza moderna. L'Uomo rimane solo davanti alla grandezza dell'Universo, abbandona le credenze scritte sui libri antichi e affronta con critica le affermazioni della scienza armato solo del proprio ingegno.

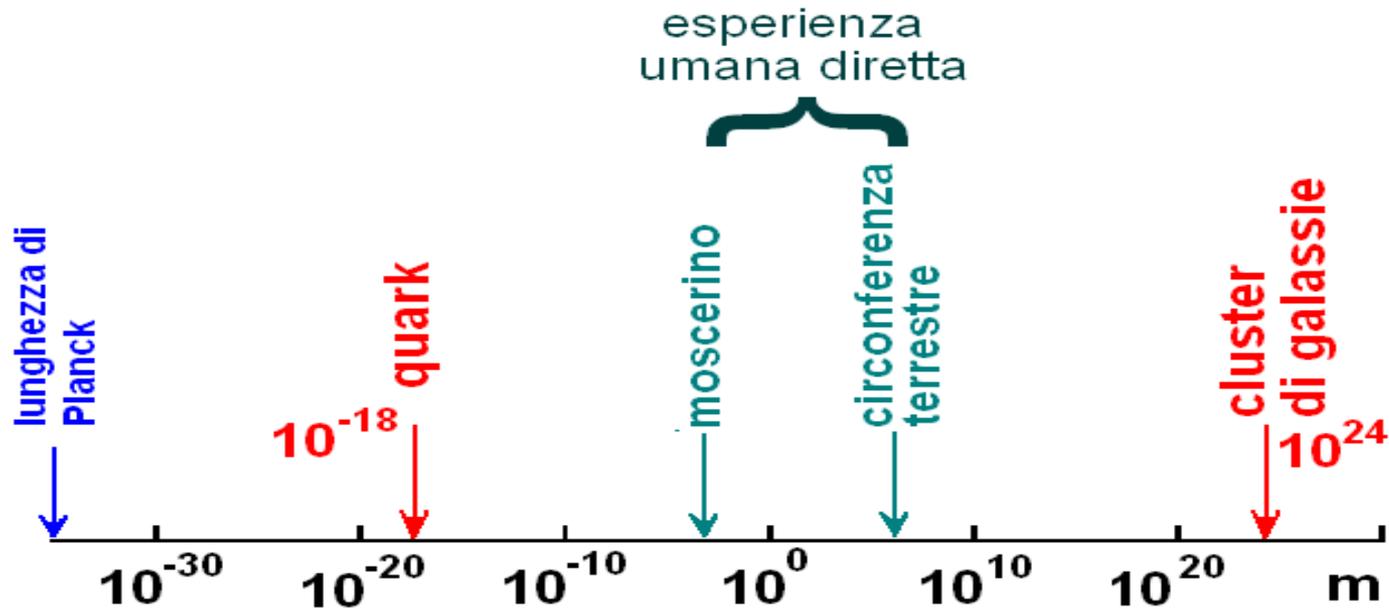
Nasce il metodo scientifico che cerca incessantemente le falsificazioni delle previsioni delle teorie.



L'Uomo sperimenta direttamente un limitato intervallo di lunghezze: da qualche millimetro (dimensioni di un moscerino) a distanze dell'ordine di 10000 km (quando viaggia dall'Europa all'America). Questo costituisce un intervallo di soli 10 ordini di grandezza.

L'Universo contiene oggetti (super-ammassi di galassie) che hanno dimensioni dell'ordine di 10^{24} m e, all'altro estremo, oggetti come le particelle elementari (quark) di dimensioni dell'ordine di 10^{-18} m.

Un intervallo di ben 42 ordini di grandezza.



Non c'è alcun motivo per cui quello che osserviamo con i nostri sensi nel nostro piccolo ambiente—Terra valga per tutto l'Universo.

Le condizioni sulla Terra sono molto diverse da quelle riscontrate in media nell'Universo di oggi (molto freddo e con bassissima densità di materia) e, impensabilmente diverse da quelle in cui si è trovato l'Universo nei suoi primi istanti di vita.

Quando cerchiamo di capire i fenomeni che riguardano oggetti immensi quali cluster di galassie o che interessano le particelle elementari dobbiamo rinunciare alla nostra esperienza di tutti i giorni.

Lo spazio in cui l'Uomo si muove ed il tempo che lo accompagna per tutta la vita sono molto più complessi di quanto possiamo ritenere.

.

Data la nostra limitata esperienza, siamo portati a ritenere che spazio e tempo siano due grandezze diverse ed indipendenti, misurabili con strumenti completamente diversi (- metro ed orologio-), qualcosa di stabile, rigido, ben definito ed immutabile. Se le velocità alle quali ci spostiamo nella vita di tutti i giorni fossero molto grandi – frazione della velocità della luce - faremmo esperienze molto diverse. Lo spazio ed il tempo ci apparirebbero intimamente legati. Ci apparirebbe normale vedere gli oggetti intorno a noi cambiare di forma e dimensioni a seconda della nostra velocità e altrettanto normale osservare la dilatazione del tempo in fenomeni che riguardano oggetti che si muovono a velocità elevate.

In questo mondo “ad alta velocità” non esiste simultaneità degli eventi. Il susseguirsi degli eventi osservati dipende, infatti, dalla velocità. Non si può parlare di eventi contemporanei in modo generalizzato, ma tutto dipende dalla velocità (Relatività ristretta).

La Terra, pur con una massa molto modesta rispetto agli astri che si osservano in cielo, deforma anch'essa lo spazio circostante . Ce ne accorgiamo se facciamo qualche osservazione di precisione, come quando usiamo il GPS per localizzare la nostra posizione sulla superficie terrestre.

Un sofisticato sistema di triangolazione tra satelliti che montano orologi di precisione permette di conoscere la nostra posizione con precisione del metro o anche meglio se, per uso militare, si adottano ulteriori accorgimenti.

Questo è possibile introducendo correzioni relativistiche agli orologi che trasmettono impulsi dai numerosi satelliti.

Il tempo, infatti, scorre in modo diverso sulla superficie terrestre e sui satelliti.

Sul satellite che viaggia a velocità dell'ordine di 5.6 km/s l'orologio rallenta e perde circa $7 \text{ microsecondi/giorno}$ a causa della sua velocità (Relatività ristretta) ma, dato che è posto a circa 20000 km dalla superficie terrestre, risente di un campo gravitazionale terrestre minore dell'orologio a Terra. Questo lo fa accelerare di circa $45 \text{ microsecondi/giorno}$ (Relatività generale).

Il risultato finale è quindi che gli stessi orologi, portati a bordo dei satelliti in orbita, battono il tempo più velocemente. Per ovviare a tutto questo gli orologi a bordo dei satelliti sono corretti elettronicamente.

Tutto funziona correttamente con le equazioni relativistiche.

In presenza di grandi masse, lo spazio si curva.

Anche un fotone (di qualunque frequenza) se attraversa una regione con masse, seguirà la curvatura.

La luce curva, quindi, non perché attratta gravitazionalmente (i fotoni non hanno massa a riposo), ma perché nel viaggiare “in linea retta” si ritrovano in uno spazio curvo.

Questa curvatura permette di vedere oggetti lontani e nascosti dalla presenza di cluster di galassie (molto massive) più vicine.

Le molteplici strisce luminose che appaiono nella diapositiva seguente sono immagini della stessa galassia, nascosta dietro cluster di galassie più vicine.

La luce arriva da più percorsi grazie alla curvatura dello spazio per la presenza lungo il percorso di spazio-tempo curvato dalla presenza di cluster molto massivi.

Galaxy Cluster 0024+1654 as a Gravitational Lens



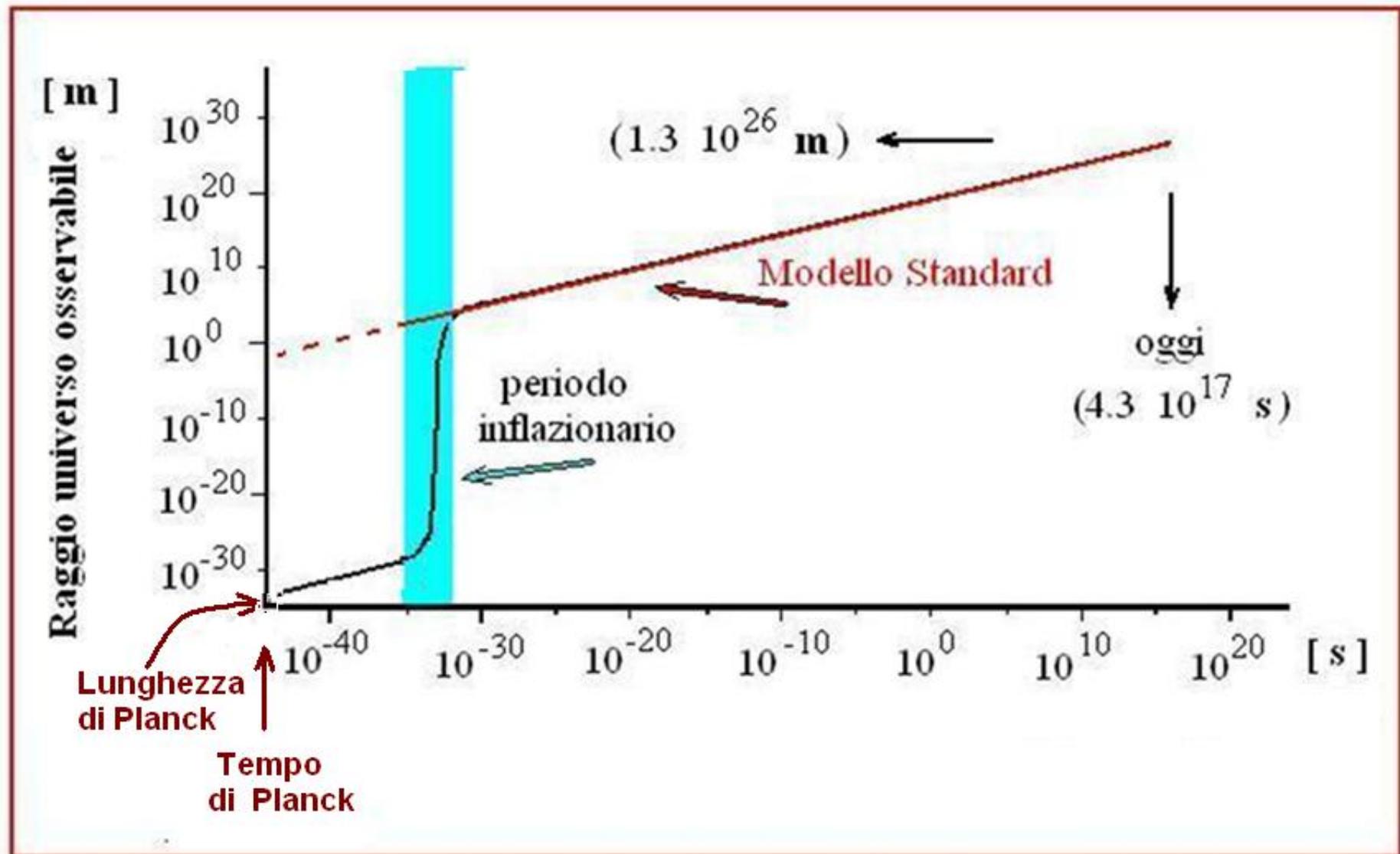
L'immagine del Hubble Space Telescope mostra diversi oggetti affusolati blu: sono immagini multiple della stessa galassia (più remota e retrostante) e che sono stati duplicati dall'effetto di lente gravitazionale offerto dal cluster di galassie molto luminose al centro dell'immagine

Lo spazio-tempo è una sola entità, non rigida, ma plastica e che può essere anche deformata dalla presenza di masse importanti. (Relatività Generale). Lo spazio-tempo ha avuto origine insieme al nostro universo ed ha un'età ben definita: oggi la valutiamo 13.82 miliardi di anni.

L'Uomo scruta il cielo da migliaia di generazioni dandone via via spiegazioni mitologiche più disparate, ma oggi, col metodo scientifico l'Uomo ha fatto enormi progressi, specialmente nell'ultimo secolo, e ...

per la prima volta la nostra generazione dispone di una teoria scientifica dell'evoluzione dell'Universo, e per la prima volta abbiamo un modello che è sostenuto dalle osservazioni.

Modello Standard e Inflazione



Tempo di Planck

Le leggi della fisica non hanno più valore se torniamo al primo istante dopo il Big Bang.

Il primo quanto di tempo, infatti, detto tempo di Planck è dato da:

$$t_P = \sqrt{\frac{G h}{c^5}} = 1.35 \cdot 10^{-43} \text{ s}$$

dove $G =$ Costante di Gravitazione Universale $6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$
 $h =$ Costante di Planck $6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
 $c =$ Velocità della luce nel vuoto $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

È considerato il più breve intervallo di tempo misurabile, ovvero è la più piccola misurazione di intervallo di tempo che abbia qualche significato. E' pure il tempo che impiega un fotone che viaggia alla velocità della luce per percorrere una *lunghezza di Planck*.

LUNGHEZZA DI PLANCK

La **lunghezza di Planck** è un'unità di lunghezza e fa parte di un sistema di unità di misura detto *Unità di misura di Planck*. La teoria corrente suggerisce che una lunghezza di Planck sia la più piccola distanza oltre la quale il concetto di dimensione perde ogni significato fisico.

Vale:

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616\,252 \times 10^{-35} \text{ m}$$

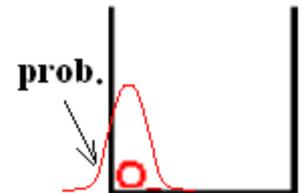
La lunghezza ed il tempo sono quantizzati !

La scienza riesce a dare spiegazione dell'evoluzione dell'Universo dall'età attuale, all'indietro, sino a circa 10^{-43} s dopo il Big Bang.

Oltre, la scienza stessa stabilisce che non si può andare, non per mancanza di strumenti o di tecniche attualmente non disponibili, ma per il limite imposto dal principio di indeterminazione di Heisenberg.

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$



Tunneling

$$[x, e] = 0$$

$$[x, p_x] \neq 0$$

$$[x, p_y] = 0$$

DA DOVE NASCE L'UNIVERSO ?

La materia ordinaria che conosciamo sembra “tranquilla” ma è costituita da particelle (protoni, neutroni, elettroni) in continua agitazione.

Protoni e neutroni sono tenuti insieme dall'interazione forte mentre gli elettroni sono legati ai nuclei dall'interazione elettromagnetica.

Ma protoni e neutroni sono formati da quark tenuti insieme da gluoni e cambiano stato incessantemente interagendo tra loro e con le particelle virtuali che li circondano in un continuo e frenetico rimescolamento.

Anche il vuoto non è uno stato “tranquillo”. Le leggi fisiche lo descrivono pieno di particelle virtuali che appaiono e scompaiono in tempi brevissimi e di campi i cui valori fluttuano continuamente attorno allo zero.

Il vuoto è un sistema fisico in cui materia ed energia sono nulle.

L'Universo nasce da una trasformazione del vuoto per via di una fluttuazione quantistica.

L'energia totale del nostro universo è nulla, come l'energia del vuoto. Per la sua nascita non è stato necessario introdurre energia; l'energia potenziale gravitazionale è negativa ed uguaglia la somma delle energie di vario tipo, positive, contenute nell'Universo.

Il principio di conservazione dell'energia vale, quindi, anche per il nostro universo.

Il vuoto, poi, è pieno di coppie di particelle che, pur di osservare il principio di indeterminazione di Heisenberg, sono continuamente prodotte e ricombinate in tempi ridottissimi.

L'incertezza del valore dell'energia e dell'intervallo di tempo è sempre maggiore di una quantità minima data da:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

Il vuoto non è del tutto “vuoto” , ma è perturbato da fluttuazioni quantistiche, ovvero dalla continua creazione e annichilazione di particelle ed antiparticelle.

Anche la carica elettrica totale dell'Universo è nulla.

Si possono creare dal vuoto coppie elettrone-positrone, ecc..., ma la carica totale si mantiene costantemente nulla.

L'energia della coppia particella-antiparticella che si crea dal vuoto ha tempo di vita tanto più breve quanto più grande è la massa della coppia.

Nei moderni acceleratori, con fasci di particelle (protoni, elettroni, ecc...) che percuotono il vuoto (pieno di particelle virtuali) , possono essere estratte nuove particelle tanto più energetiche quanto più elevata è l'energia della collisione.

Il secolo XIX ha visto svilupparsi molto interesse per i fenomeni legati all'elettricità ed al magnetismo, sino a sfociare nello sviluppo delle equazioni di Maxwell del campo elettromagnetico che descrivono il campo elettrico ed il campo magnetico, compresi i fenomeni luminosi, in un sistema uniforme. Le equazioni di Maxwell, però, non ubbidiscono al principio di relatività galileiana, ovvero la loro forma non rimane la stessa se le osserviamo da due sistemi di riferimento, uno in moto relativo uniforme rispetto all'altro.

H.A.Lorentz notò una proprietà curiosa e notevole quando si sottopongono le equazioni di Maxwell ad una particolare trasformazione di coordinate (Trasformazione di Lorentz):

TRASFORMAZIONE DI LORENTZ

$$x' = \frac{x - v t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - \frac{v x}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

dove v è la velocità del sistema di riferimento S' (x' , y' , z' , t') in moto rettilineo uniforme rispetto a S (x, y, z, t)

Si nota che spazio e tempo non sono più indipendenti come suggerito da Newton ed accettato per secoli, ma intimamente legati.

Il passaggio successivo di A.Einstein portò alla scoperta che tutte le leggi fisiche rimangono invariate se sottoposte alla trasformazione di Lorentz e ne diede un significato fisico.

Studiando le equazioni di Maxwell dell'elettromagnetismo, comprese che se viaggi a velocità elevate, non sono più vere *per te*, ovvero non descrivono più quello che *tu* misuri. Ma se chiami *tempo* una variabile diversa t' legata alla variabile tempo t di chi sta fermo con una opportuna trasformazione di coordinate, allora tutto torna. Einstein ha capito che il ritmo a cui avvengono i fenomeni per chi sta fermo è descritto dal tempo t , mentre per chi è in movimento gli stessi fenomeni sono descritti dal tempo t' . Un orologio fermo misura il tempo t , un orologio in movimento misura il tempo t' . Per un oggetto in movimento, il tempo passa più lentamente.

Non esiste un tempo unico, perché questo dipende dallo stato di moto (Relatività Ristretta) e dal potenziale gravitazionale in cui è posto (Relatività Generale).

Il Big Bang

Il Big Bang è un modello cosmologico, accettato ormai da tutti, basato sull'idea che l'Universo, ad energia totale nulla, iniziò ad espandersi a velocità super elevate con condizioni iniziali di alta temperatura.

La piccola fluttuazione iniziale del vuoto, mentre si stava espandendo, deve essere stata riempita da un campo scalare ad energia positiva che ha fatto aumentare esponenzialmente il suo volume.

La teoria rende conto della abbondanza degli elementi leggeri e della presenza della radiazione cosmica di fondo (CMB) alla temperatura prevista per l'evento avvenuto circa 13.8 miliardi di anni fa.

La teoria originale non riusciva a spiegare la singolarità (densità infinita).

Oggi, l'Universo ad energia nulla non ha più bisogno della singolarità iniziale e spiega abbastanza bene tutto quello che è avvenuto dopo i primi 10^{-43} secondi dopo il Big Bang.

Con l'inflazione, poi, durata solo 10^{-32} s , si spiega anche l'incredibile uniformità della temperatura della radiazione di fondo e la incredibile omogeneità nelle osservazioni astronomiche: l'universo si assomiglia tremendamente in tutte le zone vicine o incredibilmente remote.

Il termine Big Bang fu coniato da Fred Hoyle in senso sarcastico e dispregiativo perché sostenitore di un'altra teoria (detta dello Stato Stazionario) alla quale credeva anche Einstein.

Ma la scoperta della radiazione cosmica di fondo (Penzias e Wilson, 1964) ha indicato il Big Bang come migliore teoria.

Il nome ha avuto successo ed è rimasto.

Un chiarimento sul termine Big Bang che, in italiano, traduciamo come Grande Esplosione.

Il Big Bang non è una normale esplosione che avviene in un punto dello spazio e ad un certo istante di tempo.

In una normale esplosione può essere definito un centro dell'esplosione con i frammenti scagliati in tutte le direzioni (verso l'osservatore e anche in direzione opposta).

Il Big Bang è un'esplosione dello spazio e del tempo (prima non c'erano) e non c'è un centro dell'esplosione: tutti gli osservatori vedono i frammenti allontanarsi da loro.

Attualmente l'Universo è ancora in espansione (anzi, sta accelerando).

Le galassie presenti, che non hanno motivo intrinseco di muoversi, in realtà si stanno allontanando le une dalle altre perché è lo spazio tra loro che si espande.

La luce da esse emessa, dato che lo spazio si espande, vedrà la sua lunghezza d'onda allungarsi; chiamiamo il fenomeno **red shift**.

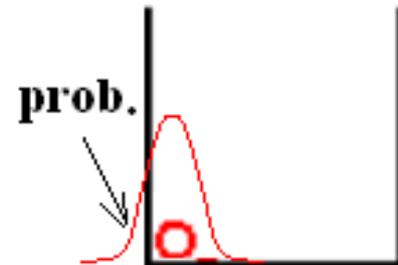
“Cosa c’era prima del Big Bang?” La frase non ha significato, almeno a livello di scienza. Si può rispondere solo a livello di mito o di religione.

Ma anche qui ricordiamo S.Agostino (S.Agostino d’Ippona, *Confessiones*, XI,12):

“ quid faciebat deus antequam faceret caelum et terram?”

“ alta scrutantibus gehennas parabat”

Mentre nel mondo macroscopico vale il principio di causa-effetto, nella meccanica quantistica si presentano effetti molto spettacolari: possono avvenire eventi in modo spontaneo senza una causa, anche se solo per tempi brevi o superare una barriera pur non avendo l'energia sufficiente (Effetto Tunnel, per esempio).



Tunneling

Niels Bohr, uno dei padri della meccanica quantistica ebbe a dire: "chiunque non rimanga scioccato dalla teoria quantistica, vuol dire che non l'ha capita".

Contrariamente alla meccanica classica, la meccanica quantistica non predice il futuro in termini di conoscenza del passato, ma fornisce regole molto precise per calcolare la probabilità di tutti i possibili risultati dell'esperimento.

“Sosteniamo che il modello del Big Bang sia al momento la teoria fisica del cosmo più convincente e completa perché è un modello che possiede capacità predittive ed in particolare perché, come deve fare ogni teoria fondata, continua a sopravvivere alle sfide poste dalle osservazioni”

Ralph Alpher (1921-2007) – cosmologo statunitense di origine russo-ebraica. Nel 1948 concepì la famosa teoria Alpher-Bethe-Gamow sulla nucleosintesi primordiale

Il vuoto non è poi così vuoto ! Per un tempo brevissimo possono crearsi particelle e antiparticelle che, poi, si annichiliscono e scompaiono.

Il primo secondo di vita...

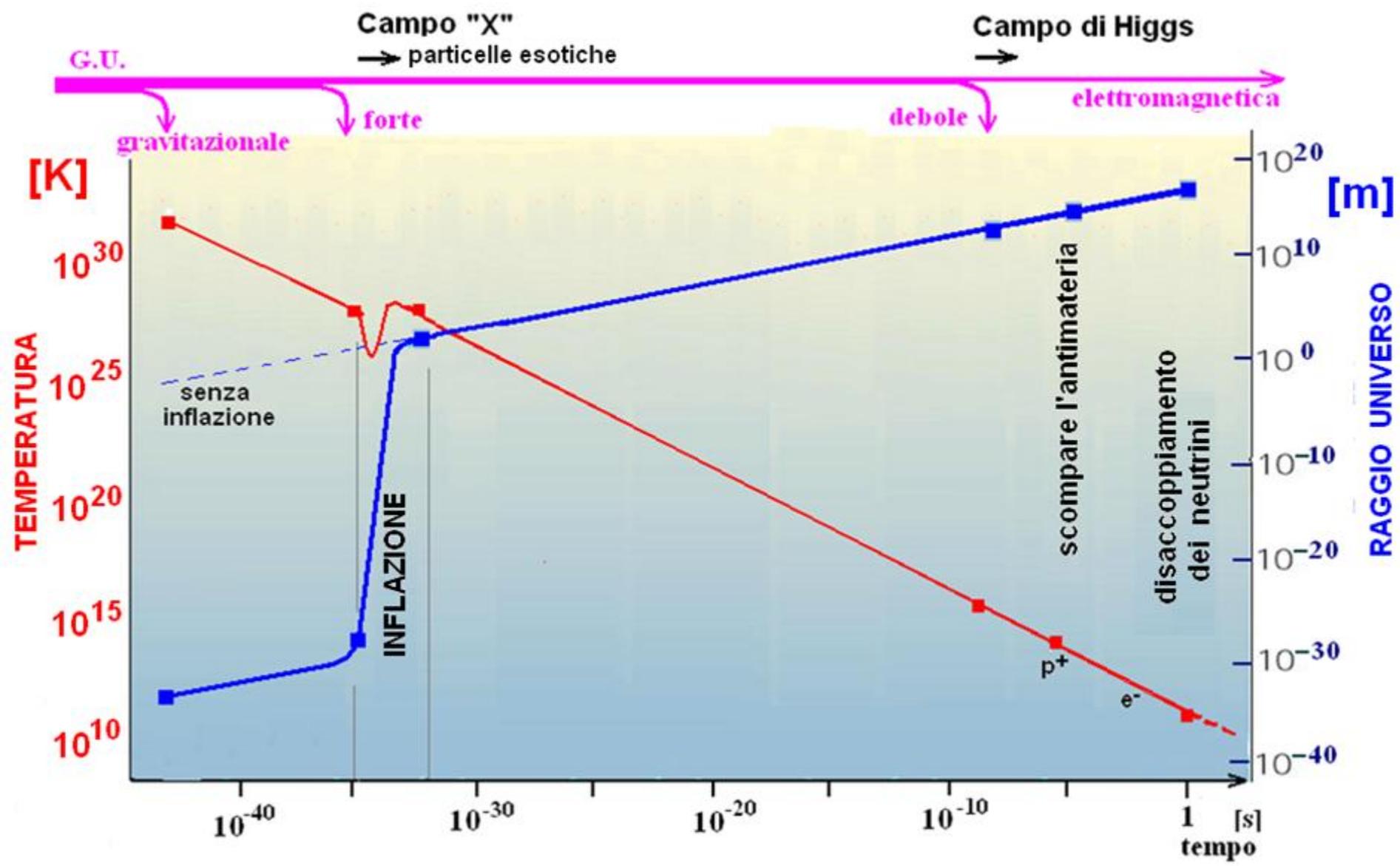
Nel primo secondo di vita dell'Universo sono accaduti tanti eventi, tanti fenomeni e tante cose strane... forse molte di più che nei miliardi di anni seguenti.

Questo perché l'Universo nel primo secondo di vita ha sperimentato intervalli di temperatura molto più grandi che nei 13.8 miliardi di anni che sono seguiti.

Le temperature spaventose dei primi attimi di vita dell'Universo hanno permesso l'esistenza di particelle molto energetiche che avevano bisogno di quelle temperature e che sono ormai scomparse.

Oggi si tenta di ricrearle al CERN, per esempio.

➔ Forte legame tra le ricerche sulle particelle elementari e la cosmologia.



Al tempo di Planck ($\approx 10^{-43}$ s) si suppone che la temperatura sia dell'ordine di 10^{32} K. Le dimensioni dell'Universo sono di circa 10^{-35} m, miliardi di volte più piccolo di un protone.

La interazione gravitazionale si separa dalle altre tre che continuano ad essere unificate.

Al tempo 10^{-35} s dal Big Bang, la temperatura è scesa a 10^{28} K e il raggio dell'Universo è dell'ordine di 10^{-26} m .

La forza forte si separa da quella elettromagnetica e debole che continuano ad essere unificate (interazione elettro-debole).

A questo tempo, e per 10^{-32} s, si ha l'inflazione. L'Universo, miliardi di volte più piccolo di un protone, dopo questa inflazione si ritrova ad avere dimensioni alla nostra portata (dell'ordine del metro), e con temperatura dell'ordine di 10^{27} K.

NOTA

L'interazione forte è la forza che tiene insieme i quark (particella mediatrice: gluone) e i protoni e neutroni (particella mediatrice: pione) permettendo l'organizzazione dei nuclei dei vari elementi. L'intensità della forza è molto grande, ma è a cortissimo raggio. E' oggetto della quantum chromodynamics – QCD.

L'interazione debole agisce solo su distanze subnucleari e compare in alcuni decadimenti radioattivi.

E' oggetto della quantum electrodynamics QED.

L'interazione elettromagnetica tiene insieme elettroni e nuclei e, quindi, permette l'organizzazione degli atomi e molecole. Regola, inoltre, la propagazione delle onde elettromagnetiche.

L'interazione gravitazionale regola il comportamento degli oggetti molto massivi; altrimenti ha intensità trascurabile. Agisce anche a grandissimo raggio.

Modello Standard e Inflazione

A. Guth aggiunge l'inflazione al Modello Standard, periodo durato circa 10^{-32} s (da: **A. Guth - WAS COSMIC INFLATION THE 'BANG' OF THE BIG BANG?** Published in "The Beamline" 27, 14 (1997)).

In questo tempo (estremamente breve) l'Universo si è espanso esponenzialmente di circa 10^{30} volte (altri dicono anche di più !)

Come paragone, un protone che aumentasse di dimensioni sino a diventare grande come il Sistema Solare sino alla nube di Oort aumenterebbe di circa 10^{30} volte !.

Velocità della luce nel vuoto : $c = 299792.458$ km/s

Per lo spazio-tempo che si espande non c'è la limitazione della velocità della luce come massimo valore, Seguendo Einstein, infatti, tale limitazione vale per gli oggetti materiali che si muovono in un sistema di riferimento inerziale.

Spesso ce ne scordiamo...

In questo caso non abbiamo l'Universo che si espande nello spazio precedentemente vuoto, ma è l'Universo che, espandendosi, crea lo spazio-tempo.

E può fare ciò che vuole...

INFLAZIONE

Oggi è abbastanza chiaro che particelle scalari a spin zero (particelle X e Y), della famiglia del bosone di Higgs, potrebbero produrre il meccanismo dell'inflazione, anche se i dettagli non sono ancora del tutto conosciuti.

Procedendo a ritroso verso il passato, oggi possiamo osservare che la temperatura aumenta e la intensità delle tre forze non gravitazionali cambiano a velocità e sensi diversi (l'**interazione debole** diviene più forte e l'**interazione forte** diviene più debole) e, a circa 10^{-35} s dopo il Big Bang tutte e tre le forze (con l'**interazione elettromagnetica**) divengono della stessa intensità.

Questo fa prevedere l'esistenza di particelle elementari (particelle "X" e "Y" o, genericamente, particelle "X") che hanno sia carica elettrica sia carica di colore (che riguarda l'interazione forte), molto pesanti ($\sim 10^{15}$ GeV/c²) e che possono fare da mediatrici di scambi tra comunità di particelle solo a quelle temperature.

In quelle condizioni, particelle dotate di colore come i quark possono essere convertite in particelle prive di colore, come elettroni e neutrini, sempre attraverso la mediazione delle particelle X.

La particella X può formarsi e disintegrarsi, per esempio, secondo i processi:



Ma se i processi inversi:



si sviluppano con probabilità più bassa, allora la X e la sua antiparticella, in media, distruggono antimateria e creano materia.

In queste condizioni i quark e gli anti-quark possono decadere a ritmi leggermente diversi o avere vie di decadimento diverse. (E' una possibilità)-

INFLAZIONE

Con le tre interazioni che diventavano una sola cosa alle alte temperature iniziali, dovevano formarsi un elevatissimo numero di particelle molto pesanti chiamate “monopoli magnetici” (circa 10^{20} volte più pesanti degli elettroni). Queste particelle dovevano essere di lunga durata (l'unico modo per annichilirsi era che si scontrassero con le corrispondenti antiparticelle) e anche l'universo attuale doveva esserne pieno.

Per fortuna, queste particelle non sono state osservate verosimilmente proprio perché non si sono formate all'epoca a causa dell'inflazione; la loro presenza molto massiva avrebbe condizionato l'evoluzione dell'Universo e, certamente, non avrebbe consentito la nostra attuale esistenza.

Le tre interazioni rimaste non si sono ancora differenziate.

Subito dopo l'inflazione, l'Universo è un ambiente estremamente caldo popolato da particelle prive di massa che interagiscono tra loro con un'unica costante di accoppiamento.

L'Universo è omogeneo, ancora opaco ed isotropo. E' pieno di particelle e antiparticelle ancora prive di massa che si presentano in forma molto diversa dalla attuale.

La forza forte, infine, si separa e ha inizio l'era elettrodebole.

L'inflazione cosmica può spiegare l'estrema omogeneità dell'Universo su larga scala.

Regioni lontanissime, separate da miliardi di anni luce, hanno la stessa temperatura: 2.72548 ± 0.000018 K (una volta sottratto l'effetto Doppler dovuto al movimento della Terra e del Sistema Solare).

Le piccole anisotropie sono in accordo con quanto ci si aspetta dalle piccole oscillazioni termiche generate da fluttuazioni quantistiche nell'Universo primordiale una volta espanso fino alle dimensioni dell'Universo attualmente osservabile.

Queste minime fluttuazioni, ingigantite dall'inflazione, porteranno alla formazione delle stelle e delle galassie.

Un Universo senza fluttuazioni e completamente omogeneo non avrebbe portato alla formazione di ammassi galattici, stelle, pianeti, ecc...

L'inflazione ha portato ad una crescita estremamente rapida dell'Universo, tanto che non potremo mai "vedere" l'istante iniziale. Come dice Leonard Susskind della Stanford University: "è praticamente certo che l'intero universo sia di molti, moltissimi ordini di grandezza più esteso della porzione a noi visibile".

Attorno a 10^{-11} s dopo il Big Bang, con la temperatura scesa a 10^{16} K, una particella speciale diviene il bosone di Higgs di 125 GeV. I bosoni di Higgs, in quell'ambiente diventato "freddo", non sopravvivono ma creano il campo di Higgs.

Le particelle elementari (bosoni deboli, quark, leptoni, ecc.), interagendo con il campo di Higgs, acquistano massa e si differenziano nel loro comportamento.

Le più massive, con il raffreddamento spariranno rapidamente, altre, come i quark up e down, leggere, potranno aggregarsi e formare i protoni e neutroni.

Con il campo di Higgs si rompe la perfetta simmetria dei primi istanti. Meno male, perché da questa leggera asimmetria si è sviluppato l'Universo che conosciamo.

Sempre attorno a 10^{-11} s dopo il Big Bang avviene l'ultima separazione: separazione tra la forza elettromagnetica e forza debole.

Al diminuire della temperatura le particelle W^\pm e Z^0 diventano molto massive perché invischiate pesantemente nel campo di Higgs, mentre i fotoni, privi di massa, rimangono liberi di muoversi.

Da questo momento, le particelle W^\pm e Z^0 ed i fotoni avranno vita separata.

L'energia termica si riduce a sufficienza da consentire a quark e antiquark di combinarsi tra loro per formare le prime particelle composite, gli adroni. Si formano, in particolare, i nucleoni, cioè i protoni e i neutroni e le relative antiparticelle (era degli adroni).

GLI ADRONI

I quark top, molto massicci, non riescono a legarsi in qualcosa di stabile.

I quark up e down, invece, i più leggeri tra i quark, si legano in uno stato particolare con la mediazione dei gluoni (mediatori della forza forte).

Nascono i primi protoni, mattoni delle successive strutture materiali più complesse, che sono assolutamente stabili.

Sono costituiti da due quark u con carica $+2/3$ e da un quark d con carica $-1/3$ per una carica totale $+1$.

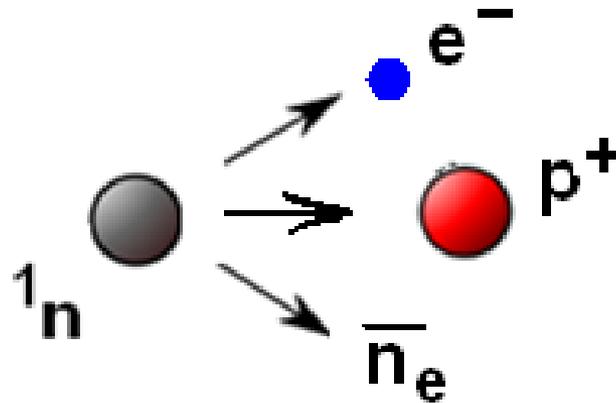
I 3 quark sono legati da un'energia di legame molto elevata (938.27 MeV), molto superiore a quella corrispondente alla massa dei 3 quark.

A temperature dell'Universo sempre più basse, rimarranno legati sempre meglio e sarà sempre più difficile riuscire a frantumare il protone nei suoi componenti.

Oggi il tempo di vita del protone non è stato misurato perché superiore a 10^{33} anni (miliardi di miliardi di volte superiore all'età dell'Universo stimata in circa 10^{10} anni).

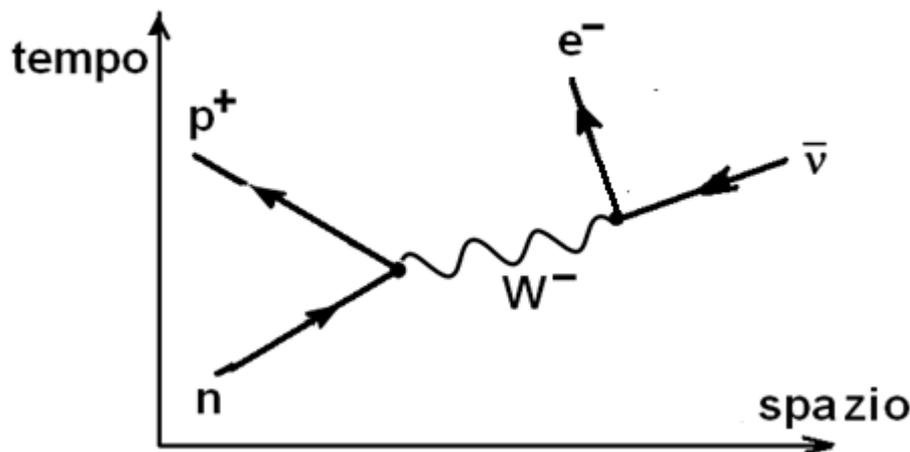
I neutroni sono particelle molto simili ai protoni, ma con carica nulla. Sono costituiti da 1 quark u e da due quark d. Anche la massa è molto simile ($m = 939.56 \text{ MeV}/c^2$), ma non uguale: il neutrone è leggermente più pesante del protone di circa lo 0.14 %.

Per questo il neutrone può decadere in un protone accompagnato da un elettrone ed un antineutrino elettronico.



E' un tipico decadimento nucleare "debole"

Il neutrone “libero” decade, quindi, in circa 15 minuti con una reazione nucleare spontanea detta “decadimento β ”.



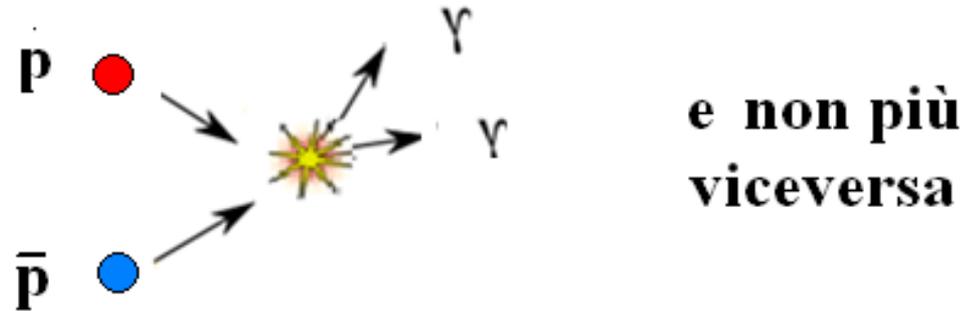
Il rapporto protoni/neutroni è aumentato subitaneamente sino a 6:1 per poi fermarsi ed aumentare leggermente successivamente a causa delle reazioni all'interno delle stelle.

Quando la temperatura sarà scesa a sufficienza, i neutroni comporranno i nuclei degli atomi insieme ai protoni con i quali si trasforma continuamente mediante lo scambio di pioni. Questo rende il neutrone “legato” stabile.

Tra gli adroni, oltre ai barioni di tipo fermionico (protone, neutrone) composti da 3 quark, ci sono anche i mesoni (di tipo bosonico) composti da 2 quark (per esempio: pione , composto da quark u e anti-quark \bar{d}).

SCOMPARSA DELL'ANTIMATERIA

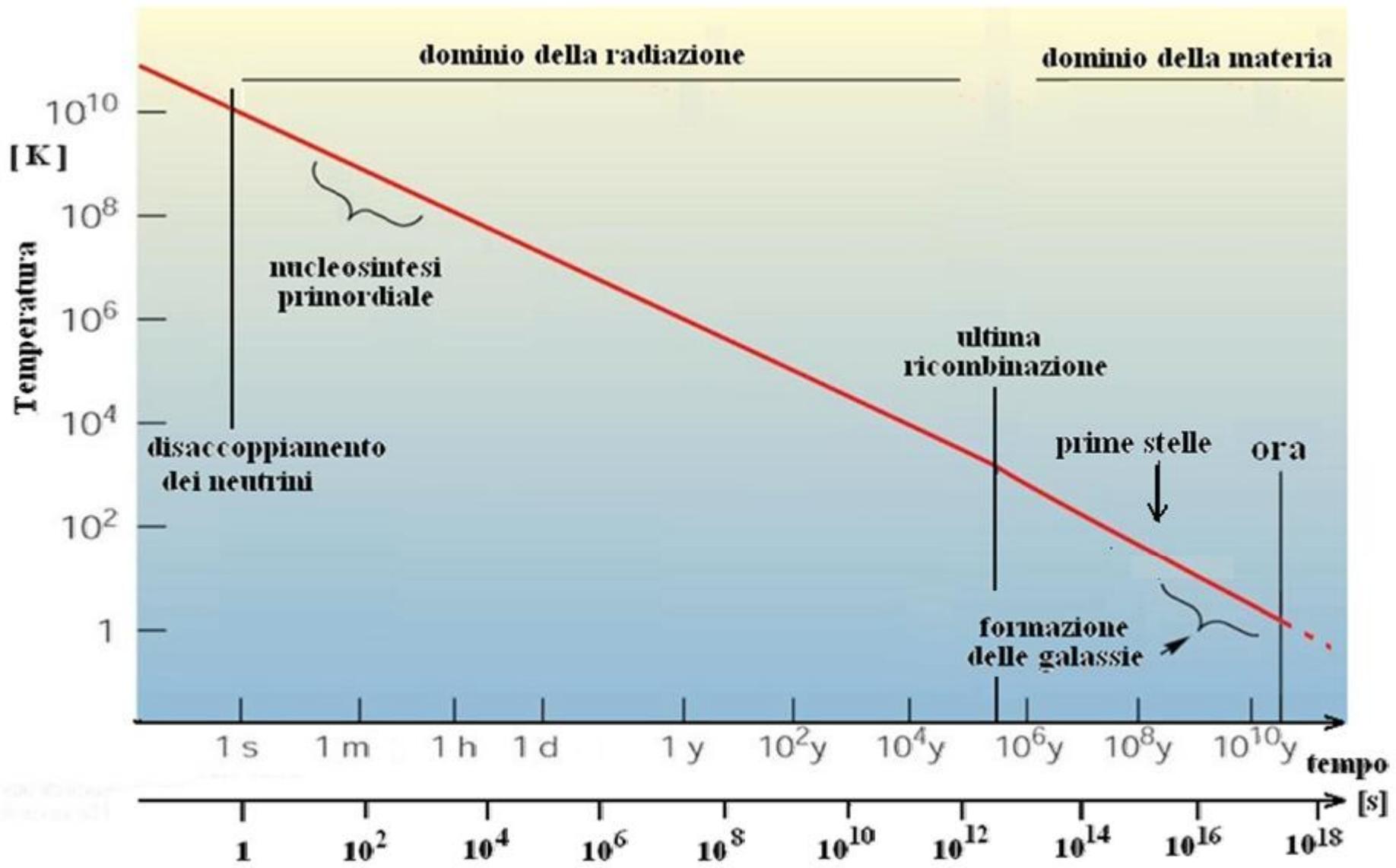
Attorno a $T = 10^{13}$ K ($t = 10^{-6} / 10^{-4}$ s dal Big Bang) materia e antimateria si ricombinano lasciando un lieve eccesso di materia.



Questa piccola discrepanza, la cui origine non è ancora chiarita, fa sparire l'antimateria lasciando circa un miliardo di fotoni per ogni protone, rapporto che si mantiene anche oggi.

Lo studio del bosone di Higgs potrebbe portare ad una spiegazione più completa. O, forse, il decadimento più rapido dell'antimateria è correlato alla violazione di CP da parte di fenomeni dovuti a interazione debole, oppure al già visto decadimento di particelle X, ecc...

L'antimateria si può studiare oggi con i moderni acceleratori (che la producono a fatica e per breve tempo) ed è molto utile anche in medicina. La pet – Positron Emission Tomography -Tomografia a Emissione di Positroni) è una tecnica diagnostica per la produzione di mappe funzionali dell'interno del corpo umano).



100.000000
8.000000E-01

Quark .

Gli adroni (protoni, neutroni e relative antiparticelle) sono composti da 3 quark (quark up e quark down).

La forza forte tra i quark ha una caratteristica inaspettata: aumenta se aumenta la distanza di separazione, ovvero diminuisce se i quark sono molto vicini.

Questo porta alla non esistenza di quark isolati nel nostro ambiente attuale.

Quando l' Universo era molto piccolo, prima che si formassero gli adroni, i quark U e D erano tanto vicini tra loro da essere sostanzialmente particelle libere.

Solo quando la temperatura è scesa in seguito all'espansione dell'Universo, i quark U e D si sono allontanati quel tanto da aumentare la forza di legame e formare gli adroni.

Elettrone

L'elettrone è una particella stabile perché non ci sono particelle più leggere e non può decadere in particelle neutre (la carica deve conservarsi).

Interagisce solo gravitazionalmente, per interazione elettromagnetica e debole. La sua massa è circa 1800 volte inferiore a quella del protone ($0.511 \text{ MeV}/c^2$)

NEUTRINI

Sono i più leggeri dei leptoni (interagiscono solo “debole”) e hanno massa talmente trascurabile da non essere ancora stata misurata. Possono attraversare enormi quantità di materia senza avere alcuna interazione.

I neutrini “cosmici” prodotti da reazioni tipo $n \rightarrow p + e + \nu$ del primo secondo sono molto energetici (molto di più di quelli prodotti successivamente nelle stelle).

Interagivano facilmente con la materia e con i fotoni sino all'istante $T = 1 \text{ s}$, quando la temperatura è scesa talmente da non riuscire più a mantenere il contatto termico e si ha il loro “disaccoppiamento”.

Da qui in poi avranno vita separata dalla materia e dalla radiazione e rivestiranno un ruolo secondario nei processi successivi. Li ritroviamo oggi ad una temperatura enormemente più bassa (circa 2 K) a causa dell'espansione dell'Universo (di un fattore circa 10^{17}).

I primi 3 minuti (Steven Weinberg - Mondadori Ed.)

A circa 1 s dopo il Big Bang, l'Universo diviene abbastanza rarefatto tanto che i neutrini, sempre poco interagenti con la materia, si disaccoppiano dalla materia e avranno una storia autonoma. Questi neutrini ormai diventati pochi e "freddi" a causa dell'espansione dell'Universo, sono stati osservati solo recentemente (2018) e da loro potremo avere informazioni ed un'immagine dell'Universo di questi primi istanti di vita.

Con temperatura tra 10^{10} e 10^8 K , nei primi 3 minuti di vita dell'Universo, avvengono le prime fusioni nucleari tra nucleoni. Quest'epoca è detta *Era della nucleosintesi*. I protoni, ovvero i nuclei di idrogeno, si fondono in elio-4 (due protoni e due neutroni) ed in piccole altre quantità di altri nuclei leggeri (^2H , ^3H , ^6Li , ecc.)..

Per fortuna solo il 25% circa di idrogeno si è trasformato in elio; la fusione si è fermata in tempo, quando la temperatura è scesa, non permettendo più le reazioni nucleari.

Il 75 % di idrogeno rimasto ha trovato modo poi di utilizzare le stelle che si formeranno in fornaci per continuare il lavoro di fusione in nuclei più pesanti. Lavoro che dura tuttora, moderato da processi *deboli* che permettono una lunga durata del fenomeno. Meno male...

Se l'Universo iniziale avesse avuto una temperatura di partenza più elevata, l'era della nucleosintesi probabilmente avrebbe avuto una durata diversa e, magari, tutto l'idrogeno si sarebbe convertito in elio già nei primi minuti; tutta la vita seguente dell'Universo sarebbe stata totalmente diversa.

La nucleo-sintesi primordiale ha portato a trasformare l'idrogeno in elio nella percentuale che ancora oggi riscontriamo come abbondanza naturale (74% di idrogeno e 25% di elio). Le reazioni nucleari nelle stelle non hanno cambiato sostanzialmente questo rapporto che si è costituito nei primi tre minuti.

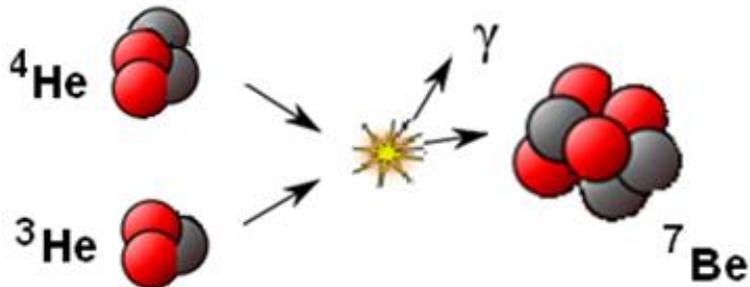
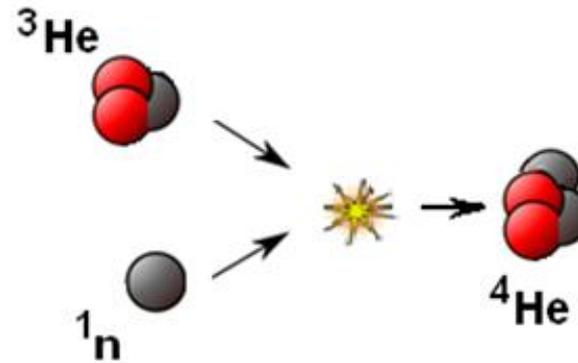
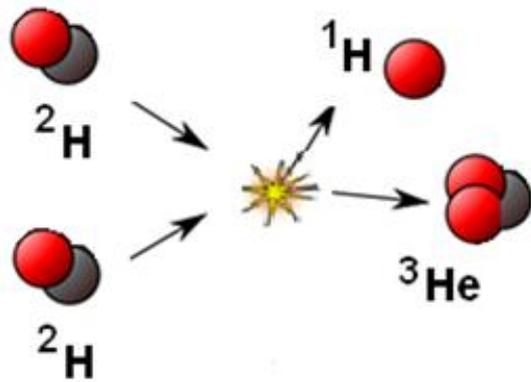
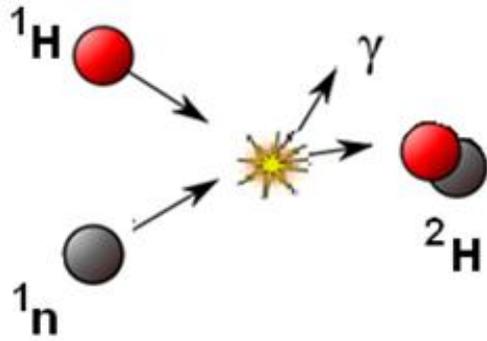
La teoria del Big Bang spiega e giustifica esattamente il rapporto tra idrogeno ed elio che oggi possiamo osservare: un successo che nessun'altra teoria è in grado di raggiungere.

NUCLEOSINTESI PRIMORDIALE

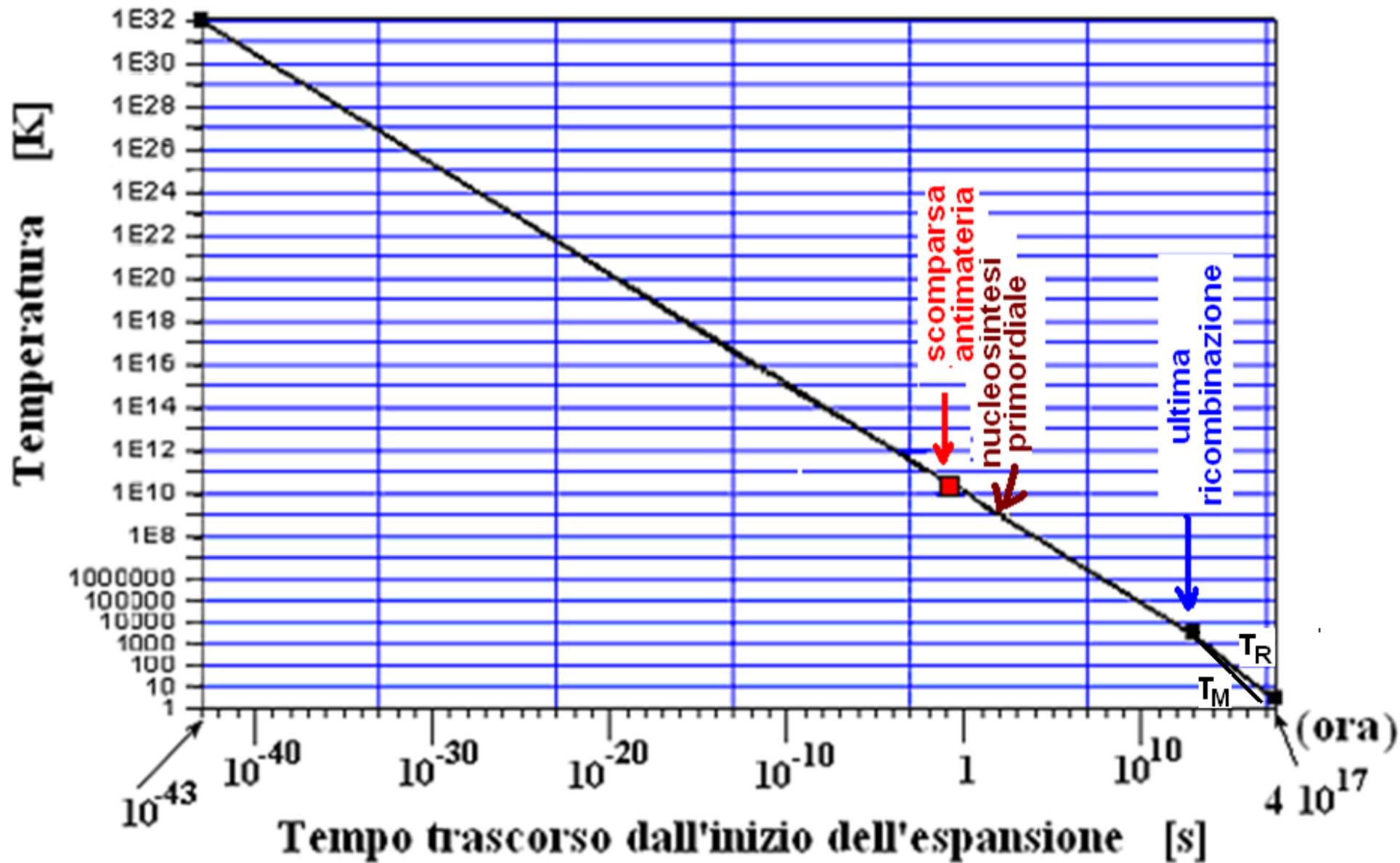
Durante i primi secondi di vita dell'universo, la temperatura è più alta dell'energia nucleare del deuterio e per questo ogni atomo di deuterio che si forma è subito distrutto (situazione nota come *collo di bottiglia del deuterio*). Quindi la formazione dell'elio-4 è ritardata fino al momento in cui l'universo è abbastanza freddo per la formazione del deuterio (circa $T = 10^{10}$ K). Questo permette la formazione di elio, ma subito dopo, a circa 3 minuti dal Big Bang, quando la temperatura è scesa sotto il miliardo di gradi, l'universo diventa troppo freddo perché possa avvenire la fusione nucleare. A questo punto l'abbondanza di elementi è fissata: rimane circa il 77 % di idrogeno, circa il 23 % di ^4He con tracce di ^2H , ^3He , ^7Li . Gli altri elementi più pesanti si formeranno all'interno delle stelle.

Meno male che è andata così..... perché se il tempo di formazione dell'elio fosse durato più a lungo dei 3 minuti (temperatura $T = 10^9$ K) , tutto l'idrogeno si sarebbe convertito in elio e non ci sarebbe stato più combustibile per mantenere le stelle in attività per miliardi di anni, forgiare gli elementi pesanti e permettere il formarsi della vita su uno sperduto pianeta di una stella qualunque (tra miliardi di stelle della nostra galassia), su una qualunque dei miliardi (se non di più) di galassie dell'Universo. Bastava anche un rapporto leggermente diverso tra la massa del neutrone e del protone e avremmo avuto molto più elio e molto meno idrogeno che è il combustibile essenziale per innescare le reazioni nucleari nelle stelle ... E, senza le stelle, non si sarebbero formati gli elementi pesanti, i pianeti, ... L'Universo sarebbe diventato una cosa ben triste e senza luce... senza possibilità che qualcuno, un giorno, potesse contemplare il firmamento.

NUCLEOSINTESI PRIMORDIALE



Alcune reazioni nucleari che portarono alla formazione dei primi elementi leggeri



Temperatura dell'Universo in funzione del tempo trascorso dal big bang

Descrizione della figura precedente.

Le teorie note non consentono la descrizione per $t < 10^{-43}$ s. Attorno a 10^{-10} s anche le forze elettromagnetica e debole si separano formando, con la forza gravitazionale e forte, i quattro tipi di forze che oggi conosciamo.

In evidenza il tempo della scomparsa dell'antimateria (quadrato rosso) ed il tempo dell'ultima ricombinazione (quadrato nero), quando l'Universo divenne trasparente (circa 380000 anni dopo il big bang).

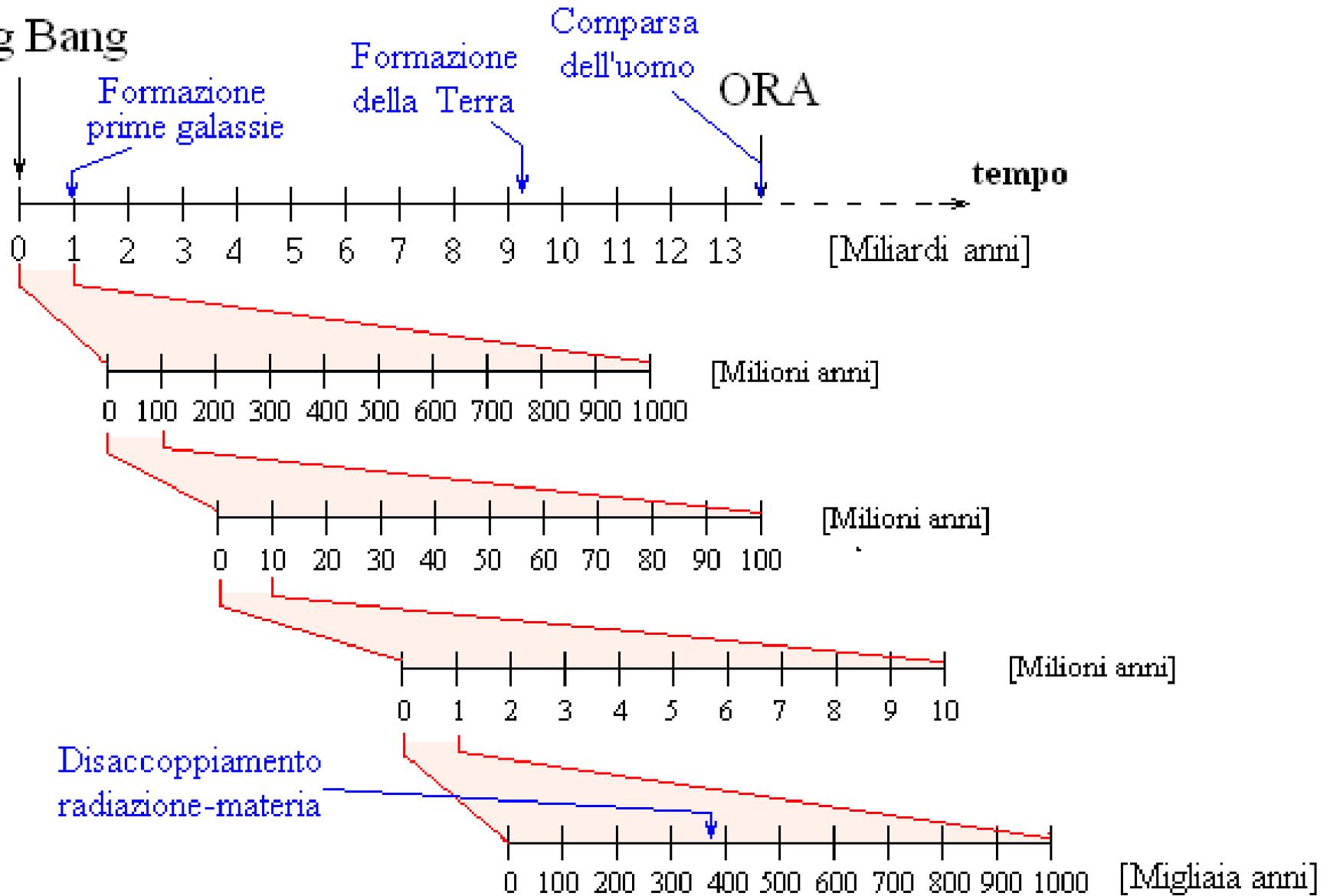
Notare la variazione di pendenza, da qui in poi, dovuta al disaccoppiamento della radiazione dalla materia che si raffredda separatamente con la propria velocità.

La luce di allora (fotoni a 3000 K), subendo l'espansione dell'Universo, è ora osservabile nelle microonde (a 2.73 K).

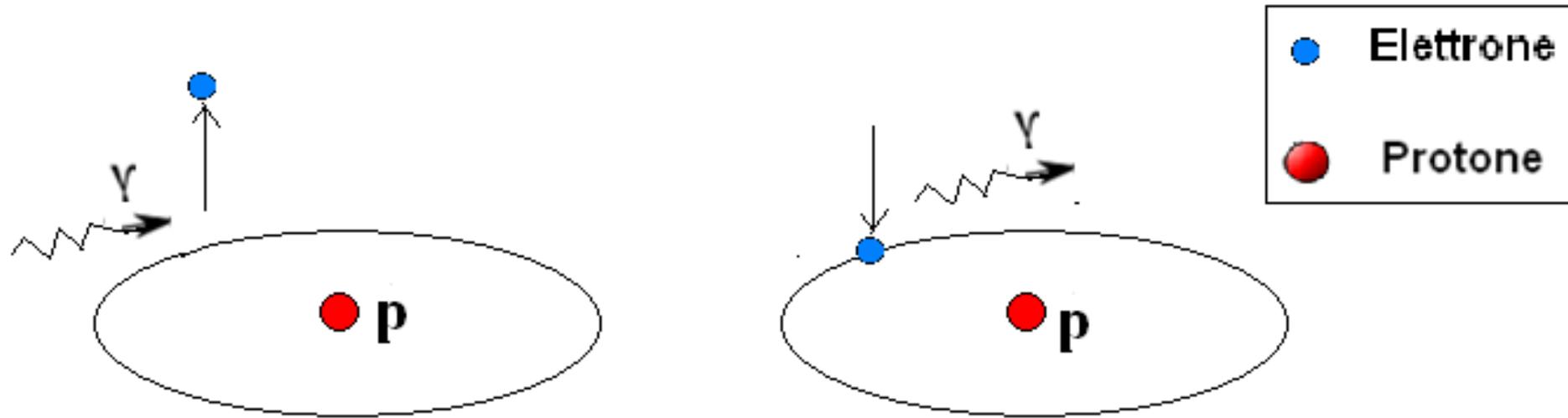
Dopo i primi minuti, con la formazione dei nuclei di idrogeno, elio e poco altro, segue un periodo “tranquillo”. Non succederà più nulla di importante per migliaia e migliaia di anni. L’Universo si raffredda, ma rimane un mondo nebbioso, fatto di un mescolamento di nuclei, elettroni, fotoni che interagendo tra loro, impediscono alla luce di mostrarsi. La temperatura è ancora troppo alta perché si possano formare atomi neutri.

Gli elettroni sono dotati di troppa energia perché l’attrazione Coulombiana possa forzarli stabilmente attorno ai nuclei. Anche se un elettrone si legasse ad un nucleo, con l’urto con un fotone (anch’esso molto energetico), verrebbe subito scalzato via.

Big Bang



RICOMBINAZIONE



L'atomo (di idrogeno, in questo esempio) colpito da radiazione molto energetica si ionizza (l'elettrone viene scalzato via e si separa dal nucleo (di un solo protone)). Se un elettrone libero (carica neg.) si avvicina al protone (carica pos.) può venire catturato ed emette un fotone.

Materia e radiazione sono accoppiate ed hanno la stessa temperatura

Se, con il diminuire della temperatura, i fotoni non hanno più energia sufficiente, il processo di ionizzazione non avviene.

Materia e radiazione sono disaccoppiate e la diminuzione della temperatura avviene in modo indipendente, a ritmi diversi.

Ultima ricombinazione

L'Universo, dal tempo della scomparsa dell'antimateria, era ed è tuttora ben più pieno di fotoni (circa 400 per centimetro cubo) che di atomi di materia; il rapporto è rimasto di un protone (nucleo di idrogeno) ogni miliardo di fotoni.

Prima dell'ultima ricombinazione, data la temperatura ancora elevata, gli atomi sono ionizzati e gli elettroni continuano ad essere liberi.

Questa condizione dava la possibilità ai fotoni di essere continuamente diffusi dagli elettroni liberi in un processo di scattering Thomson. A causa di questa continua diffusione, il libero cammino medio dei fotoni era veramente minimo e l'Universo primordiale, sino a circa 380000 anni di età era, perciò, opaco. L'Universo era qualcosa di simile all'interno di una stella (come il nostro Sole) ed era "opaco" (non vediamo l'interno del Sole). Materia e radiazione, in continua interazione, mantengono la stessa temperatura.

Ultima ricombinazione

Dopo i primi 3 minuti, quando si formarono i primi nuclei, per migliaia di anni non succede nulla di particolare. Solo quando, espandendosi, la temperatura scese a migliaia di gradi, gli elettroni ed i nuclei cominciarono a formare atomi neutri in un processo detto di ricombinazione. Gli elettroni non sono più liberi, ma si legano stabilmente ai nuclei carichi positivamente. Si formano i primi atomi neutri, principalmente di idrogeno ed elio.

I fotoni non ebbero più la possibilità di venire diffusi dagli elettroni liberi (non ce n'erano più e la diffusione da atomi neutri è fenomeno raro) pertanto si ebbe il disaccoppiamento della radiazione dalla materia che dal tempo dell'ultimo scattering (circa 380000 anni dopo il Big Bang ovvero quando la temperatura dell'Universo era di circa 3000 K) continuarono a raffreddarsi separatamente (la materia più velocemente della radiazione).

I fotoni, da quell'epoca, non sono più diffusi dalla materia ionizzata, ma hanno la possibilità di viaggiare senza ostacoli.

L'universo diviene trasparente.

Ultima ricombinazione

La luce di allora (fotoni dell'ultima ricombinazione a 3000 K circa) ha viaggiato libera per l'Universo e siamo oggi in grado di osservarla.

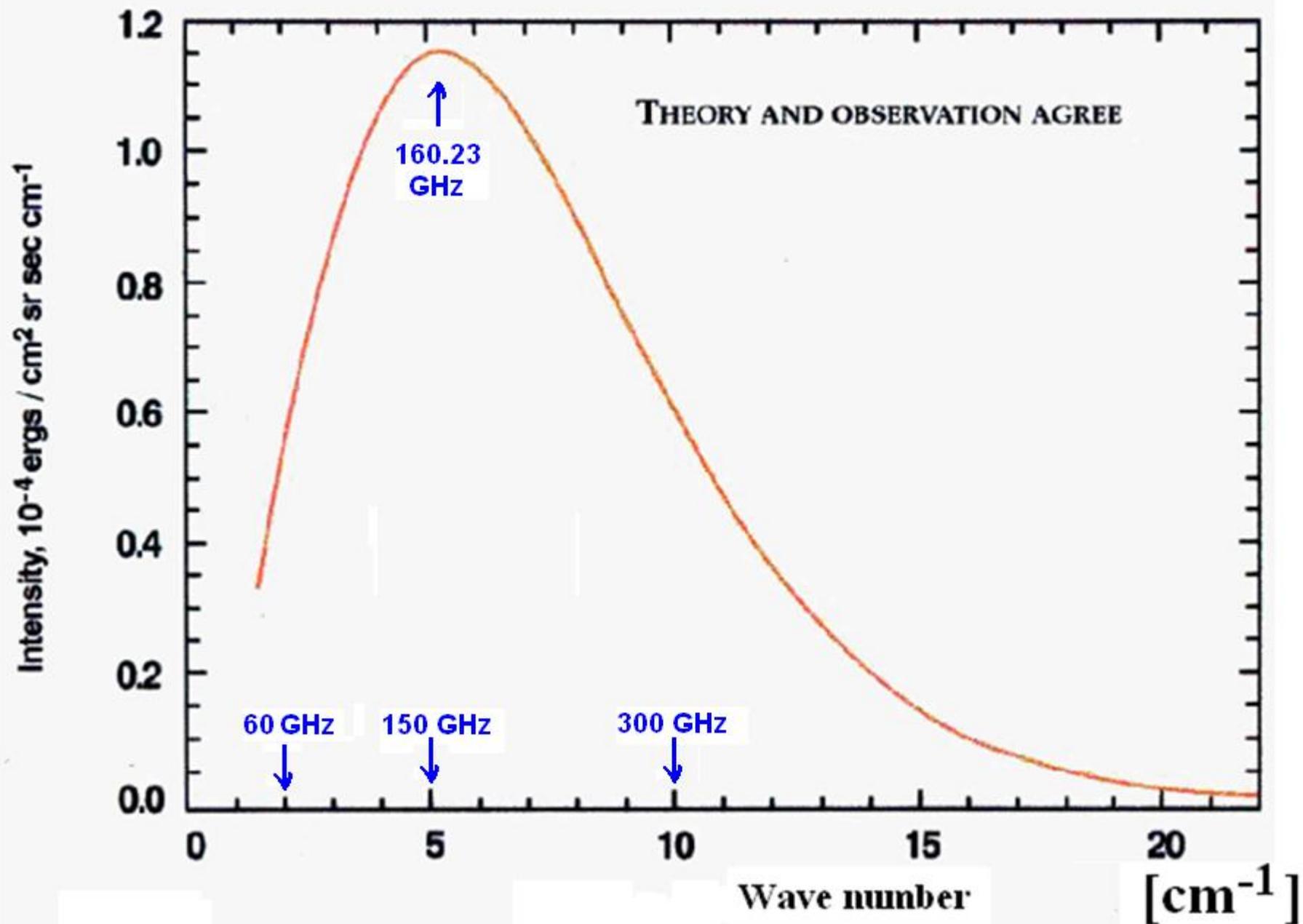
I fotoni emessi (a 3000 K) hanno subito l'espansione dell'Universo che, da allora (380000 anni dal Big Bang), ha subito un'espansione di circa 1000 volte.

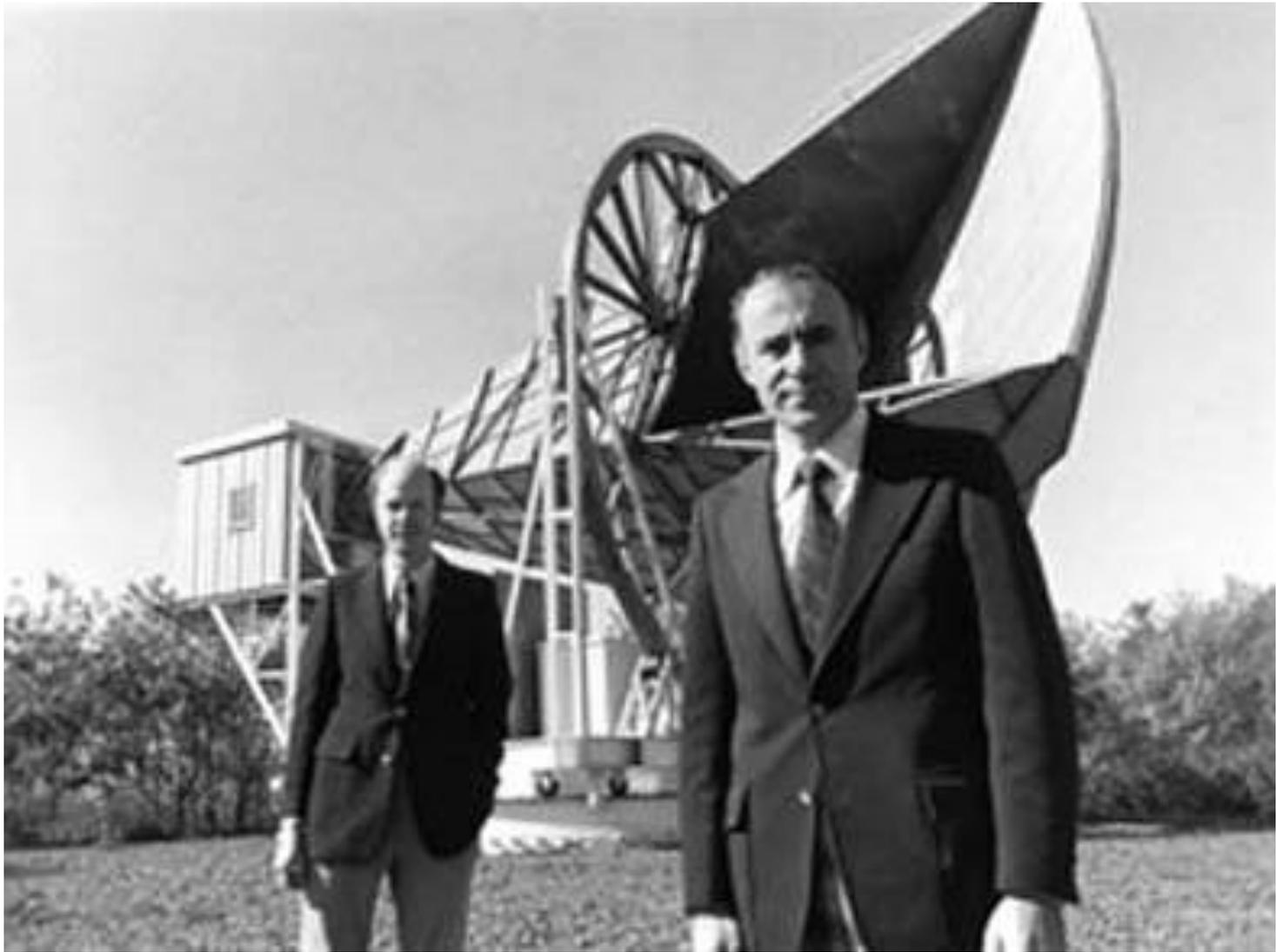
La lunghezza d'onda, perciò, si è allungata di 1000 volte, i fotoni hanno perso energia, e la temperatura degli stessi fotoni di allora sono osservati oggi ad una temperatura 1000 volte circa più bassa (redshift cosmologico).

Oggi la temperatura dello spettro di corpo nero della radiazione di fondo è $T = 2.726$ K con un picco dello spettro a circa 160,2 GHz ($\lambda = 1.9$ mm).

Qui possono essere osservati.

COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM FROM COBE





Robert Wilson e Arno Penzias davanti all'antenna con la quale hanno scoperto la radiazione cosmica di fondo (1964).

Penzias e Wilson, ricercatori dei Bell Laboratories, scoprirono la Radiazione Cosmica di Fondo (CMB) nel 1964 [*] mentre stavano utilizzando un'antenna a microonde per provare la possibilità di comunicazioni transatlantiche per riflessione passiva dal satellite Echo. La scoperta li portò a conseguire il premio Nobel per la fisica nel 1978.

I due captarono un rumore di origine ignota di intensità costante proveniente da tutte le direzioni che non riuscirono ad eliminare. Si rivolsero a R.H.Dicke della vicina Princeton University che non ci mise molto a capire che quel rumore non era altro che la radiazione cosmica di fondo già ipotizzata negli anni '40 da F.Gamow.

La scoperta è considerata la più importante tra le prove sperimentali a favore della teoria del Big Bang proposta da A.F.Fridman e G.Lamaître negli anni '20.

[*] A.A.Penzias, R.W.Wilson – *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s* - *Astrophysical Journal*, 142 ,418-421 (1965)

FATTORE DI SCALA

Con la misura della velocità di recessione delle galassie distanti è possibile stimare come l'Universo si è espanso nel tempo.

Utile è il “fattore di scala” che dà le dimensioni dell'Universo relativamente alle dimensioni di oggi poste uguali ad 1.

Circa 5 miliardi di anni fa, per esempio, quando si è formato il Sole e la Terra, le dimensioni dell'Universo erano più piccole di un fattore 0.7.

Quando l'Universo è diventato trasparente e la luce ha potuto viaggiare nello spazio senza diffusione (circa 380000 anni dopo il Big Bang), le sue dimensioni erano circa 1000 volte più piccole.

Pur tuttavia la luce ha viaggiato da allora per più di 13 miliardi di anni per arrivare a noi solo ora. L'Universo, nel frattempo, si è espanso e la superficie da cui è partita la luce è oggi molto più lontana di 13 miliardi di anni luce. Se avessimo la possibilità di ripercorrere a ritroso il cammino effettuato da questa luce dovremmo percorrere, oggi, una distanza di circa 46.5 miliardi di anni luce.

A causa dell'inflazione iniziale, l'Universo osservabile può essere una piccola parte dell'intero Universo, ma, visto che non possiamo vedere nulla oltre tale limite, è impossibile affermare alcunché sulle dimensioni dell'intero Universo.

E' pure difficile definire le dimensioni dell'Universo, anche limitandoci all'Universo osservabile.

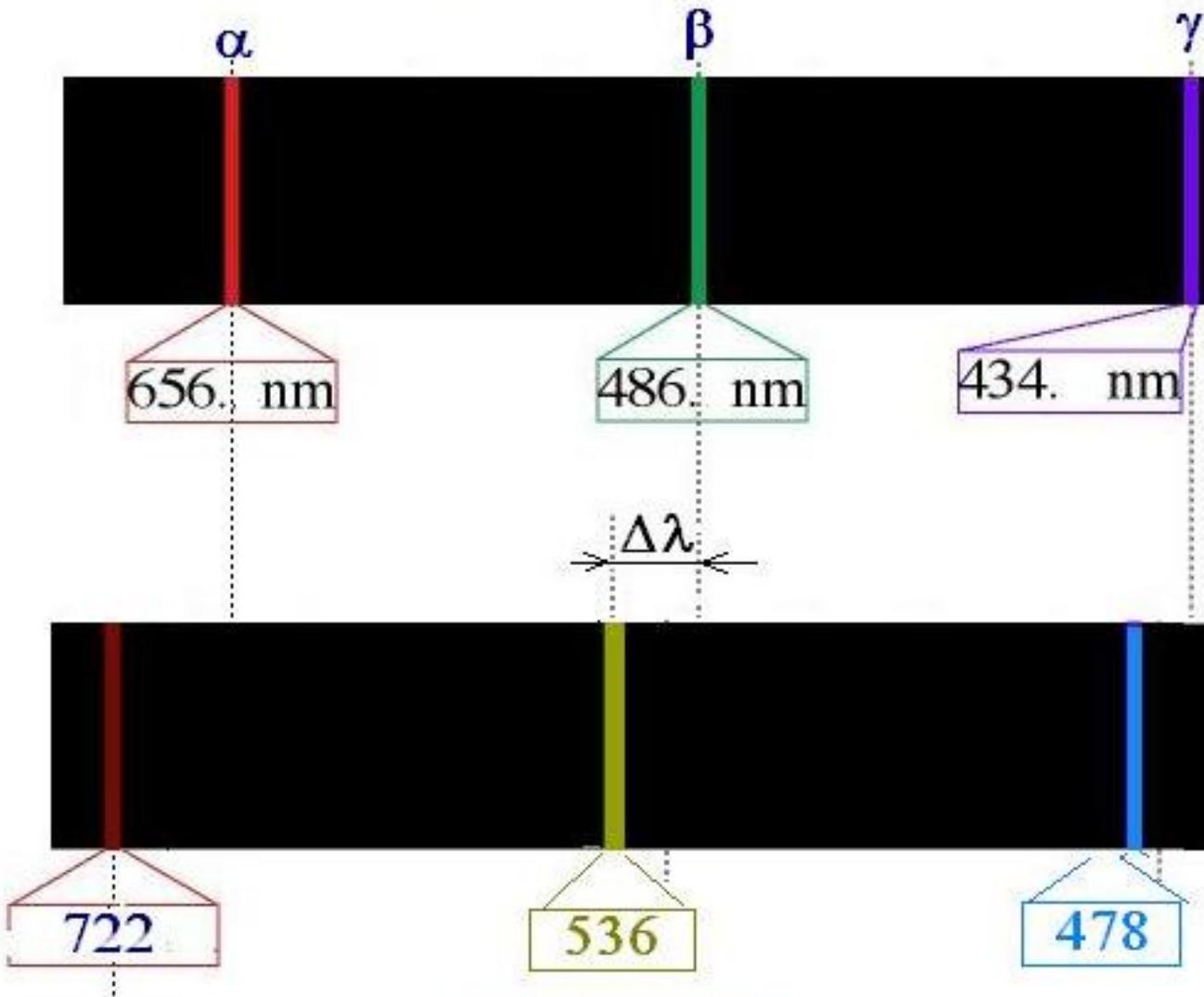
Per confronto, se prendiamo un aereo e voliamo a New York su una distanza di 5000 km, ad una velocità media di 500 km/h, impiegheremo circa 10 ore per effettuare il viaggio. Ma se supponiamo che durante il tempo del viaggio la Terra aumenti di dimensioni e la distanza aumenti di circa il 20% , quando atterreremo l'aeroporto di partenza sarà distante 6000 km.

E quale sarà stata la distanza percorsa? Evidentemente il numero sarà compreso tra 5000 e 6000 km, dipende da come è avvenuta l'espansione.

Si può parlare, quindi, di tre distanze.....

The Hydrogen spectra - Balmer Series

SPOSTAMENTO
VERSO IL ROSSO



$$z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{em}}} - 1$$

$$z = \frac{536}{486} - 1$$

$$z = 0.1$$

← RED SHIFT

La scoperta di questa radiazione di fondo è abbastanza recente (1964) per opera di Arno Penzias e Robert Wilson. Interessante anche il modo in cui arrivarono alla scoperta, brillantemente esposto nella Lecture della premiazione con il premio Nobel nel 1978.

([http:// nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1978/Wilson-lecture.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1978/Wilson-lecture.pdf))

Questa scoperta confermava in modo qualitativo e quantitativo la teoria del *big bang*, sino ad allora messa in dubbio da modelli di stato-stazionario e avvalorata da fenomeni solo qualitativi tipo paradosso di Olbers.

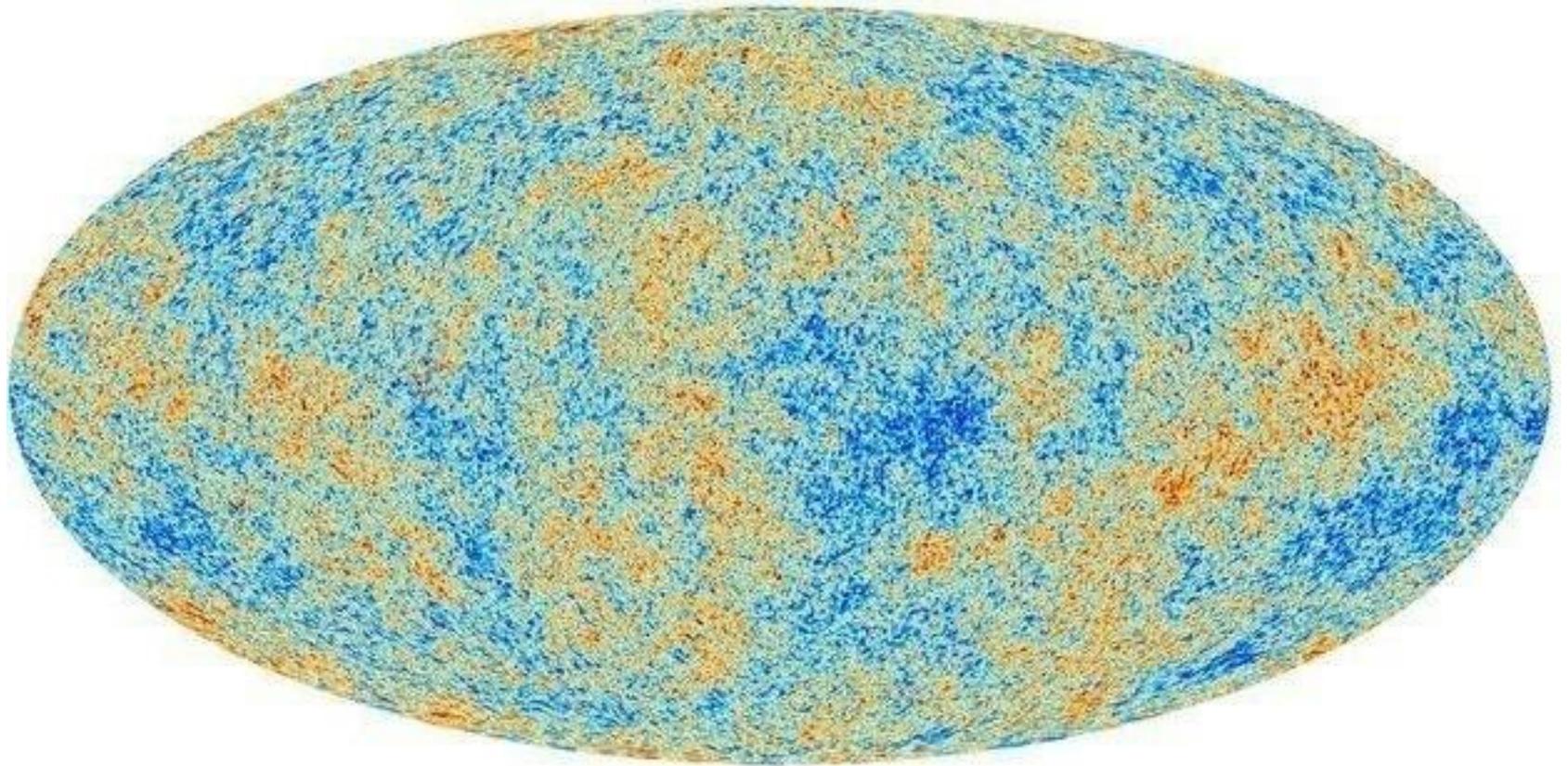
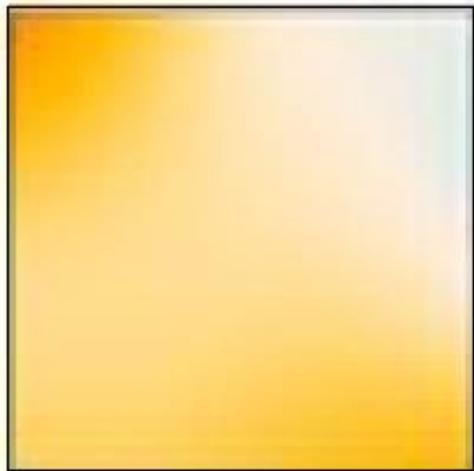


Immagine dell'Universo primordiale (circa 380000 anni dopo il Big Bang) osservata dal telescopio spaziale Planck dell'European Space Agency - 2013.

Mappa della radiazione cosmica di fondo (CMB) nel corso degli anni

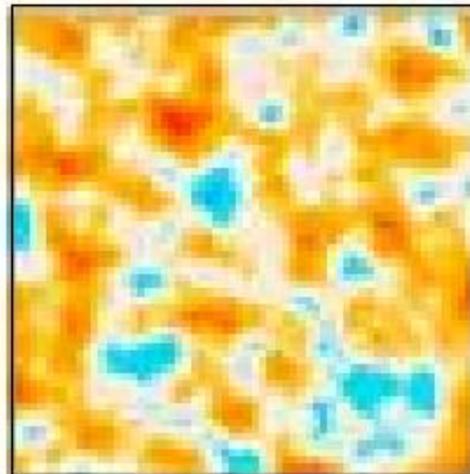
COBE

1989



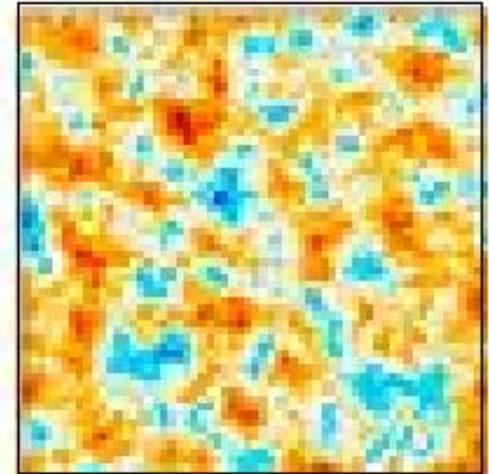
WMAP

2001



PLANCK

2009



La teoria del *Big Bang* è ora accreditata da tutti gli astronomi anche perché piccole anisotropie (dell'ordine di 10^{-5}) nella provenienza della radiazione, previste e necessarie per spiegare, per esempio, la formazione delle galassie, sono state effettivamente osservate.

Riuscire ad osservare contrasti di densità così piccoli ha richiesto l'utilizzo di satelliti artificiali.

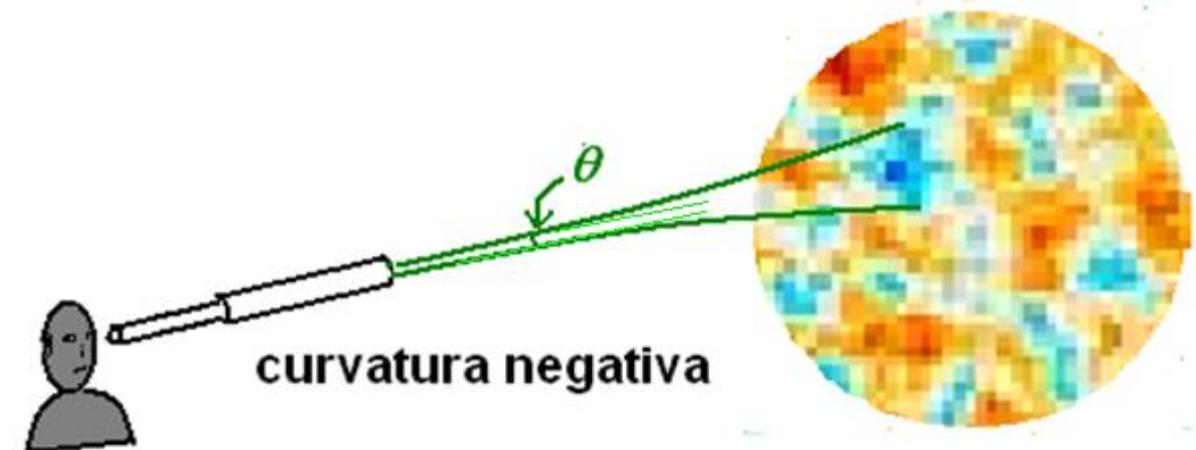
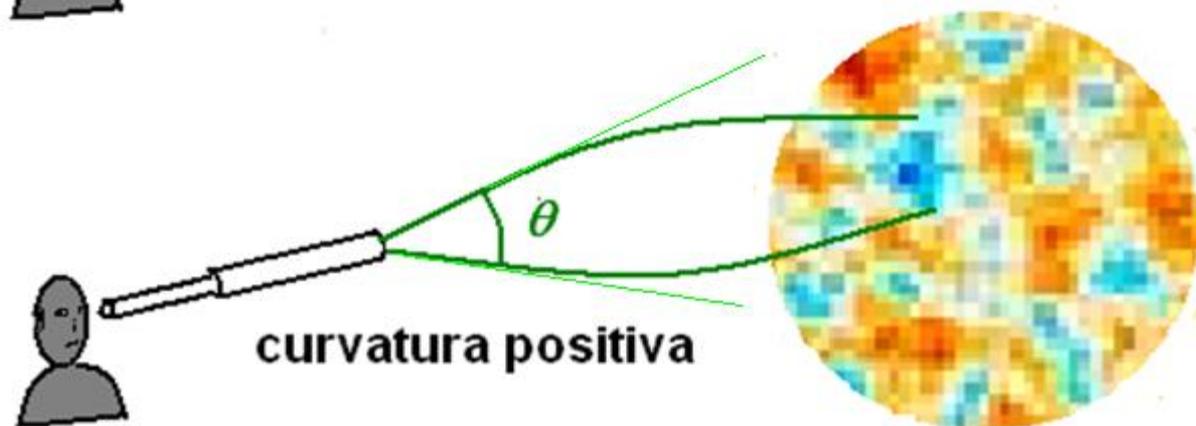
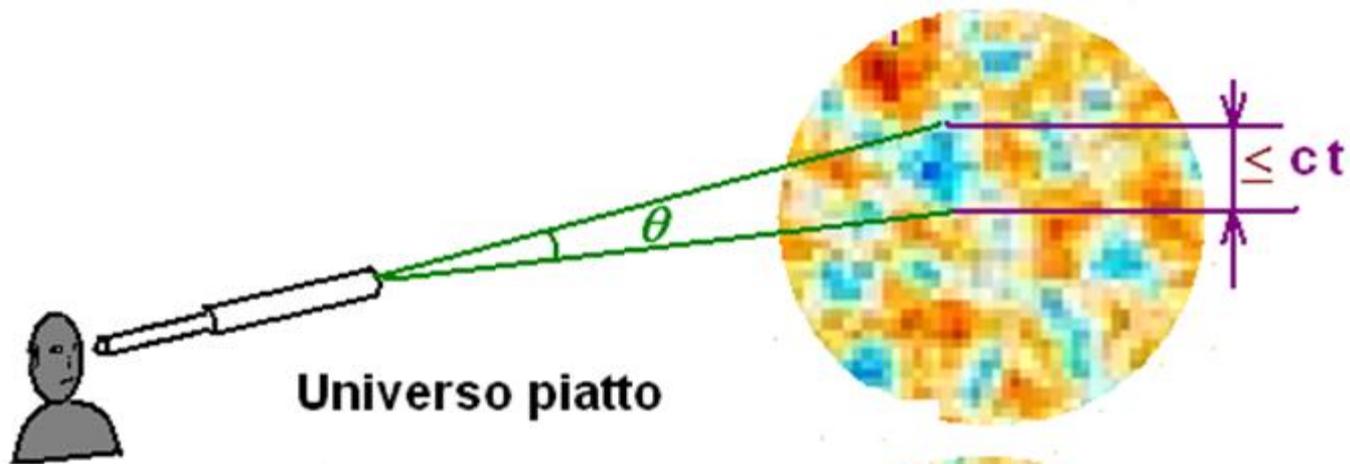
(D.N.Spergel *et al*, Wilkinson Microwave Anisotropy Probe observation: determination of cosmological parameters, *Astrophysical Journal Supplement* **148**, 175-194 (2003)).

Non solo si è riusciti a misurare variazioni nella radiazione cosmica di fondo (CMBR) ma anche le dimensioni delle granulosità.

Stimando la dimensione massima di queste granulosità, e sapendo la loro distanza, possiamo confrontare l'angolo di osservazione θ con l'angolo calcolato secondo la geometria euclidea.

Queste triangolazioni cosmiche permettono di misurare la curvatura dello spazio.

Ebbene l'osservazione dice che l'Universo è piatto e vale la geometria euclidea.



L'immagine è stata "scattata" al tempo $T = 380000$ anni. Le dimensioni più grandi delle irregolarità non possono essere più grandi di cT .

D'altra parte, oggi, l'immagine proviene da circa 13 miliardi di anni fa, ovvero $13 \cdot 10^9$ anni luce.

Il fattore di scala, z , è circa 1000. La distanza della superficie dell'ultima diffusione era 1000 volte più piccola.

Conosciamo, quindi, le dimensioni del triangolo e, quindi anche dell'angolo sotto il quale dobbiamo vedere la irregolarità.

Basta confrontare quest'angolo con l'angolo θ osservato con i radiotelescopi...

Risultato: L'Universo è piatto.

Anche analizzando la distribuzione delle dimensioni delle irregolarità nella radiazione cosmica di fondo si scopre che è proprio la distribuzione che ci si aspetta per un universo piatto.

Se l'Universo fosse chiuso o aperto, le immagini di oggetti così distanti apparirebbero deformati stante il percorso divergente o convergente della luce per arrivare sino a noi. Diretta conseguenza di un Universo piatto è che la densità di materia è molto vicina alla densità critica.

Ma la materia che osserviamo è ben lontana da produrre la densità critica.

Il fondo di radiazione dà un'ulteriore conferma che dobbiamo cercare materia e l'energia "oscure" che non sperimentiamo, ma che devono esserci per far tornare i conti.

MODELLO STANDARD

Il Modello Standard descrive tre delle quattro interazioni fondamentali note: interazione forte, interazione debole ed interazione elettromagnetica e le particelle elementari ad esse collegate.

Non è una teoria del tutto, obiettivo della fisica di oggi, perché non comprende l'interazione gravitazionale. Per questa, infatti, non c'è ancora una teoria quantistica coerente.

L'unificazione delle interazioni elettromagnetica e debole nel Modello Standard è dovuta a S. Weinberg e A. Salam e lascia presagire la possibilità di Grande Unificazione anche con le altre interazioni.

Al Modello Standard originale si è aggiunto, in tempi recenti, il bosone di Higgs.

Quarks

I	II	III		
$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t top	0 0 1 γ photon	$125.09 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H higgs

$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 g gluon	
--	---	--	----------------------------------	--

Scalar Bosons

$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z^0 Z boson	
---	---	---	--	--

Leptons

$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W^\pm W boson	
--	---	---	--	--

Gauge Bosons

MODELLO STANDARD
delle particelle elementari

		gravitazionale	debole	elettromagnetica	forte
raggio d'azione		∞	10^{-18} m	∞	10^{-15} m
Leptoni quanti di materia	quarks	X	X	X	X
	elettrone, muone, tau	X	X	X	
	neutrini	X	X		
Bosoni mediatori interazione	fotone	X		X	
	W^+ , W^-	X	X	X	
	Z^0	X	X		
	gluoni	X			X
	gravitone ?	X			

Nella tabella viene indicato a quali interazioni è soggetto ciascuno dei quanti

Nei moderni acceleratori, facendo urtare protoni, più è grande l'energia delle collisioni, più alta sarà la temperatura che può svilupparsi, anche se per un breve istante, e più grande sarà la massa delle particelle che si potranno produrre.

Si possono creare le particelle che popolavano l'Universo nei suoi primi istanti quando le temperature erano di migliaia di miliardi di kelvin.

Il bosone di Higgs è stato rivelato recentemente (2012) con l'acceleratore LHC del CERN a Ginevra. È un bosone scalare massivo ($125.18 \pm 0.16 \text{ GeV}/c^2$) che ha un'importanza fondamentale all'interno del Modello Standard.

Le alte temperature raggiungibili con gli attuali acceleratori di particelle sono quelle che si riscontravano nell'Universo dopo tempi dell'ordine del nanosecondo dopo il Big Bang, ma sono ancora lontanissime da quelle previste per la Grande Unificazione. .

Si prevede, infatti, viste le variazioni dell'intensità delle tre interazioni al variare della temperatura, che le tre interazioni dovrebbero arrivare a sovrapporsi attorno a 10^{27} K ,portando, quindi, alla Grande Unificazione.

Queste temperature erano presenti nell'Universo al tempo dell'inflazione ($t = 10^{-32}$ s).

Costanti di accoppiamento. OGGI.

Costante di accoppiamento forte

$$\alpha_s = 1$$

Costante elettromagnetica

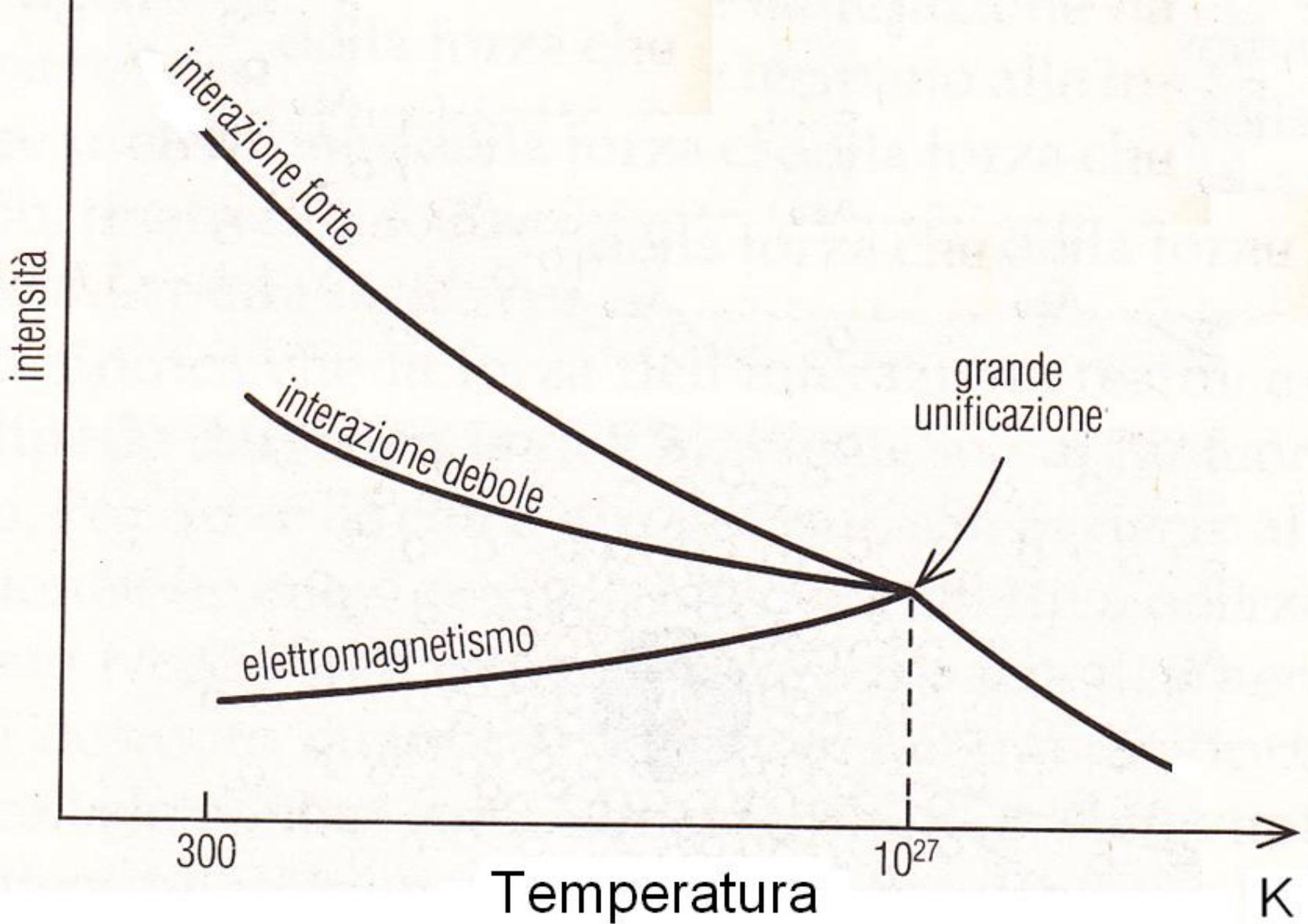
$$\alpha = 1/137 \approx 10^{-2}$$

Costante di accoppiamento debole

$$\alpha_W \approx 10^{-6}$$

Costante di gravitazione

$$\alpha_G \approx 10^{-39}$$



Da: *John D. Barrow* – Il libro degli universi - Ed.: Mondadori (2013).

Dopo l'ultima ricombinazione, gli atomi sono diventati neutri e l'Universo è diventato trasparente. I fotoni a 3000 K possono viaggiare per l'Universo che diventa luminosissimo. Ma per poco... perché, espandendosi, si raffredda ed i fotoni del visibile diventano infrarossi. E l'Universo diventa buio.

Per milioni di anni la gravitazione, la più debole delle interazioni, ma che agisce anche a lunga distanza, operando sul pulviscolo di idrogeno ed elio che riempie l'Universo, riesce a concentrare la materia attorno a grumi sempre più grandi. Queste irregolarità della densità si traducono in ambienti di più forte attrazione gravitazionale formando, quindi, agglomerati sempre più grandi.

Schiacciati dalla gravitazione, questi grumi si scaldano e raggiunta adeguata temperatura possono instaurarsi reazioni nucleari che accendono una stella. Siamo a circa 200 milioni di anni dopo il Big Bang.

Formazione delle stelle e delle galassie

La forza gravitazionale, agendo su piccole irregolarità nella distribuzione della materia, formò agglomerati di materia sempre maggiori che portarono alla formazione delle prime stelle, circa 200 milioni di anni dopo il Big Bang, e alle prime galassie.

L'alta temperatura prodotta dalla compressione forma un plasma caldissimo nella parte più interna che innesca la fusione nucleare tra i nuclei di idrogeno ed elio presenti.

Nella fusione, lo stato legato è più leggero dei nuclei isolati e la differenza di massa si sviluppa in energia sotto forma di fotoni e neutrini che, mantenendo l'equilibrio con la gravitazione, rende stabile la stella (almeno sino a quando rimane del "combustibile")

Anche le stelle che, a questo punto, brillano nell'Universo buio, tendono ad aggregarsi in galassie. La galassia più vecchia conosciuta è IOK-1 ; risale a 750 milioni di anni dopo il Big Bang e presenta un red shift di 6.96.

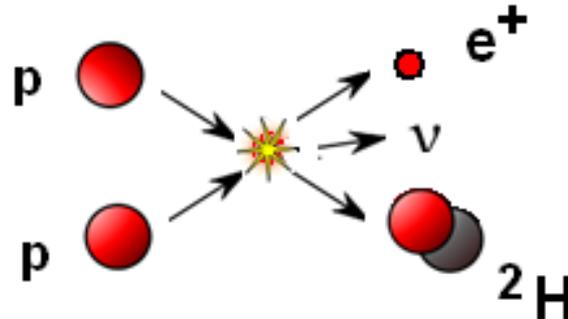
I processi di fusione nucleare che si originarono all'interno dei nuclei delle stelle portarono alla formazione di elementi pesanti (carbonio, azoto, ossigeno, ed altri elementi sino al ferro o, al massimo, sino al ^{56}Ni).

Quando il combustibile nucleare comincia a scarseggiare, la stella collassa sotto la forza gravitazionale ed esplose diffondendo questi elementi nello spazio interstellare.

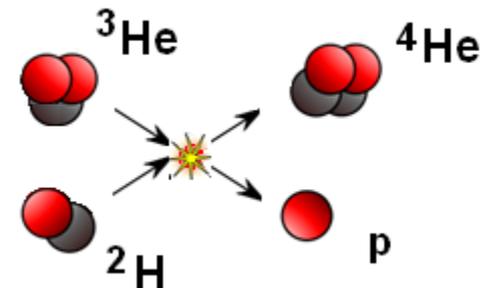
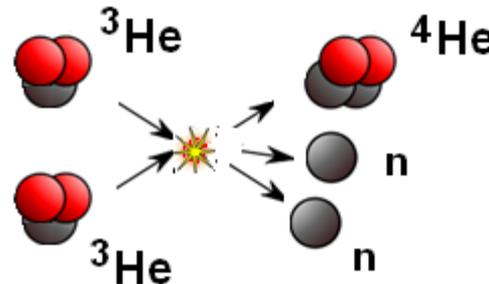
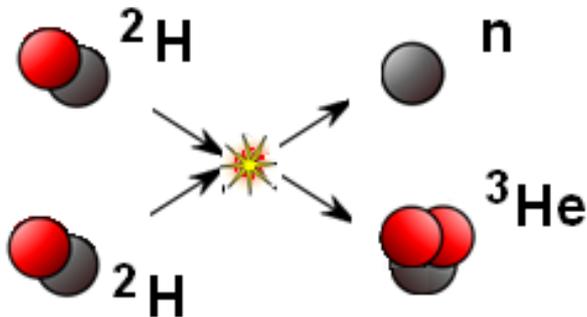
Gli elementi più pesanti del ferro si producono per cattura neutronica specialmente nell'esplosione di supernove, fusione di stelle di neutroni ed altri simili catastrofici avvenimenti

REAZIONI DI FUSIONE NUCLEARE NELLE STELLE

I nuclei di idrogeno presenti nelle stelle danno per fusione nucleare un deutone (nucleo di deuterio, 2H) un positrone e^+ ed un neutrino.



E' una reazione da interazione debole; avviene raramente. Occorrono circa 10^{18} tentativi di urti tra protoni perché avvenga la reazione. Dopo di ché i nuclei di deuterio, quando si urtano, si fondono in elio (reazioni da interazione forte).



Per fortuna esiste questo “intoppo” da interazione debole che costringe le stelle ed il nostro Sole a bruciare l'idrogeno molto lentamente e trasformarlo in elio con tempi dell'ordine di parecchi miliardi di anni.

Se esistesse la possibilità di trasformare idrogeno in elio con processi da interazione forte, tutto l'idrogeno presente già nei primi istanti dell'Universo si sarebbe trasformato in elio rapidamente e non ci sarebbe stato il tempo per la formazione delle stelle e delle galassie .

Non solo non ci sarebbe la vita sulla Terra, ma non ci sarebbe neanche la Terra ed il Sistema Solare...

La necessità di ricorrere ad un processo da interazione debole per trasformare idrogeno in elio e sviluppare energia nasce dal fatto che non esiste l'elio-2.

Se esistesse, sarebbe possibile ottenerlo con reazioni da interazione forte che si sviluppano molto rapidamente.

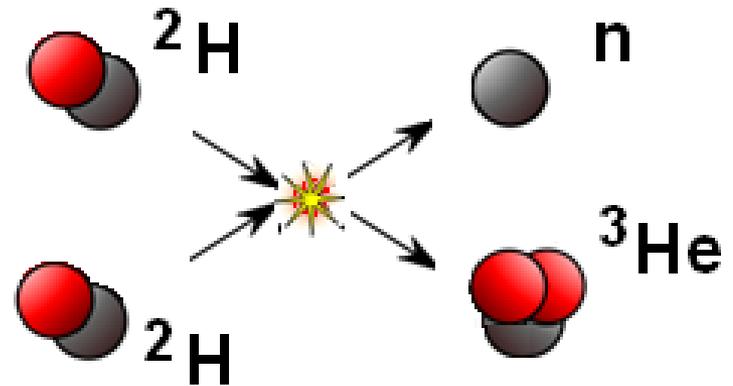
L'elio-2, infatti, non esiste perché la forza nucleare forte che tiene insieme i due protoni è minore della repulsione coulombiana (i protoni hanno carica dello stesso segno) di solo qualche percento.

Le energie in gioco sono di circa 19.5 MeV e di 20 MeV circa.

Dobbiamo essere ben contenti, quindi, che Qualcuno ha pensato bene di scegliere le costanti fisiche universali con i valori che hanno permesso l'evoluzione dell'Universo....

CURIOSITA'

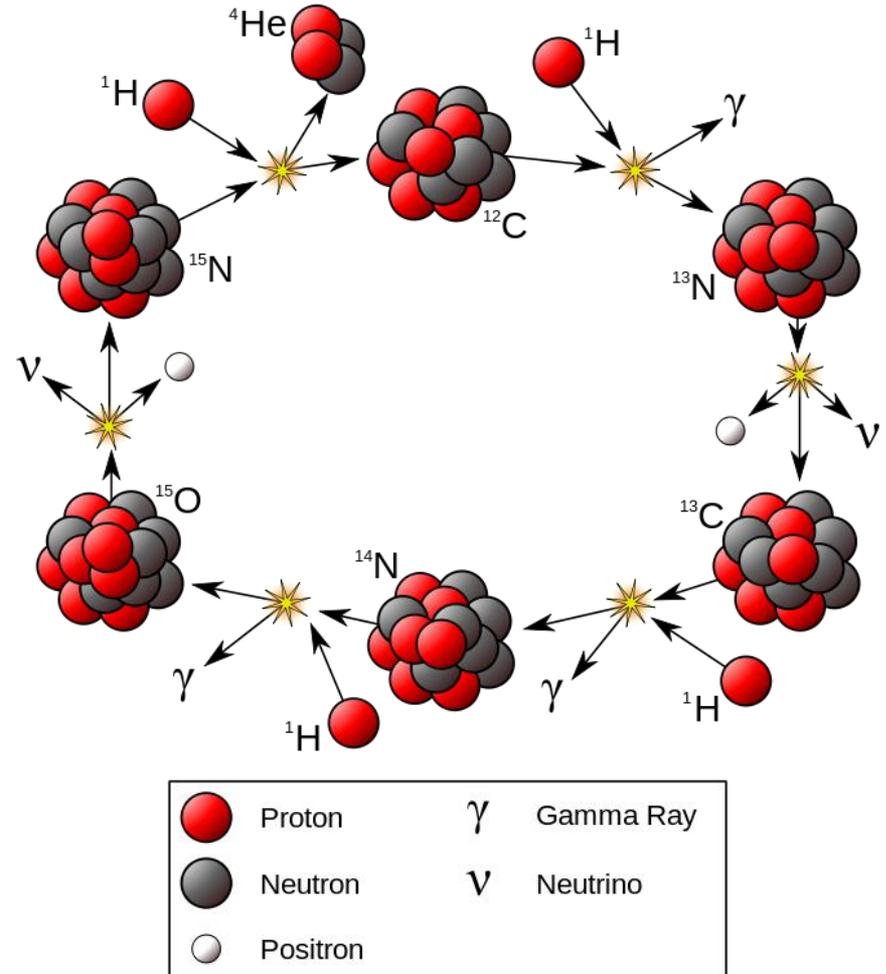
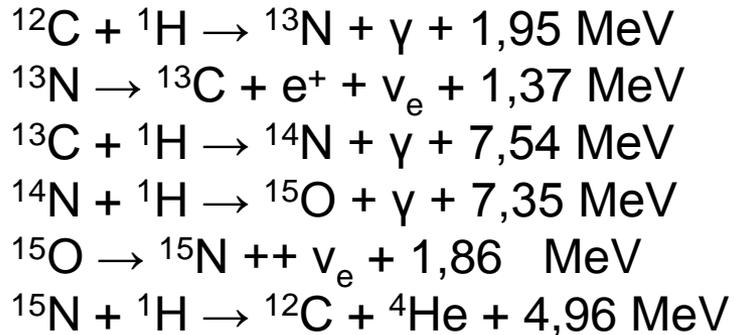
Le bombe termonucleari (bombe H) utilizzano l'isotopo-2 dell'idrogeno come materiale di partenza e, una volta raggiunta la temperatura di milioni di gradi, il deuterio si trasforma in elio-3 attraverso una interazione forte, rapidissima, quindi (esplosiva!).



E meno male che l'isotopo-2 dell'idrogeno è molto meno frequente dell'isotopo-1 (circa 1 %). Altrimenti fare esplodere una bomba nucleare in mare equivarrebbe a coinvolgere tutto l'idrogeno dell'oceano in una esplosione apocalittica.

Sviluppo di Energia nel Sole

Le reazioni del ciclo carbonio-azoto presenti sul Sole (**ciclo di Bethe**) sono le seguenti:

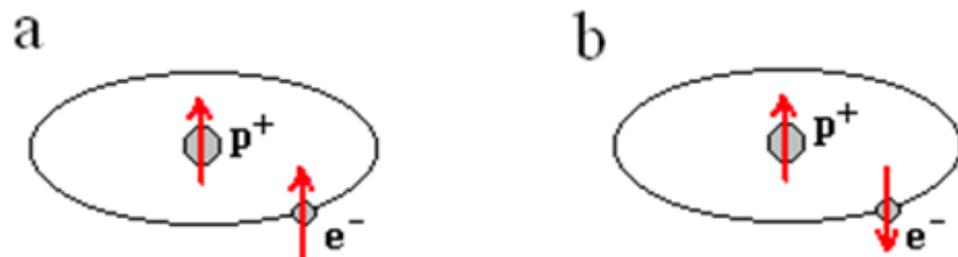


"CNO Cycle" di Borb. Con licenza CC BY-SA 3.0 tramite Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CNO_Cycle.svg#/media/File:CNO_Cycle.svg

Riga di 21 cm

Data la grande abbondanza di idrogeno nell'universo fu ovvio ricercare l'emissione di righe spettrali da parte di elettroni che ricadono nel livello fondamentale dell'idrogeno dopo essere stati eccitati. E' abbondante, ha un solo elettrone ed è più semplice l'analisi teorica.

Una transizione iperfine dell'idrogeno neutro presenta una frequenza di transizione a circa 1420.405 MHz (riga di 21 centimetri).



Modello di atomo neutro di idrogeno.

Il protone e l'elettrone dell'atomo di idrogeno hanno entrambi *spin* $I = 1/2$.

L'energia associata è minima quando gli spin sono antiparalleli.

Quando l'atomo si eccita (a), per esempio per avere assorbito energia di un fotone, gli spin diventano paralleli. La situazione, però, non è stabile e l'atomo tende a ritornare allo stato fondamentale (b) emettendo un fotone di energia ben definita (riga di 21 cm)

Riga di 21 cm (1420.405 MHz) dell'idrogeno



Antenna a tromba usata da H.I.Ewen e E.M.Purcell nella prima rivelazione della riga di 21 cm dell'idrogeno neutro nella Via Lattea (1951), ora al National Radio Astronomy Observatory, Green Bank, WV (U.S.A.).

La transizione da spin paralleli ad anti-paralleli causa l'emissione di fotoni alla lunghezza d'onda di 21 cm. Questo avviene per ogni atomo mediamente ogni 10^7 anni e, nello spazio interstellare, c'è solo circa un atomo di idrogeno per centimetro cubo, per cui sembra impossibile poter osservare questa emissione..... Essendo però il numero di centimetri cubi dello spazio interstellare estremamente grande, la riga di emissione di 21 cm è facilmente osservabile tramite i radiotelescopi.

Tramite la riga a 21 cm fu possibile nel 1952 tracciare le prime mappe della distribuzione dell'idrogeno neutro nella Galassia, rivelando per la prima volta la struttura a spirale della Via Lattea. Anche la curva di rotazione della galassia fu determinata tramite la riga a 21 cm dell'idrogeno neutro (effetto doppler)

FORMAZIONE DEL CARBONIO ALL'INTERNO DELLE STELLE

Il carbonio è alla base di tutte le forme di vita conosciute, ma il Big Bang di fatto non produce carbonio, da dove viene dunque?

Nel 1953 l'astrofisico Fred Hoyle (parteggiava per lo “stato stazionario” ed avversava la teoria del “Big Bang”, anche se, ironia della sorte, il nome Big Bang era stato usato proprio da Hoyle in modo canzonatorio, ma è proprio questo il nome che è rimasto) aveva calcolato che quando nel centro di una stella tre nuclei di elio si uniscono, difficilmente si combinano per formare carbonio-12, nella forma quale lo conosciamo.

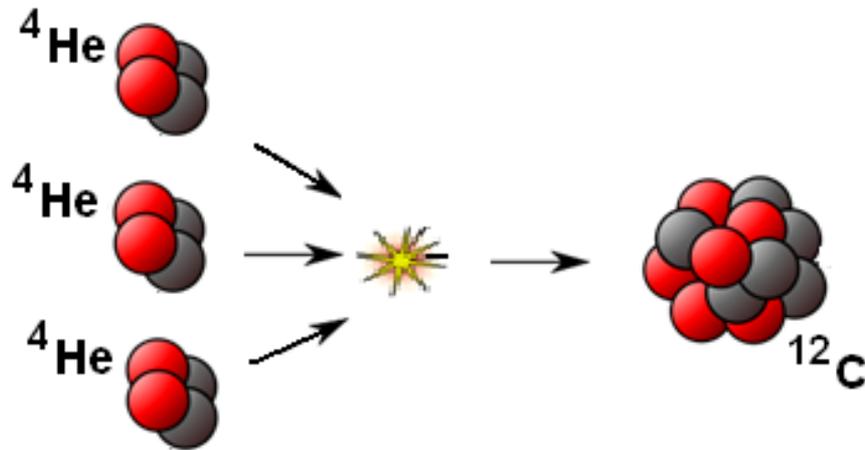
Fred Hoyle aveva ipotizzato l'esistenza di un nuovo stato eccitato del carbonio-12 (stato ancora non rivelato) con un'energia adatta a rendere possibile la formazione del carbonio nelle stelle, attraverso una prima fusione di 2 nuclei di elio (formano il berillio-8) e successivamente con un altro nucleo di elio per arrivare al carbonio-12.

Ma non era così semplice..... Il berillio-8 è del tutto instabile e dura una frazione microscopica di secondo, invece, la fusione di He e Be richiedeva tempo.....

Utilizzando in qualche modo il Principio Antropico (visto che ci siamo, siamo fatti di carbonio, il carbonio-12 deve potersi formare,..... si formerebbe se ci fosse uno stato eccitato di carbonio-12 di energia 7.65 MeV in più dello stato stabile, allora andiamo a cercare questo livello eccitato e guardiamo se c'è davvero) riuscì con l'intervento del collega Fowler a trovare questo stato eccitato, esattamente a 7.65 MeV , come previsto.

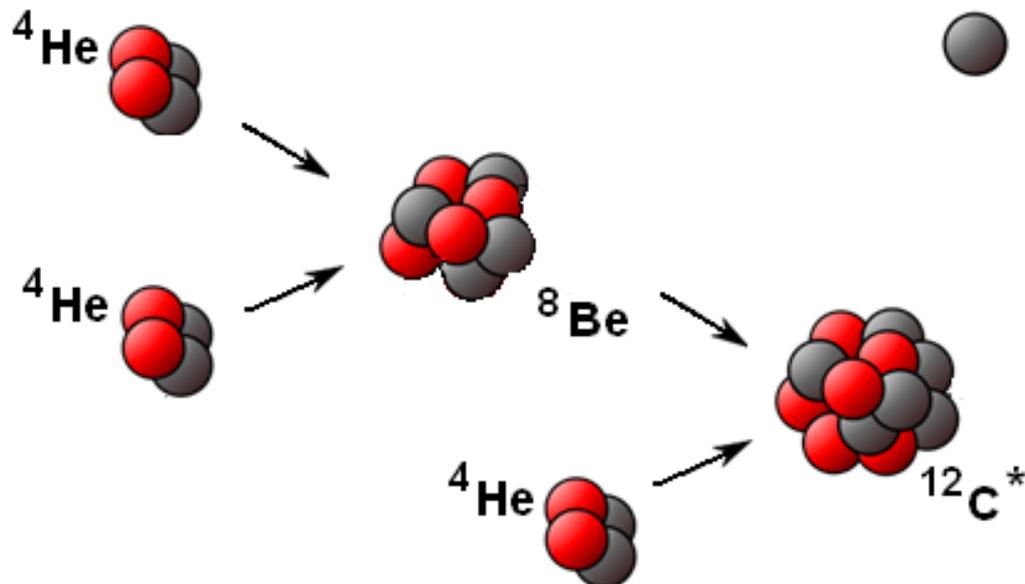
Brillante intuizione di Hoyle e problema risolto.

FORMAZIONE DEL CARBONIO ALL'INTERNO DELLE STELLE



altamente improbabile
(non giustifica la
percentuale di carbonio
osservata)

 Protone
 Neutrone



possibile e attraverso uno
stato eccitato si giustifica la
quantità osservata in natura
di carbonio.

PARADOSSO DI OLBERS

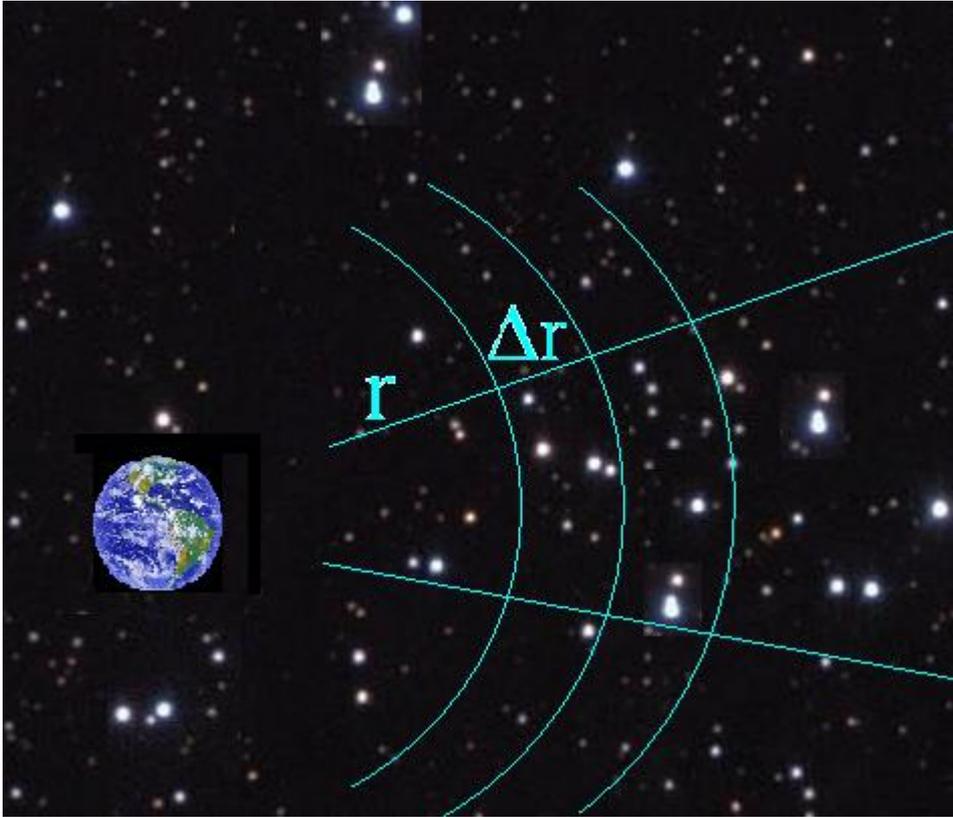
Perché il cielo di notte è buio?

Ogni strato di spessore Δr posto a distanza r dalla Terra contiene un certo numero di stelle.

Raddoppiando r , la superficie dello strato aumenta come r^2 ed il volume (sempre di ampiezza Δr) contiene un numero di stelle 4 volte maggiore (in media).

Siccome è lontano il doppio, la sua intensità è, però, 4 volte minore.....

In buona sostanza, ogni strato aggiunge luminosità al precedente.



Se l'universo fosse infinito, il numero degli strati è pure infinito ed il cielo notturno dovrebbe essere brillantissimo. In qualunque direzione, dovremmo, prima o poi, incontrare la superficie di una stella.....

In realtà il cielo di notte è buio !

- 1) Il numero di strati non è infinito. L'universo ha avuto un inizio.
- 2) L'universo si sta espandendo. Le galassie lontane presentano redshift. La radiazione emessa ha subito un abbassamento di frequenza. L'apporto di energia è meno consistente ($E = h \nu$)

Il paradosso di Olbers ha fornito il primo indizio che la teoria dello stato stazionario (ampiamente appoggiata nella prima metà del secolo scorso) non poteva essere corretta.

L'espansione dell'Universo secondo la teoria del Big Bang caldo, invece, spiega molto bene perché il cielo è buio.

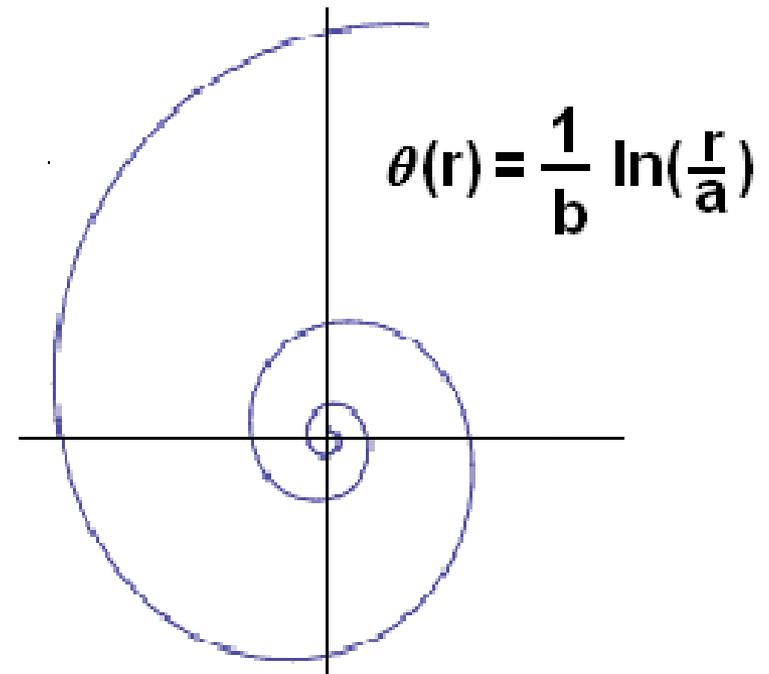
(se fosse sempre esistito, la luce avrebbe avuto il tempo di arrivare a noi anche da grandi distanze rendendo molto luminoso il cielo notturno) .

Basta osservare che il cielo di notte è buio per suggerirci che l'universo ha avuto un inizio !

Formazione delle galassie

Le stelle primordiali supermassicce hanno vita breve. Muoiono, diffondono gas interstellare e si riformano. Si formano sporadici centri di aggregazione dove la materia è attratta gravitazionalmente. Per conservazione del momento angolare le stelle ed il gas interstellare è costretto a ruotare attorno al nucleo centrale in un grande disco di accrescimento. Dopo circa 500 milioni di anni dal Big Bang si formano le prime galassie che avranno, in media, tempi di vita lunghissimi, dell'ordine di miliardi di anni. Data la lunga vita delle galassie, c'è stato tempo perché si sviluppassero sistemi solari con pianeti su uno dei quali, dopo miliardi di anni, si sviluppasse la vita e l'Uomo.

Whirlpool Galaxy, Messier 51



Galassia Vortice, M51A, nello scontro con la compagna M 51 B, in falsi colori che mettoni in risalto i bracci che sono approssimativamente spirali logaritmiche

Anche la nostra Via Lattea è un agglomerato di stelle, gas e polveri di aspetto a spirale con bracci più densi di stelle di circa 100000 mila anni luce di diametro.. Una grande massa di materia oscura la avvolge con aspetto di sfera di circa 1.000.000 anni luce di diametro e che contiene la maggior parte della materia galattica.

Le galassie possono avere dimensioni molto più modeste e di forme diverse:; oltre alle galassie a spirale, sono presenti galassie ellittiche , di aspetto sferico o di forme strane, molto spesso dovuto a collisioni tra galassie.

ALTRI STRANI OGGETTI

Nell'Universo si trovano molti strani oggetti: buchi neri, quasar (oggi meglio indicate con QSO), ecc...

Questi QSO (Quasi Stellar Object) sono le più potenti sorgenti dell'Universo; sono stati scoperti come forti sorgenti radio (e si chiamarono Quasar), ma poi si trovò che emettevano anche luce, in una quantità immensa, anche se la sorgente risulta molto piccola (stellare).

Astronomia e poesia

... l'osservazione ci assicura che in numerose direzioni attorno a noi, se non in tutte, vi è un limite effettivo, o almeno non ci si offre alcun fondamento per pensare altrimenti.

Se la successione delle stelle fosse infinita, lo sfondo del cielo ci presenterebbe una luminosità uniforme come quella della Galassia, poiché non ci sarebbe assolutamente neanche un punto in tutto questo sfondo in cui non esisterebbe una stella.

L'unico modo per comprendere, in una tale condizione, i vuoti che il nostro telescopio individua in innumerevoli direzioni, sarebbe quello di supporre che la distanza dello sfondo invisibile sia così immensa che mai nessun raggio abbia finora potuto giungere fino a noi.

Chi oserebbe negare che ciò possa essere così?

Edgar Allan Poe - *Eureka* – Saggio sull'universo materiale e spirituale.
Titolo originale: *Eureka. A prose poem* (1848)

OGGETTI ASTRONOMICI PIU' DISTANTI

Nome	<u>Redshift</u> (z)	<u>Light travel distance</u> (Gly)	Tipo di oggetto
EGSY8p7	$z=8.68$	13.2	Galaxy
GRB 090423	$z=8.2$	13.095	Gamma-ray burst
EGS-zs8-1	$z=7.73$	13.044	Galaxy
z8 GND 5296	$z=7.51$	13.02	Galaxy
SXDF-NB1006-2	$z=7.215$	12.91	Galaxy
GN-108036	$z=7.213$	12.91	Galaxy
BDF-3299	$z=7.109$	12.9	Galaxy
ULAS J1120+0641	$z=7.085$	12.9	Quasar

	anno-luce [a.l.]	parsec [pc]	Megaparsec [Mpc]	Distanza [km]	Distanza [m]
anno-luce [a.l.]	1	0.307	$0.307 \cdot 10^{-6}$	$0.95 \cdot 10^{13}$	$0.95 \cdot 10^{16}$
parsec [pc]	3.26	1	10^{-6}	$3.086 \cdot 10^{13}$	$3.086 \cdot 10^{16}$
Megaparsec [Mpc]	$3.26 \cdot 10^6$	10^6	1	$3.086 \cdot 10^{19}$	$3.086 \cdot 10^{22}$
Distanza [km]	$1.053 \cdot 10^{-13}$	$0.324 \cdot 10^{-13}$	$3.24 \cdot 10^{-20}$	1	1000
Distanza [m]	$1.053 \cdot 10^{-16}$	$0.324 \cdot 10^{-16}$	$0.324 \cdot 10^{-22}$	0.001	1

SEMPLICI MODELLI DI UNIVERSO

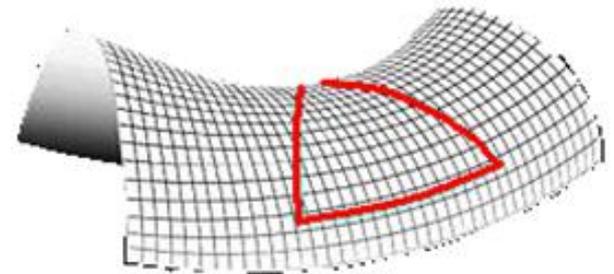
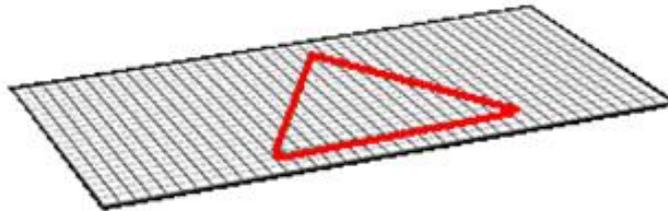
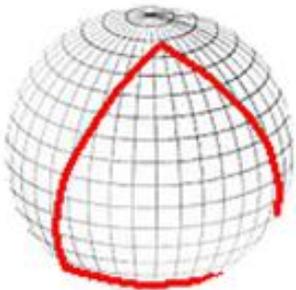
La curvatura dello spazio Ω dipende dal rapporto tra la densità dell'Universo e la densità critica.

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$

Se: $\Omega > 1$ l'Universo ha curvatura positiva ed è descritto da geometria sferica
(La somma degli angoli di un triangolo è maggiore di 180°)

se: $\Omega = 1$ l'Universo è piatto ed è descritto dalla geometria euclidea
(La somma degli angoli di un triangolo è 180°)

se: $\Omega < 1$ l'Universo ha curvatura negativa ed è descritto da geometria iperbolica
(La somma degli angoli di un triangolo è minore di 180°)



Se la densità è maggiore del valore critico, l'Universo rallenterà progressivamente la sua espansione sino a fermarsi, invertirà il movimento e si ritirerà su se stesso in un Big Crunch.

Se la densità è minore del critico, l'Universo si espanderà per sempre.

Se la densità è proprio tale che $\Omega = 1$, l'Universo continuerà ad espandersi, ma continuamente rallentando per sempre .

L'età dell'Universo può essere calcolata conoscendo la densità e la costante di Hubble attuale H_0 .

Nel caso di universo vuoto ($\Omega = 0$), la densità è zero e l'età dell'Universo si calcola aprox. come l'inverso della costante di Hubble.

Nel caso di $\Omega = 1$, ovvero con Universo con densità pari al valore critico, l'età dell'Universo è data da:

$$t = \frac{2}{3} \frac{1}{H_0}$$

La costante di Hubble attuale è $H_0 = 72.5 \text{ (km/s)/Mpc}$ (Il valore accettato cambia continuamente).

L'inverso del valore della costante di Hubble attuale ha le dimensioni di un tempo e fornisce una stima dell'età dell'Universo. Si può interpretare, infatti, come il tempo necessario per ripercorrere l'espansione dell'Universo all'inverso verso il Big Bang, supponendo che la velocità di espansione sia stata costante.

Si ha:

$$H_0 := 72.5 \quad \text{km s}^{-1}/\text{Mpc}$$

$$t_0 := \frac{1}{H_0} \cdot 3.26 \cdot 10^6 \quad \text{a.l./kms}^{-1}$$

$$t_0 := \left(\frac{1}{H_0} \cdot 3.26 \cdot 10^6 \right) \cdot 0.95 \cdot 10^{13} \quad t_0 = 4.272 \cdot 10^{17} \quad \text{s}$$

$$t_0 := \frac{t_0}{31.56 \cdot 10^6} \quad t_0 = 1.354 \cdot 10^{10} \quad \text{anni}$$

Ricordando che: 1 Megaparsec = 3.26 a.l. - 1 anno-luce = $0.95 \cdot 10^{13} \text{ km}$
 1 anno = $31.56 \cdot 10^6 \text{ s}$

Per $\Omega = 1$ il risultato dà $t_0 = 10$ miliardi di anni.

Dobbiamo prendere il risultato solo con molta approssimazione.

Aggiungiamo ora i dati dell'osservazione..

Effettuando misure del diametro angolare delle piccole disomogeneità di temperatura nella radiazione di fondo, è possibile calcolare la curvatura dello spazio tempo.

L'osservazione dice che l'Universo è piatto ($\Omega = 1$), ovvero con densità uguale alla densità critica. Questo è in accordo con la teoria inflazionaria, anzi la conferma.

L'osservazione dice anche che la materia che si osserva porta ad una densità molto piccola e non al valore di densità critica. Deve esserci molta più materia di quella osservata per portare la densità ρ vicino alla densità critica ρ_0 , ovvero a $\Omega = 1$.

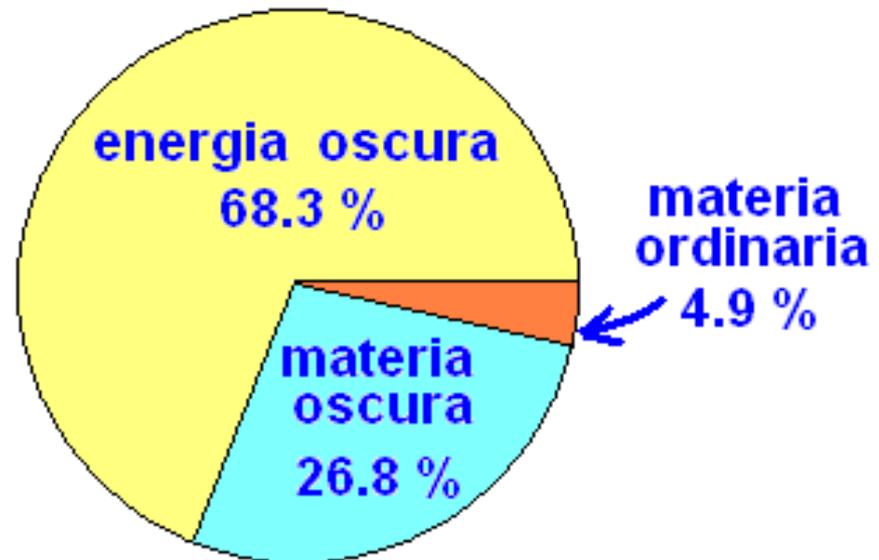
Oltre alla materia barionica che conosciamo, dobbiamo aggiungere la materia oscura per spiegare il movimento nelle galassie, ma... non basta.

Occorre poi considerare che l'osservazione ha dato l'Universo in accelerazione da circa 7 miliardi di anni. Per questo dovremo aggiungere la energia oscura e, con questa, si potrà raggiungere la densità critica che spiega l'osservazione di Universo piatto.

Dall'elaborazione dei dati più recenti (2013) ottenuti dal telescopio spaziale Planck la costante di Hubble che lega, tra l'altro, la velocità di espansione dell'Universo alla sua età, sembra leggermente più ridotta rispetto a quanto sostenuto in passato: 67.80 ± 0.77 km/s per megaparsec. L'età dell'Universo diviene leggermente più remota: 13.79 ± 0.037 miliardi di anni.

Elaborando i dati ottenuti dal telescopio spaziale Planck dell'ESA si sono ottenuti valori più precisi dei componenti dell'Universo:

materia ordinaria: 4.9 %
materia oscura 26.8 %
energia oscura : 68.3 %.

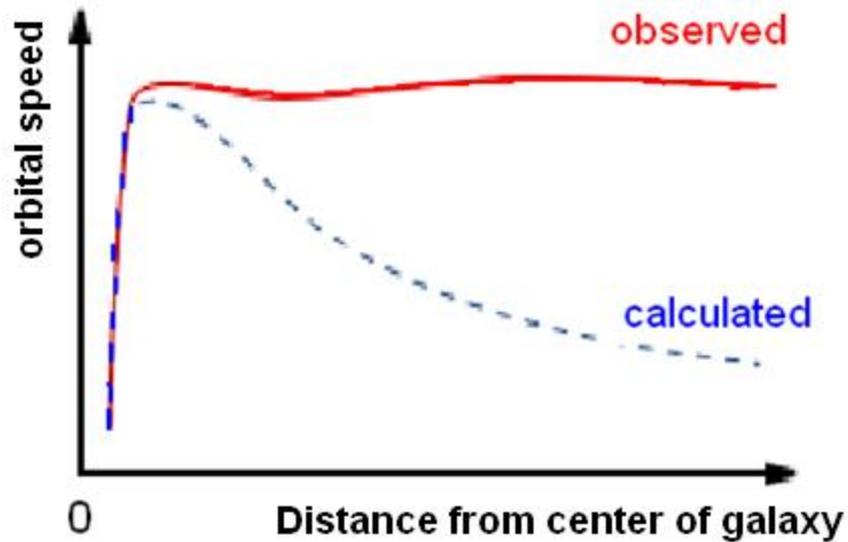


La materia ordinaria , quella che conosciamo bene e descriviamo con le particelle del Modello Standard, costituisce meno del 5% della massa totale dell'Universo.

Le galassie e gli ammassi di galassie stanno insieme per la presenza di una materia oscura, non luminosa, impalpabile e invisibile, ma che è cinque volte più abbondante della materia osservata e che costituisce circa il 27 % della massa totale dell'Universo.

Il rimanente 68 % è costituito da energia oscura che è responsabile dell'accelerazione che sta subendo l'Universo da circa 7 miliardi di anni, contrariamente a quanto si poteva pensare dato che la gravità avrebbe dovuto agire per rallentare l'espansione.

Le prime osservazioni che la velocità di rotazione delle stelle delle galassie non erano descrivibili con la distribuzione di materia osservata sono avvenute negli anni '30 per opera di F.Zwicky, di H.Babcock* e di Vera Rubin.



* Babcock, H, 1939 - *The rotation of the Andromeda Nebula* - Lick Observatory bulletin no. 48

Negli ammassi galattici la materia ordinaria non è concentrata nelle galassie, ma nel gas intergalattico (principalmente idrogeno ed elio), sino a 5 10 volte di più.

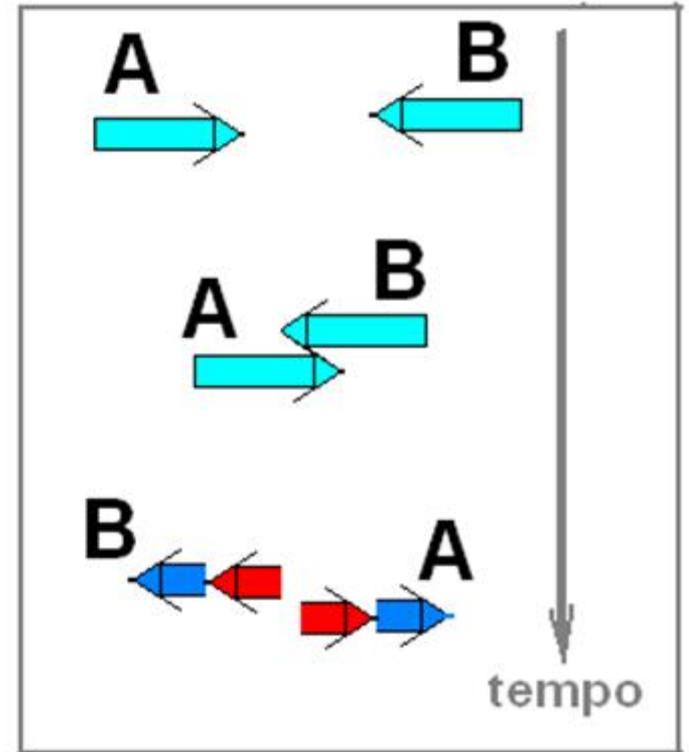
Oltre alla materia ordinaria troviamo anche la materia oscura (circa 5 6 volte più massa della materia ordinaria).

Nel Bullet Cluster, che sono due ammassi di galassie entrati in collisione circa 150 milioni di anni fa e che attualmente si stanno allontanando, si possono osservare nubi di gas che nella collisione, per i grandi attriti, hanno rallentato il loro movimento e sono ancora vicini alla zona dello scontro (evidenziata in rosa nell'immagine). Le galassie sono invece transitate in verso opposto senza toccarsi e sono state rallentate dagli effetti gravitazionali in misura minore e ora si sono allontanate molto di più dalla zona dello scontro (evidenziate in blu).

I due ammassi galattici, ben separati, sono ora costituiti da galassie (materia ordinaria) e da materia oscura, senza gas intergalattico (evidenziate in blu nell'immagine).

La misura della massa in questi due cluster di galassie è, così, facilitata e si può calcolare meglio il contributo della materia oscura dagli effetti di lente gravitazionale esercitata sulla luce proveniente da sorgenti molto remote retrostanti.

Il *Bullet Cluster* e l'evidenza della materia oscura



gas
intergalattico **galassie + materia oscura**

materia

L'urto tra i due ammassi (avvenuto a circa 15 milioni di chilometri all'ora) permette di riconoscere il gas caldissimo che ha subito una forte interazione (emette raggi X) e la materia ordinaria stellare e la materia oscura che, a parte qualche raro scontro, si sono attraversate senza apprezzabili interazioni, se non gravitazionali.

Questa materia (ordinaria e oscura) che non ha subito rallentamento nello scontro è ben calcolabile per gli effetti che produce come lente gravitazionale sulla luce proveniente da galassie molto più lontane.

Oggi sappiamo che circa il 27 % dell'Universo è costituito da materia oscura; conosciamo molte caratteristiche che deve avere la materia oscura, ma nessuno sa ancora di cosa si tratti.

Non emette radiazione elettromagnetica ed è rivelabile solo attraverso gli effetti gravitazionali.

Galaxy Cluster 0024+1654 as a Gravitational Lens



L'immagine del Hubble Space Telescope mostra diversi oggetti affusolati blu: sono immagini multiple della stessa galassia (più remota e retrostante) e che sono stati duplicati dall'effetto di lente gravitazionale offerto dal cluster di galassie molto luminose al centro dell'immagine

ENERGIA OSCURA ED ACCELERAZIONE DELL'UNIVERSO

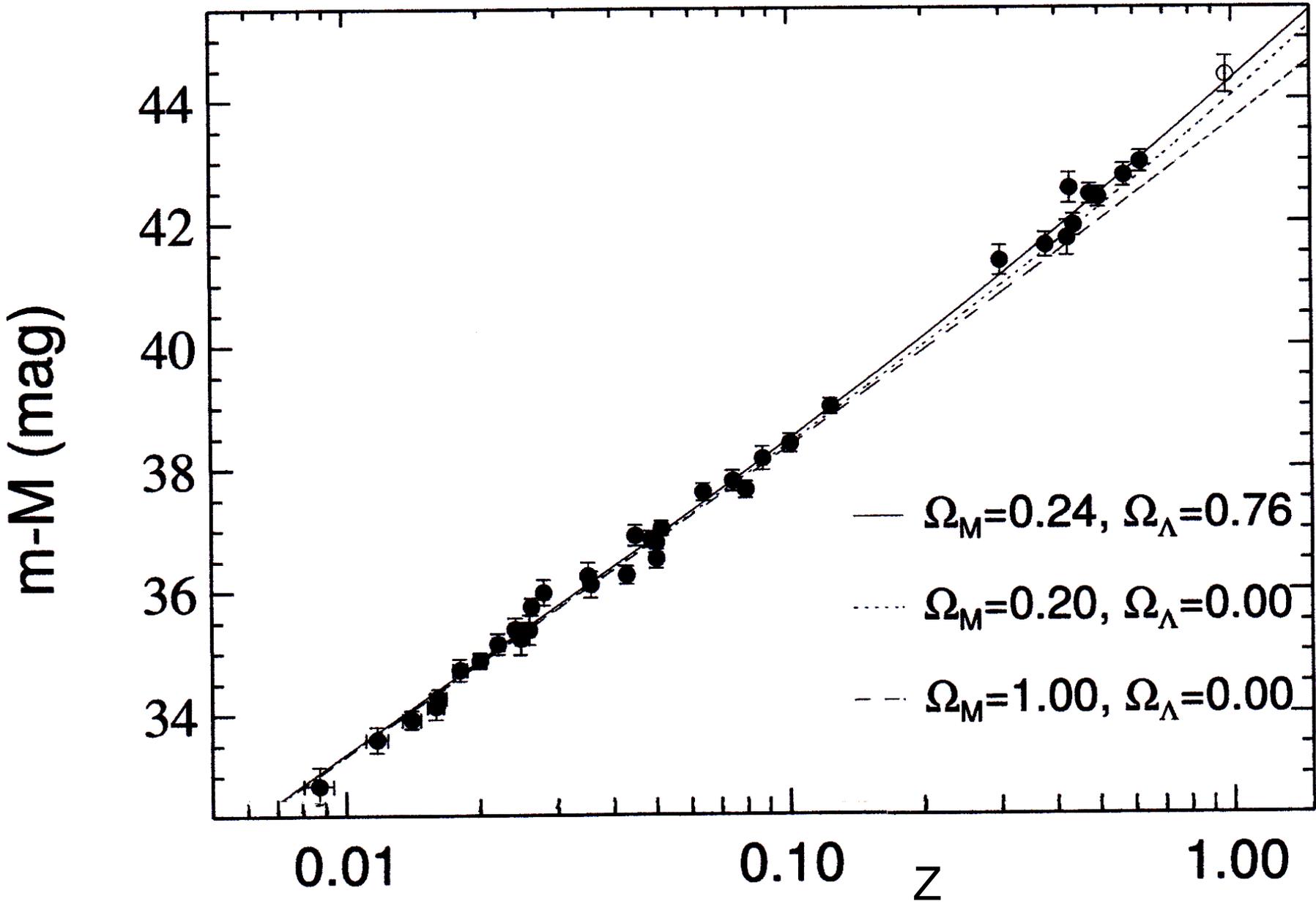
Per raggiungere le condizioni di universo piatto come da osservazione, la presenza della sola materia oscura non è sufficiente (si raggiunge, infatti, poco più del 30% del necessario).

Manca qualcosa ...

Alla fine degli anni '90 ci si accorse di un fenomeno totalmente imprevisto. L'Universo sta accelerando.

Deve esserci una fonte di energia sconosciuta che potrebbe giustificare, tramite una pressione negativa, l'accelerazione dell'Universo.

Questa energia oscura potrebbe rappresentare quasi del tutto il 70% di massa mancante dell'Universo ed è la spiegazione più diffusa



Il modello più semplice in accordo con le osservazioni è chiamato modello CDM- λ (cold dark matter al quale si è aggiunta la costante lambda, λ).

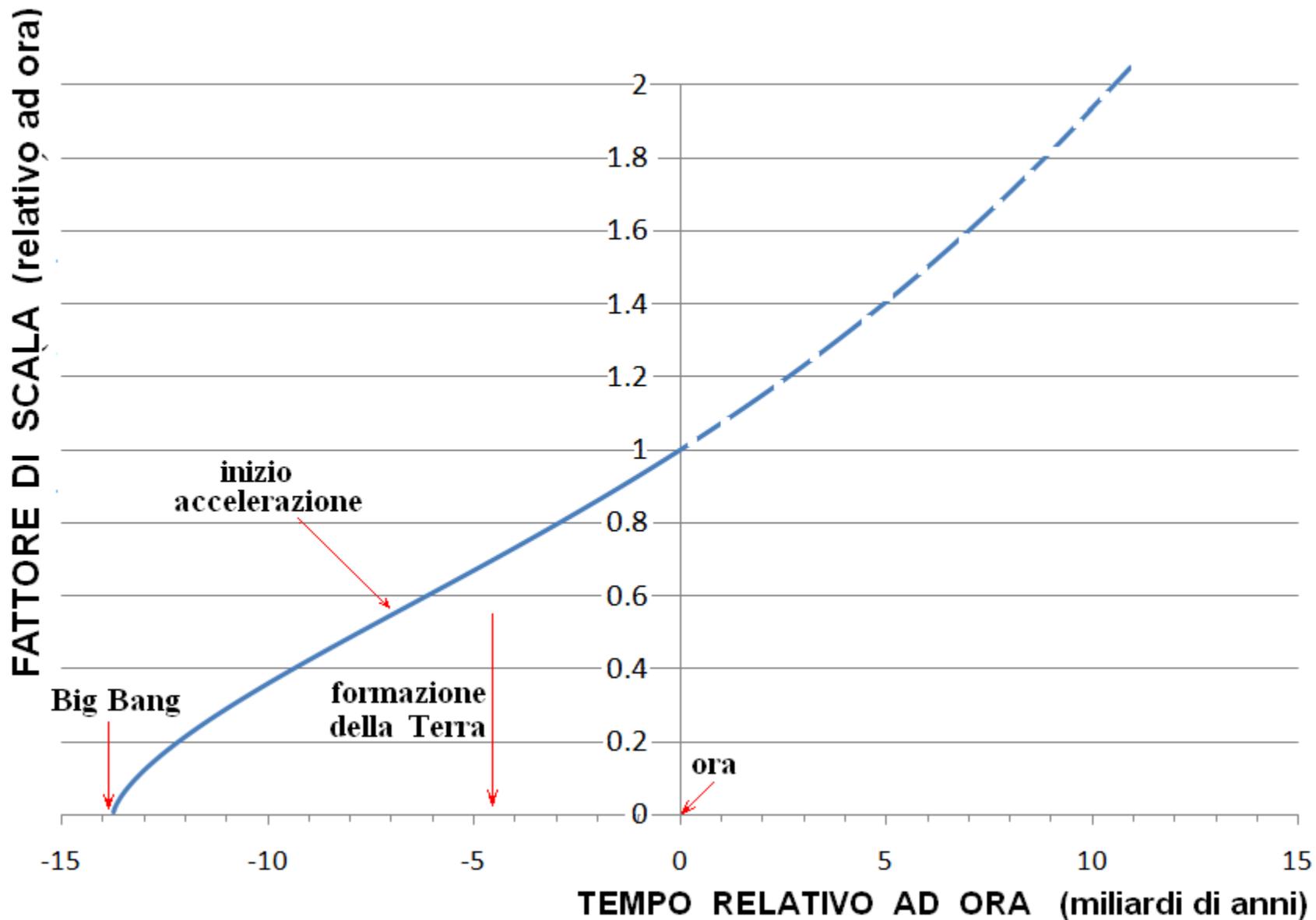
La costante cosmologica λ è associata all'energia del vuoto ed è un numero assurdamamente piccolo, ma non nullo, dell'ordine di 10^{-120} , ed è enormemente più piccolo di quello calcolato in base alla teoria quantistica dei campi.

Pur essendo un numero assurdamamente piccolo, alla costante λ è associato il destino dell'Universo. Se fosse diversa anche per un solo ordine di grandezza, l'Universo sarebbe già finito con un Big Crunch o diventerebbe eterno.

Ma se c'è un'energia associata al vuoto, aumentando il volume del vuoto, aumenta l'energia...

Eravamo così contenti di avere capito la nascita dell'universo come un passaggio ad altro stato di vuoto sempre ad energia zero, invece sembra oggi che il conto dell'energia non torni. E' uno dei problemi più attuali...

ESPANSIONE DELL'UNIVERSO



IMPORTANTE CONCLUSIONE

La maggior parte della materia massiva presente nell'Universo è di natura non barionica, di un tipo a noi completamente sconosciuto

PRINCIPALI PROBLEMI CHE RIMANGONO DA RISOLVERE:

- 1 - esatta dinamica dell'inflazione**
- 2 - meccanismi che hanno portato alla sparizione della antimateria**
- 3 - meccanismi che dovrebbero portare alla Grande Unificazione delle quattro forze fondamentali**
- 4 – perché le costanti fisiche hanno proprio questi valori**
- 4 - di cosa è fatta la materia oscura**
- 5 - cos'è l'energia oscura**

Per molti di questi problemi sarebbe molto utile disporre di acceleratori che permettessero di esplorare energie almeno dell'ordine del centinaio di TeV (circa 10 volte maggiore dell'attuale Lhc).

FAQ - Come si possono calcolare le distanze?

Bisogna trovare categorie di oggetti di cui si possa conoscere la luminosità assoluta. Il confronto con la luminosità apparente permette, poi, di risalire alla distanza. Per distanze non troppo grandi (che non coinvolgano i modelli di universo) il metodo funziona.

Il primo passo in questa direzione è stato fatto da una astronoma americana, Henrietta Swan Leavitt, che, studiando le stelle a luminosità variabile (cefeidi) della Piccola Nube di Magellano (supposte tutte alla stessa distanza), scoprì che le stelle più luminose erano quelle che avevano il periodo più lungo.

Conosciuta questa correlazione, dalla misura del periodo si poteva calcolare la luminosità assoluta. Da qui, sapendo che la luminosità decresce con il quadrato della distanza, è sufficiente la misura della luminosità apparente di questo tipo di stelle per ricavare la distanza.

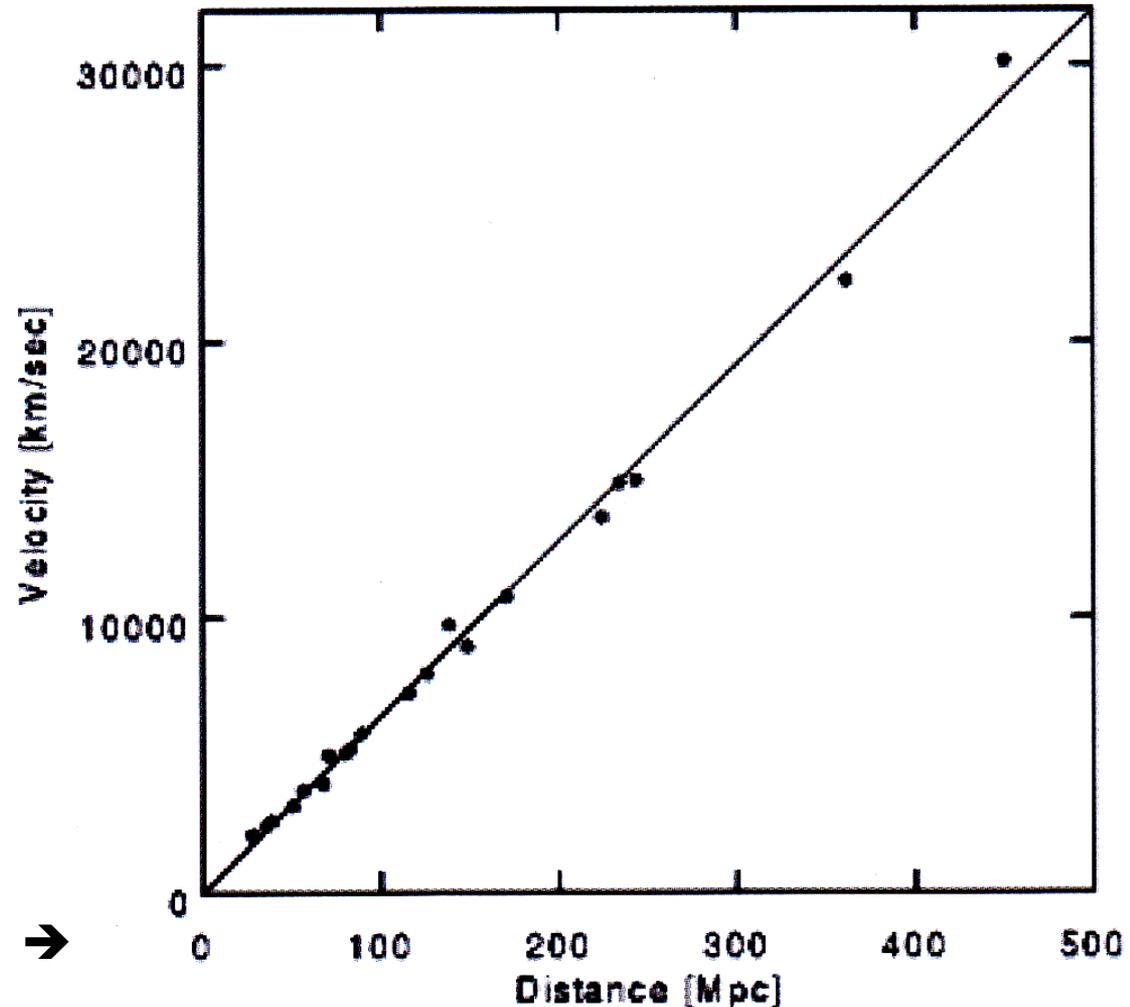
REDSHIFT DELLE GALASSIE (Effetto cosmologico)

Nel 1927 Georges Lemaitre e subito dopo Edwin Hubble scoprirono che le galassie si allontanano una dall'altra producendo uno spostamento verso il rosso della luce osservata (redshift) che è proporzionale alla loro distanza

Il valore attuale della costante di proporzionalità - Costante di Hubble - oggi vale:

$$H_0 = 67.15 \pm 1.2 \text{ km/s/Mpc}$$

(satellite Planck – 2013)



(Riess, Press and Kirshner ,1996) →

I due fondamentali parametri che descrivono l'espansione dell'Universo sono la **Costante di Hubble** ed il **deceleration parameter**.

La costante di Hubble misura la velocità di espansione dell'Universo oggi in unità $\text{km/s} / \text{Mpc}$.

Ma la Costante di Hubble cambia di valore su scale di tempi cosmologici. L'espansione dell'Universo dovrebbe rallentare col tempo per opera dell'attrazione gravitazionale. Dovremo, quindi, scrivere: $H(t)$.

Il parametro di decelerazione tiene conto del rallentamento dell'espansione col tempo, anche se, in realtà ed in tempi recenti, si è scoperto che l'Universo da 6-7 miliardi di anni sta accelerando.

Il redshift z è definito in modo che :

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{em}}}$$

**.con
lambda = lunghezza d'onda
osservata ed emessa
dall'oggetto celeste.**

Per valori di $z < 0.1$ ovvero per velocità $v < 30000$ km/s si ha:

$$z = \frac{v}{c}$$

**dove v è la velocità (radiale)
di allontanamento**

**Il risultato è lo stesso, ma non sono le galassie che ,
mediamente, si allontanano.**

**Non c'è nessuna forza che agisce tra le galassie per
allontanarle. E' lo spazio tra le galassie che si espande**

Per valori di velocità superiori a $v > 30000$ km/s è corretto usare la formula relativistica:

$$z = \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c}}{1 + \frac{v}{c}}} - 1$$

da cui:

$$v = \frac{2 c z + c z^2}{2 + 2 z + z^2}$$

e, in base alla legge di Hubble, la distanza d diviene:

$$d = \frac{v}{H_0}$$

con d = distanza dell'oggetto
in Megaparsec

Effetto Doppler per la luce:

Esempio:

Lo spettro di una sorgente stellare mostra un redshift $z = 0.1$ dovuto ad effetti locali, non cosmologici (Effetto Doppler)

La velocità radiale è:

$$v = \frac{2 c z + c z^2}{2 + 2 z + z^2} = 28500 \text{ km/s}$$

Usando la formula semplificata:

$$v = c z = 30000 \text{ km/s}$$

Esempio:

Sono state osservate le righe dello spettro di una sorgente stellare:

$$\lambda_{\text{obs}} = 397 \text{ nm} \quad \text{Ca II (calcio ionizzato)}$$

che, in laboratorio, è emessa a:

$$\lambda_{\text{em}} = 393 \text{ nm}$$

Il redshift , supposto non cosmologico, ma dovuto a semplice effetto Doppler, è pertanto:

$$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obs}}}{\lambda_{\text{em}}} \quad z = 0,0102$$

a cui corrisponde una velocità di allontanamento (z è positivo):

$$v = c z = 3060 \text{ km/s}$$

METODO DELLE SUPERNOVAE

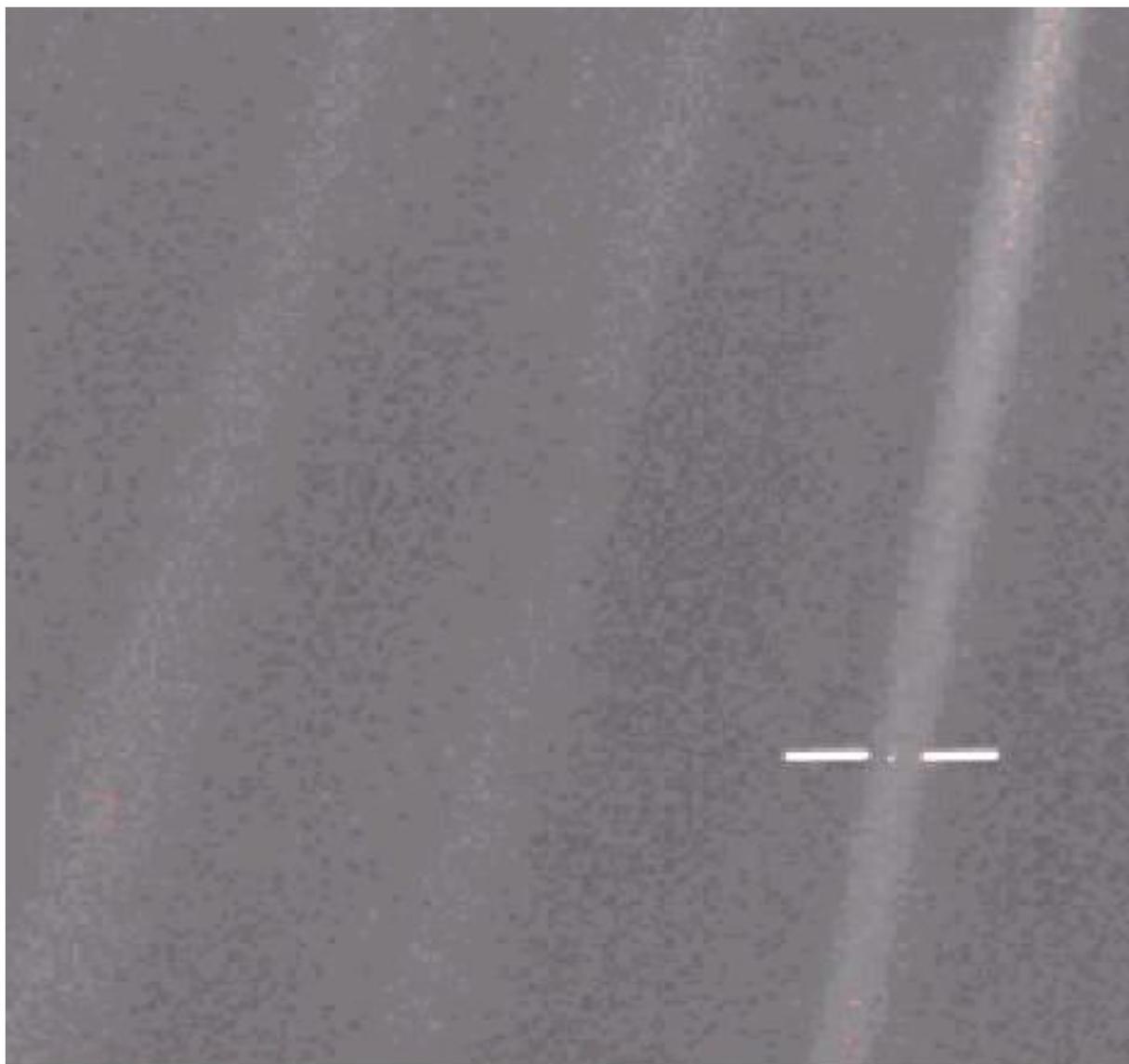
Una categoria particolare di supernova originata dall'esplosione di una nana bianca di un sistema binario viene utilizzata come "candela" standard.

Mentre la nana bianca ed una stella ordinaria ruotano l'una attorno all'altra, la nana bianca, data la sua forte gravità, risucchia materiale dall'altra stella aumentando gradatamente la propria massa.

Ad un preciso valore di massa, la nana bianca non è più in grado di sostenere se stessa e implode sotto il suo stesso peso.

Questi eventi si verificano sempre con le stesse modalità, danno luogo ad una curva di luce caratteristica ed a una stessa luminosità assoluta .

Misurando la luminosità apparente, sapendo che l'energia che raggiunge l'osservatore decresce con il quadrato della distanza, è possibile risalire alla distanza.



**Immagine della
Terra vista dalla
distanza di circa
 $6 \cdot 10^9$ km ripresa
dal Voyager 1
(1990).**

Photo Nasa.

Io penso che non c'è forse nessuna migliore dimostrazione della follia della presunzione umana che questa immagine da lontano del nostro piccolo mondo.

Secondo me, essa sottolinea la nostra responsabilità di avere più gentilezza e compassione l'un con l'altro e di preservare e curare teneramente quel pallido puntino blu, l'unica casa che noi abbiamo mai conosciuto.

Carl Sagan (*Reflections on a Mote of Dust*)

Carl Sagan (New York, 9/11/1934 – Seattle, 20/12/1996) e' stato un astronomo, divulgatore scientifico e autore di fantascienza statunitense.

Per saperne di più:

T.Regge – *Infinito* – Mondadori (1996)

T.M.Davis, C.H.Lineveaver – *Expanding Confusion: common misconceptions of cosmological horizons and the superluminal expansion of the Universe* - arXiv: astro-ph/0310808v2

T.M.Davis, C.H.Lineveaver – *Piccoli equivoci sul big bang* – Le Scienze – aprile 2005

L.Susskind – *Il Paesaggio Cosmico – Dalla teoria delle stringhe al megaverso* - Adelphi (2007)

G.Tonelli – *Cercare Mondi* - Rizzoli (2017)

G.Tonelli – *Genesi – Il grande racconto delle origini* - Feltrinelli (2019)