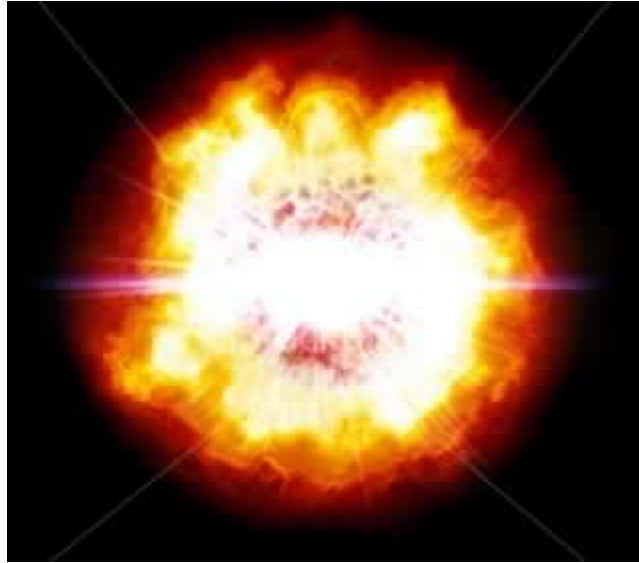


Viaggio nel Big Bang

di Francesco Battistelli (2008)

1. big bang e cosmologia

Il Big Bang è un'esplosione che ha creato l'Universo?



Questa è l'idea che molti si fanno, quella di un'esplosione di un qualcosa che viene scagliato nello spazio circostante... ma questa immagine del Big Bang è fuorviante ed errata! Certamente il termine significa "grande botto", ma occorre tenere presente che questo nome venne coniato nel 1949 da uno dei principali sostenitori della teoria cosmologica rivale, quella dello stato stazionario! Infatti fu lo scienziato e scrittore di fantascienza Fred Hoyle a utilizzare pubblicamente il nome **Big Bang** durante il programma radio della BBC *"The Nature of Things"*. Come vedremo, il Big Bang non è una esplosione di materia all'interno di uno spazio pre-esistente, ma è piuttosto una sorta di "esplosione" dello spazio. Inoltre il Big Bang non parla di creazione, ma è solamente una teoria cosmologica.



fonte: HST

La **cosmologia** è lo studio scientifico delle proprietà su larga scala dell'Universo nel suo complesso e nel tempo, e all'interno della cosmologia il Big Bang è la teoria scientifica che descrive meglio delle altre teorie l'evoluzione fisica dell'Universo nel tempo. Ma cosa si intende quando si parla di teoria scientifica?

Che cos'è una teoria scientifica?

I passi principali di una teoria scientifica sono i seguenti:

1. vengono osservati dei fenomeni oppure vengono dedotte conclusioni dalle cose che già si conoscono come vere;
2. viene formulato un modello teorico utilizzando il linguaggio matematico per formulare una o più leggi;
3. vengono verificate le previsioni, e a seconda del risultato delle osservazioni la teoria dovrà essere abbandonata, modificata o migliorata per accogliere i dati.

Quindi una teoria scientifica non si propone di descrivere la realtà con generiche affermazioni senza riscontro, ma utilizzando leggi matematiche e facendo specifiche previsioni che dovranno essere testate con ulteriori osservazioni. E' importante aggiungere che una teoria corretta può non essere sempre valida, in quanto ogni teoria ha il suo ambito di validità.



Isaac Newton (1642-1727),
ritratto di Sir Godfrey Kneller
(Farleigh House, Farleigh
Wallop, Hampshire)

Prendiamo per esempio la **Gravitazione Universale**, formulata nel 1687: Newton osservando fenomeni tra loro apparentemente scollegati, la caduta di un corpo sulla Terra e il movimento della Luna intorno alla Terra, formula un modello nel quale entrambi questi fenomeni obbediscono alla cosiddetta legge della Gravitazione Universale:

$$F = -\frac{GMm}{R^2}$$

Tutte le verifiche successive hanno confermato la validità della teoria, a condizione che si osservino corpi a riposo o che si spostano molto lentamente rispetto alla velocità della luce.

Nel caso di corpi che si muovono a velocità comparabili con la velocità della luce (300.000 km/s) le leggi di Newton vengono superate e completate nel 1916 dalla Relatività Generale di Einstein, sulla quale torneremo presto. Naturalmente questo non toglie niente alla correttezza, nel suo ambito di validità, della legge di Gravitazione Universale.

2. i fondamenti della teoria

Il modello del Big Bang si poggia su due pilastri teorici:



1. Il principio cosmologico

L'ipotesi più semplice sull'Universo è che sia lo stesso ovunque e in ogni direzione. Il principio cosmologico afferma che su scale molto grandi l'Universo è:

- **omogeneo** = non dipende dal luogo in cui ci si trova
- **isotropo** = non dipende dalla direzione in cui si osserva

Quindi, non considerando le fluttuazioni locali, l'Universo appare su grande scala nello stesso modo (ovvero i parametri cosmologici hanno lo stesso valore) ad osservatori situati in punti diversi che osservino allo stesso istante.



fonte: HST

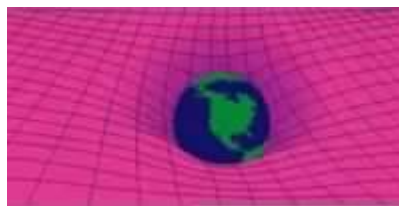


Albert Einstein
(www.nobelprize.org)

2. La Relatività generale

Abbiamo visto che la gravità di Newton è valida per i corpi a riposo o che si spostano molto lentamente rispetto alla velocità della luce. Nella Relatività generale, valida anche per corpi che si muovono a velocità prossime alla velocità della luce, lo spazio non è uno sfondo rigido in cui le particelle si muovono esercitando una mutua forza di attrazione e la gravità non è più descritta da un campo gravitazionale. Per Einstein la gravità diventa l'effetto della distorsione dello spazio e del tempo causata dalla massa (e dall'energia, equivalente alla massa secondo la celebre equazione $E = mc^2$) e il fisico John Wheeler riassume così questo concetto:

"La materia dice allo spazio come curvarsi, lo spazio dice alla materia come muoversi"



Le previsioni della Relatività Generale sono state confermate dalle osservazioni, in particolare nelle peculiarità dell'orbita di Mercurio e nella curvatura della luce da parte del Sole.

Applicando la Relatività generale ad un Universo omogeneo e isotropo (secondo il principio cosmologico) si ottengono due conseguenze:

1. la geometria dello spazio ha **curvatura costante** (positiva, nulla o negativa) che dipende dalla quantità di materia e/o energia contenuta nell'Universo. Infatti se la materia è distribuita in modo uniforme, a causa degli effetti gravitazionali la corrispondente distorsione dello spazio-tempo può avere solo una delle tre forme (curva positivamente e limitata, curva negativamente e infinita, piatta e infinito);
2. la materia tende al **collasso gravitazionale**. Infatti la forza di gravità è una forza che a differenza delle altre forze non può essere schermata. Se l'Universo è omogeneo viene esercitata attrazione gravitazionale su ogni particella e quindi in un Universo statico e immutabile nel tempo tutta la materia tenderebbe a collassare su se stessa.

Quindi unendo il Principio cosmologico e la Relatività generale si deduce che l'Universo



deve **cambiare nel tempo!!!**

L'Universo è statico o dinamico?

L'idea di un Universo statico era già stata messa in discussione dal cosiddetto paradosso di Olbers che nel 1826 si chiedeva perché il cielo sia oscuro. Infatti se l'Universo fosse eterno, infinito e statico, il cielo di notte sarebbe chiaro, perché prima o poi si vedrebbe la luce di una stella in ogni direzione e il cielo sarebbe luminoso come la superficie del Sole.



L'equazione originale di Einstein dipinta su una locomotiva
(fonte: [Departamento de Astronomía Univ. Chile](#))

Con la Relatività generale l'equazione di Einstein non dava soluzioni costanti nel tempo, e l'unica conseguenza possibile era che l'Universo non poteva essere statico, ma doveva espandersi o contrarsi. Ma nel 1917 l'idea di un Universo in espansione non era accettabile da Einstein, che avendo supposto l'Universo omogeneo, isotropo e statico, inventò la **costante cosmologica (Λ)**, un termine matematico dall'effetto anti-gravitazionale:

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

L'equazione di Einstein con l'aggiunta della costante cosmologica Λ

L'effetto fisico della costante cosmologica è una repulsione che si oppone alla gravità e al conseguente collasso della materia. La costante doveva perciò avere un valore ben preciso per permettere l'esistenza di un Universo statico. Qualche anno dopo, quando grazie alle scoperte di Hubble sarà evidente che l'Universo è in fase di espansione, Einstein ammetterà che la costante cosmologica era stata il "più grande errore della sua vita".

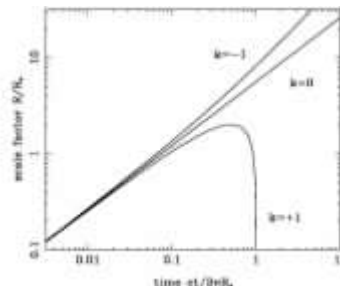
L'Universo è dinamico?

Nel 1921 il matematico russo Friedman trovò una soluzione alle equazioni di Einstein che implicava l'**espansione dell'Universo**, quindi l'Universo è omogeneo, isotropo e dinamico. Dalla seconda equazione di Friedmann l'espansione dipende dal rapporto Ω tra la densità di materia dell'Universo e la densità critica:

- se $\Omega < 1$ (densità inferiore alla densità critica) l'Universo è aperto e ha un'espansione infinita;
- se $\Omega = 1$ (densità uguale alla densità critica) l'Universo è piatto ma ha un'espansione infinita;
- se $\Omega > 1$ (densità superiore alla densità critica) l'universo è chiuso e ricollassa su sé stesso.



$$\left(\frac{H}{H_0}\right)^2 - \frac{\Omega_0}{a^3} = \frac{1 - \Omega_0}{a^2}$$



Alexander Friedmann, la sua equazione e il grafico che illustra il rapporto tra fattore di scala e tempo in base alla densità di materia

3. l'espansione dell'Universo

Negli anni venti Edwin Hubble, utilizzando il nuovo telescopio all'Osservatorio di Monte Wilson, riuscì a misurare grazie alle Cefeidi e all'effetto Doppler la distanza e la velocità di alcune galassie.



Edwin Hubble e la Galassia M31 (fonte: Robert Gendler)

Hubble fece due scoperte importanti:

1. **risolse il problema della natura delle galassie**
Rilevando la presenza nelle nebulose di stelle Cefeidi, che hanno una stretta correlazione tra il periodo e la luminosità assoluta, dalla misura del periodo e della luminosità apparente Hubble ne calcolò la distanza, dimostrando definitivamente che le galassie sono extragalattiche.
2. **scoprì l'espansione dell'Universo**
Confrontando le distanze calcolate con le Cefeidi con le misure della velocità relativa delle galassie, calcolate grazie all'effetto Doppler sulla luce, Hubble si accorse che più una galassia era lontana più si allontanava velocemente.

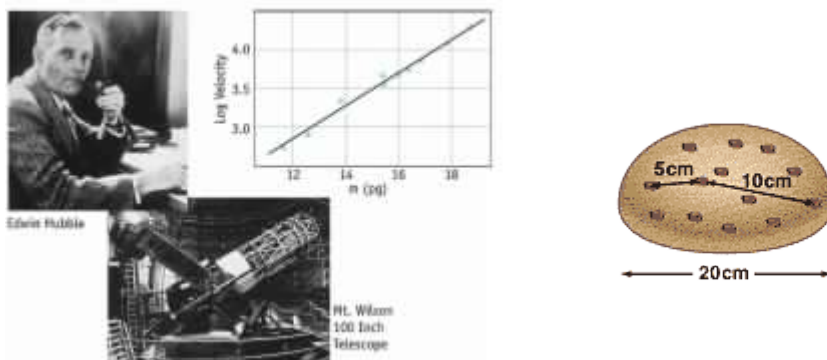
La legge di Hubble

La velocità con cui una galassia si allontana da noi è proporzionale alla sua distanza, secondo una semplice relazione detta **Legge di Hubble**, la cui costante di proporzionalità H_0 è detta **costante di Hubble**:

$$v = H_0 d$$

La legge di Hubble è quello che ci si aspetta per un Universo in espansione omogenea, ma per la Relatività generale l'espansione di Hubble non è un semplice allontanarsi delle galassie tra di loro. Non sono le galassie a muoversi in uno spazio euclideo, piuttosto è lo spazio-tempo ad espandersi trascinando le Galassie con sé. Per illustrare l'espansione dell'Universo si utilizza l'analogia con la lievitazione di un panettone infinito, in cui la pasta che lievita è lo spazio-tempo in espansione, le uvette e i canditi sono le galassie che aumentano la loro distanza relativa.

DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



a sinistra Hubble, il suo telescopio e il grafico della sua legge; a destra l'analogia tra l'espansione dell'Universo e la lievitazione di un panettone infinito (fonte: [NASA-WMAP](#))

Se rovesciamo l'espansione dell'Universo percorrendo il tempo all'indietro, troviamo un istante nel passato in cui tutto l'Universo è concentrato in un punto di raggio nullo e di densità e temperatura infinite. Convenzionalmente questo istante è detto **big bang** o il **tempo 0** da cui si parte per conteggiare l'età dell'Universo. Come abbiamo visto non c'è stata un'esplosione in un unico punto dello spazio che si è propagata come un'onda disomogenea nello spazio, quindi non c'è un centro dell'Universo e in un certo senso il Big Bang è avvenuto ovunque! Il big bang è una comparsa ed "esplosione" di spazio e tempo, l'Universo stesso inizia ad espandersi da quell'istante.

Nasce il modello teorico

La conseguenza principale dell'espansione dell'Universo è che nei primi istanti l'Universo doveva essere piccolo e caldo, e questo fu il punto di partenza del lavoro di George Gamow, che nel 1948 pubblicò insieme a Ralph Alpher la cosiddetta teoria del Big Bang caldo, conosciuta come teoria **$\alpha \beta \gamma$** dai nomi degli autori **Alpher**, **Bethe** (che Gamow aveva intenzionalmente aggiunto proprio per ottenere questo effetto) e **Gamow**.



Gamow con i suoi allievi
(fonte: www.medlem.tripodnet.nu)

Nei primi istanti dell'Universo la densità doveva essere molto elevata, perciò la materia era molto calda e completamente ionizzata. Tutte le particelle e le radiazioni presenti erano in equilibrio termodinamico, come accade all'interno di una stella dove la radiazione elettromagnetica è in equilibrio termodinamico con la materia: quindi nei primi istanti l'Universo era opaco. La teoria spiegava come avviene la sintesi degli elementi chimici e prediceva l'esistenza di una radiazione uniforme, residuo del calore primordiale. Infatti quando l'espansione raffreddò il plasma, elettroni e nuclei si unirono negli atomi disaccoppiandosi dai fotoni, e il mare di fotoni primordiali liberi doveva essere ancora visibile come una radiazione di fondo, isotropa e con uno spettro di corpo nero corrispondente a 5 K... ma per molti anni questa radiazione sarebbe rimasta invisibile!

Teorie cosmologiche rivali

Nei decenni successivi si fronteggiarono due teorie cosmologiche, senza che nessuna prevalesse sull'altra per mancanza di prove evidenti:

- la teoria del **Big Bang caldo** (appoggiata da Lemaitre, Gamow e da molti altri), in cui l'Universo si espande da uno stato iniziale denso e caldo e si va raffreddando con il tempo.
- la teoria dello **Stato stazionario** (proposta Bondi, Gold e Hoyle, già incontrato come autore del nome "big bang"), in cui per mantenere la densità costante c'è una continua creazione di materia (circa 1 protone per km^3 all'anno), violazione della conservazione della massa praticamente inosservabile.



George Gamow Fred Hoyle

4. le prove del Big Bang

Il modello del Big Bang è diventato la teoria cosmologica prevalente perché è sostenuto da una serie di importanti prove, confermate dalle osservazioni sperimentali:

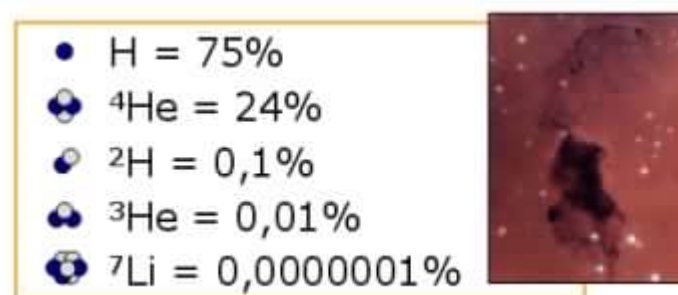
- l'espansione dell'Universo
- l'abbondanza degli elementi leggeri
- la radiazione cosmica di fondo

Abbiamo già visto l'espansione dell'Universo, punto di partenza della teoria del Big Bang, e ora vediamo le altre due prove:

L'abbondanza degli elementi leggeri

La teoria del Big Bang prevede che un secondo dopo il Big Bang la temperatura era di circa 10 miliardi di gradi e l'Universo era popolato da neutroni, protoni, elettroni, positroni (o anti-elettroni), fotoni e neutrini. Quando l'Universo si è raffreddato, i neutroni si sono trasformati in protoni ed elettroni oppure si sono combinati con i protoni nel deuterio, un isotopo di idrogeno. In seguito la maggior parte del deuterio si è combinata in elio e si è prodotto del litio, finché sono diminuite la temperatura e la densità rendendo altre fusioni improbabili.

Quindi nei primi tre minuti dopo il Big Bang si sono formati elementi leggeri (la cosiddetta **Nucleosintesi primordiale**), la cui abbondanza finale in percentuale dipende dal rapporto tra fotoni e barioni (neutroni e protoni) e dal numero di specie di neutrini.



Le abbondanze relative degli elementi misurate in ambienti chimicamente poco evoluti

Le abbondanze misurate sono simili a quelle previste, e nessun'altra teoria spiega in modo efficace la percentuale elevata di nuclei di elio (quello prodotto nelle stelle viene bruciato nelle successive fasi di vita stellare). Per questo la nucleosintesi primordiale rappresenta uno dei pilastri fondamentali della teoria del Big Bang caldo.

La radiazione cosmica di fondo

La teoria del Big Bang prevede che l'Universo primordiale era molto caldo e che durante l'espansione si è raffreddato. Secondo George Gamow (1948) l'Universo dovrebbe ancora essere pieno del calore residuo rimasto dal momento in cui si sono formati i nuclei (**ricombinazione**) e i fotoni hanno iniziato a viaggiare indisturbati per l'Universo. Questi fotoni "fossili" costituiscono la cosiddetta **radiazione cosmica di fondo**, che secondo la teoria dovrebbe essere uniformemente distribuita, seguire la cosiddetta legge del corpo nero ed emettere nelle microonde, essendosi la frequenza dei fotoni spostata verso il rosso a causa dell'espansione dell'Universo.

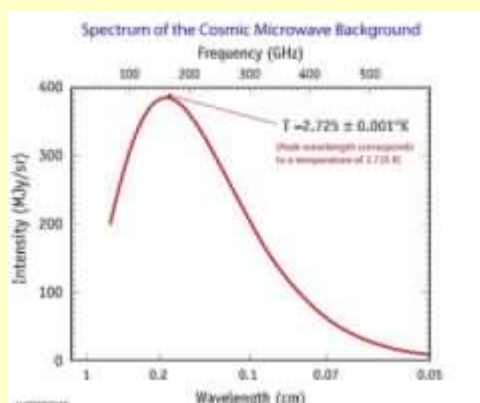


Penzias, Wilson e la loro antenna
(fonte: [NASA-WMAP](#))

Nel 1964 Arno Penzias e Robert Wilson, che lavoravano per i Bell Telephone Laboratories, scoprirono per caso una fonte di rumore nell'antenna radio che stavano provando, una radiazione isotropa, ovvero proveniente con la stessa intensità da ogni direzione, nella banda delle microonde. Non essendo riusciti a identificarne la fonte, ne parlarono con il gruppo di Robert Dicke, che alla vicina Università di Princeton stava creando un esperimento per trovare la radiazione di fondo predetta da Gamow.

I ricercatori di Princeton capirono subito che i due tecnici dei Bell Labs avevano trovato quello che loro stavano cercando, il mare di fotoni fossili che aveva dominato l'Universo per alcune centinaia di migliaia di anni. Qualche anno dopo Penzias e Wilson riceveranno il premio Nobel per questa scoperta.

La radiazione cosmica di fondo a microonde (CMB, **Cosmic Microwave Background**) è radiazione pressoché isotropa a 2.73 K e quindi emette soprattutto nelle microonde. Se i nostri occhi potessero osservare le microonde, vedremmo nel cielo una luminosità uniforme in ogni direzione, e non è immaginabile un'altra possibile fonte di radiazioni così uniforme. La radiazione di fondo è quindi la prova più schiacciante della teoria del Big Bang caldo, secondo la quale il primo Universo era un luogo estremamente denso, caldo e contenente particelle molto energetiche. Emessa poche centinaia di migliaia di anni dopo il Big Bang, prima di qualunque altra stella o galassia, questa radiazione ci permette di conoscere le condizioni dell'Universo giovane su scale molto grandi.



LO SPETTRO DELLA RADIAZIONE DI FONDO

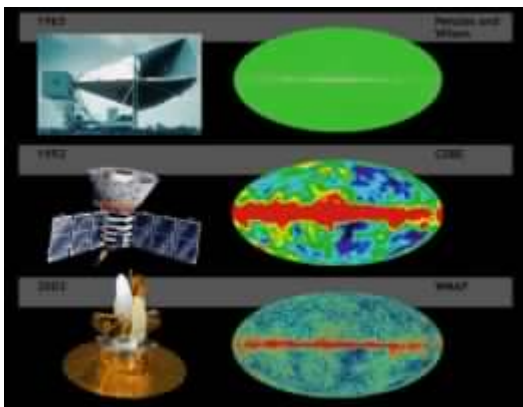
Noi vediamo la radiazione di fondo nel momento della ricombinazione, cioè "alla superficie di ultimo scattering tra fotone ed elettrone". Secondo la teoria del Big Bang, lo spettro della CMB dovrebbe essere quello di un corpo nero perfetto, effettivamente misurato dall'esperimento COBE: in effetti è uno dei corpi neri più accurati che si trovino in natura, e questo ci conferma che

L'Universo giovane era in equilibrio termodinamico.

L'espansione dell'Universo non cambia la forma dello spettro della radiazione, che rimane sempre di corpo nero, ma ne aumenta solamente la lunghezza d'onda: la radiazione ha subito un **red-shift cosmologico**, un effetto puramente gravitazionale non dovuto all'effetto Doppler.

Fluttuazioni nella temperatura della radiazione di fondo

Studiando la radiazione cosmica di fondo a microonde si può guardare vedere l'Universo quando era opaco, l'ultima volta che la maggior parte dei fotoni sono stati diffusi dalla materia. La sua temperatura ci dà informazioni sulla storia termica dell'Universo.

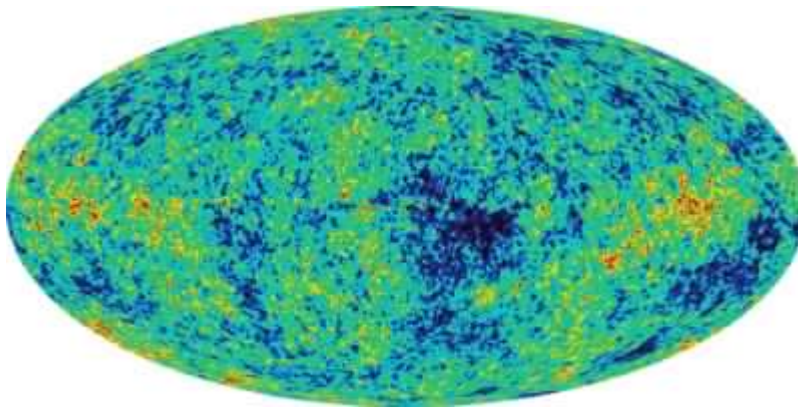


Nel 1989 il satellite **COBE** (Cosmic Background Explorer) aveva misurato una temperatura uniforme di 2,725 K, confermando l'isotropia rilevata da Penzias e Wilson.

Ma secondo la teoria la radiazione non avrebbe dovuto essere perfettamente isotropa, perché per la formazione delle strutture che vediamo nel cosmo erano necessarie minime variazioni della temperatura. Nel 1992 COBE ha rilevato per la prima volta fluttuazioni nella temperatura della radiazione di fondo, anisotropie misurate con maggiore precisione da **Boomerang**, un pallone ideato a Roma dal gruppo di De Bernardis.

La misura più accurata delle fluttuazioni di temperatura del CMB è dovuta al satellite **WMAP** (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), che come COBE ha fatto una mappa di tutto il cielo, ma con una risoluzione di circa 13 minuti di arco.

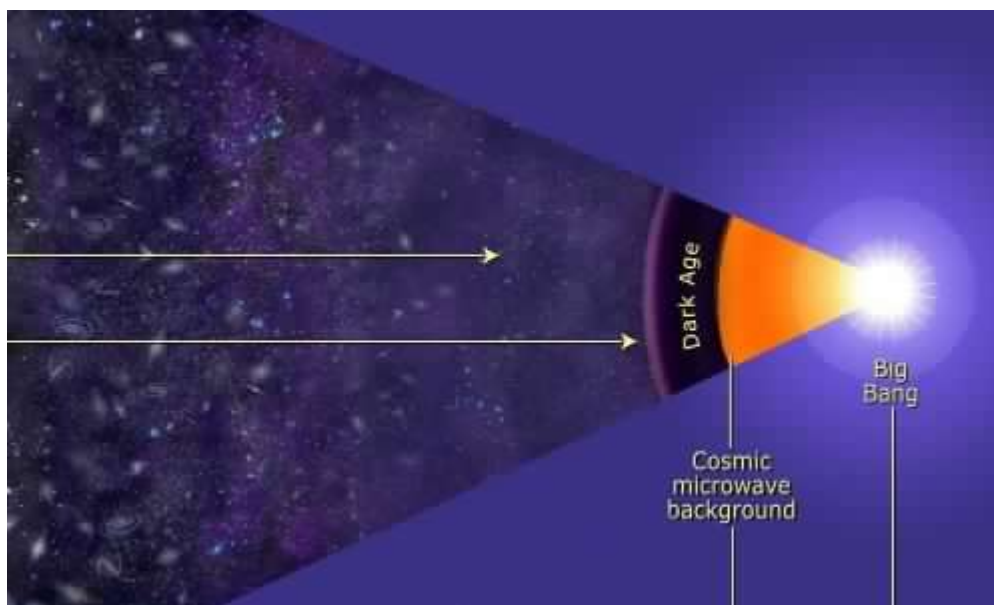
Queste fluttuazioni di temperatura danno informazioni sulle perturbazioni primordiali, che per instabilità gravitazionale sono cresciute fino a formare le strutture cosmiche su larga scala che vediamo (stelle, galassie e ammassi di galassie). Studiando le fluttuazioni si possono misurare i parametri fondamentali della teoria del Big Bang, tra cui la densità e la composizione dell'universo. Infatti estraendo dallo spettro delle fluttuazioni di temperatura le diverse oscillazioni armoniche (così come si fa con la musica quando si scompone un suono nelle sue armoniche), dal primo picco dipende la geometria globale dell'Universo e il rapporto tra la prima oscillazione armonica e le successive dipende dalla densità dei barioni.



La mappa delle fluttuazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo del Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (fonte: [NASA-WMAP Science Team](#))

5. conseguenze e limiti della teoria

Come abbiamo visto il Big Bang è un modello largamente accettato che spiega l'origine e l'evoluzione del nostro Universo: da uno stato caldo e denso il cosmo si è ampliato nel cosmo vasto e molto più freddo. Possiamo vedere i resti della densa e calda materia in una freddissima radiazione cosmica di fondo a microonde, che pervade uniformemente tutto il cielo, e la teoria è confermata dall'espansione dell'Universo e dall'abbondanza degli elementi leggeri.



fonte: [NASA/ESA](#) and Ann Feild ([STScI](#))

Poiché luce viaggia a una velocità finita, gli astronomi osservano gli oggetti come erano nel passato, quando la luce è partita verso di noi. La maggior parte delle stelle visibili ad occhio nudo sono distanti tra 10 e 100 anni luce, quindi le vediamo come erano 10/100 anni fa. Vediamo la galassia di Andromeda come era 2,5 milioni di anni fa e lontane galassie come erano pochi miliardi di anni dopo il Big Bang. Ma non potremo vedere il Big Bang, perché nei primi istanti l'Universo è molto denso e quindi è opaco alla radiazione. Il fatto che l'Universo sia finito nel tempo implica che non si possa guardare oltre il cosiddetto **orizzonte cosmologico** (detto anche orizzonte delle particelle), perché la luce di tutto quello che è oltre l'orizzonte avrebbe dovuto impiegare per raggiungerci un tempo superiore all'età dell'Universo.

I limiti della teoria del Big Bang

Il modello del Big Bang ha alcuni limiti, perché non riesce a spiegare bene i seguenti punti:

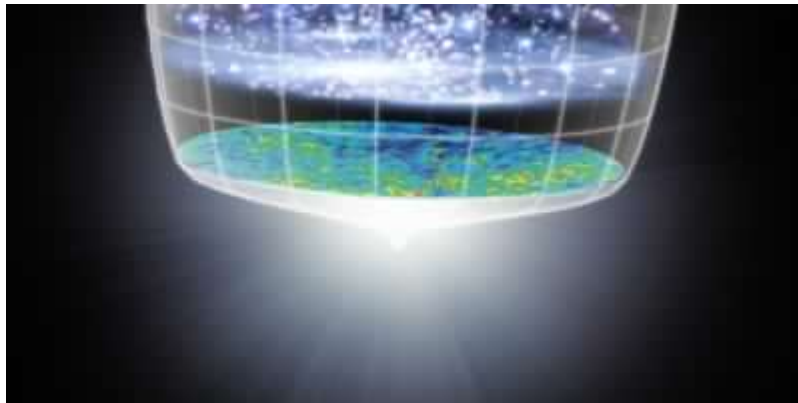
- **perché l'universo è così uniforme a grande scala?**
Alcune regioni in direzioni opposte del cielo sono così lontane che non avrebbero mai potuto entrare in contatto, perché il tempo in cui la luce percorre la loro distanza supera l'età dell'universo. Ma se la temperatura della radiazione di fondo è uniforme significa che

c'era equilibrio termodinamico e quindi queste regioni ora al di fuori del rispettivo orizzonte cosmologico dovevano essere state in contatto in passato.

- **perché l'Universo non è uniforme su piccola scala?**
La teoria del Big Bang presume che materia e radiazione siano distribuiti uniformemente, ma la gravità da sola non è in grado di produrre le piccole fluttuazioni da cui si sono generate le strutture che vediamo. E allora come si sono formate le stelle e le galassie?
- **la geometria piatta è un improbabile caso fortunato?**
Dalla misura delle fluttuazioni di temperatura WMAP ha determinato che la geometria del cosmo è pressoché piatta, ma per la teoria del Big Bang questa sarebbe un'incredibile coincidenza.
- **dove sono i monopoli magnetici?**
La teoria del Big Bang prevede un numero elevato di "monopoli magnetici", prodotti nei primi istanti dell'Universo. Ma questi monopoli magnetici non sono mai stati osservati.

Le teorie dell'inflazione

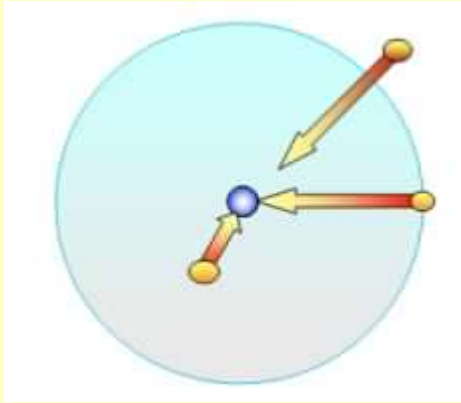
Abbiamo visto che quando qualcosa non torna, o si abbandona la teoria cercandone una migliore, oppure si cercano gli aggiustamenti necessari per fare quadrare i conti. In soccorso della teoria del Big Bang l'aiuto decisivo venne dalla **teoria dell'Inflazione**, sviluppata per la prima volta nel 1980 da Alan Guth, Andrei Linde, Paul Steinhardt e Andy Albrecht. L'inflazione è un periodo di espansione accelerata dell'Universo nei suoi primi istanti, e si pensa che l'agente propulsore dell'espansione potrebbe essere una sorta di proprietà del vuoto.



(fonte: [NASA-WMAP Science Team](#))

I cosmologi pensano che la teoria dell'inflazione possa spiegare la grande uniformità del nostro universo e l'origine delle strutture, risolvendo nel modo più semplice i problemi insoluti del Big Bang:

- **problema dell'uniformità a grande scala**
regioni ora lontane erano molto più vicine prima dell'inflazione, avrebbero potuto essere a contatto raggiungendo una temperatura uniforme prima dell'inflazione o durante l'inflazione stessa;
- **problema dell'origine delle strutture**
eventuali microscopiche fluttuazioni quantistiche verrebbero ampliate durante l'inflazione originando diverse distribuzioni nella densità di materia, e dopo centinaia di milioni di anni le regioni più dense hanno dato origine a stelle, galassie, e ammassi di galassie;
- **problema della geometria piatta**
la rapidissima dilatazione avrebbe portato la curvatura dell'Universo ad un valore prossimo alla piattezza;
- **problema dei monopoli magnetici**
gli eventuali monopoli magnetici che esistevano prima non sono osservati perché durante l'inflazione la loro densità sarebbe calata esponenzialmente fino a livelli non rilevabili.



L'INFLAZIONE E L'ORIZZONTE DELLE PARTICELLE

L'inflazione è una rapidissima espansione del fattore di scala: secondo la teoria più accreditata in una frazione di secondo (10^{-33} s) la scala sarebbe aumentata di 10^{26} volte, tanto che in questo periodo l'orizzonte cosmologico osservabile (detto anche **orizzonte delle particelle**) si sarebbe addirittura rimpicciolito! Normalmente l'orizzonte delle particelle, che naturalmente avanza alla velocità della luce, va conquistando sempre più terreno, e con il passare del tempo nuove regioni di spazio entrano in contatto causale. Se invece l'Universo viene accelerato come nella fase inflattiva ad una velocità estremamente maggiore rispetto alla velocità della luce, l'orizzonte delle particelle si rimpicciolisce, e zone che erano in contatto causale si ritrovano successivamente isolate!

Quindi la teoria del Big bang e l'Inflazione spiegano l'evoluzione dell'Universo, e l'unica ipotesi necessaria è che la materia sia distribuita omogeneamente e isotropa su grandi scale. Restano diversi parametri liberi che determinano la struttura del nostro Universo, che devono essere fissati dalle osservazioni, ovvero la geometria del cosmo (aperto, chiuso o piatto), l'attuale tasso di espansione (la costante di Hubble) e il corso di espansione passato e futuro, determinato dalla densità dei vari tipi di materia nell'Universo.

6. la struttura dell'Universo

Quanto è grande l'Universo?

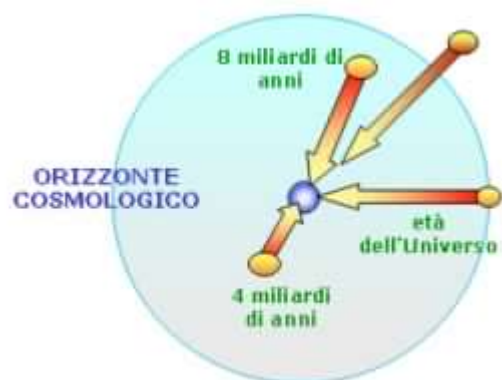
Un Universo infinito rimane sempre tale, anche quando si espande o si contrae. Ma fino a dove possiamo guardare? L'Universo ha un tempo finito, quindi anche se fosse infinito noi saremmo in grado di osservare solamente quella parte che ha fatto in tempo a inviarci particelle o radiazioni.

- Possiamo vedere solo fino a distanze pari alla **distanza massima** percorsa dalla luce dal Big Bang ad oggi.
- Il modello del Big Bang non prova a descrivere la regione dello spazio che si trova oltre quella distanza, il cosiddetto **orizzonte cosmologico**, limite dinamico dell'Universo osservabile.

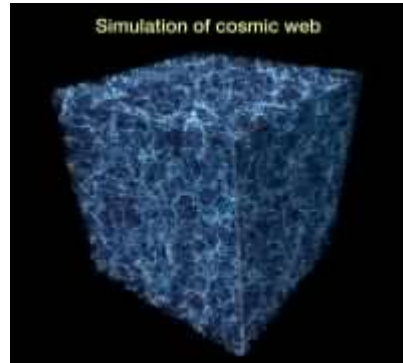
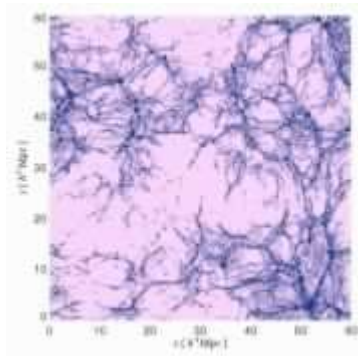
L'espansione dell'Universo, che sposta la radiazione delle stelle molto lontane verso il rosso, e l'orizzonte cosmologico, che pone un limite all'Universo osservabile e alla luce che può pervenire fino a noi, risolvono il paradosso di Olbers sul perché il cielo notturno sia buio.

Come è fatto l'Universo?

Su larga scala l'unica forza ad avere importanza è la **forza gravitazionale**, dato che le forze nucleari hanno un limitato raggio d'azione e la forza elettrostatica tende a neutralizzarsi. Le galassie sono raggruppate in gruppi di ammassi e superammassi, distribuiti in una struttura



complessa che ricorda una spugna, in cui una rete di strutture, muri e filamenti circonda grandi vuoti.

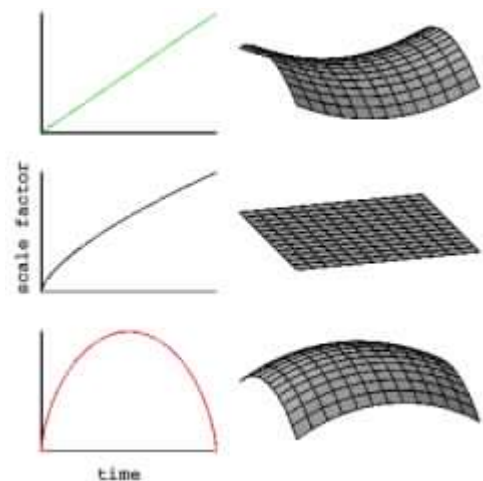


A sinistra la struttura osservata in una porzione di Universo, a destra simulazione della rete cosmica (fonte: [NASA](#), [ESA](#), and E. Hallman, University of Colorado)

Qual è la geometria dell'Universo?

La materia svolge un ruolo centrale nella cosmologia, perché la densità media della materia determina la geometria del cosmo, e secondo i modelli di Universo di Friedmann-Robertson-Walker ci sono tre casi possibili:

- se $\Omega < 1$ (densità dell'Universo inferiore alla densità critica) la geometria dello spazio è **aperta**, curva negativamente come la superficie di una sella: l'universo è aperto e si espande in eterno con una legge di tipo iperbolico.
- se $\Omega = 1$ (densità dell'Universo esattamente uguale alla densità critica) la geometria del cosmo è **piatta** con curvatura infinita: l'universo è critico e l'espansione è ancora infinita.
- se $\Omega > 1$ (densità dell'Universo che supera la densità critica) la geometria dello spazio è **chiusa**, curva positivamente come la superficie di una sfera: l'universo è chiuso e con il tempo ricollassa su sé stesso.



Nota: La densità critica equivale a $9,9 \times 10^{-30} \text{ g/cm}^3$, ovvero a 5,9 protoni per metro cubo, che equivale ad avere 1 grammo di materia nel volume occupato da 100 Terre.

La versione più semplice della teoria inflazionistica prevede che la densità dell'universo sia molto vicina alla densità critica e che quindi la geometria del cosmo sia **piatta**. Questo risultato è stato confermato dalle misure di WMAP sulle fluttuazioni di temperatura, la densità media misurata è pari alla densità critica con un margine di errore del 2%.

Come si espande l'Universo?

La velocità di espansione dell'Universo dipende dalla costante di Hubble, e questo significa che se questa costante vale $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ noi vediamo allontanarsi galassie distanti 3 milioni di anni luce a 70 chilometri al secondo, galassie distanti 6 milioni di anni luce a 140 chilometri al secondo, e così via in proporzione.



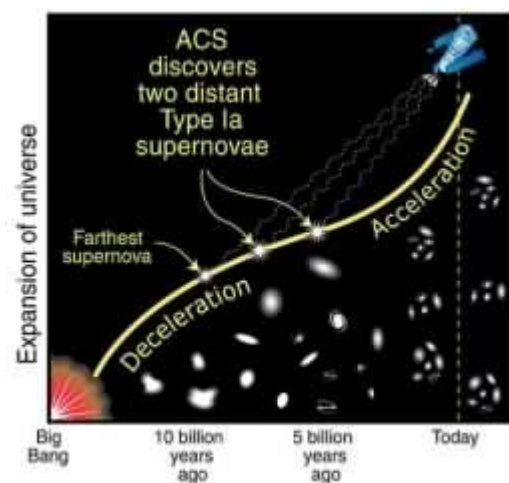
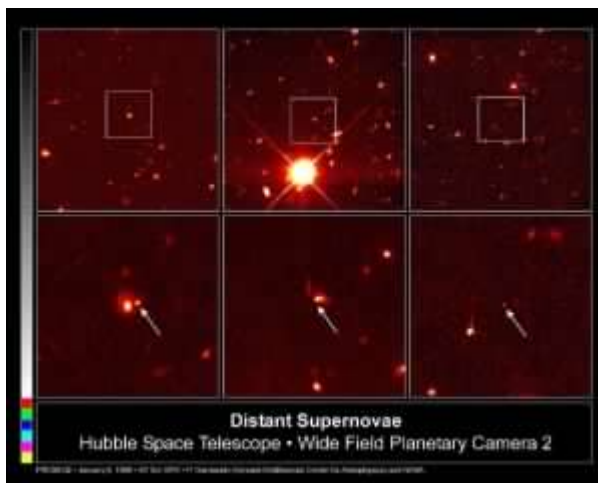
Edwin Hubble

QUANTO VALE LA COSTANTE DI HUBBLE

Nella legge di Hubble ($v = H_0 d$) la velocità viene misurata in km/s e la distanza di galassie in Megaparsec (1 Mpc = 3,26 milioni di anni luce = $3,08 \cdot 10^{19}$ km). Quindi l'unità di misura della costante di Hubble è $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$.

- La **misura cosmologica** del valore della costante di Hubble si basa principalmente sulla determinazione di distanza e velocità di recessione di grandi campioni di galassie o supernove. Dallo studio dei dati cosmologici utilizzando l'Hubble Space Telescope si è ottenuto un valore compreso tra 66 e $82 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$
- Una **misura indiretta** del valore della costante di Hubble si basa sulla analisi delle fluttuazioni della radiazione di fondo. Se le premesse teoriche sono corrette, dalle misure di WMAP si è ottenuto il valore $73,5 \pm 3,2 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$
- Combinando i dati cosmologici con i dati da WMAP la migliore stima nel caso di un universo è piatto è **$70,8 \pm 1,6 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$**

Ma nel 1997 è sorto un problema inaspettato: le supernove di tipo Ia sono ottime candele standard, perché sono così luminose da essere visibili a distanze cosmologiche. Ma misurando la loro magnitudine apparente ci si è accorti che è maggiore rispetto a quanto ci si aspetta nel caso di un universo piatto (la differenza è di circa mezza magnitudine). Questo significa che queste supernove sono più lontane di quanto ci si potesse aspettare, e questo può significare solo una cosa: **l'Universo sta accelerando!**



A sinistra immagini di Supernovae Ia dallo Hubble Space Telescope
A destra l'espansione dell'Universo nel tempo (fonte: [NASA/ESA](#) e A. Feild, [STScI](#))

7. gli ingredienti dell'Universo

Tutta la materia che vediamo è fatta di atomi, i fisici spiegano la materia e le forze che si osservano con il cosiddetto **modello standard**, che prevede quattro interazioni fondamentali e una serie di particelle elementari.

La radiazione e la materia ordinaria

Gli ingredienti dell'Universo che possiamo osservare direttamente sono:

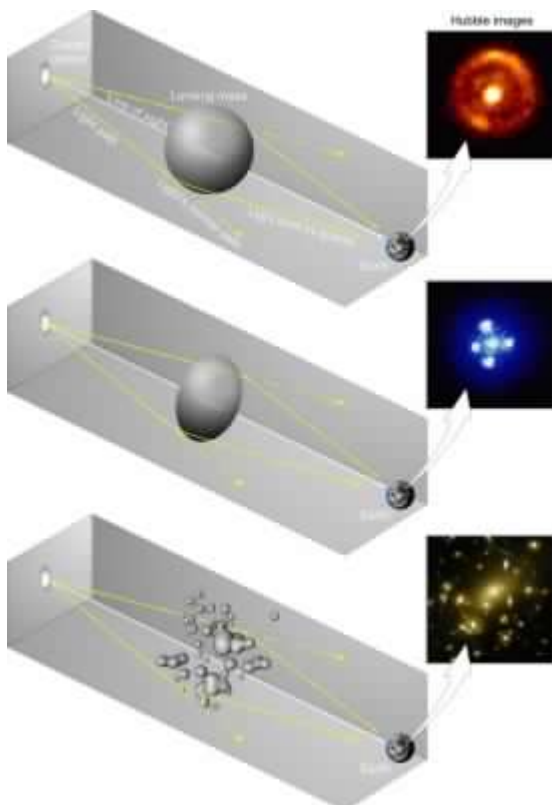
- La **radiazione**, composta di particelle come i fotoni e i neutrini con massa nulla o pressoché nulla. Queste particelle si muovono a velocità relativistiche, ovvero prossime o uguali alla velocità della luce, e come abbiamo visto per la radiazione di fondo, subiscono una perdita di energia dovuta al *redshift cosmologico* a causa dell'espansione dell'Universo.
- La cosiddetta **materia ordinaria**, presente nelle stelle, buchi neri e gas interstellare e costituita principalmente da protoni, neutroni ed elettroni. Un problema emerso recentemente è che studiando il moto delle galassie e degli ammassi di galassie si è scoperto che la massa visibile di stelle, gas e polveri è decisamente inferiore (non più del 20%) rispetto alla massa effettivamente presente, rilevata grazie agli effetti gravitazionali.



la Galassia M31 (fonte: Robert Gendler)

Esiste un altro tipo di materia?

Come abbiamo visto lo studio della velocità di rotazione di galassie e ammassi di galassie prevede la presenza di materia diversa dalla materia ordinaria. La presenza di materia non visibile è confermata dagli effetti di lente gravitazionale ed è prevista dallo studio delle fluttuazioni di temperatura della radiazione di fondo rilevata dal WMAP, visto che per spiegare l'universo piatto è necessaria una materia diversa dalla materia barionica.



Alcuni tipi di lenti gravitazionali osservate
(fonte: [European Space Agency](#))

Questa materia sconosciuta viene chiamata **materia oscura**, deve essere debolmente interagente e non dovrebbe essere mai stata in equilibrio termodinamico con le altre particelle. Per ora i principali candidati al ruolo di materia oscura sono:

- i **MACHOs** (MASSive Compact Halo Objects), oggetti che non emettono radiazioni significative come nane brune e oggetti simili
- i **buchi neri** supermassicci
- le cosiddette **WIMPS** (Weakly Interacting Massive Particles), ipotetiche particelle elementari subatomiche prodotte dopo il Big Bang e mai direttamente osservate in laboratorio; sono particelle pesanti e poco energetiche che interagiscono debolmente con la materia barionica.

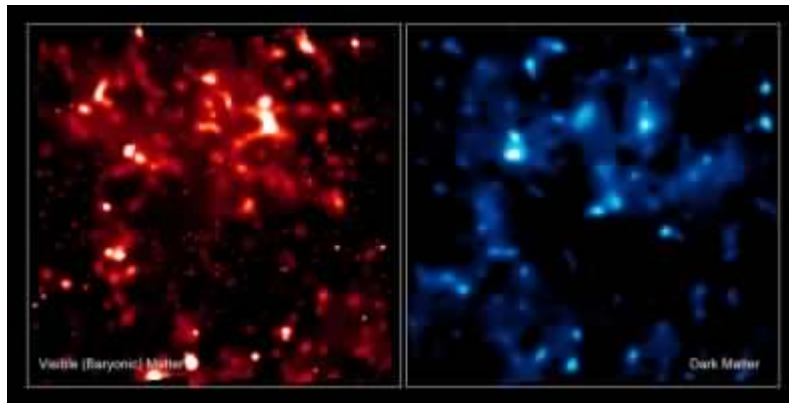
L'unico modo di vedere la materia oscura è attraverso gli effetti gravitazionali e il metodo più promettente per tracciarne la distribuzione nello spazio è quello delle cosiddette lenti gravitazionali.

L'effetto di **lente gravitazionale** era stato previsto da Einstein. Poiché la massa distorce la geometria dello spazio, corpi massicci interposti tra la Terra e un oggetto più lontano possono deviare

la radiazione elettromagnetica, distorcendo come una lente l'immagine dell'oggetto stesso che perviene fino a noi. Questo effetto è stato misurato per la prima volta durante una eclissi solare, e sono stati osservati numerosi esempi di lente gravitazionale

La materia oscura e le strutture cosmiche

Si pensa che la materia oscura sia la responsabile della formazione delle **strutture cosmiche a grande scala**, che per la teoria del Big Bang non si sarebbero potute formare in così poco tempo con la sola materia ordinaria. Infatti la radiazione in equilibrio con la materia barionica non avrebbe permesso alle fluttuazioni di crescere, mentre la materia oscura, non interagendo con i fotoni, avrebbe permesso alle fluttuazioni di temperatura e densità primordiali di crescere a partire dal periodo di equivalenza. In questo modo si sarebbero formate rilevanti strutture di materia oscura, alle quali in seguito si sarebbe aggregata gravitazionalmente la materia ordinaria per formare le galassie e gli ammassi di galassie che vediamo nel nostro Universo.



Comparazione tra la materia ordinaria (in rosso) e la struttura a larga scala della materia oscura (in blu)
fonte: [NASA](#), [ESA](#) and R. Massey (California Institute of Technology)

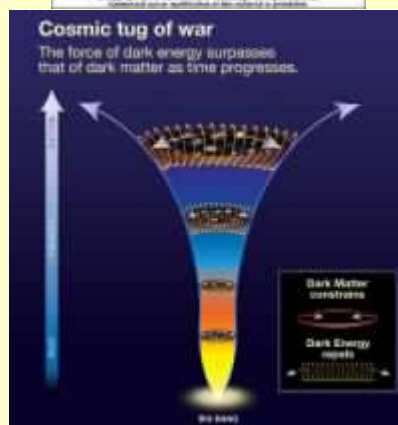
Manca ancora qualcosa?

Lo studio delle fluttuazioni della radiazione di fondo ha mostrato che per avere un Universo piatto la densità di materia deve essere uguale alla densità critica, ma la densità di materia (o di energia) misurata, anche considerando la materia oscura, non è sufficiente. Inoltre abbiamo visto che dallo studio delle Supernovae la l'espansione dell'Universo appare accelerata. L'attrazione gravitazionale della materia rallenta l'espansione, ma per assurdo anche un Universo senza materia non riesce a spiegare la loro minore luminosità apparente. Quindi se l'espansione dell'universo è accelerata occorre trovare qualcosa che abbia un curioso effetto anti-gravitazionale!

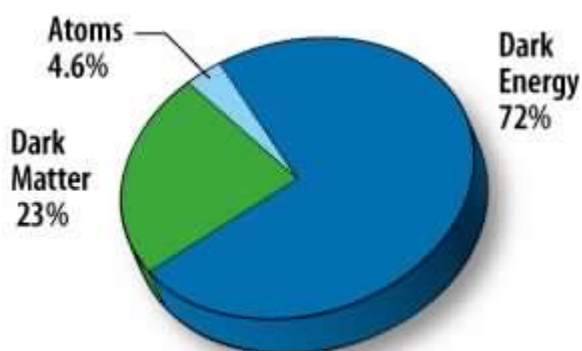
LA MISTERIOSA ENERGIA OSCURA

La spiegazione che è stata proposta è che per spiegare la geometria piatta dell'Universo e l'espansione accelerata osservata è che deve esistere qualcosa, chiamato **energia oscura**, che sia uniformemente diffusa in tutto l'Universo, corrisponda ai 3/4 della densità di energia del cosmo e che una sorgente di antigravità.

Cosa può essere l'energia oscura? Qualcuno propone che sia una strana forma di materia che può causare accelerazione nell'espansione del cosmo, altri la giudicano come una proprietà del vuoto, una specie di "densità di energia del vuoto", residuo del vuoto primordiale, che genera una pressione negativa... ma la cosa più curiosa è che i suoi effetti anti-gravitazionali sono simili alla deprecata **costante cosmologica** di Einstein, che dopo anni di esilio e di discredito si prende la sua rivincita rientrando dalla finestra



a sinistra una immagine di A.Einstein in bicicletta
a destra il "tiro alla fune" tra materia ed energia oscura che provocherebbe l'espansione rallentata o accelerata dell'Universo (fonte: [NASA/ESA](#) e A. Feild, [STScI](#))



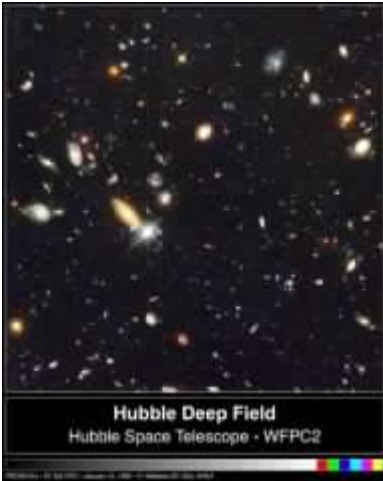
Al momento il modello del Big Bang caldo integrato con la presenza di Materia oscura fredda è considerato un modello standard, e quindi si pensa che la composizione dell'Universo in percentuale alla densità di energia dell'Universo sia la seguente:

- **radiazione** (con un contributo poco rilevante alla densità)
- **materia barionica ordinaria** (4.6% della densità)
- **materia oscura fredda** (23% della densità)
- **energia oscura** (72% della densità)

Ci sono naturalmente spiegazioni alternative che non richiedono la presenza di materia oscura ed energia oscura. Infatti la dimostrazione della presenza di materia oscura parte dall'ipotesi di validità della gravità di Newton e della relatività generale, ma ci sono teorie come la MOND (MOdified Newtonian Dynamics) che modificano la dinamica di Newton introducendo un termine che diventa importante per accelerazioni molto piccole. Ma questa teoria è molto complicata e non si applica bene sugli ammassi di galassie, quindi come accade sempre nella scienza aspettiamo gli sviluppi, le osservazioni e le teorie future che sicuramente non mancheranno.

8. l'età e il destino dell'Universo

Gli astronomi stimano l'età dei universo in due modi:



- 1. cercando le stelle più vecchie**
Il tempo di vita di una stella dipende dalla sua massa: una stella come il Sole brucia il suo combustibile per circa 9 miliardi di anni, una stella di massa doppia vivrà solo 800 milioni di anni, una stella con metà massa rispetto al Sole avrà combustibile per 20 miliardi di anni. I più antichi ammassi globulari contengono solo stelle inferiori a 0,7 masse solari, quindi hanno un'età stimabile tra 11 e 18 miliardi di anni (l'incertezza è dovuta a incertezze sulla distanza e su dettagli dell'evoluzione stellare).
- 2. misurando il tasso di espansione dell'Universo**
L'età dell'Universo si misura dalla singolarità iniziale, l'istante detto Big Bang, e dipende da come è variato il tasso di espansione, che a sua volta dipende dalla densità di materia e dalla composizione del cosmo. Per esempio se la gravità rallenta l'espansione dell'Universo, questo si espandeva più in fretta nel passato e per raggiungere le dimensioni attuali è bastato un tempo minore, quindi maggiore è la densità dell'Universo, minore è l'età dell'Universo.

QUANTI ANNI HA L'UNIVERSO?

L'età dipende dalla costante di Hubble, dalla geometria e dalla materia presente nell'Universo.

La **costante di Hubble** ha le dimensioni dell'inverso di un tempo (infatti è misurata in $\text{km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, ma km e Mpc hanno entrambe la dimensione di lunghezza [L] e si elidono), quindi determina le dimensioni spaziali e temporali dell'Universo. Se la velocità di espansione è costante il **tempo di Hubble** vale $t_0 = 1/H_0$ se la densità di materia è molto bassa ($\Omega_0 \ll 1$) e vale $2/3H_0$ se l'universo piatto con molta materia ($\Omega_0 = 1$).

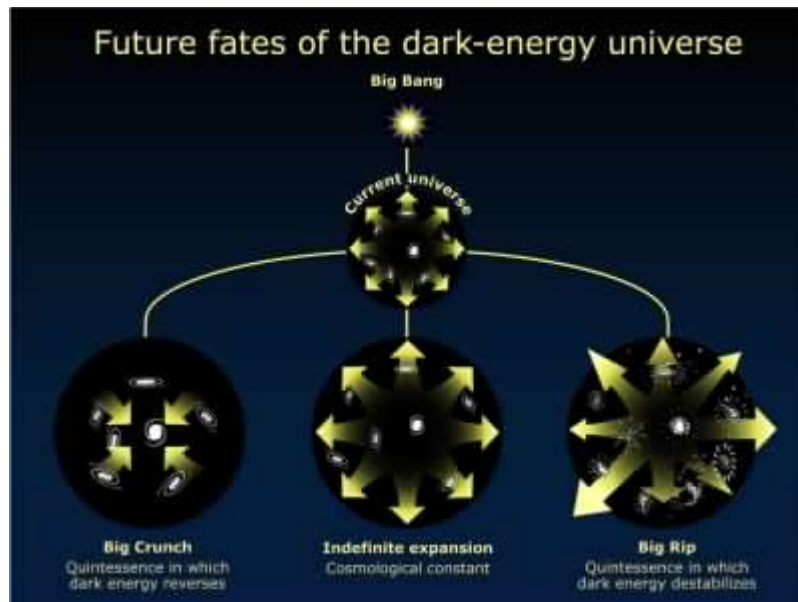
- Se la geometria è piatta, la misura cosmologica della costante di Hubble viene stimata tra 66 e $82 \text{ km s}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$, quindi l'età viene stimata tra i 12 e i 14 miliardi di anni, quindi è coerente con i dati delle stelle più vecchie degli ammassi globulari.
- Dalla analisi delle fluttuazioni della radiazione di fondo misurata da WMAP nel caso di un universo piatto si è ottenuto il valore oggi accettato di **$13.7 \pm 0,13$ miliardi di anni**



autore: Vittorio Spinsanti

Quale destino per l'Universo?

Il destino finale del cosmo dipende dalla densità di materia e dal braccio di ferro tra materia ed energia oscura. A seconda della geometria dell'Universo e degli effetti gravitazionali e anti-gravitazionali dei suoi componenti di avrà un collasso (**big crunch**), una espansione costante e indefinita o un'espansione talmente accelerata da essere lacerante (**big rip**).



possibile destino dell'Universo (fonte: [NASA/ESA](#) and A. Riess, [STScI](#))

9. una breve storia dell'Universo

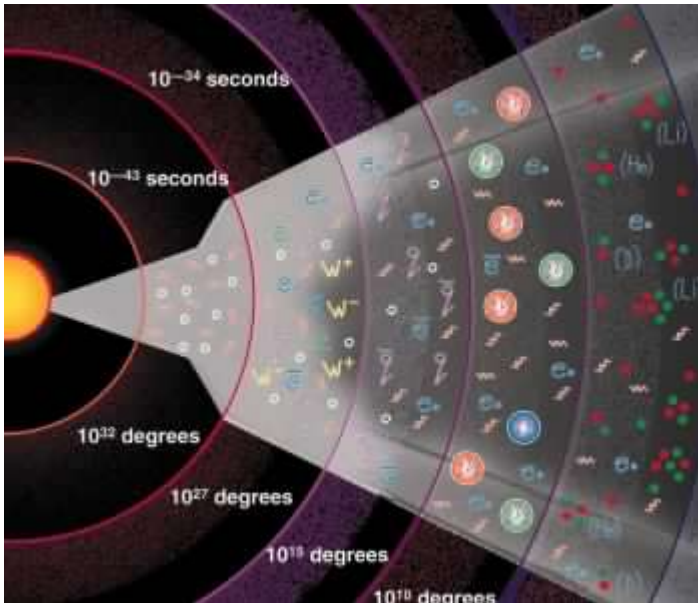
Partiamo dall'inizio?

La teoria del Big Bang descrive l'evoluzione dell'Universo, non parla né dell'inizio né di quello che esisteva prima del Big Bang. Il modello non può dire nulla su ciò che ha dato luogo al Big Bang, anche perché avvicinandoci alla singolarità iniziale la densità, la temperatura e la pressione salgono a livelli infiniti, tanto che nel tempo che va dall'istante iniziale al **tempo di Planck** ($5,391 \cdot 10^{-44}$ s) non valgono più le leggi fisiche conosciute e si suppone che le quattro forze fondamentali fossero unificate in una sola (G.U.T.)



I primi tre minuti dell'Universo

Poiché l'energia termica era molto maggiore della massa a riposo di quasi tutte le particelle, nei primi istanti l'Universo era dominato da particelle ultrarelativistiche, che si comportano a tutti gli effetti come radiazione. Nei primi tre minuti si susseguono diversi momenti fondamentali per l'evoluzione dell'Universo:



- Alla fine dell'epoca GUT dovrebbe esserci stata un'accelerazione rapida (**inflazione**) che spiega la piattezza dell'Universo, il cui raggio è passato in 10^{-33} secondi da 10^{-26} metri a 10 centimetri.
- Dopo 10^{-10} secondi finisce l'**epoca elettrodebole**: le quattro forze fondamentali sono separate e il plasma è in equilibrio termodinamico, stato caratterizzato dalla Temperatura.
- Dopo 10^{-4} secondi i quark liberi formano neutroni e protoni e quindi inizia l'**epoca degli adroni**; nel primo secondo il raggio dell'Universo raggiunge la dimensione di qualche anno-luce.
- Dopo 1 secondo dal Big Bang avviene il **disaccoppiamento dei neutrini**, la radiazione fossile che si propaga nell'Universo contiene per ogni specie 115 neutrini fossili per cm^3 ; i nuclei non si possono ancora formare finché i fotoni sono troppo energetici
- Quando la temperatura scende sotto i 10^{10} K neutroni e protoni si combinano a formare nuclei leggeri. Il processo detto **nucleosintesi** dura all'incirca tre minuti.

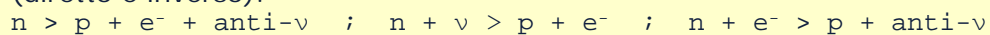
I PRIMI TRE MINUTI DELL'UNIVERSO IN DETTAGLIO

- Non possiamo partire dal cosiddetto Big Bang ($t = 0$) perché l'Universo con densità e temperatura infinite non può essere descritto dalle leggi fisiche note. Infatti se l'energia per particella è maggiore di $1,22 \cdot 10^{19}$ GeV si ha l'**epoca della gravità quantistica** e dell'unificazione di tutte le forze fondamentali, periodo che termina al tempo di Planck = $5,39 \cdot 10^{-44}$ s.
- Nel periodo successivo le tre forze fondamentali (elettromagnetica, nucleare forte e debole) sono unificate nelle **Teorie della Grande Unificazione** (GUT = Grand Unification Theories). A quelle energie le particelle avevano simmetrie maggiori rispetto alle particelle note oggi (es. supersimmetria tra bosoni e fermioni).
- Ad energie più basse (intorno a $E = 10^{16}$ GeV, $T = 10^{29}$ K, circa 10^{-38} s dopo il Big Bang) inizia l'**epoca delle transizioni di fase**, periodo che vede la rottura delle simmetrie. Ad ogni rottura spontanea di simmetria corrisponde una transizione di fase, in cui la materia si comporta in modo diverso prima e dopo la rottura, e alla fine ci troviamo con particelle diverse. Durante queste transizioni di fase si creano difetti topologici, che possono immagazzinare energia.
- Alle energie di 10^{15} GeV ($T = 10^{28}$ K, circa 10^{-36} s dopo il Big Bang) qualcosa ha rotto la simmetria tra materia ed antimateria (**bariogenesi**), generando un piccolo eccesso di materia che ha poi permesso a parte della materia (quark ed elettroni) di sopravvivere. L'annichilazione delle particelle primordiali (ne resta 1 su 10^9) implica una grandissima produzione di entropia nell'Universo primordiale e vengono emessi fotoni in abbondanza.
- Alle energie di 10^{14} GeV ($t = 10^{27}$ K, circa 10^{-35} s dopo il Big Bang) tutte le simmetrie delle GUT sono rotte. Finisce l'unificazione tra forza nucleare forte e forza elettrodebole, quark e leptoni che prima di trasformavano tra

loro diventano particelle distinte. Ora troviamo tutte le particelle: quark e leptoni (con le loro antiparticelle), gluoni, bosoni dell'interazione elettrodebole, bosoni di Higgs e forse particelle ignote di materia oscura.

- La fine dell'epoca della GUT sembra un buon momento per una fase di **inflazione**, che diluisce la curvatura e qualsiasi tipo di difetto topologico presente. L'inflazione è una accelerazione rapida (in 10^{-33} secondi il raggio passa $R = 10^{-26}$ m a 10 cm.) che rende l'Universo piatto e isotropo, riducendo la densità dei monopoli magnetici. Nel corso dell'espansione accelerata le fluttuazioni quantistiche dovute al principio di indeterminazione di Heisenberg possono diventare fluttuazioni del potenziale gravitazionale.
- Alle energie tra 10^{14} e 100 GeV l'Universo è un plasma in equilibrio termodinamico, stato caratterizzato dalla temperatura. È l'epoca del **dominio dei quark**, che risentono delle forze gravitazionale, nucleare forte ed elettrodebole.
- A 100 GeV ($T = 10^{15}$ K, circa 10^{-10} s dopo il Big Bang) si rompe la forza elettrodebole, si differenziano forza debole e forza elettromagnetica. In questo momento l'Universo contiene quark, leptoni, fotoni, neutrini e forse materia oscura.
- Alle energie di 300 MeV ($T = 10^{12}$ K, circa 10^{-4} s dopo il Big Bang) avviene l'ultima transazione di fase, la **transizione quark-adroni** cioè la il confinamento dei quark in particelle adroniche, soprattutto pioni.
- Inizia quindi l'**epoca adronica**, in cui la massa-energia dell'Universo è dominata dai composti di quark. Si generano protoni e neutroni, che restano in equilibrio termodinamico con leptoni (elettroni e neutrini) e fotoni. Non si possono formare nuclei perché i fotoni sono troppo energetici.

Le reazioni che permettono questo equilibrio sono quelle del decadimento β (diretto e inverso):



- A energie di 130 MeV (circa $5 \cdot 10^{-3}$ s dopo il Big Bang) avviene l'annichilazione di pioni e antipioni, a parte la piccola asimmetria causata dalla bariogenesi. Inizia l'**epoca leptonica**, in cui la massa-energia è dominata dalle coppie elettroni-positroni. In questo periodo c'è abbondanza delle particelle con piccola massa (elettroni, positroni, neutrini, antineutrini e fotoni), mentre protoni e neutroni hanno la stessa abbondanza, circa un milionesimo rispetto ai leptoni.
- Ad 1 MeV (0,7 s) si disaccoppiano i **neutrini elettronici**, fino ad allora in equilibrio termodinamico con la materia: l'energia media dei neutrini cala e diminuisce la probabilità di interagire con la materia. I neutrini liberi costituiscono una radiazione di fondo cosmico analoga a quella dei fotoni ma di temperatura più bassa (2 K, la radiazione fossile contiene per ogni specie 115 neutrini fossili per cm^3). Quando i neutrini si disaccoppiano i decadimenti β inversi diventano poco probabili, quindi il rapporto tra neutroni e protoni si stabilizza al valore 1/5. I neutroni hanno un lungo tempo di decadimento, e prima di decadere si combineranno con i protoni.
- A 0,5 MeV (circa 4 s dopo il Big Bang) finisce l'era leptonica. I fotoni non hanno energia sufficiente per produrre coppie elettrone-positrone, avviene l'**annichilazione di elettroni e positroni**, e resta un residuo di elettroni uguale al numero dei protoni. L'energia prodotta nell'annichilazione riscalda i fotoni del 35% ma non i neutrini, l'Universo è dominato dai fotoni fino all'equivalenza.
- Nei primi tre minuti dell'Universo (quando $T < 10^{10}$ K) avviene la **nucleosintesi primordiale**, ovvero si generano nuclei leggeri prima che temperatura e densità rendessero ulteriori fusioni poco probabili. In quel periodo si sono formati nuclei di ^2D ^3He ^4He e ^7Li , la cui abbondanza finale dipende sensibilmente dal rapporto $\eta = \Omega_{\text{B}} h^2$ tra barioni e fotoni. Se η è alto molti nuclei ^2D si fondono in nuclei ^4He , e stime di abbondanza in ambienti chimicamente poco evoluti danno $\text{D}/\text{H} = 2-4 \cdot 10^{-5}$ da cui $\eta = 4-7 \cdot 10^{-10}$. Utilizzando ^4He ed elementi più pesanti si ottiene $\Omega_{\text{B}} h^2 = 0,023$ (in

accordo con quella ottenuta dalle fluttuazioni CMB). Per $h = 0,7$ vale $\Omega_{\text{B}h^2} = 0,04$ (meno del 15% per cento di materia barionica, il resto è materia oscura non barionica). L'abbondanza di ^4He (24%) dipende anche dal numero di specie dei neutrini.

Il processo dura pochi minuti ma non si formano atomi perché i fotoni sono troppo energetici. Componenti principali dell'Universo sono fotoni, neutrini e antineutrini, e per ogni miliardo di fotoni ci sono un elettrone e un protone.

Dai primi tre minuti dopo il Big Bang ad oggi

Concludiamo il discorso con una specie di viaggio nella macchina del tempo, e per semplificare le cose facciamo finta che il momento iniziale (dal Big Bang alla nucleosintesi) sia avvenuto alla mezzanotte del 1 gennaio e che noi qui ci troviamo alla mezzanotte del 31 dicembre.

- 1 gennaio, a mezzanotte in punto

Alla fine dei suoi primi tre minuti di vita, l'Universo è pieno di protoni, neutroni, nuclei leggeri, elettroni, fotoni, neutrini e materia oscura. La componente dominante è quella della **radiazione**, principalmente fotoni e dei neutrini.

- 1 gennaio, 10 s dopo la mezzanotte

Dopo 40.000 anni la radiazione si è affievolita (**equivalenza**). Termina l'epoca della radiazione (onde e particelle con energie cinetiche molto superiori all'energia connessa con la massa) e inizia l'epoca del **dominio della materia** (energia connessa con la massa, $E = mc^2$). L'Universo è un plasma di elettroni e protoni, simile allo stato dentro una stella, ma a causa dei fotoni troppo energetici non si possono formare atomi stabili.

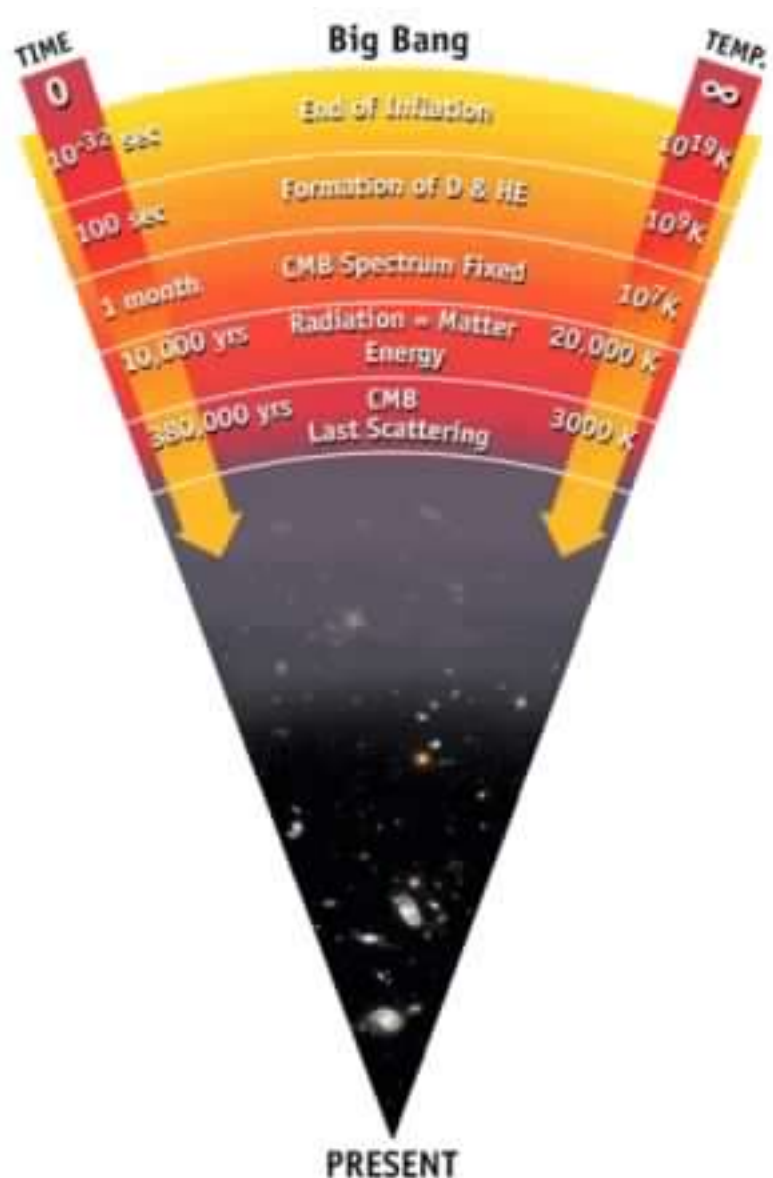
- 1 gennaio, 15 minuti dopo la mezzanotte

A 380.000 anni di vita dell'Universo il plasma si raffredda sotto i 3000 K, i

fotoni sono meno energetici quindi i protoni e i nuclei di elio possono formare gli atomi di idrogeno ed elio (**ricombinazione atomica**) catturando gli elettroni liberi. Senza elettroni liberi i fotoni possono viaggiare indisturbati (**disaccoppiamento dei fotoni**) e l'Universo trasparente alla radiazione elettromagnetica cessa di essere opaco. La **radiazione cosmica di fondo** (che contiene circa 420 fotoni fossili per cm^3) si propaga in tutto l'Universo ed è l'unica luce presente di questa lunga **età oscura**.

- 6 gennaio

Dopo 200 milioni di anni termina l'età oscura e nascono i primi oggetti capaci di ionizzare il gas.



- **11 gennaio**
Circa 400 milioni di anni dopo il Big Bang iniziano a formarsi i quasar e le prime galassie intorno alla materia oscura fredda che si era disaccoppiata precedentemente. Nelle reazioni termonucleari delle stelle si brucia idrogeno che si trasforma in elio e in elementi pesanti fino al ferro, e nelle esplosioni delle *supernovae* si sintetizzano gli elementi pesanti dell'Universo.
- **31 agosto**
circa 4,6 miliardi di anni fa dalla contrazione gravitazionale di una nebulosa nascono il Sole e i pianeti con la Terra in cui viviamo.
- **settembre**
Quando l'età dell'Universo è intorno ai 10 miliardi di anni inizia l'epoca del **dominio del vuoto**, in cui l'energia oscura provoca l'espansione accelerata dell'Universo.
- **29 settembre**
3,5 miliardi di anni fa compaiono sulla Terra i primi batteri.
- **18 dicembre**
500 milioni di anni fa (nel periodo detto Cambriano) la Terra è popolata da animali e piante antenati degli esseri viventi odierni.
- **30 dicembre**
65 milioni di anni fa in seguito ad eventi catastrofici probabilmente derivati dalla caduta di un meteorite si estinguono i dinosauri.
- **31 dicembre, ore 21:45**
3,5 milioni di anni fa è l'età di Lucy, un *Australopithecus afarensis*.
- **31 dicembre, ore 23:55**
150.000 anni fa compare in Africa l'*homo Sapiens*.

Appendice

il Modello Standard

I fisici con il cosiddetto Modello Standard spiegano tutti i tipi di materia osservati con un piccolo numero di **particelle fondamentali** e riportano tutte le forze osservate a quattro **interazioni fondamentali**, a ciascuna delle quali sono associate particelle mediatrici specifiche. Le interazioni tra le particelle fondamentali di materia avvengono tramite lo scambio di particelle mediatrici di forza. Il Modello con le sue previsioni è stato verificato dall'osservazione, anche se la forza gravitazionale non è ancora completamente compresa nell'ambito della teoria.

LE PARTICELLE FONDAMENTALI DELLA MATERIA

La materia che ci circonda è composta dagli atomi, costituiti da tre particelle (protoni, neutroni ed elettroni). Secondo il modello Standard le particelle fondamentali si dividono in due gruppi principali (quark e leptoni) divisi in tre famiglie. Ogni particella è accompagnata da una antiparticella.

- Ci sono sei **LEPTONI**: l'**elettrone**, il **muone** e il **tau** hanno carica elettrica -1, ad ognuna di queste è associato un **neutrino** di massa quasi nulla e privo di carica elettrica, che interagisce solo grazie alla forza debole.
- I **QUARK** non sono mai osservati da soli, ma sono uniti in triplette nei **barioni** (es. protoni e neutroni) e in coppie nei **mesoni**. Ci sono sei sapori di quark: up, charm e top di carica $-2/3$, down, strange e bottom di carica $1/3$.

La prima famiglia contiene i mattoni fondamentali della materia stabile, ovvero i due quark **up** e **down** (costituenti del protone e dei neutroni), l'**elettrone** e il neutrino elettronico. Le altre due famiglie contengono particelle più pesanti e instabili.

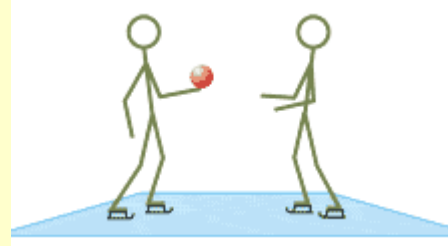


LE QUATTRO INTERAZIONI FONDAMENTALI

I fisici riportano tutte le forze osservate in natura a quattro interazioni fondamentali. Ogni interazione è definita dal raggio d'azione (la distanza massima alla quale esercita) e dall'intensità.

- **INTERAZIONE ELETTROMAGNETICA**, responsabile della struttura atomica e molecolare della materia, che si manifesta tra particelle dotate di carica elettrica respingendo cariche uguali e attraendo cariche opposte. Il raggio d'azione è infinito e l'intensità, 100 volte inferiore rispetto alla forza forte, decresce con la distanza.
- **INTERAZIONE FORTE**, responsabile della coesione dei nuclei atomici, che si manifesta tra quark, particelle dotate di carica di colore. Il raggio di azione è molto piccolo (10^{-15} m) e l'intensità aumenta con la distanza.
- **INTERAZIONE DEBOLE**, responsabile della trasformazione della materia nei decadimenti di quark e leptoni. Il raggio d'azione è estremamente piccolo (i processi di decadimento sono di solito eventi molto rari) e l'intensità è 10^{-13} rispetto alla forza forte.
- **INTERAZIONE GRAVITAZIONALE**, che si manifesta tra tutte le particelle con un raggio d'azione infinito. L'intensità decresce con la distanza e la forza è sempre attrattiva e quindi, pure essendo la più debole delle forze (10^{38} volte inferiore rispetto alla forza elettromagnetica), ha rilevanza su grandi scale.

particelle che si attraggono...



... e particelle che si respingono scambiandosi i mediatori

Le particelle mediatrici di forza

A ciascuna interazione sono associate particelle mediatrici di forza specifiche, dette **bosoni intermedi** o quanti del campo di interazione. Queste particelle trasportano dell'energia della forza, e vengono emesse e riassorbite dalle particelle che interagiscono.

- il mediatore della forza elettromagnetica è il **fotone**, che ha massa nulla.
- il mediatore della forza forte è il **gluone**, che tiene uniti i quark.
- i mediatori della forza debole sono i **bosoni W^+ W^-** e il **bosone Z**, tutti molto pesanti (85 e 97 volte la massa del protone).
- il mediatore della forza gravitazionale (gravitone) non è stato ancora sperimentalmente osservato.