

Le ere dell'Universo e la nucleosintesi primordiale

di Daniele Gasparri

In questo articolo cercherò di analizzare brevemente le ere dell'Universo, a partire dall'istante della sua formazione fino al momento attuale, cercando di dare giustificazione agli elementi e alle strutture attualmente visibili

Tutto iniziò con il Big Bang, una specie di esplosione, meglio un evento iniziale con il quale ha avuto inizio il tutto: lo spazio, il tempo, la materia, la radiazione: tutto l'Universo ora esistente. L'istante zero è un punto con densità e temperatura infinite, una singolarità, cioè un qualcosa che non è possibile da spiegare con le leggi fisiche che conosciamo. Questa singolarità conteneva il TUTTO, cioè tutta la materia, lo spazio, la radiazione che oggi possiamo osservare e misurare.

E' bene chiarire cose si identifica con l'evento Big Bang e cosa non deve essere invece frainteso:

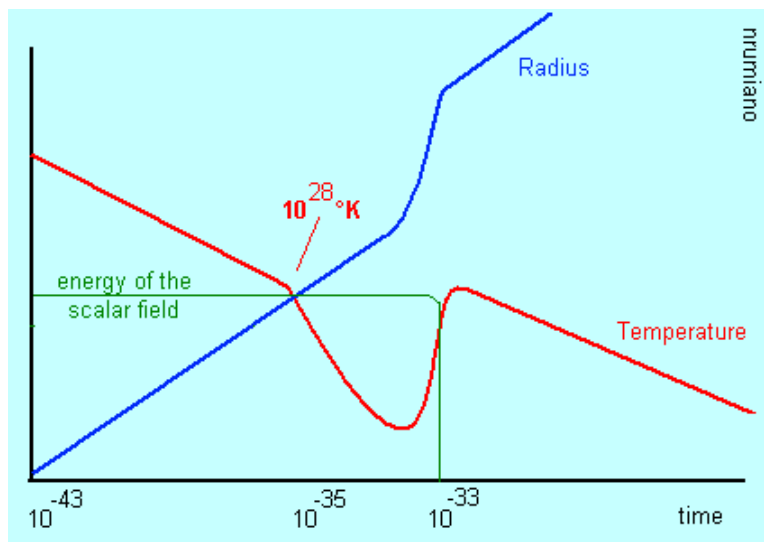
- Il Big Bang non è un'esplosione identificata nello spazio, piuttosto l'esplosione e la creazione dello spazio, quindi anche del tempo. Non è possibile collocarlo in un punto perché tutto era concentrato in quel punto, sia spazialmente che temporalmente
- La velocità di recessione delle galassie e della radiazione cosmica di fondo produce uno spostamento verso il rosso di tutta la radiazione elettromagnetica. Poiché l'energia della radiazione è proporzionale alla frequenza o, in alternativa, inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda, qualsiasi radiazione spostata verso il rosso possiede un'energia minore, o in alternativa, si raffredda. L'allontanamento delle galassie è causato dall'espansione dell'Universo, cioè dalla creazione di nuovo spazio e l'effetto, benché sia lo stesso, non è da confondere con il redshift causato dall'effetto doppler. Quest'ultimo è causato dal moto relativo delle sorgenti, il redshift cosmologico dalla creazione di nuovo spazio. Questo porta ad un'altra importante conseguenza:
- La velocità di recessione di sue galassie può essere anche maggiore della velocità della luce. Poiché non sono implicati moti di oggetti massicci come stelle e/o particelle in generale, ma la velocità di recessione è causata dall'espansione dell'Universo stesso, non valgono i limiti imposti dalla relatività ristretta per la velocità con la quale l'Universo si può espandere.
- L'espansione dell'Universo riguarda ogni punto dello stesso, solamente che è misurabile su scale molto grandi, cosiddette cosmologiche. E' impossibile misurare l'espansione del nostro corpo o della Terra o dell'intero sistema solare. Gli effetti sono visibili a partire da scale di qualche centinaio di milioni di anni luce e sono tanto maggiori quanto maggiori sono le distanze alle quali si osserva. L'analogia con un palloncino che si gonfia è perfettamente calzante: due punti vicini si espandono con velocità minori rispetto a due punti molto lontani.
- Sulla base di considerazioni fisiche, quantistiche e termodinamiche è possibile risalire a ritroso fino ai primissimi istanti di vita dell'Universo, ricostruire ere che non possiamo osservare direttamente (ad esempio tutte quelle antecedenti il disaccoppiamento materia-radiazione, poiché l'Universo a quei tempi era completamente opaco alla sua stessa radiazione). Le leggi fisiche come le conosciamo, possono dirci con ottima precisione come si comportava e come è evoluto l'Universo a partire dal cosiddetto tempo di Planck, che equivale a circa 10^{-43} s dopo il Big Bang. Possiamo arrivare effettivamente estremamente vicini all'istante iniziale, ma non lo potremmo mai raggiungere. Attualmente, per cercare di spiegare gli istanti antecedenti, si ricorre alla cosiddetta teoria delle stringhe, la quale però, dopo l'entusiasmo iniziale, non ha trovato riscontri nella realtà e sempre adesso in una fase di stallo.

Fatte queste premesse, siamo in grado di analizzare le ere principali del nostro Universo, le tappe fondamentali che lo hanno portato ad essere quello che oggi noti tutti osserviamo, secondo il modello ormai più accettato e che dispone di maggiori prove osservative, il cosiddetto modello

standard, opportunamente modificato con l'introduzione dell'inflazione, della materia oscura e della costante cosmologica Λ (denominato modello Lambda-CMD, Cold Dark Matter).

Spesso troverete una descrizione del cosiddetto modello standard, che ormai sembra essere stato superato. Questo modello è quello che attualmente sembra essere maggiormente adatto per i dati in nostro possesso. In realtà, le ere cosmiche che stiamo per analizzare differiscono solamente in modo marginale rispetto al più datato modello standard, prevedendo solamente (si fa per dire!) l'introduzione dell'inflazione, dell'espansione accelerata in ere cosmiche recenti e la materia oscura, fondamentale per lo sviluppo delle strutture (argomento, questo, che tratteremo solo in modo marginale)

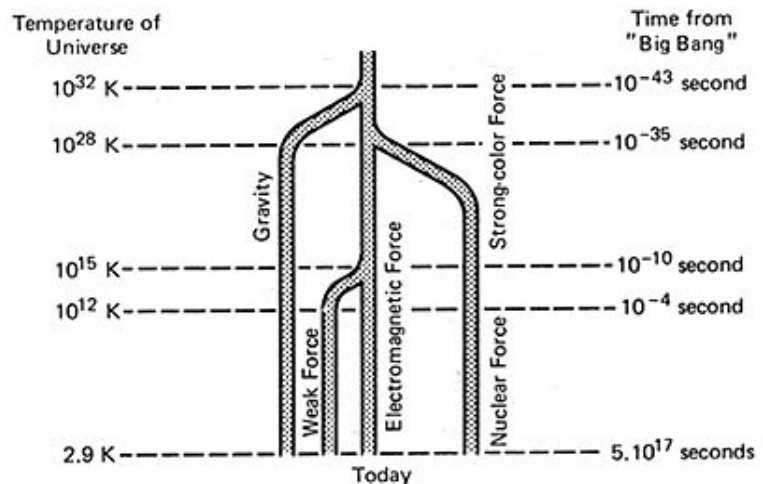
- 1) Tempo $t = 0$, temperatura $T = \infty$. Avviene il Big Bang. La singolarità iniziale “esplode”, si espande e crea lo spazio e il tempo. All'interno si trova radiazione e le 4 interazioni fondamentali, ma ancora nessuna particella
- 2) $t = 10^{-43} s$, $T = 10^{32} K$. Al tempo di Planck si suppone che la forza gravitazionale si separi dalle altre 3 che continuano ad essere unificate (cioè hanno la stessa intensità, stesso raggio, stesse proprietà). Il raggio dell'Universo è ancora sconosciuto. A partire da questo tempo possiamo conoscere con ragionevole certezza ogni sua fase
- 3) $t = 10^{-35} s$, $T = 10^{28} K$, raggio dell'Universo $R = 10^{-26} m$, denominata era dell'inflazione. Termina la grande unificazione. La forza forte si separa da quella elettromagnetica e debole che continuano ad essere unite (forza elettrodebole). Si creano le prime particelle elementari: quark leptoni e le relative antiparticelle. A questo istante si verifica il fenomeno dell'inflazione, cioè una iper-espansione dell'Universo in un tempo brevissimo. Sempre in questa era si forma il leggero eccesso di materia rispetto all'antimateria, un fatto fondamentale. Se materia ed antimateria fossero state presenti in modo perfettamente uguale (come lascerebbero intuire i fenomeni di produzione di coppie a partire da fotoni gamma) esse si sarebbero annichilate totalmente; l'Universo sarebbe stato un luogo permeato esclusivamente da radiazione e qualche sporadica e temporanea concentrazione di particelle e/o antiparticelle. A causa dell'inflazione, di cui si pensa la responsabile sia l'energia oscura, l'Universo in un intervallo di tempo di $10^{-34} s$ si espande da un raggio $R = 10^{-26} m$ a $R = 10m$, aumentando di dimensioni di un fattore almeno 10^{27} !
- 4) $t = 10^{-32} s$, $T = 10^{28} K$, $R = 10m$, l'Universo post-inflattivo ha una temperatura altissima, uguale rispetto alla fase precedente. Questo comportamento è accettato e giustificato dalla teoria dell'inflazione, che spiegheremo nei suoi punti salienti nelle prossime pagine. Continua la produzione di quark-antiquark,; tutte le forze sono separate tranne quella elettromagnetica e debole → elettrodebole



Andamento (approssimato) del raggio e della temperatura durante la fase dell'inflazione

- 5) $t = 10^{-9} s$, $T = 10^{15} K$,
 $R = 10^{12} m$, L'Universo ha già un raggio di un miliardo di chilometri e si sta raffreddando velocemente.

L'energia è sufficientemente bassa per separare anche la forza elettrodebole. Da questo momento in poi le 4 interazioni fondamentali seguiranno un cammino totalmente indipendente le une dalle altre



- 6) $t = 10^{-6} s$, $T = 10^{13} K$,
 $R = 10^{14} m$. L'Universo ha un raggio di 100 miliardi di Km

Storia evolutiva delle 4 interazioni fondamentali. L'ultima separazione, quella tra la forza elettromagnetica e debole, avvenne 1 miliardesimo di secondo dopo il Big Bang

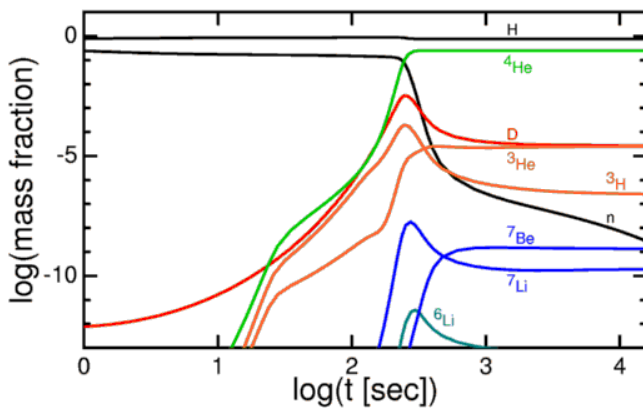
ed una temperatura di diecimila miliardi di gradi. Oltre alla radiazione sono presenti in abbondanza quark, costituenti principali degli adroni. L'energia termica finalmente diventa abbastanza bassa da consentire all'interazione forte di avere il sopravvento. I quark e gli antiquark si combinano tra loro a formare le prime particelle composite, gli adroni. Si formano, in particolare, i nucleoni, cioè i protoni e i neutroni e le relative antiparticelle. La grande maggioranza si annichilisce tra di loro, ma un'infinitesima abbondanza di materia fa sì che una piccola parte non si annichilisce, mentre tutta l'antimateria scompare. La differenza, in termini numerici è piccolissima: ogni miliardo di antiparticelle, vengono prodotte un miliardo ed 1 particelle (cioè, c'è 1 particella di materia in più ogni miliardo)

- 7) $t = 1s$, $T = 10^{10} K$, $R > 10^{14} m$. Disaccoppiamento dei neutrini. Data la densità e temperatura elevatissima, i neutrini, sebbene pochissimo interagenti con la materia ordinaria e con i fotoni, erano accoppiati, seguivano cioè la stessa storia evolutiva. In questo momento l'Universo diviene abbastanza rarefatto da consentire ai neutrini, presenti in grandissimo numero, di sfuggire e seguire una storia totalmente diversa, in modo del tutto analogo a quanto avverrà 300000 anni dopo con i fotoni. In effetti il fondo cosmico di neutrini è stato teorizzato da tutti i modelli di Big Bang, ma fino ad ora non è stato osservato direttamente, poiché queste particelle sono molto difficili da rilevare, soprattutto con una densità così esigua come quella di origine cosmologica. La temperatura dei neutrini, a causa dell'espansione dell'Universo, si dovrebbe attestare intorno ad $T \approx 1,95K$. Fino ad ora sono state trovati solo alcuni indizi indiretti. E' certo che se un giorno si riuscisse a costruire un telescopio a neutrini abbastanza sensibile, si potrebbe osservare direttamente il fondo cosmico e quindi risalire ad un tempo di 1 secondo dopo il Big Bang ed avere così un quadro diretto e prove concrete delle ipotesi fatte fino al disaccoppiamento materia-radiazione: una prospettiva davvero affascinante!

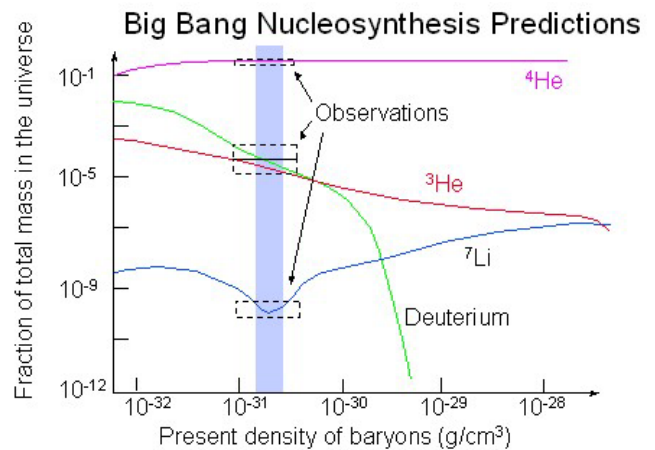
- 8) $t = 100s$, $T = 10^{10} K$, $R > 10^{15} m$. Era della nucleosintesi. Questo è un momento fondamentale per l'Universo ed è quello meglio conosciuto e totalmente indipendente da quanto successo in precedenza. La densità e la temperatura ricordano da vicino quella dell'interno delle stelle, nelle quali avvengono le reazioni nucleari. Proprio come un gigantesco nucleo stellare, a questo tempo l'Universo è sottoposto a reazioni di fusione nucleare che coinvolgono i protoni, che altro non sono che nuclei di idrogeno. In un tempo molto breve, circa 3 minuti, la composizione dell'Universo cambiò drasticamente. Il mare di protoni venne trasformato, grazie all'interazione con fotoni e neutroni, in una miscela composta per il 25% da nuclei di elio 4 (due neutroni e due protoni), l'1% di deuterio

(isotopo dell'idrogeno, contenente un protone ed un neutrone) e tracce di elementi più pesanti, come il litio.

La durata limitata di questa fase, che si concluse dopo 3 minuti, quando i livelli di temperatura e densità erano ormai insufficienti per innescare le reazioni di fusione nucleare, fu sufficiente per formare solamente elio e tracce di litio, berillio e deuterio, ma non elementi più pesanti. Questo fatto è di fondamentale importanza. Se le condizioni adatte fossero durate anche solo per 10 minuti, invece che 3, l'Universo si sarebbe riempito di elementi pesanti; quasi tutto l'idrogeno sarebbe scomparso e la stessa nascita delle stelle, galassie e la vita stessa sarebbe stata impossibile. La nucleosintesi primordiale è un altro successo della teoria del Big Bang. Nessun altro fenomeno è in grado di spiegare come mai nell'Universo esiste un'abbondanza del 74% di idrogeno e 25% Elio 4. Oggi sappiamo che l'unico ambiente nel quale si produce elio sono le stelle, ma neanche tutte le stelle dell'Universo sono in grado di produrre, nel corso di quasi 14 miliardi di anni, il 25% dell'Elio che si osserva. La teoria del Big Bang spiega e giustifica esattamente la presenza di Elio4 nell'abbondanza che oggi possiamo osservare: un successo che nessun'altra teoria è in grado di raggiungere.



Abbondanza degli elementi nell'Universo primordiale in funzione del tempo. Il numero di protoni si mantiene quasi costante, mentre i neutroni diminuiscono notevolmente, a causa della formazione dei nuclei di Elio mediante la catena protone-protone

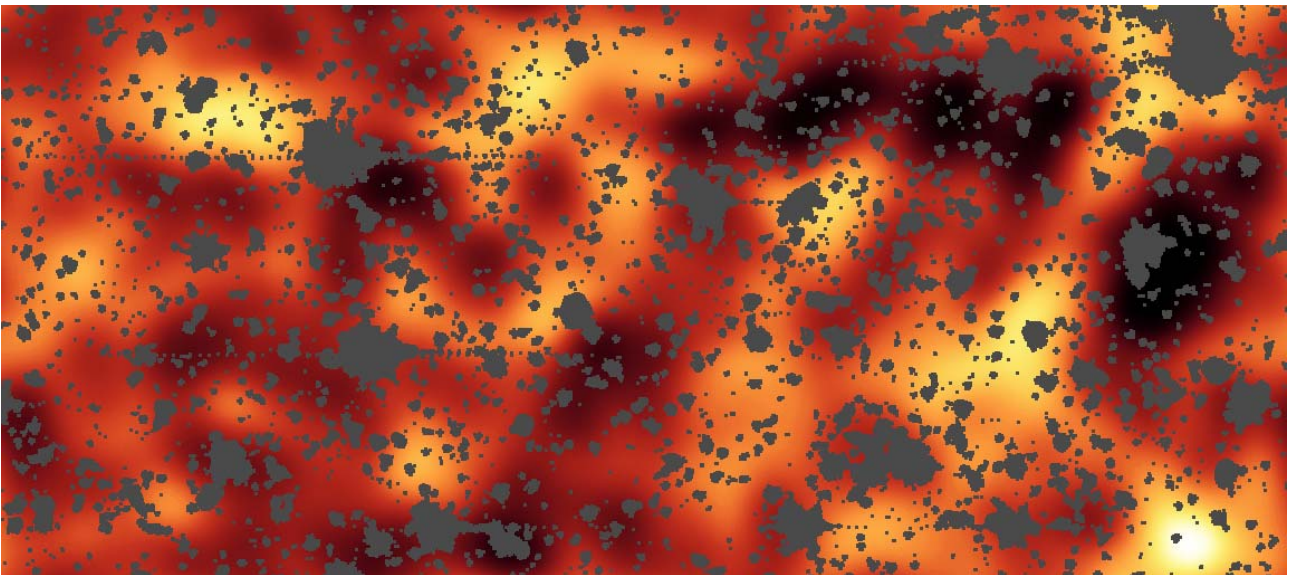


Le osservazioni delle attuali abbondanze degli elementi chimici sono in perfetto accordo con quello che la teoria della nucleosintesi primordiale prevede. Questa è un'ottima prova della correttezza del modello proposto.

Dopo questi 3 minuti nei quali si verificarono i processi di nucleosintesi primordiale, nell'Universo, almeno per 300000 anni non successe praticamente più nulla, almeno a livello della materia presente. Esso continuò naturalmente ad espandersi e raffreddarsi. La materia era ancora completamente ionizzata, cioè nello stato di plasma, tipico degli ambienti stellari, con composizione chimica quasi identica: un mare di elettroni, il 74% (della massa) di protoni, il 25% di nuclei di elio (dette anche particelle alpha), l'1% di deuterio e tracce di litio e berillio (sempre nuclei atomici). Le altre particelle viste in precedenza sono tutte instabili e possono prodursi solo sporadicamente attraverso le interazioni di elettroni e nucleoni. Protoni e soprattutto gli elettroni interagiscono continuamente con la radiazione presente, proprio come all'interno di una gigantesca stella. L'universo è ancora completamente opaco. La radiazione e la materia sono accoppiate, hanno cioè la stessa storia evolutiva, sono cioè in equilibrio. La proprietà dell'una, come la temperatura, si riscontrano anche nell'altra. Tutti i fotoni presenti non riescono a propagarsi indipendentemente nello spazio e a noi, osservatori attuali esterni, non ci giunge alcuna informazione diretta in merito a quegli istanti, fino al momento nel quale la temperatura scese abbastanza per permettere ai nuclei atomici di combinarsi con gli elettroni sparsi e dare vita ad una nuova era, nella quale il contributo della radiazione diventa trascurabile e la materia prende completamente il sopravvento

- 9) $t = 3 \cdot 10^5$ anni, $T = 3000K$, $R = 10^6$ anni luce. Era del disaccoppiamento. Quasi tutta la materia si trova nello stato neutro, composta da atomi. A questo punto la radiazione presente smette di interagire in modo continuo con la materia e riesce a propagarsi in ogni direzione. L'Universo diventa trasparente a se stesso: radiazione e materia da questo momento in poi seguiranno due strade completamente indipendenti. La radiazione cosmica di fondo è la prima traccia visibile del nostro Universo; essa permea tutto lo spazio e i suoi fotoni, dopo un viaggio di oltre 13 miliardi di anni luce giungono sulla Terra fortemente raffreddati a causa dell'espansione dell'Universo (redshift cosmologico). Quello che riusciamo ad osservare è la cosiddetta superficie di ultimo scattering, cioè la radiazione che per ultima ha interagito con la materia prima di venirci disaccoppiata. Nulla sappiamo invece degli istanti precedenti. E' come osservare un fitto banco di nubi: noi possiamo osservare direttamente solamente la superficie a noi più vicina, ma non possiamo dire nulla sugli strati immediatamente superiori. L'era della materia ha avuto inizio: da questo momento in poi l'Universo evolverà dando vita, in qualche centinaio di milioni di anni, alle prime stelle e galassie.
- 10) Era oscura. Il tempo tra il disaccoppiamento e la formazione delle prime stelle, avvenuta circa 200 milioni di anni dopo il Big Bang, è denominato era oscura. La materia è completamente neutra e si sta ancora raffreddando. L'unica radiazione emessa è prodotta dagli atomi di idrogeno che emettono nelle onde radio, la cosiddetta riga a 21 centimetri dell'idrogeno neutro. Non ci sono stelle, né processi di ionizzazione, quindi non esiste altra radiazione misurabile: l'Universo è un luogo estremamente buio. La ricerca dell'emissione a 21 centimetri di questo idrogeno primordiale è una delle sfide osservative di questi ultimi anni. Se si riuscisse a trovare la sua evidenza, avremmo delle prove aggiuntive estremamente importanti a suffragio della teoria e si potrebbero ottenere moltissime nuove informazioni in merito alla distribuzione e densità del gas primordiale, la cui emissione, alla stregua della radiazione cosmica di fondo, permea tutto l'universo. Purtroppo l'emissione a 21 cm dell'idrogeno neutro è estremamente debole e fino ad ora, anche a causa del disturbo causato dalla materia presente nel suo lungo tragitto fino a noi, non è stato possibile rilevare la sua presenza.
- 11) La nascita delle prime stelle. Circa 200 milioni di anni dopo il Big Bang si accesero le prime stelle, ponendo fine all'era dell'oscurità. Nell'Universo, dopo la radiazione cosmica di fondo, fuggita ormai lontano, apparve di nuovo luce, questa volta delle prime, gigantesche stelle. I modelli evolutivi sono piuttosto incerti a questo punto, soprattutto in merito alle dimensioni e i tempi di nascita delle prime strutture. Le prime stelle dell'Universo erano corpi molto particolari, molto diversi rispetto alle stelle che possiamo osservare. Si tratta di corpi generalmente molto massicci, oltre le 100-200 volte la massa del Sole, completamente prive di elementi pesanti, poiché a quel tempo praticamente non ne esistevano. Queste stelle, dette di Popolazione III sono estremamente importanti perché hanno dato inizio alla sintesi di tutti gli elementi più pesanti dell'elio, indispensabili per la nascita e l'evoluzione delle strutture (galassie, stelle, pianeti, la stessa vita) come noi le conosciamo. E' lecito pensare che esse non siano nate isolate, ma in gruppi più o meno numerosi, che ben presto hanno dato vita a delle primordiali galassie, al cui interno vi erano poderosi quasar, cioè giganti buchi neri che fagocitano la materia posta nelle loro vicinanze. La composizione delle stelle di Popolazione III completamente priva di carbonio, azoto e ossigeno, ha spostato di molto il limite di massa per l'esistenza di questi oggetti. Attualmente, infatti, i modelli non consentono la creazione di stelle 150 volte più massicce del Sole: oltre questa massa, infatti, le reazioni nucleari, in particolare quelle della catena CNO (Carbonio-Azoto-Ossigeno) avvengono con un tasso troppo elevato, provvedendo alla distruzione della struttura stellare. Stelle prive di questi elementi, sviluppano la loro energia nucleare solamente attraverso la catena protone-protone, la cui velocità consente masse superiori anche alle 300 volte quella solare. La vita di una tale stella è brevissima, dell'ordine, al massimo, del milione di anni.

Con stelle di Popolazione III non si intende quindi solamente una generazione stellare, ma una classe di oggetti privi di elementi pesanti ed estremamente massicci, quindi luminosi, vissute, presumibilmente per qualche centinaio di milioni di anni. Successivamente, la sintesi di elementi pesanti nei loro nuclei, ha modificato notevolmente le proprietà e la composizione dei nuovi corpi stellari, dando vita a stelle di una nuova generazione: meno massicce, meno luminose, con la presenza di elementi pesanti, le cosiddette stelle di Popolazione II. Stelle di Popolazione I si formeranno tra qualche miliardo di anni, con un'abbondanza di elementi pesanti paragonabile a quella del nostro Sole (Il Sole è una stella di Popolazione I). L'osservazione di remoti quasar, gli oggetti più luminosi dell'Universo, ha messo in evidenza, nel loro spettro, la presenza di questi elementi pesanti. Questa è una prova che la creazione di questi oggetti è successiva la generazione di stelle di Popolazione III. L'osservazione diretta di queste megastelle (vengono chiamate anche in questo modo) sarebbe una prova importantissima in merito a questa teoria e alla nucleosintesi degli elementi più pesanti, che, come già visto, non vennero prodotti a seguito del Big Bang; elementi che però vengono rilevati, seppure in misura piccola, nelle prime strutture che possiamo osservare (quasar e galassie). Le stelle di Popolazione III rappresentano il riempimento di questa lacuna tra l'era oscura permeata da idrogeno ed elio e l'osservazione di stelle e strutture (quasar) contenenti già elementi pesanti (genericamente chiamati metalli in astronomia).

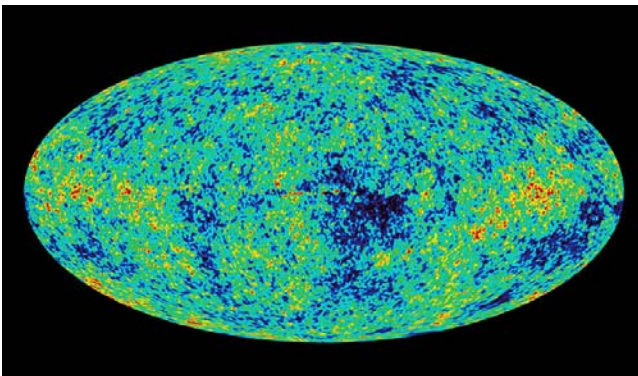


Questa ripresa del telescopio spaziale infrarosso della NASA Spitzer mostra ciò che alcuni astronomi credono essere il fondo luminoso emesso dalle stelle di Popolazione III, le prime che si formarono nell'Universo.

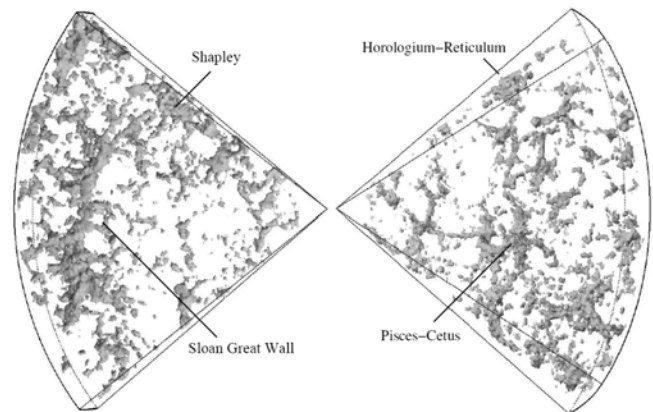
- 12) Reionizzazione: da 150 milioni di anni, ad 1 miliardo dopo il Big Bang. L'accensione delle poderose stelle di Popolazione III ha immesso una grandissima quantità di radiazione nell'Universo primordiale, radiazione estremamente energetica, in grado di ionizzare completamente il gas interstellare e intergalattico. L'Universo in questo periodo torna ad essere un ambiente quasi completamente ionizzato. La ionizzazione si completa dopo un miliardo di anni dalla nascita e da questo momento in poi, oltre il 99% dell'intero Universo si trova in questo stato, cioè composto da plasma. La re-ionizzazione è una fase che non si è ancora conclusa ed interessa anche la nostra epoca. Si pensa che questo sia il processo alla base delle ingenti quantità di plasma estremamente caldo che si osservano negli ammassi di galassie, compreso quello della Vergine, al quale il gruppo Locale appartiene. All'interno di questa fase cominciano a svilupparsi le prime strutture quali galassie e quasar, formate già da stelle di Popolazione II. Le galassie più vecchie che si conoscano hanno un'età di circa 13,2 miliardi di anni. Se consideriamo che l'Universo ebbe inizio 13,7 miliardi di anni fa

(questa data sembra essere la più corretta), allora queste prime strutture si formarono circa 500 milioni di anni dopo il Big Bang. A questo tempo l'Universo era molto più caotico e dinamico di adesso (oltre che più piccolo). Le piccolissime perturbazioni osservate nella radiazione cosmica di fondo, specchio delle perturbazioni della materia, crescono rapidamente e danno vita alle prime galassie e strutture su grande scala, come gli ammassi di galassie e a loro volta i super ammassi. Tutto l'Universo sembra essere connesso attraverso addensamenti e filamenti, ciò che resta di quelle piccolissime perturbazioni della materia misurate nella radiazione cosmica di fondo.

La fase di reionizzazione è contraddistinta da un repentino aumento dell'opacità. La radiazione emessa dalle prime stelle e strutture è stata infatti "utilizzata" dagli atomi per liberarsi dagli elettroni. L'Universo, per qualche centinaio di milioni di anni è tornato ad essere quasi completamente opaco. Una volta ionizzata tutta la materia, la densità era così bassa che l'Universo è tornato ad essere trasparente di nuovo, nonostante il livello di ionizzazione quasi totale, in grado, teoricamente, di bloccare tutta la radiazione prodotta. Siamo in una situazione diversa rispetto alle primissime fasi, quando la materia densissima e completamente ionizzata non lasciava alcun scampo alla radiazione in essa contenuta. In questo caso, invece, l'Universo diventa trasparente una volta terminato il processo di reionizzazione, poiché la densità è estremamente bassa e ormai la massa è concentrata in strutture ben definite.



Le leggerissime differenze di temperatura (circa 1/100000 K) nella radiazione cosmica di fondo rappresentano leggerissime disuniformità della materia contenuta nell'Universo, sin dall'attimo del Big Bang. Queste piccolissime perturbazioni cresceranno con il tempo e daranno vita, al termine dell'era della re-ionizzazione, alle prime galassie e successivamente ammassi di galassie



Questa è una fotografia attuale dello stato delle perturbazioni viste nell'immagine precedente. Un Universo completamente omogeneo ed isotropo sarebbe rimasto inalterato e privo di qualsiasi struttura. Qualsiasi perturbazione, anche infinitesima, sarebbe cresciuta con il tempo, alimentata dalla forza di gravità, fino a dare vita a galassie, ammassi di galassie e l'intera rete che riempie l'Universo intero, esattamente come è successo.

Questa fase è quella che porterà l'Universo ad assumere la forma e la struttura che oggi possiamo osservare. L'espansione e il raffreddamento proseguono.

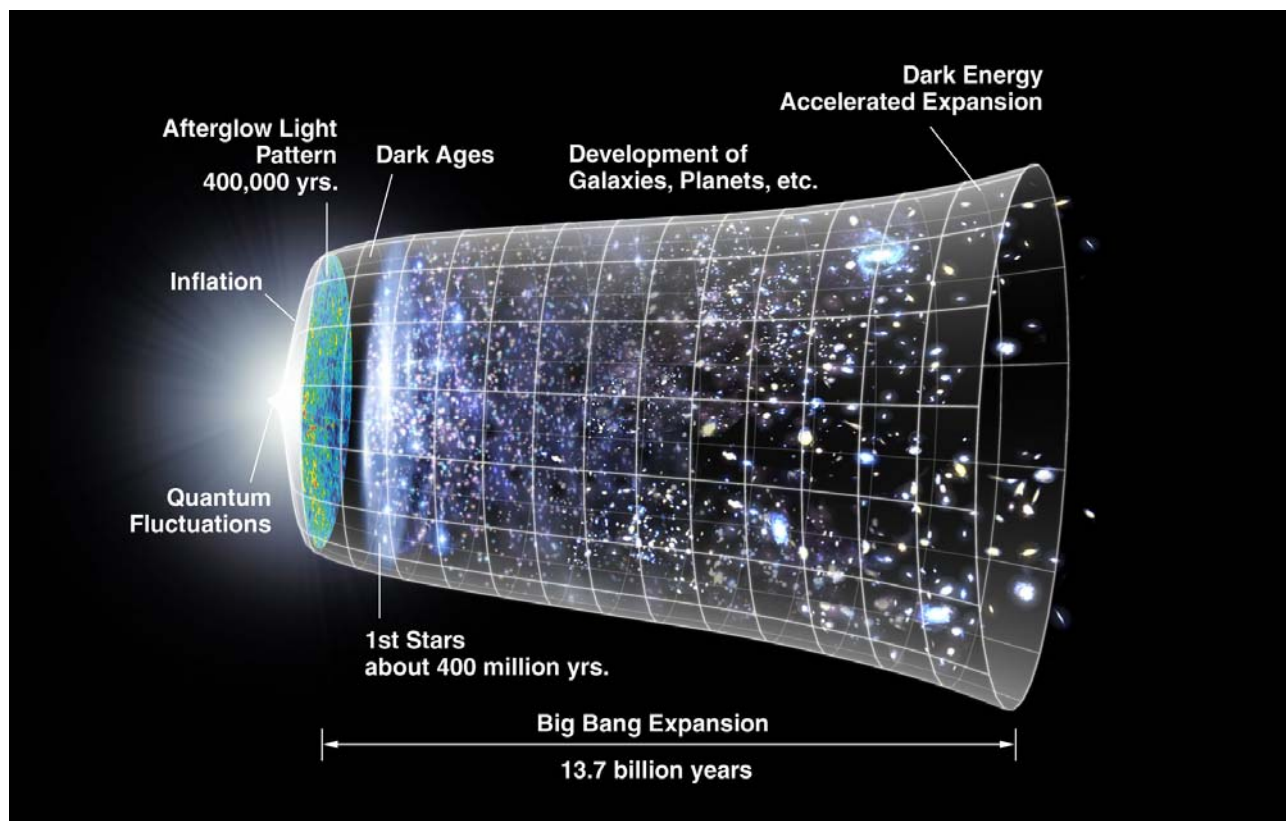
Il contributo dell'energia oscura arriverà solo a posteriori; per ora l'espansione è controllata solamente dalla materia in esso contenuta, sia essa visibile che oscura.

La Via Lattea, almeno la parte del disco sottile, si pensa si sia formata circa 8,3 miliardi di anni fa, cioè circa 5,5 miliardi di anni dopo l'istante iniziale.

- 13) Era dell'accelerazione: circa 7 miliardi dopo il Big Bang, quando l'Universo era formato da strutture molto simili a quelle che esistono oggi (ad esclusione dei quasar, ormai totalmente spenti), la sua espansione, finora proceduta in modo quasi costante (la massa visibile la rallentò leggermente) si invertì. Il tasso di espansione cominciò ad accelerare, a causa dell'energia oscura, il cui contributo divenne più importante di quello della materia.

Siamo arrivati quasi ai giorni nostri. L'Universo ora è maturo, almeno dal punto di vista strutturale, ma in continua evoluzione. Le fasi principali alle quali assisteremo in un futuro non troppo vicino, dipendono dalla massa e dal contributo e forma dell'energia oscura. Lo scenario più probabile sembra essere quello del Big Rip, descritto nelle pagine precedenti, a meno di un fenomeno, contrario all'energia oscura, in grado di invertire di nuovo l'espansione.

Ciò che è chiaro, analizzando il passato e il futuro del nostro Universo, è che esso non è statico, ma sempre in continua evoluzione, evoluzione che, come in ogni essere umano, è scritta nei geni, nell'istante iniziale che si è proiettato, per la prima volta, nella radiazione cosmica di fondo: essa contiene tutte le informazioni e le proprietà di questo nostro Universo, compreso il suo destino. Leggere ed interpretare questi e nuovi dati è una delle sfide più grandi della scienza contemporanea.



Schema evolutivo dell'Universo che tiene conto dell'inflazione iniziale e dell'accelerazione attuale

Tempo	T	Era	Descrizione
0	∞	Era della Radiazione	Il Big Bang, singolarità con dimensioni nulle e temperatura infinita. Esso crea lo spazio e il tempo. E' impossibile dire, con le nostre leggi fisiche, cosa successe in questo istante.
10^{-43} s	10^{32}		Il tempo di Planck; da qui parte la conoscenza dell'Universo. La gravità è la prima interazione che si separa dalle altre, che restano ancora unite. Si pensa che si formino e si disintegrino minuscoli buchi neri (buchi neri primordiali, teorizzati da Hawking)
10^{-35} s	10^{27}		Finisce la grande unificazione delle forze. L'interazione forte si separa e dà vita alla nascita di quark e leptoni, cioè delle prime particelle elementari e le relative antiparticelle. L'Universo a questo istante si espande di un fattore 10^{27}

			(inflazione) in un tempo brevissimo.
10^{-12} s	10^{15}		Tutte e 4 le interazioni fondamentali sono separate e da questo momento seguiranno strade indipendenti. La forza di gravità comincia a controllare l'espansione.
10^{-6} s	10^{13}		Si formano gli Adroni, le prime particelle composite, tra cui protoni e neutroni, a partire da quark e antiquark. A questo punto si verifica uno "strano" eccesso di materia rispetto all'antimateria; quest'ultima si annichisce completamente con una parte equivalente di materia. Le particelle che restano sono quasi esclusivamente di materia e rappresentano 1 milionesimo di quelle create.
100 s	10^9		Nucleosintesi primordiale: l'Universo è un mare di protoni, neutroni, elettroni e fotoni, ad una temperatura simile a quella dell'interno delle stelle. Esistono le condizioni affinché i protoni si fondano per dare vita a nuclei di Elio 4, Deuterio e tracce di Litio e Berillio. La nucleosintesi dura solamente 3 minuti, il tempo necessario per formare il 25% di Elio 4, l'1% di deuterio. Il restante 74% resta idrogeno.
300,000 anni	3,000	Era della Materia	La temperatura, cioè l'energia termica, è abbastanza bassa da permettere agli elettroni di combinarsi con i nuclei di idrogeno ed elio e formare gli atomi. Essi interagiscono molto debolmente con la radiazione presente che si disaccoppia dalla materia. L'Universo diventa trasparente alla sua stessa radiazione, inizia l'era della materia. La radiazione è libera di muoversi e va a formare il fondo cosmico a microonde che permea tutto lo spazio.
1 miliardo di anni			Si accendono le prime stelle e si formano le prime galassie. Il tempo tra il disaccoppiamento e questo periodo è denominato era oscura, poiché l'Universo è un ambiente spento che non emette radiazione, poiché* non esistono ancora stelle. L'organizzazione della materia, dagli atomi al tempo del disaccoppiamento alle prime stelle richiede molti anni
8,4 miliardi di anni			Si forma il Sole e il sistema solare. La formazione dei pianeti e della vita, costituiti da elementi più pesanti dell'Elio4, è resa possibile dalla sintesi di questi elementi nei nuclei stellari, liberati dall'esplosione di miliardi di supernovae. La vita, come la conosciamo, non poteva nascere prima, semplicemente perché non esistevano altri elementi all'infuori dell'idrogeno, dell'elio e tracce di litio e berillio.
13,4 miliardi di anni	3		Gli esseri umani compaiono sulla Terra.