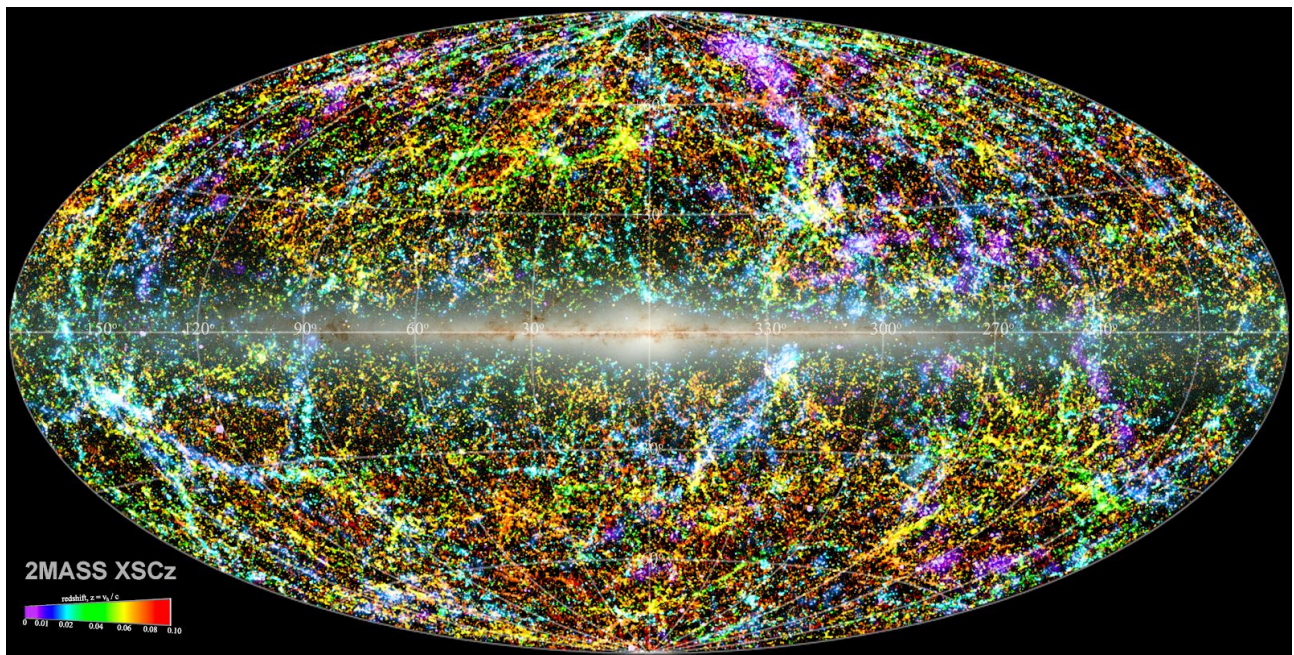


## Il modello cosmologico standard e l'enigma dell'espansione di Sabrina De Grandi

Per introdurre il modello cosmologico attuale partiamo da quanto sappiamo dalle osservazioni. Immaginiamo di srotolare la volta celeste su un tavolo, in questo modo la volta celeste è tutta rappresentata in una mappa come quella mostrata in figura. Ogni puntino di questa mappa è una galassia realmente osservata il cui colore indica la distanza misurata per ognuna. Questa mappa riporta quanto osservato fino ad oggi dell'Universo locale (cioè attorno a noi) entro una distanza di 200 Mpc (1 mega parsec = 3 milioni di anni luce). Nella mappa, nonostante siano osservabili delle regioni più vuote e più piene, dovunque guardiamo sembra tutto abbastanza simile.



Per osservare l'Universo a distanze maggiori di 200 Mpc, bisogna osservare tutte le galassie contenute entro aree limitate di cielo più in profondità. Analizzando i dati ottenuti è possibile capire come sono distribuite nello spazio le galassie più lontane, ad esempio se in modo analogo o diverso rispetto a quelle più vicine.

Osservando queste fettine di cielo emerge che l'universo è isotropo, cioè tende ad avere una struttura a spugna uguale in ogni direzione, e omogeneo, non presenta una direzione privilegiata. Queste due ipotesi basate sull'osservazione costituiscono il Principio Cosmologico, che è il principio base da cui partono i nostri modelli cosmologici.

È importante sottolineare che sulle grandi scale cosmologiche l'unica forza dominante è la forza di gravità, cioè la forza di attrazione tra i corpi. Essa fu inizialmente descritta da Newton, quando ipotizzò che il nostro corpo fosse attirato dalla massa della Terra. In generale, due masse poste nello spazio a una certa distanza tra loro si attraggono proporzionalmente alla loro massa e all'inverso della loro distanza al quadrato. Nonostante la forza gravitazionale sia inversamente proporzionale alla distanza quadratica tra le due masse, essa agisce a qualunque raggio e quindi anche su grande scala.

Nel 1915, Einstein formulò la teoria della relatività generale che estese il concetto di forza gravitazionale oltre a quello della meccanica e dinamica classica di Newton e permise di

spiegare alcune incongruenze tra i calcoli e le osservazioni. Un esempio riguarda l'orbita di Mercurio, che risultava leggermente spostata rispetto a quella prevista dalle formule classiche. La meccanica newtoniana classica infatti non tiene conto di un effetto di relatività generale, cioè della deformazione del campo gravitazionale prodotta dal Sole nello spazio-tempo.

La relatività prende in considerazione non solo lo spazio, ma anche il tempo, poiché entrambi sono deformati dalla gravità. Quindi le dimensioni importanti sono quattro: non solo le tre spaziali, ma anche quella temporale.

La teoria della Relatività Generale ha fornito una spiegazione a molti fenomeni celesti, come ad esempio gli archi luminosi prodotti nelle lenti gravitazionali dagli ammassi di galassie, dovuti alla curvatura della luce a sua volta causata dalla curvatura dello spazio tempo prodotta dalla grande massa degli ammassi, o l'esistenza di onde gravitazionali, minime deformazioni ondulatorie nello spazio tempo, causate dalla coalescenza di due buchi neri o stelle di neutroni.

La teoria della relatività generale è alla base di tutti i modelli cosmologici. Dopo aver elaborato la teoria, Einstein la applicò all'Universo intero e trovò dieci equazioni per descriverlo. Prendendo in considerazione il Principio Cosmologico, le semplificò notevolmente riducendole a due. Egli aveva l'idea di un universo isotropo, omogeneo e statico, ma risolvendo le sue formule notò che l'universo ottenuto non era statico, ma in continua evoluzione (espansione o contrazione). Per ottenere il modello che pensava corretto dovette introdurre una costante ( $\Lambda$ , lambda) nelle sue equazioni. Einstein osservò inoltre che la geometria dell'universo, e anche la sua evoluzione (perpetua espansione o contrazione finale), dipendono dalla quantità di materia totale in esso contenuta. Nei primi tempi della sua scoperta, Einstein non sapeva dell'esistenza della materia oscura ("dark matter"), la cui scoperta avvenne negli anni '30: la materia barionica di cui si conosceva l'esistenza non bastava a chiudere l'universo che quindi appariva in continua espansione (di qui la famosa aggiunta del termine Lambda nelle equazioni per assicurare un Universo statico).

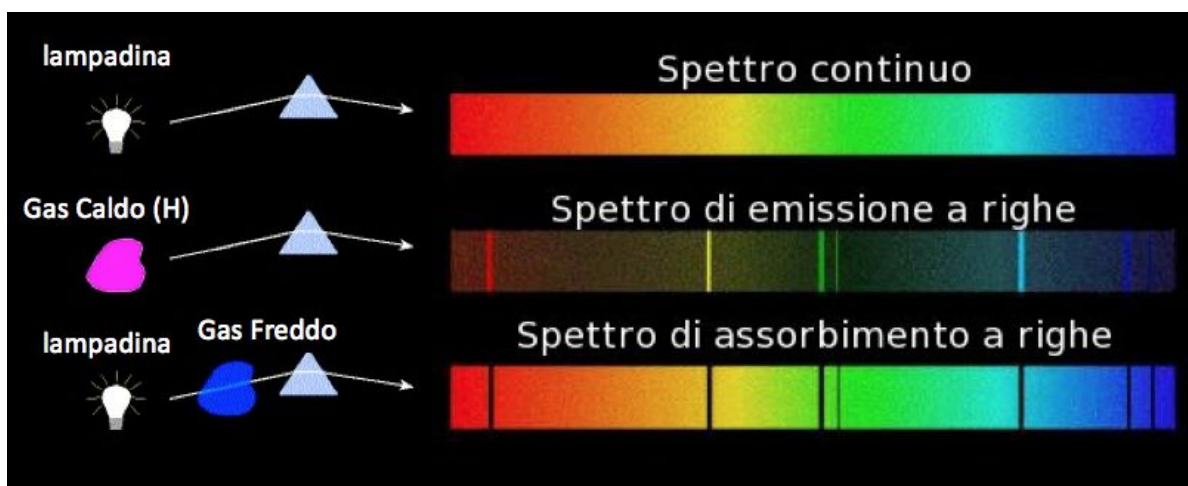
Negli anni '20 l'astronomo Hubble stava studiando gli spettri di emissione delle galassie e notò per la prima volta come le righe presenti negli spettri mostrassero un effetto detto "effetto Doppler" sempre uguale per tutte le galassie osservate. Tale effetto è un fenomeno della luce quando può essere descritta come un'onda che viaggia nello spazio. Per spiegare l'effetto Doppler della luce si può fare l'analogia con il comportamento delle onde sonore. Vicino a un'ambulanza ferma con la sirena accesa si sente un suono con una certa frequenza; se l'ambulanza si avvicina, si sente un rumore più acuto poiché la frequenza dell'onda aumenta, ossia la lunghezza d'onda si accorcia; se l'ambulanza si allontana sentiamo un suono più basso perché le onde vengono stirate e la frequenza si abbassa, ossia la lunghezza d'onda si allunga. Quest'effetto nel suono riguarda tutte le onde e vale anche per la luce.

Prendiamo una lampadina in laboratorio e facciamo passare la sua luce attraverso un prisma che la scompone nelle varie frequenze del suo spettro visibile continuo. Prendendo un gas caldo che emette luce e facendo passare questa luce attraverso il prisma non si vede uno spettro continuo, ma si osservano solo delle righe luminose caratteristiche dell'elemento che emette tale luce. Questo è chiamato "spettro di emissione". Utilizzando la lampadina di prima, che emette la sua luce con uno spettro continuo, e interponendo un gas freddo, ad esempio l'idrogeno, tra la lampadina e il prisma lo spettro risultante avrà

delle righe scure che corrispondono alle righe caratteristiche del gas freddo. Questo è lo spettro di assorbimento delle righe.

La luce del Sole fatta passare attraverso un prisma mostra tante righe di assorbimento che permettono di identificare quali sono gli elementi presenti nel Sole: c'è l'idrogeno e altri elementi risultanti dalle reazioni di fusione nucleare che avvengono al suo interno. Osservando la luce emessa da una galassia che è formata da tante stelle e scomponendola tramite il prisma, è possibile osservare le varie righe e identificare i vari elementi che la compongono.

Hubble ha osservato la luce emessa dalle galassie, in particolare le righe dell'idrogeno, e ha confrontato la posizione delle righe dell'idrogeno di queste galassie con quello che si osservava in laboratorio. Le righe osservate per la luce delle galassie risultavano essere tutte 'spostate' verso la parte 'rossa' dello spettro rispetto alla posizione osservata in laboratorio, ed erano tanto più spostate verso il rosso tanto più la galassia era lontana.



Tutte le galassie osservate mostravano un *red-shift*, mai un *blue-shift*, ciò significa che tutte si stavano allontanando da noi. In realtà noi non siamo speciali, ogni punto dell'universo si sta allontanando dal resto dell'universo, come dei puntini disegnati sulla superficie di un palloncino di gomma che si sta gonfiando.

Le misure più recenti ci indicano che la velocità di allontanamento delle galassie è di circa 70 km/s per megaparsec con un'incertezza di circa 4 km al secondo per megaparsec.

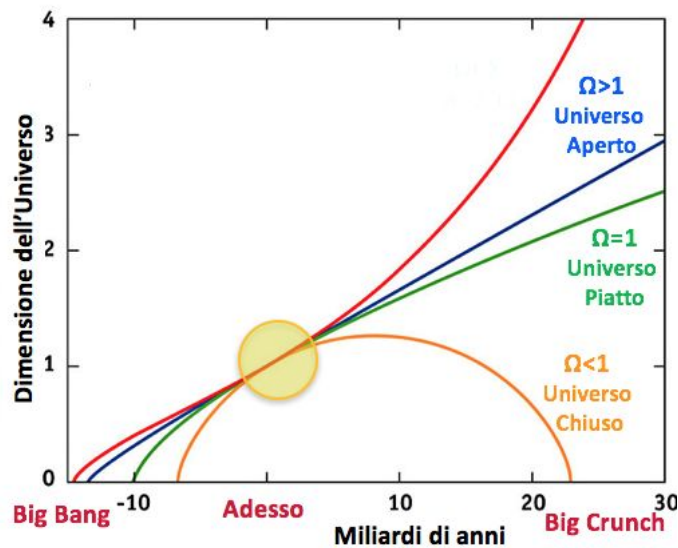
Se l'universo si espande, andando a ritroso nel tempo possiamo ipotizzare che la materia era più compressa e quindi con più energia, più calda. Continuando ad andare indietro nel tempo si arriverebbe a un momento in cui tutta la materia era concentrata in un unico punto: da qui nasce la teoria del Big Bang. In prossimità del Big Bang lo stato fisico della materia era diverso (per via dell'enorme energia contenuta e della 'compressione').

Vari scienziati, tra cui Friedman, hanno lavorato a modelli che descrivono come si è espanso l'universo a partire dal Big Bang, a seconda della quantità di materia totale dell'universo. L'espansione dipende dalla geometria dell'universo e dal parametro omega che rappresenta la densità totale della materia dell'universo divisa per una 'densità critica', definita come la densità necessaria per avere  $\omega=1$ . Questa densità critica è pari a circa 1 g di materia nel volume occupato da 100 Terre.

Se la densità è elevata allora la geometria dell'universo è chiusa, cioè l'universo potrà in futuro tornare a contrarsi. Per spiegare questo concetto ragioniamo su due dimensioni (al posto di quattro), prendendo in considerazione un foglio di carta. Appallottolando il foglio ci saranno delle porzioni in cui la superficie è ancora piatta e quindi vale una geometria

tradizionale/analitica (la somma degli angoli interni di un triangolo è  $180^\circ$ , due rette parallele non si incontrano e così via); ci saranno però altre porzioni del foglio in cui invece la superficie è convessa (arcuato verso l'esterno, curvatura positiva) e altri in cui è concava (curvatura negativa), in tali zone la geometria è diversa (somma degli angoli maggiore o minore di  $180^\circ$ , rette parallele di incrociano, etc...).

Questa situazione viene riprodotta con le quattro dimensioni dell'universo, come mostra il grafico.



Con Omega maggiore di 1 dopo il big bang e l'iniziale espansione dell'universo segue un collasso dell'universo su sé stesso per via della sua forza di gravità, detto *Big Crunch*. Per un valore di omega uguale a 1 si avrebbe un universo piatto che continua a espandersi indefinitamente; mentre con omega minore di 1 avremmo un'espansione che, non essendo frenata dalla forza di gravità, accelererebbe.

Nel 1997 ci fu una svolta inaspettata: sono state osservate delle esplosioni di supernova di tipo 1A in galassie molto lontane. Sono esplosioni di stelle molto luminose che raggiungono un picco di luminosità sempre identico, che decresce e scompare in 40-60 giorni; sono considerate degli indicatori per la distanza fra le galassie, in quanto il picco di luce osservato è più o meno luminoso a seconda della distanza. Nel 1997 queste esplosioni risultavano essere più lontane di quanto ci si aspettasse in base alle misurazioni dei *red-shift* delle galassie in cui erano esplose. Questa osservazione è stata interpretata come l'indicazione che l'universo si sta espandendo più velocemente di quanto ci si aspettasse. Il valore, ritenuto costante, della relazione fra distanza e velocità di allontanamento delle galassie era stato calcolato da Hubble prendendo come riferimento stelle e galassie relativamente vicine; osservando con gli strumenti attuali delle galassie più lontane ci rendiamo conto che il valore cresce all'aumentare della distanza, ciò implica che l'universo sta subendo un'espansione accelerata, accelerazione che ha avuto inizio circa 7 miliardi di anni fa.

Il modello cosmologico standard attuale quindi presenta una fase di espansione lievemente decelerata subito dopo il Big Bang, seguita poi da un'espansione accelerata negli ultimi 7 miliardi di anni. Attualmente gli scienziati stanno cercando di comprendere la causa dell'accelerazione dell'universo. Per ora viene identificata con un'energia di qualche tipo, per ora ignota, detta appunto energia oscura (dark energy), una grandezza fisica che non riusciamo a spiegare con la fisica classica e che sembra permeare quello che è considerato il vuoto. Il destino dell'universo quindi dipende sia dalle sue caratteristiche geometriche (la quantità della materia che crea la forza di gravità e frena l'espansione)

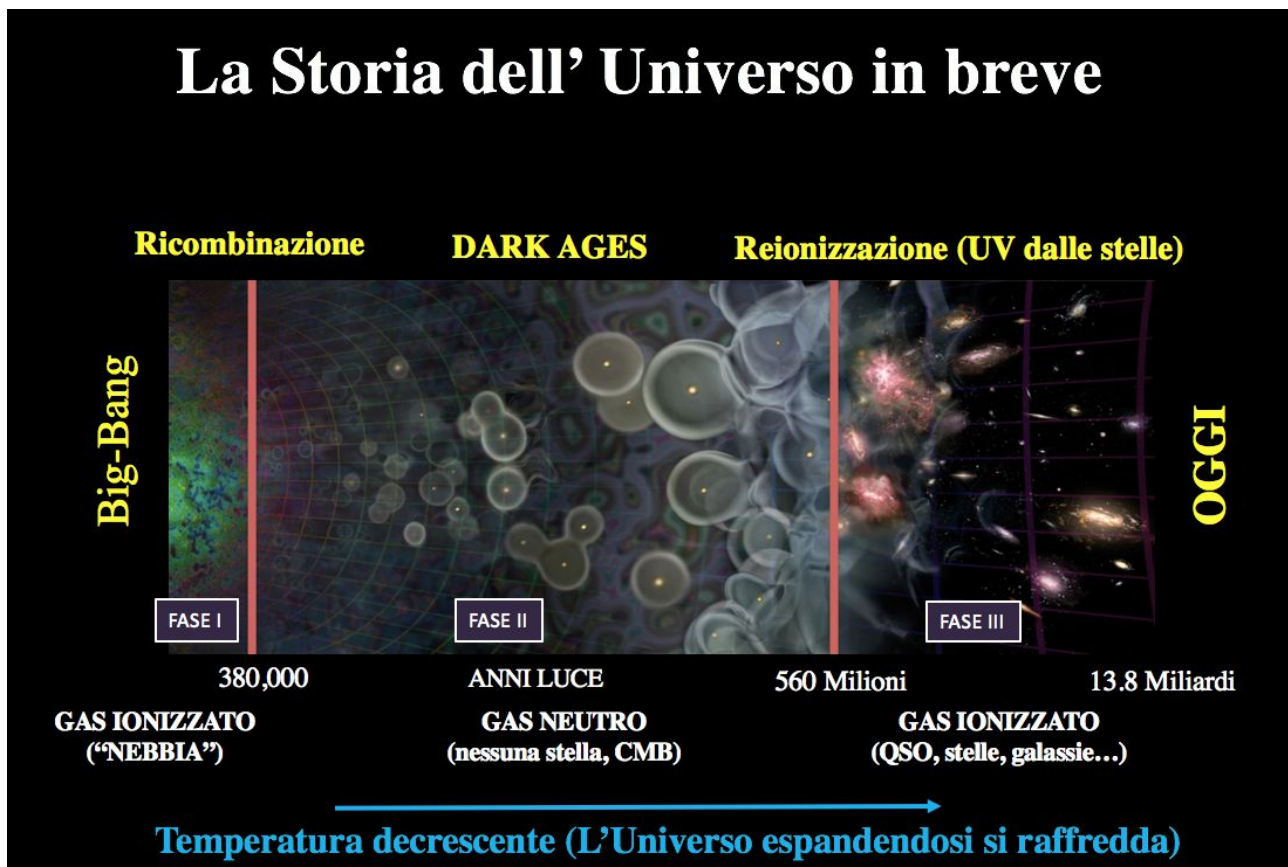
che dall'energia oscura (che sembra il fattore preponderante). Secondo le ultime ipotesi si crede che quasi il 70% dell'universo sia composto da energia oscura, solo il ~5% da materia barionica ordinaria e il restante da materia oscura.

Osservando la mappa dell'universo con lunghezze d'onda molto maggiori del visibile si vede la "radiazione cosmica di fondo": un'immagine dell'universo primordiale che arriva da molto lontano (è stata emessa quando l'universo aveva solo 380 mila anni), che sembra perfettamente uniforme all'apparenza ma che se vista con un contrasto pari a 1/100000 rivela piccolissime differenze di densità. Sono queste fluttuazioni minuscole di densità che, col passare del tempo e l'ausilio della forza di gravità, hanno portato alle grandi differenze di densità odierne (cioè alle galassie e agli enormi spazi "vuoto" tra di esse).

Lo studio della radiazione cosmica di fondo inizia negli anni '60 quando Penzias e Wilson la scoprirono mentre cercavano di eliminare un rumore di sottofondo rilevato dalle loro antenne. Nei primi anni '80 col satellite COBE della NASA si è potuta mappare la radiazione di fondo presente in tutta la volta celeste, ma con una risoluzione limitata dalla tecnologia di allora; nel 2013 invece il satellite Planck ha mappato l'universo con strumenti più sensibili e con una maggiore risoluzione angolare.

In base a queste osservazioni si può ricostruire la storia dell'universo: all'inizio c'è stata l'esplosione del Big Bang con una veloce espansione dell'universo, si sono formati gli atomi e per 380.000 anni c'è stato un periodo in cui l'universo era completamente opaco. Le altissime temperature presenti infatti facevano collidere continuamente le particelle e i fotoni emessi dalle collisioni venivano riassorbiti immediatamente da altri urti. Dopo questo primo periodo l'universo, continuando ad espandersi, arrivò a raffreddarsi a tal punto che gli atomi e gli elettroni iniziarono a ricombinarsi in atomi neutri (prettamente idrogeno), permettendo ai fotoni di procedere senza essere riassorbiti. È in questo momento che l'universo diventa trasparente (a 380.000 anni circa), ma è ancora buio perché non sono presenti stelle che lo rischiarino. Inizia così l'età oscura. Guardando lontano coi nostri strumenti, cioè guardando sempre più indietro nel tempo, possiamo solo vedere la superficie di quello che era l'universo opaco e osservare quella che viene detta la "superficie di ultimo scattering", la nostra mappa di radiazione di fondo. Questa mappa ci dice che già 380 mila anni dopo il Big Bang nell'universo sono presenti piccolissime differenze di densità, che crescendo per via dell'effetto della forza di gravità creano aggregazioni di materia sempre maggiori che portano alla formazione delle prime stelle.

Le stelle primordiali più antiche osservate nel 2018 risalgono a circa 180 milioni di anni dal Big Bang, mentre le galassie più distanti sembrano essersi formate dopo 560 milioni di anni dal Big Bang.



Per scoprire come si è evoluto l'universo sono state create simulazioni processate da super-computer che necessitano di tempi di calcolo elevatissimi. Le simulazioni forniscono risultati molto simili alla distribuzione di materia nell'universo realmente osservata, con filamenti, ammassi di galassie e aree relativamente vuote.

L'universo è un oggetto infinito che esiste da un tempo finito e che sta subendo un'espansione accelerata. Non ci è possibile osservare oggetti distanti più di 13,8 miliardi di anni luce, poiché la luce non ha avuto il tempo di arrivare fino a noi: questo limite è chiamato orizzonte cosmologico. Dalla terra possiamo osservare in direzioni opposte le galassie, per esempio una a una distanza di circa 10 miliardi di anni luce e una a circa 13 miliardi di anni luce. Esse distano fra loro circa 23 miliardi anni luce, una distanza troppo grande perché esse possano essere state in contatto nel passato (essendo la luce la velocità massima raggiungibile nel vuoto). Allo stesso tempo dalla Terra osserviamo che in quelle due galassie valgono le stesse leggi fisiche; ciò si spiega solo supponendo che queste due galassie in tempi vicini al Big Bang siano state a contatto prima della rapida espansione e che abbiano interagito fra loro. Questa teoria si chiama teoria dell'inflazione. Tale ipotesi spiegherebbe anche il paradosso della piattezza dell'universo, spiegando come mai il parametro omega osservato è "miracolosamente" uguale a 1 (corrispondente a un universo a geometria piatta): con la teoria dell'inflazione questo parametro pari a 1 risulta plausibile, perché espandendosi la struttura dell'universo sembrerebbe localmente piatta a causa delle grandi dimensioni dello stesso.

Riassumendo il modello cosmologico attuale è in grado di spiegare molte delle nostre osservazioni anche se resta ancora da scoprire la natura di due parti fondamentali di esso: la materia oscura che ne regola la forma e l'energia oscura che ne regola l'espansione attuale.