

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Astronomia

Cenni al Modello del Big Bang, Inflazione e Materia Oscura

Relatore:
Prof. Daniele Dallacasa

Presentata da:
Angelo Semeraro

Anno Accademico 2019/2020

Indice

1	Evidenze osservative del Big Bang	3
1.1	Redshift	3
1.2	Legge di Hubble - Lemaître	4
2	Modello del Big Bang	5
2.1	Fasi evolutive	5
2.2	CMBR	7
2.3	Nucleosintesi primordiale	8
3	Modello Cosmologico Standard ΛCDM	10
3.1	Il principio cosmologico	10
3.2	Geometria dell'Universo	11
3.3	Densità critica e parametro di densità	13
3.4	Equazioni di Friedmann	13
4	Materia oscura	15
4.1	Prime evidenze osservative	15
4.2	Curva di rotazione delle galassie a spirale	16

Introduzione

La cosmologia è la scienza che studia l'universo nella sua totalità, tentando di spiegarne l'origine e l'evoluzione attraverso le leggi fisiche che lo governano. L'obiettivo del seguente elaborato è quello di offrire una descrizione del *Modello Cosmologico Standard* " Λ CDM", generalmente accettato dalla comunità scientifica essendo quello più semplice in accordo con le osservazioni e sostenuto da ipotesi che lo rendono più attendibile rispetto agli altri modelli.

Nel Capitolo 1 vengono descritte le scoperte di natura osservativa fatte nel XIX e nel XX secolo, quali il *redshift* e la *Legge di Hubble - Lemaître*, connesse all'espansione dell'Universo e che rappresentano una prova fondamentale dell'attendibilità del modello da noi preso in esame.

Nel Capitolo 2, viene fatta una descrizione del modello del Big Bang, comprendente le sue fasi evolutive e alcune delle scoperte e teorie più importanti a suo sostegno, quali la radiazione cosmica di fondo e la nucleosintesi primordiale

Successivamente, nel Capitolo 3, viene illustrato il Modello Cosmologico Standard, i principi sui quali esso affonda le sue fondamenta, alcune caratteristiche e parametri noti ed accettati dalla comunità scientifica allo stato attuale delle conoscenze.

Infine, nel Capitolo 4, si fa qualche accenno alla materia oscura, in particolar modo se ne descrivono le evidenze sperimentali che ne hanno permesso la scoperta e quelle che successivamente ne hanno confermato l'esistenza.

Capitolo 1

Evidenze osservative del Big Bang

Il modello cosmologico del Big Bang è stato strutturato a partire da due importanti evidenze osservative quali il redshift e l'espansione dell'Universo, entrambi essenziali alla sua formulazione.

1.1 Redshift

Il redshift, in generale, è un fenomeno per cui una radiazione elettromagnetica presenta una lunghezza d'onda maggiore o minore rispetto a quella che aveva nel momento dell'emissione. Si consideri lo spettro di una sorgente che presenti righe in assorbimento o in emissione; dal confronto di queste con quelle relative a sorgenti note o ad elementi studiati in laboratorio, è possibile decretare se la sorgente presa in analisi si stia allontanando o avvicinando a noi, essendo la posizione delle righe sfasata da un lato o l'altro rispetto al nostro campione. Questo fenomeno è dovuto all'effetto Doppler relativo al moto del sistema che stiamo studiando. Se λ è la lunghezza d'onda del nostro campione e λ_{oss} quella dell'oggetto da noi osservato, si definisce z il redshift come:

$$z = \frac{\lambda_{oss} - \lambda}{\lambda} \quad (1.1)$$

A questo punto si avranno tre casi:

- $\lambda = \lambda_{oss}$: il sistema è fermo
- $\lambda > \lambda_{oss}$: il sistema si sta avvicinando, in questo caso si parla di *blueshift*
- $\lambda < \lambda_{oss}$: il sistema si sta allontanando, in questo caso si parla di *redshift*

In generale si utilizza il secondo termine in quanto è più comune che le galassie presentino righe spostate verso il rosso.

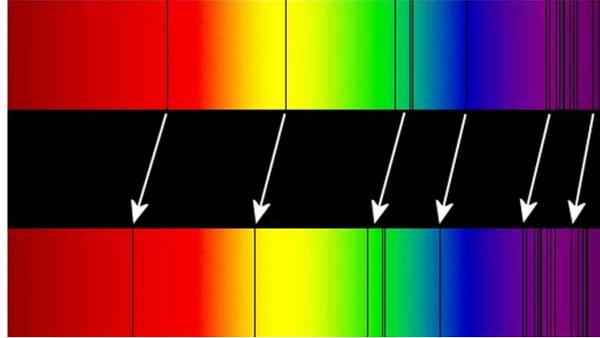


Figura 1.1: *Linee in assorbimento dello spettro elettromagnetico di una galassia (sotto) confrontate con quelle dello spettro del Sole (sopra). Le frecce indicano lo spostamento verso il rosso delle prime, dovute al fatto che la galassia si sta allontanando.*

1.2 Legge di Hubble - Lemaître

Nei primi anni del '900, attraverso l'osservazione e lo studio degli spettri di un numero ristretto di galassie, Edwin Hubble ne calcolò le velocità radiali tramite il fenomeno dell'effetto Doppler. Egli notò che tutti gli spettri erano caratterizzati da uno spostamento verso il rosso delle righe spettrali, di conseguenza ne dedusse che le galassie in esame si stessero tutte allontanando e osservò inoltre che le velocità di allontanamento aumentavano all'aumentare della distanza. Nel frattempo, precisamente nel 1927, l'astronomo Georges Lemaître dedusse per via teoria una legge che affermava che la velocità di recessione lungo la linea di vista v fosse direttamente proporzionale alla distanza tra osservatore e sistema D :

$$v = H_0 D \quad (1.2)$$

A partire da questi risultati, nel 1929 Hubble formulò una legge osservativa che attraverso una relazione lineare legava il redshift della luce emessa dalle galassie e la loro distanza:

$$z = \frac{H_0 D}{c} \quad (1.3)$$

Conosciuta come *Legge di Hubble - Lemaître*, in cui H_0 è definito *parametro* (o costante) *di Hubble*, il cui valore odierno è di circa $70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Secondo un recente studio si è ipotizzato che esso sia costante in tutto l'Universo ma che vari nel tempo e che quindi a seconda del redshift al quale ne si misura il valore si ottengono risultati differenti. Dalla suddetta costante è possibile per di più stimare il cosiddetto tempo di Hubble attraverso la relazione $\tau_0 = H_0^{-1}$, che rappresenta una stima dell'età del nostro Universo pari a circa 13,82 miliardi di anni.

Capitolo 2

Modello del Big Bang

Con la scoperta del redshift e la conseguente formulazione della legge di Hubble, in contrasto con quella di Universo statico di Einstein, nacque l'idea che l'Universo si stesse espandendo, il che giustificava il sistematico allontanamento delle galassie. Il pensiero che ne derivò fu quello che questo processo dovesse effettivamente avere un'origine, in particolare Georges Lemaître nel 1931 propose che l'evidente espansione del cosmo necessitasse di un processo di contrazione andando indietro nel tempo, raggiungendo un punto in cui questo non sarebbe più stato possibile. Questo è il cosiddetto Big Bang, l'istante iniziale in cui tutto ha avuto origine, descritto anche come "l'atomo primitivo" o singolarità contenente tutta la massa dell' Universo in un volume quasi nullo soggetto a temperature altissime, motivo per il quale la fisica ipotizza che le uniche componenti presenti fossero fotoni e particelle uniti fra loro formando una miscela incandescente nella quale era presente un perfetto equilibrio tra energia e materia dato dalla formula: $E = Mc^2$. Una volta cominciata l'espansione la miscela ha cominciato ad accrescere le sue dimensioni raffreddandosi e diminuendo sia la sua densità che la sua energia.

2.1 Fasi evolutive

Di seguito verranno elencate le 8 ere ipotizzate dai cosmologi che descrivono la "storia" dell'Universo a partire dai primi istanti fino alla formazione dei primi atomi, avvenuta circa 200 secondi dopo il Big Bang.

- **Era di Planck** (da 0 a 10^{-43} secondi)

Si suppone che in questa fase iniziale le quattro forze fondamentali -elettromagnetica, nucleare debole, nucleare forte e gravità- fossero riunite in una sola e che, la temperatura fosse dell'ordine di $\sim 10^{32}$ K.

- **Era di grande unificazione** (da 10^{-43} a 10^{-36} secondi)

In questo lasso di tempo la forza di gravità si separa dalle altre che rimangono unite, inoltre la temperatura si abbassa a $\sim 10^{30} K$. Secondo lo stato delle conoscenze attuali la nascita dello spazio-tempo per come lo conosciamo sarebbe attribuibile a quest'era.

- **Era dell'inflazione** (da 10^{-36} a 10^{-33} secondi)

Questa è un'epoca di fondamentale importanza nella quale le oscillazioni dell'inflatone -ipotetico campo scalare- generano una rapidissima e drastica espansione, la cui energia liberata sottoforma di onde elettromagnetiche dà origine a svariate coppie di particelle (quark e leptoni) e antiparticelle. Le temperature scendono fino ad arrivare a $10^{27} K$.

- **Era elettrodebole** (da 10^{-33} a 10^{-12} secondi)

A questo momento corrisponde la scomposizione della forza elettrodebole in interazione debole ed elettromagnetica, alla quale consegue l'assunzione di massa dei bosoni, quark e leptoni. La temperatura cala drasticamente fino a $10^{15} K$.

- **Era dei quark** (da 10^{-12} a 10^{-6} secondi)

Le forze del Modello Standard sono ora completamente separate e le temperature arrivano a $10^{14} K$.

- **Era degli adroni** (da 10^{-6} a 1 secondo)

Durante quest'era l'energia termica diventa abbastanza bassa da permettere l'interazione fra i quark, che si combinano a formare gli adroni (neutroni e protoni). Questi dovrebbero annichilirsi con le rispettive antiparticelle, ma un'asimmetria nella produzione di materia e antimateria ha permesso il prevalere della prima sulla seconda. La temperatura arriva a $10^{13} K$.

- **Era dei leptoni** (da 1 a 100 secondi)

La temperatura cala ulteriormente arrivando a $10^{10} K$ permettendo la creazione di elettroni e positroni e per la stessa ragione data per gli adroni, anche in questo caso prevalgono gli elettroni e quindi la materia.

- **Era della nucleosintesi** (da 100 a 200 secondi)

La temperatura raggiunge ordini di grandezza pari a $10^9 K$ permettendo la nascita dei primi nuclei di elio, litio e deuterio e dando come risultato finale della nucleosintesi un'abbondanza di idrogeno del 75% , di elio del 25% e di deuterio abbastanza piccola da risultare trascurabile.

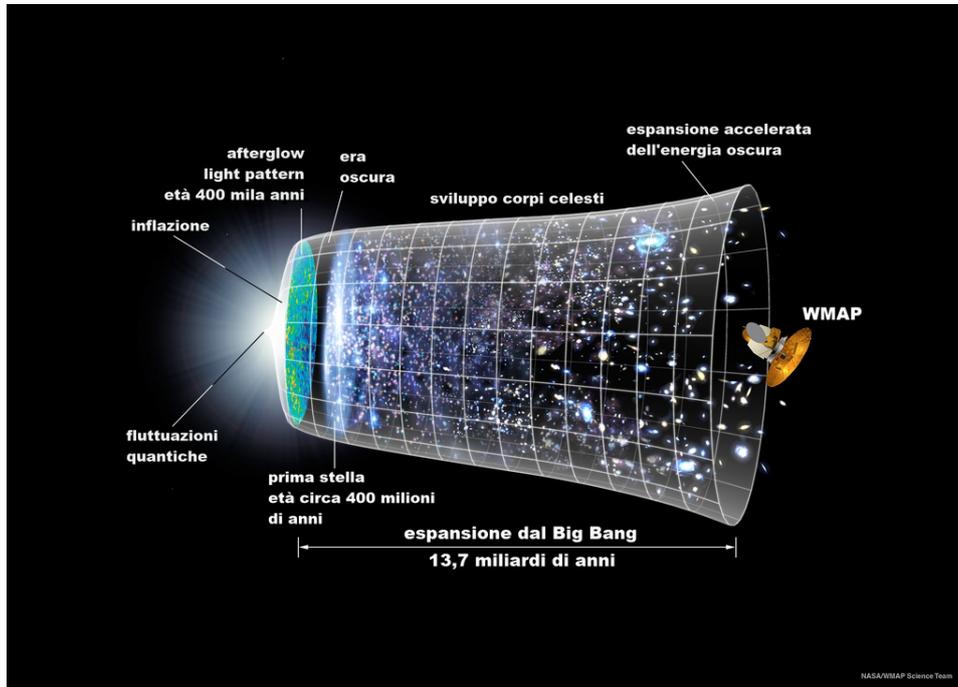


Figura 2.1: *Rappresentazione grafica della nascita e dell'evoluzione dell'Universo a partire dai primi istanti di vita fino ad oggi. Si noti come il periodo inflazionario presenti un'espansione rapida che si manifesta in un tempo breve, mentre successivamente essa continua ad un ritmo più costante.*

2.2 CMBR

Nel 1965 i fisici statunitensi Robert Woodrow Wilson e Arno Penzias costruirono un radiometro al fine di portare avanti esperimenti sulle comunicazioni via satellite e sulla radioastronomia. Le misurazioni però erano affette da un eccesso di temperatura di circa $3,5\text{ K}$ che i due sperimentatori non riuscivano a spiegarsi, in quanto essa si presentava essere isotropa e quindi non attribuibile ad una sorgente in particolare.

Così, senza volerlo, è stata scoperta la radiazione cosmica di fondo, in inglese *Cosmic Microwave Background Radiation*, da cui la sigla CMBR. In seguito essa fu interpretata come un residuo relativo alle prime fasi evolutive dell'Universo, in particolare all'epoca in cui esso raggiunge i 3000 K e diventa possibile il processo che prende il nome di ricombinazione cosmologica, in cui nuclei ed elettroni si combinano per formare atomi neutri di idrogeno, elio e litio. Inoltre è presente anche un fenomeno di disaccoppiamento radiazione-materia che provoca la diffusione dei fotoni per scattering formando quello che giunge a noi come residuo di quell'era, il cui spettro di corpo nero, a causa dell'espansione dell'Universo, viene misurato oggi con una temperatura di: $T_{CMBR} = 2,725 \pm 0,001\text{ K}$.

La scoperta della CMBR è stata di fondamentale importanza in quanto ha permesso di sostenere il modello del Big Bang piuttosto che quello dello Stato Stazionario (Steady State) sostenuto da Einstein, il quale sosteneva l'idea di un Universo eterno ed immutabile (principio di omogeneità ed isotropia dello spazio-tempo), modello che per essere valido necessitava l'ipotesi di continua creazione di fotoni e di materia, ritenuta dalla comunità scientifica alquanto innaturale. La radiazione cosmica di fondo invece rappresenta una prova evidente del fatto che l'Universo in un'epoca antecedente fosse significativamente più denso e caldo e di conseguenza lo stato attuale è dato dall'espansione che ne ha permesso il raffreddamento.

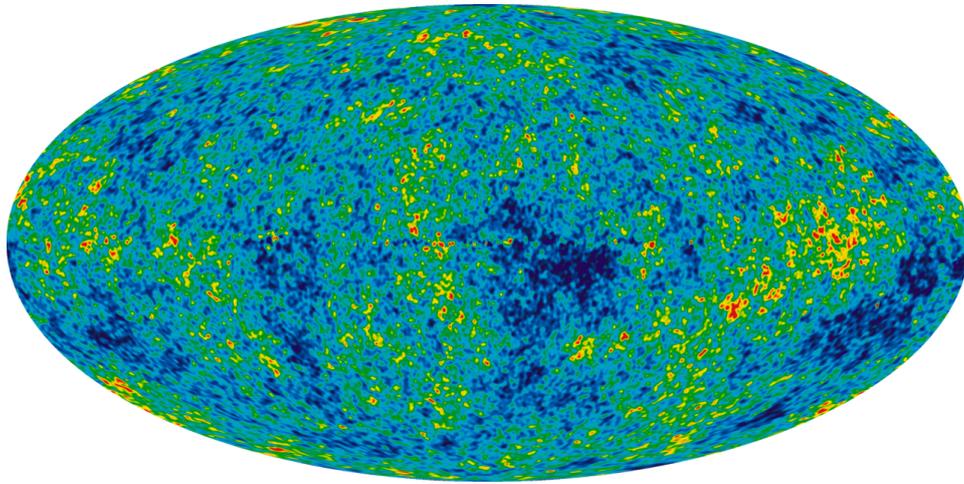


Figura 2.2: *Mapa del cielo osservato alla lunghezza d'onda delle microonde detta anche radiazione cosmica di fondo.*

2.3 Nucleosintesi primordiale

Un'ulteriore teoria a sostegno del modello del Big Bang è quella della nucleosintesi primordiale, che spiega le abbondanze di alcuni elementi chimici quali ^2H e ^4He che altrimenti non potrebbero essere giustificate considerando unicamente i processi di produzione che osserviamo oggi negli interni stellari. Infatti se proviamo a fare il calcolo di tale produzione vedremo che il risultato sarà inconsistente con l'abbondanza degli stessi elementi presenti nell'Universo osservabile. Assumendo che la luminosità emessa dalla nostra galassia sia costante e abbia origine dal processo di fusione dell'idrogeno in elio, si considerano i seguenti valori:

$$M_{gal} = 10^{12} M_{\odot} = 10^{12} \cdot 2 \cdot 10^{33} g = 2 \cdot 10^{45} g \quad (2.1)$$

$$L_{gal} = 10^{11} L_{\odot} = 10^{11} \cdot 4 \cdot 10^{33} \text{ erg s}^{-1} = 4 \cdot 10^{44} \text{ erg s}^{-1} \quad (2.2)$$

L'energia prodotta dalla fusione nucleare in un tempo di Hubble $\tau \approx 14 \cdot 10^{17} \text{ s}$ è data da:

$$E_{tot} = 4 \cdot 10^{44} \text{ erg s}^{-1} \cdot 14 \cdot 10^{17} \text{ s} = 1,6 \cdot 10^{62} \text{ erg} \quad (2.3)$$

A questo punto si calcola il numero di atomi di ${}^4\text{He}$ generati dal processo tramite il rapporto fra E_{tot} e l'energia prodotta da una singola fusione di quattro nuclei di H in un nucleo di He.

$$N_{He} = \frac{E_{tot}}{E_{sing}} = \frac{1,6 \cdot 10^{62} \text{ erg}}{4,5 \cdot 10^{-5} \text{ erg}} = 3,5 \cdot 10^{66} \quad (2.4)$$

A partire da questo risultato è possibile ricavare la massa totale di ${}^4\text{He}$ presente nella galassia tramite il suo prodotto con il valore della massa di un singolo atomo dello stesso elemento:

$$M_{He} = N_{He} m_{He} = 3,5 \cdot 10^{66} \cdot 6,64 \cdot 10^{-24} \text{ g} = 2,4 \cdot 10^{43} \text{ g} \quad (2.5)$$

L'abbondanza di elio nella galassia si ottiene dal rapporto:

$$Y = \frac{M_{He}}{M_{gal}} = \frac{2,4 \cdot 10^{43} \text{ g}}{2 \cdot 10^{45} \text{ g}} \sim 0,01 \quad (2.6)$$

Questo risultato è nettamente in contrasto con quello ottenuto osservativamente, il quale raggiunge valori approssimativamente pari a $Y \approx 0,24$. Questa incongruenza tra il valore osservato e il valore calcolato è alla base dell'ipotesi di nucleosintesi primordiale, cioè di un processo di sintesi di idrogeno ed elio in quantità ingenti, che permetta quindi di spiegarne l'attuale abbondanza. E' possibile attribuire questo processo ad un periodo successivo al Big Bang che va da 1 a 3 minuti essendo questi gli unici momenti in cui l'Universo è stato caratterizzato da una densità abbastanza elevata da permetterlo, ma che con la successiva espansione quindi cessa di aver luogo non essendoci più le condizioni fisiche che lo permettono, inoltre questo limite temporale non permette la sintesi di elementi più pesanti del berillio.

Capitolo 3

Modello Cosmologico Standard Λ CDM

Il modello " Λ CDM" (*Cold Dark Matter*) deriva da osservazioni cosmologiche quali la CMBR e l'espansione dell'Universo. Esso si basa principalmente sulle assunzioni di isotropia, cioè l'assenza di direzioni preferenziali, e di omogeneità, cioè che su grande scala l'aspetto generale del cosmo è indipendente dalla posizione dell'osservatore e dalla direzione di osservazione.

Secondo questo modello l'Universo sarebbe costituito da tre elementi principali:

- Per il 68 % di energia oscura, indicata con la costante cosmologica Λ , rappresenta l'energia nel vuoto e su grande scala essa agisce come una forza repulsiva capace di prevalere sulla gravità.
- Per il 27 % da materia oscura fredda, cioè materia oscura non termalizzata.
- Per il restante 5 % da atomi e fotoni.

Queste sono le assunzioni fatte affinché il modello cosmologico sia consistente con i dati osservativi, ma questo non significa che siano necessariamente vere.

3.1 Il principio cosmologico

Il principio cosmologico è uno dei pilastri del modello Λ CDM ed è un'assunzione che ha permesso di ridurre drasticamente il numero delle teorie cosmologiche possibili nate fra il XIX e il XX secolo, in particolare è stato un ulteriore passo verso l'allontanamento dal modello Stazionario che era sostenuto da un'idea molto simile: il principio cosmologico perfetto. Esso ipotizzava l'Universo come identico a sé stesso in ogni punto e in ogni istante, questo implicava che la densità di energia dovesse rimanere costante e che ciò fosse

possibile tramite un meccanismo di produzione di materia ed energia che compensasse l'espansione.

Il principio cosmologico invece dice che l'Universo è omogeneo e isotropo, su scala sufficientemente grande, infatti osservativamente è possibile notare che al di sotto di 100 Mpc esso si presenta come disomogeneo e anisotropo, infatti la materia si addensa per formare oggetti come pianeti, stelle, galassie e ammassi e quindi non è possibile applicare questi concetti in maniera assoluta.

Nello specifico si ha che l'omogeneità implica che non esiste un punto che si distingue particolarmente rispetto agli altri e che quindi la massa è distribuita uniformemente a prescindere la luogo che si sceglie per fare l'osservazione. L'isotropia invece implica che non esiste una direzione privilegiata, ma che una vale l'altra se consideriamo l'Universo come privo di un centro vero e proprio e che quindi l'osservatore non occupa alcuna posizione considerata particolare rispetto a qualsiasi altra.

3.2 Geometria dell'Universo

Lo studio della geometria locale riguarda la curvatura dell'Universo osservabile in un generico punto. Partendo dai concetti precedentemente descritti di omogeneità e isotropia, si assume quindi di essere al centro di un volume occupato da un fluido con densità uniforme ρ , le cui particelle rappresentano le galassie e del quale studiamo la gravità trascurandone però temperatura e pressione.

La velocità di una particella posta a distanza dall'osservatore è:

$$\vec{v}_r = f(t)\vec{r} \quad (3.1)$$

che integrata da:

$$\vec{r} = R(t)\vec{r}_0 \quad (3.2)$$

Dove \vec{r} è la distanza misurata dall'osservatore, $R(t)$ è il parametro di espansione tale che $0 < R(t) \leq 1$ ($R(t) = 1$ se misurato oggi e con valore decrescente andando indietro nel tempo) e r_0 è detta *coordinata comovente*, che rappresenta la distanza presente fra due oggetti se essi non si muovessero, è quindi una maniera conveniente per definire le distanze in maniera indipendente dal tempo e quindi dall'espansione dell'Universo. Si assume quindi, per il *Teorema di Birkhoff* che tutta la massa M è contenuta nel centro della sfera di raggio R , tali che $R \gg \frac{MG}{c^2}$ e $M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$.

Per determinare l'accelerazione con la quale l'Universo si espande si scrive:

$$\ddot{R} = -\frac{GM}{R^2} = -\frac{4\pi G\rho R^3}{3R^2} \quad (3.3)$$

Che per $\rho(t)R^3 = \rho(t_0)R_0^3$ (con $R_0 = 1$ e $\rho(t_0)$ che rappresenta la densità attuale) diventa:

$$\ddot{R}R^2 + \frac{4\pi G\rho(t_0)}{3} = 0 \quad (3.4)$$

Quest'ultima equazione integrata dà la velocità:

$$\dot{R}^2 = \frac{8\pi G\rho(t_0)}{3R} - K \quad (3.5)$$

Con $K = U - T$. Le equazioni per la velocità \dot{R} e l'accelerazione \ddot{R} appena ricavate dicono quindi che il nostro Universo non è statico dato che $\ddot{R} = \dot{R} = 0 \iff M(\rho) = 0$.

A questo punto si possono ottenere tre differenti scenari a seconda del valore che scegliamo di attribuire a K detto parametro di curvatura:

- $K > 0 \rightarrow$ Universo Chiuso.

Caratterizzato da uno spazio a curvatura sferica, presenta un raggio massimo $R_{max} = 8\pi G\rho_0/3K$.

- $K < 0 \rightarrow$ Universo Aperto, $R \propto t$.

Caratterizzato da uno spazio a curvatura iperbolica in cui l'espansione avviene sempre più rapidamente.

- $K = 0 \rightarrow$ Universo Piatto (di Einstein - de Sitter), $R \propto t^{2/3}$.

Caratterizzato da uno spazio euclideo in cui l'espansione è crescente. Per R piccolo tutti i modelli convergono a questo.

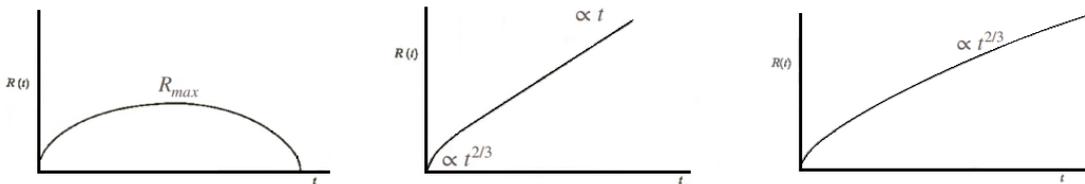


Figura 3.1: Grafici che mostrano come R vari in funzione del tempo in base al parametro di curvatura. Da sinistra si ha: $K > 0$ (Universo chiuso), $K < 0$ (Universo aperto), $K = 0$ (Universo piatto).

3.3 Densità critica e parametro di densità

La densità critica è rappresentata da un valore limite che discrimina un universo chiuso da uno aperto, cioè uno dominato dalla gravità da uno dominato dall'espansione.

$$\dot{R}^2 = \frac{8\pi G\rho(t_0)}{3R} = \frac{8\pi G\rho(t_0)R^3}{3} \quad (3.6)$$

Dato che $\dot{R}^2 = H^2 R^2$ si può scrivere:

$$H^2 R^2 = \frac{8\pi G R^2 \rho_c}{3} \Rightarrow \rho_c = \frac{3H_0^2}{8G\pi} \quad (3.7)$$

Con i valori attuali si ha:

$$\rho_{c,0} \simeq 9,2 \cdot 10^{-27} \text{ Kg } m^{-3} \quad (3.8)$$

Si definisce a questo punto il parametro di densità come il rapporto

$$\Omega_0 = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (3.9)$$

Dove ρ è intesa come densità media dell'Universo.

3.4 Equazioni di Friedmann

Le equazioni per la relatività generale di Einstein mettono in relazione le proprietà geometriche dello spazio-tempo con il tensore energia-momento, infatti esse sono alla base degli attuali modelli cosmologici. Tra il 1922 e il 1924 il russo Alexander Friedmann trovò le soluzioni a queste equazioni, ipotizzando che il raggio di curvatura R dipendesse dal tempo e che il valore scelto della costante cosmologica Λ ne determinasse l'evoluzione. Esse prendono il nome di equazioni di Friedmann e possono essere espresse nella forma:

$$\dot{R}^2 = \frac{8\pi G\rho R^2}{3} - k \quad (3.10)$$

$$\frac{2\ddot{R}}{R} + \frac{\dot{R}}{R^2} = -\frac{8\pi GP}{c^2} - \frac{k}{R^2} \quad (3.11)$$

Dove ρ è la densità di massa del fluido, k è il parametro di curvatura e P rappresenta la pressione del fluido.

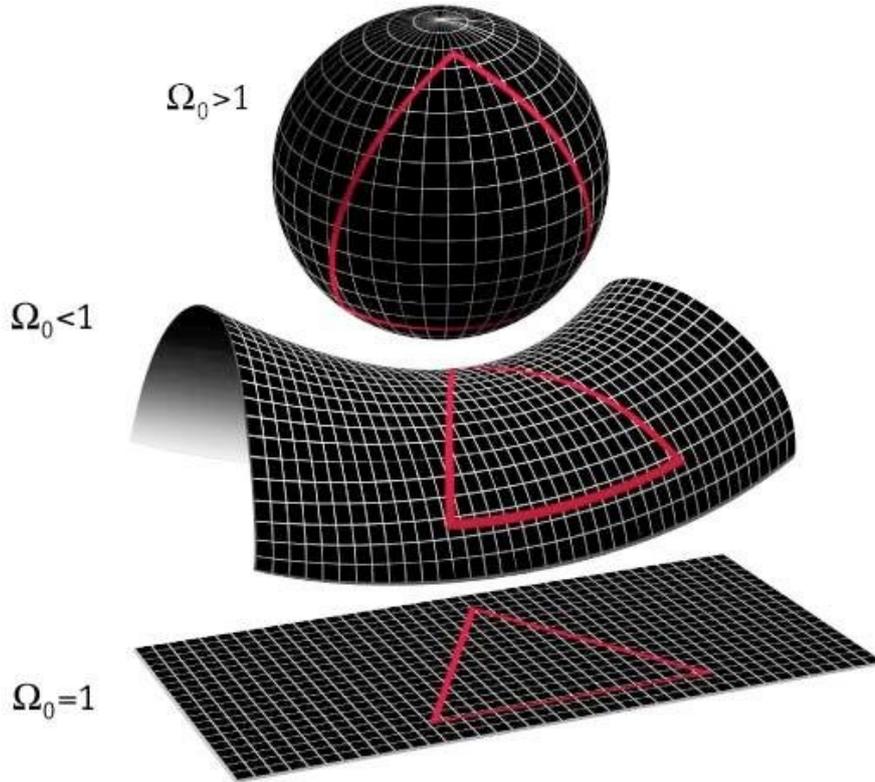


Figura 3.2: Rappresentazione grafica dei tre casi descritti, in riferimento al valore del parametro di densità Ω_0 . In alto, lo spazio a curvatura positiva (Universo sferico, chiuso) per cui il teorema di Pitagora diventa $h < \sqrt{x^2 + y^2}$; al centro, lo spazio a curvatura negativa (Universo iperbolico, aperto) per cui il teorema di Pitagora diventa $h > \sqrt{x^2 + y^2}$; in basso, lo spazio a curvatura nulla (Universo euclideo, piatto) per cui il teorema di Pitagora rimane invariato $h = \sqrt{x^2 + y^2}$.

Capitolo 4

Materia oscura

Al giorno d'oggi si sa ancora poco riguardo la materia oscura, sappiamo per certo che esiste perché ne possiamo osservare gli effetti gravitazionali, ma sulla sua natura e composizione si sa ben poco dato che essa non è osservabile come la materia ordinaria in quanto ha la caratteristica di non emettere alcun tipo di radiazione in nessuna delle bande dello spettro elettromagnetico.

E' stato calcolato che essa permea praticamente la maggior parte dell'Universo, infatti della materia che lo compone la materia oscura ne rappresenta una percentuale pari al 85%, mentre il restante 15% è formato da stelle e gas. Essendo la sua presenza non di poco conto e la sua natura ancora un'incognita, essa è tutt'oggi oggetto di studio da parte degli scienziati e rappresenta per ora uno dei dilemmi più grandi della cosmologia.

4.1 Prime evidenze osservative

La prima evidenza dell'esistenza della materia oscura fu trovata dall'astronomo svizzero Fritz Zwicky che stava osservando l'ammasso di galassie della Chioma. Egli stimò la massa di ogni galassia a partire dalla sua luminosità e infine le sommò per ottenere la massa totale dell'ammasso. In seguito ottenne una seconda stima della stessa quantità, basata però sulla misura della dispersione delle velocità delle galassie e che risultava 400 volte maggiore rispetto alla prima.

Infatti gli effetti gravitazionali provocati dalla massa calcolata a partire dalle galassie osservate non giustificava la stabilità dell'ammasso, cioè le sue componenti non avrebbero potuto essere così compatte ma si sarebbero dovute disperdere allontanandosi reciprocamente. Questo implicava la presenza di un'ulteriore massa che, tramite la sua attrazione gravitazionale, permettesse all'ammasso di rimanere unito e che, a causa del fatto che fos-

se invisibile alle osservazioni astronomiche, prese il nome di *dunkle Materie*, cioè materia oscura.

4.2 Curva di rotazione delle galassie a spirale

Una delle prove fondamentali dell'esistenza della materia oscura deriva dallo studio della curva di rotazione delle galassie a spirale. Queste possiedono una struttura che può essere suddivisa in tre zone differenti:

- Il *bulge* è la zona centrale di forma sferoidale, caratterizzato dalla presenza di stelle più vecchie e solitamente di un buco nero super massiccio.
- Il *disco* è la zona che circonda il centro ed è formato da stelle giovani, ammassi aperti e nubi di gas. Esso presenta un considerevole momento angolare che lo tiene in rotazione.
- La zona più esterna nella quale non sono presenti stelle ma solamente gas neutro.

Considerando la materia visibile si può stimare l'andamento della velocità di rotazione della galassia in funzione del raggio a partire dalla formula dell'accelerazione centripeta, che nel caso sia dovuta ad una forza gravitazionale può essere scritta come:

$$a_c = \frac{v^2}{R} = \frac{GM(R)}{R^2} \quad (4.1)$$

Da cui si ricava l'espressione per $v(R)$:

$$v(R) = \sqrt{\frac{GM(R)}{R}} \quad (4.2)$$

Per quanto riguarda il bulge è possibile calcolare la massa in funzione del raggio utilizzando la distribuzione di densità sferica, calcolo che porta al risultato:

$$v(R) \propto R \quad (4.3)$$

cioè la velocità cresce linearmente con l'aumentare del raggio.

Nel caso del disco bisogna considerare una distribuzione di densità superficiale che porta alla scomparsa della dipendenza dal raggio:

$$v(R) \propto R^0 \quad (4.4)$$

Nella zona più esterna invece, essendo la maggior parte della massa concentrata all'interno del raggio, è possibile considerare quest'ultima come se fosse concentrata nel centro e tramite questa assunzione si ha:

$$v(R) \propto \sqrt{R} \quad (4.5)$$

Quest'ultima rappresenta la cosiddetta *decrescita Kepleriana*, ritrovabile nello studio della velocità di rivoluzione dei pianeti, che decresce appunto con l'aumentare della distanza dalla stella attorno alla quale essi orbitano.

Se invece si mappa la rotazione di una galassia a spirale tramite l'effetto Doppler, sfruttando la riga a 21 cm dell'idrogeno, questa decrescita non si osserva in nessun caso. Questo porta a pensare che nelle zone esterne delle galassie a spirale, debba esistere una porzione di massa che non si riesce a rilevare tramite gli strumenti in nostro possesso e che fa in modo che la velocità di rotazione rimanga costante al posto di decrescere come ci si aspetterebbe.

Bibliografia

- [1] Cimatti A. *Astronomia, appunti e dispense*. Università di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2017
- [2] Ciotti L. *Astrofisica extragalattica, appunti e dispense*. Università di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2019
- [3] Dallacasa D. *Processi di Radiazione e MHD, appunti e dispense*. Università di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2018
- [4] Ferraro F. R. *Astrofisica Stellare, appunti e dispense*. Università di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2018
- [5] Gonzàles A. C. *La materia oscura. L'elemento più misterioso dell'universo*. Milano RBA, 2015
- [6] Vazza F. *Astrofisica Extragalattica, appunti e dispense*. Università di Bologna, Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2019