

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA  
CORSO DI LAUREA IN ASTRONOMIA

CENNI AL MODELLO DEL BIG BANG,  
INFLAZIONE E MATERIA OSCURA

TESI DI LAUREA

Presentata da:

**Francesca Fedi**

Relatore:

**Chiar.mo Prof. Daniele  
Dallacasa**

---

Anno accademico 2020-2021



*A mia mamma Stefania  
mia ispirazione, forza e serenità,  
al professor A. Bragagnolo  
costante punto di riferimento, maestro e guida,  
ad M. sempre al mio fianco  
e a me stessa.  
Grazie.*



# Indice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Evidenze osservative del Big Bang</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Redshift . . . . .   | 1         |
| 1.2 Legge di Hubble-Lemaître . . . . .   | 2         |
| <b>2. Il modello del Big Bang</b>  | <b>4</b>  |
| 2.1 Cronologia del Big Bang e inflazione . . . . .                                     | 4         |
| 2.2 Nucleosintesi primordiale e il problema dell'elio . . . . .                        | 5         |
| 2.3 Radiazione cosmica di fondo . . . . .  | 6         |
| <b>3. Modello cosmologico standard <math>\Lambda</math>CDM</b>                         | <b>8</b>  |
| 3.1 Geometria dell'universo . . . . .  | 8         |
| 3.2 Densità critica e parametro di densità $\Omega$ . . . . .                          | 10        |
| <b>4. Materia oscura</b>   | <b>12</b> |
| 4.1 Curva di rotazione delle galassie a spirale . . . . .                              | 12        |
| 4.2 Lenti gravitazionali . . . . .   | 14        |
| 4.3 Ipotesi sulla composizione della materia oscura . . . . .                          | 15        |
| <b>Appendice 1: Ricerca di WIMP e teorie alternative alla materia oscura . . . . .</b> | <b>A1</b> |
| <b>Appendice 2: Aloni di materia oscura e NGC 1052-DF2 . . . . .</b>                   | <b>A2</b> |



# Sommario

Le prime teorie cosmologiche nascono in un contesto *filosofico-religioso* già a partire dal IV secolo a.C. nell'Antica Grecia, ma la cosmologia moderna nasce fra il 1915 e il 1929 grazie alle importanti scoperte di Albert Einstein, Aleksandr Friedmann, Georges Lemaître, Edwin Hubble e molti altri scienziati.

Questo elaborato ha lo scopo di fornire una panoramica sulle principali teorie che hanno portato allo sviluppo della concezione di universo ad oggi maggiormente accettata. Espone inoltre le principali osservazioni astrofisiche che sono state necessarie alla comprensione della struttura dell'universo, fino ad arrivare a problemi ancora aperti e dibattuti.

Nel primo capitolo viene esposto il lavoro che Hubble ha svolto osservando gli spettri di emissione delle galassie, che si è concluso con la formulazione della *legge di espansione dell'universo*. Grazie a questa legge empirica, a cui era giunto nello stesso periodo anche Lemaître, si inizia a parlare di universo in espansione e si arriva allo sviluppo della *teoria del Big Bang*, in profondo contrasto con la visione di universo statico sostenuta fino a quel momento.

Nel secondo capitolo vengono descritte le *ere* che delineano le primissime fasi di vita dell'universo a partire da  $10^{-43}$  *sec*. Si considera poi la *teoria inflazionistica*, che prevede un'espansione accelerata dell'universo e la *teoria della nucleosintesi primordiale*, con cui vengono spiegate le attuali abbondanze di elio nell'universo. La radiazione cosmica di fondo, scoperta nel 1965, già prevista teoricamente a sostegno del modello del Big Bang, occupa l'ultima parte del capitolo.

Nel terzo capitolo si prendono in esame i possibili modelli cosmologici che cercano di spiegare come l'espansione dell'universo si evolva nel tempo. Attualmente il modello che meglio riproduce le osservazioni cosmologiche del Big Bang è il *Modello Cosmologico Standard  $\Lambda$ CDM* che ipotizza, oltre alla presenza della *materia barionica*, anche la presenza di *materia oscura* ed *energia oscura*.

Il quarto capitolo è concentrato sulla materia oscura: si pensa che sia una particolare forma di materia non interagente con la radiazione elettromagnetica, rilevabile quindi solo grazie ai suoi *effetti gravitazionali*. Esistono numerosi fenomeni, come le *lenti gravitazionali* e le velocità misurate dallo studio delle *curve di rotazione delle galassie a spirale*, a cui è però possibile dare una spiegazione solo introducendo questo tipo di materia sconosciuta.



# Capitolo 1

## Evidenze osservative del Big Bang

A partire dal 1920, Edwin P. Hubble utilizzando il più grande telescopio di quell'epoca, quello dell'osservatorio di Mount Wilson, studiò gli spettri di un gruppo di 24 galassie, al fine di misurare le loro velocità radiali.

Hubble e il suo collaboratore, Milton L. Humason, analizzarono gli spettri di tali galassie e, con il supporto di precedenti misurazioni effettuate da Vesto M. Slipher, si accorsero che la maggior parte degli spettri presentava uno spostamento sistematico delle righe spettrali verso il rosso, il *redshift*, il quale indicava che le galassie si stavano *allontanando* dalla Terra. Un'eccezione risultò essere Andromeda che presentava invece un *blueshift*, il quale indicava che la galassia era in *avvicinamento*.

Hubble formulò la così detta "Legge di Hubble-Lemaître", chiamata così perché anche Georges Lemaître nel medesimo periodo era giunto in modo teorico alle stesse conclusioni. Essa è una legge empirica che afferma l'esistenza di una relazione lineare tra il redshift delle galassie, interpretato come una misura della velocità di recessione, e la loro distanza. Ne segue che le velocità di allontanamento delle galassie sono tanto più elevate, quanto maggiore è la loro distanza.

Tale legge portò ad un gigantesco cambiamento nella concezione dell'Universo, che fino a quel momento era considerato *statico*: gli astronomi iniziarono a parlare di Universo in *espansione* e più tardi questa scoperta culminerà con la formulazione della teoria del *Big Bang* da parte di George Gamow e Ralph Alpher.

### 1.1 Redshift

Nell'ambito della spettroscopia astronomica è possibile misurare e scomporre la radiazione emessa da un corpo celeste, generando così lo *spettro elettromagnetico* del corpo, nel quale possono essere presenti righe spettrali in assorbimento o in emissione, la cui natura dipende dalle caratteristiche del corpo stesso. Osservando uno spettro elettromagnetico, come ad esempio quello di una galassia, è possibile determinare se il corpo in analisi è in allontanamento o in avvicinamento rispetto a noi, confrontando le sue righe spettrali, con quelle di elementi studiati in laboratorio o con quelle di sorgenti note.

Questo fenomeno è dovuto all'*effetto Doppler*, che consiste nel cambiamento apparente, rispetto al valore originario, della lunghezza d'onda  $\lambda$  (o della frequenza  $\nu$ ) della radiazione emessa da una sorgente, dovuto alla velocità radiale della sorgente stessa e si manifesta con uno *spostamento* delle righe.

Se  $\lambda$  è la lunghezza d'onda della radiazione emessa da una sorgente e  $\lambda_{oss}$  quella osservata, in un regime *non* relativistico ( $v \ll c$ ), allora il redshift  $z$  è:

$$z = \frac{\lambda_{oss} - \lambda}{\lambda}$$

Si possono distinguere 3 diversi casi, rappresentati anche nella figura 1.1:

1. Se  $\lambda = \lambda_{oss} \Rightarrow z = 0$ , sistema *fermo*.
2. Se  $\lambda > \lambda_{oss} \Rightarrow z < 0$ , sistema in *avvicinamento*: *blueshift*.
3. Se  $\lambda < \lambda_{oss} \Rightarrow z > 0$ , sistema in *allontanamento*: *redshift*.

In definitiva tali risultati non indicano il moto delle galassie attraverso lo spazio, ma l'espansione dello stesso spazio-tempo in cui le galassie sono inserite, cioè l'espansione dell'universo: per questo si parla di *redshift cosmologico*.

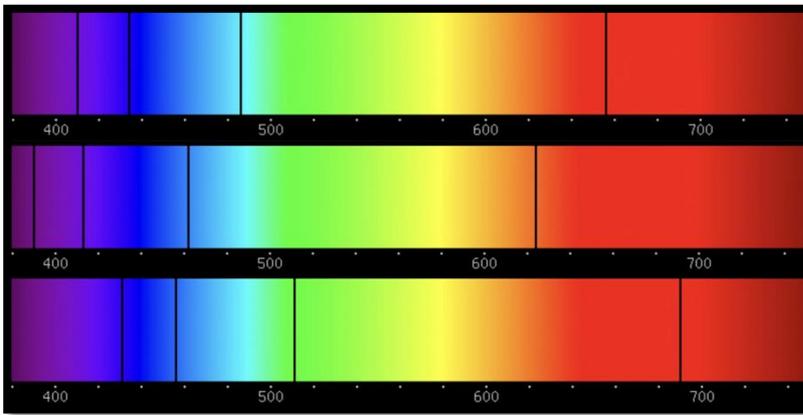


Figura 1.1: Confronto delle linee in assorbimento in tre diversi spettri (spettro visibile  $\sim 400 - 700$  nm). In alto si osserva un sistema fermo (caso 1), in mezzo si osserva un sistema in avvicinamento (caso 2) e in basso un sistema in allontanamento (caso 3).

[Fonte: <http://scisyn.com/> riadattata].

## 1.2 Legge di Hubble-Lemaître

La *legge di Hubble-Lemaître*, che mostra la proporzionalità tra la velocità di recessione delle galassie  $v$  e la loro distanza  $D$ , nella sua forma più utilizzata, si può scrivere come:

$$v = H_0 D$$

Tale legge fissa una retta sul piano  $v - D$ , dove  $H_0$  rappresenta la pendenza della retta e prende il nome di *costante di Hubble*. Inizialmente Hubble, come mostrato nella figura 1.2, prese in analisi le galassie vicine alla Via Lattea, stimando la loro velocità e la loro distanza grazie all'uso delle Cefeidi come candele standard. Risultò che esse si stavano allontanando con una velocità proporzionale alla loro separazione. Successivamente Hubble riuscì a compiere osservazioni sempre più profonde, ma all'aumentare delle distanze aumentava anche l'incertezza sulla retta.

Attualmente (figura 1.2) si riescono a raggiungere profondità di  $\sim 600$  Mpc utilizzando, come candele standard, le *Supernovae Ia* e la stima odierna di  $H_0$  è:

$$H_0 \approx 70 \text{ km/sec/Mpc}$$

Pertanto, considerando una galassia distante  $1000 \text{ Mpc}$ , la velocità di allontanamento dalla Terra è circa di  $70\,000 \text{ km/s}$ .

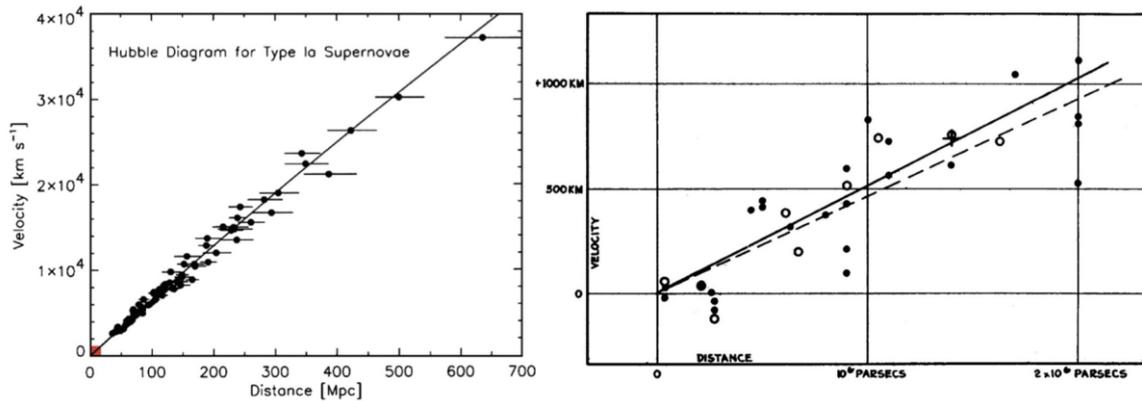


Figura 1.2: A destra si osserva la relazione trovata da Hubble nel 1929 e presentata nell'articolo "A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae". Le relazioni in realtà sono due: la linea continua e la linea tratteggiata. Da quest'ultima, derivata dal raggruppamento di 24 galassie (punti neri) in 9 gruppi (punti bianchi), Hubble ottenne il valore (errato) di  $513 \text{ km/s/Mpc}$ . La croce rappresenta la distanza media delle galassie. A sinistra è invece mostrata la relazione di Hubble ottenuta con i dati delle Supernovae Ia che consentono di raggiungere distanze estremamente maggiori. Il quadratino rosso, all'origine delle coordinate, indica la regione investigata da Hubble nel 1929. [Fonte: "L'uomo e il cosmo" di Paola Focardi e riadattata].

La costante di Hubble fissa la scala delle distanze e dei tempi in Cosmologia, infatti è possibile ricavare il così detto *tempo di Hubble*  $\tau_0$  come l'inverso di  $H_0$ .

$$\tau_0 = \frac{1}{H_0}$$

Considerando il tasso di espansione dell'universo, se esso fosse:

- Costante  $\Rightarrow \tau_0$  corrisponderebbe all'età dell'universo;
- In graduale rallentamento  $\Rightarrow \tau_0$  rappresenterebbe un limite superiore dell'età dell'universo;
- In accelerazione  $\Rightarrow$  l'età dell'universo potrebbe essere maggiore di  $\tau_0$ .

Grazie a recenti misurazioni, effettuate dal satellite *Planck*, si stima che l'età dell'universo sia di  $13.80 \pm 0.02 \text{ Gyr}$ .

Infine, secondo studi attuali, il valore di  $H_0$  non sarebbe fisso, ma si evolverebbe in base alla distanza cosmologica dell'oggetto studiato; tale ipotesi è stata basata sulla così detta "tensione sulla costante di Hubble" che indica una discrepanza fra le misure a seconda del metodo adottato.

Se viene eseguita una stima locale, considerando un basso redshift, ed utilizzando le candele standard come metodo di misurazione della distanza, il risultato ottenuto corrisponde ad:  $H_{local} \approx 74.03 \pm 1.42 \text{ km/s/Mpc}$ .

Invece, una stima eseguita utilizzando le fluttuazioni della radiazione cosmica di fondo CMB ad alto redshift ( $z \sim 1000$ ) fornisce un risultato pari a:  $H_{CMB} \approx 67.4 \pm 0.5 \text{ km/s/Mpc}$ .

# Capitolo 2

## Il modello del Big Bang

Grazie alla legge di espansione dell'universo, iniziarono a svilupparsi nuove teorie cosmologiche. Tra queste, spicca la teoria pubblicata da Lemaître nel 1931 e la teoria dello *Stato Stazionario* (Steady-State) di Fred Hoyle, la quale prevedeva una continua creazione di materia per sostenere l'espansione dell'universo con la conseguenza che l'universo non avesse né un inizio né una fine. Alla fine degli anni '40 la teoria di Lemaître pose le basi della *teoria del Big Bang*. Lemaître suppose che l'evidente espansione del cosmo necessitasse di un processo di *contrazione* a ritroso nel tempo, raggiungendo un punto in cui le distanze sarebbero state pari a zero. La teoria del Big Bang si basa su di una *singolarità* primordiale, un "punto" materiale contenente tutta la massa dell'universo, in cui la densità della materia, la sua temperatura e la curvatura dello spazio-tempo sono infinitamente grandi. In questa ipotesi, si pensa che nell'universo si fosse stabilito un perfetto *equilibrio* tra energia e materia che, grazie ad  $E = mc^2$ , si trasformano l'una nell'altra. Si può pensare quindi, che l'universo sia nato in seguito ad una grande *esplosione* iniziale a partire dalla singolarità, che causò l'*espansione*, ancora oggi osservata. Con il passare del tempo si sarebbe verificato un graduale abbassamento della temperatura, dell'energia interna e della densità. Tale espansione interessa l'intero spazio-tempo: ciascun punto dell'universo è centro di espansione e non esiste un punto privilegiato o un "centro" dal quale l'espansione parte. È necessario chiarire che il Big Bang non rappresenta ancora una teoria fisica sull'origine del cosmo completamente sviluppata ed esaustiva, poiché non si è ancora riusciti a comprendere la fisica al tempo  $t = 0$ . Per fare questo sarebbe necessario sviluppare una *nuova* teoria fisica con lo scopo di unificare la relatività generale e la meccanica quantistica, la così detta *gravità quantistica*.

### 2.1 Cronologia del Big Bang e inflazione

I primi istanti dell'evoluzione dell'universo non sono accessibili alle osservazioni astronomiche, ma è stato ipotizzato cosa potrebbe essere avvenuto a partire da  $10^{-43}$  sec dopo il Big Bang. Le *ere* che delineano le primissime fasi di vita dell'universo sono :

- Tra  $0$  e  $10^{-43}$  secondi: era di Planck. In questo periodo, si suppone che le quattro *forze fondamentali*: gravitazionale, elettromagnetica, forte e debole, fossero unificate.
- Tra  $10^{-43}$  e  $10^{-36}$  secondi: era della GUT (Grand Unification Theory). All'inizio di questa epoca la forza di gravità si disaccoppia dalle altre forze, che restano unificate in una sola forza descritta dalla *Teoria della grande unificazione*. La temperatura si riduce da  $10^{40}$  a  $10^{36}$  K e si ipotizza la nascita dello spazio-tempo.

- Tra  $10^{-36}$  e  $10^{-32}$  secondi: era dell'inflazione. Questo periodo è caratterizzato da una rapida *accelerazione* dell'espansione dell'universo, che aumenta le sue dimensioni di circa  $10^{27}$  volte *dilatandosi* esponenzialmente. La forza forte si separa da quella elettrodebole, la temperatura diminuisce fino a  $10^{33} K$  e, grazie all'energia liberata dall'espansione, vengono create coppie di particelle, come quark e leptoni, e antiparticelle.
- Tra  $10^{-32}$  e  $10^{-12}$  secondi: era elettrodebole. In questa era la forza debole si separa da quella elettromagnetica e la temperatura scende a  $10^{20} K$ .
- Tra  $10^{-12}$  e  $10^{-6}$  secondi: era dei quark. In tale epoca le energie sono ancora troppo alte per consentire ai quark di combinarsi tra loro per formare barioni o mesoni; infatti la materia risulta principalmente costituita da una miscela di quark, gluoni e leptoni. La temperatura arriva a  $10^{16} K$  e le quattro forze fondamentali, separate, assumono le proprietà che osserviamo oggi.
- Tra  $10^{-6}$  secondi e 1 secondo: era adronica. Durante questa era la temperatura scende a  $10^{12} K$  e l'energia termica è abbastanza bassa da permettere l'interazione tra i quark, che si uniscono per formare gli adroni (neutroni e protoni). Tutti gli adroni sarebbero dovuti scomparire per annichilazione, ma si pensa che si sia generata una lievissima *asimmetria* nella produzione di adroni e antiadroni e per questo motivo oggi la materia domina sull'antimateria. Si pensa inoltre che le particelle di materia oscura (Dark Matter DM) si siano formate durante questa epoca.
- Tra 1 secondo e 3 minuti: era leptonica. In questo periodo la temperatura si abbassa fino a  $10^{10} K$ , grazie all'emissione di neutrini, e non consente più la formazione di coppie di elettroni e positroni. Anche in questa fase, a causa di una piccolissima *asimmetria* tra la produzione di materia e antimateria, l'annichilazione non porta ad una totale scomparsa di queste particelle (sopravvive un piccolo residuo di elettroni, positroni, neutrini ed antineutrini).
- Dopo  $\sim 3$  minuti e 20 secondi: epoca della nucleosintesi. Durante tale periodo la temperatura scende a  $10^9 K$  e, grazie alla combinazione di neutroni e protoni, si formano i primi nuclei stabili.

## 2.2 Nucleosintesi primordiale e il problema dell'elio

L'abbondanza di elio che si misura nell'universo ( $Y \sim 0.24 \div 0.28$ ), è troppo *alta* per essere spiegata solo dal bruciamento dell'idrogeno nelle *reazioni termonucleari* delle stelle.

Stimando la quantità di elio che può essere stata prodotta dalle stelle da quando si è formato l'universo (tempo di Hubble  $\tau_0 \sim 13 Gyr$ ), si osserva che i risultati sono nettamente in *contrasto* con i dati osservativi. L'ipotesi della *nucleosintesi primordiale* riesce a spiegare tale incongruenza e giustifica così, l'attuale abbondanza di elio nell'universo. È possibile svolgere il calcolo dell'elio prodotto da parte delle stelle della Via Lattea, sapendo che:

$$L_{gal} \sim 10^{11} L_{\odot} \sim 10^{11} \cdot 4 \cdot 10^{33} = 4 \cdot 10^{44} [erg \cdot sec^{-1}]$$

$$M_{gal} \sim 10^{12} M_{\odot} \sim 10^{12} \cdot 2 \cdot 10^{33} = 2 \cdot 10^{45} [g]$$

e supponendo che tutta la luminosità della galassia sia sempre rimasta costante e provenga dal solo bruciamento dell'idrogeno in elio. L'energia prodotta nel tempo di Hubble è:

$$\tau_0 = 13 \cdot 10^9 [\text{yr}] = 4 \cdot 10^{17} [\text{sec}] \Rightarrow E_{TOT} = 4 \cdot 10^{44} \cdot 4 \cdot 10^{17} = 1.6 \cdot 10^{62} [\text{erg}]$$

L'energia di legame di un nucleo di elio, ovvero l'energia prodotta dal bruciamento di quattro nuclei di idrogeno per produrre un nucleo di elio è pari a :  $E_{He} \sim 4.5 \cdot 10^{-5} [\text{erg}]$ . Quindi il numero di atomi di  $He^4$  che si sono formati in 13 Gyr è:

$$N_{He} = \frac{E_{TOT}}{E_{He}} = \frac{1.6 \cdot 10^{62} [\text{erg}]}{4.5 \cdot 10^{-5} [\text{erg}]} = 3.5 \cdot 10^{66}$$

Sapendo che la massa di un atomo di  $He^4$  è  $m_{He} \sim 6.64 \cdot 10^{-24} [g]$ , la massa totale di elio prodotta da quando la Via Lattea si è formata corrisponde a:

$$M_{He} = N_{He} \cdot m_{He} \sim 3.5 \cdot 10^{66} \cdot 6.64 \cdot 10^{-24} = 2.3 \cdot 10^{43} [g]$$

La frazione in massa di elio prodotta è dunque:

$$Y = \frac{M_{He}}{M_{gal}} = \frac{2.3 \cdot 10^{43}}{2 \cdot 10^{45}} \sim 0.01$$

Tale risultato non è coerente con i dati osservativi, i quali mostrano che l'abbondanza di elio è circa 20 volte maggiore, pertanto deve esserci stato un processo estremamente *efficiente* che, su tempi scala molto *brevi*, abbia prodotto questa grande quantità di elio, che costituisce *un quarto* della massa dell'universo. Nelle fasi antecedenti la nucleosintesi, è stato prodotto un considerevole quantitativo di neutroni, il cui tempo di decadimento  $\beta^- (n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e)$  di 10 minuti, in questo contesto, risulta estremamente lungo rendendoli così stabili.

Pertanto grazie ai neutroni liberi e temperature di  $10^9 K$ , vengono generati i primi nuclei stabili, cioè il deuterio ( $H^2$ ), il trizio ( $H^3$ ), l'elio-3 ( $He^3$ ) e l'elio-4 ( $He^4$ ) con tracce di Litio e Berillio. Non si sono formati elementi più pesanti dell' $He^4$  perché in natura non esistono *isotopi stabili* con peso atomico  $A = 5$  o  $A = 8$ , quindi il risultato finale è un'abbondanza di circa 75% di idrogeno e 25% di elio.

## 2.3 Radiazione cosmica di fondo

Nel 1948 G. Gamow, R. Alpher ed R. Herman avevano ipotizzato che, per effetto del Big Bang, si sarebbe generata una radiazione uniforme che avrebbe permeato l'intero cosmo in modo *isotropo* e, come per il redshift delle galassie, per effetto dell'espansione dell'universo, avrebbe diminuito progressivamente la propria frequenza e sarebbe stata osservabile, ai giorni nostri, nella banda delle *microonde*. In modo casuale, nel 1965 due fisici A. Penzias ed R. Wilson scoprirono la presenza di tale radiazione di fondo, cioè un flusso di fotoni che giunge da ogni direzione e non direttamente associabile a oggetti individuali come stelle o galassie. Questa radiazione venne chiamata *Cosmic Microwave Background (CMB)* e, nel contesto della teoria del Big Bang, essa si interpreta come il residuo fossile dei fotoni emessi al tempo del disaccoppiamento tra radiazione e materia che provoca la diffusione dei fotoni per *scattering*, fotoni quindi partiti a  $\sim 380\,000 \text{ yr}$  dal Big Bang.

Il *disaccoppiamento radiazione-materia* è stato un momento chiave nelle fasi evolutive dell'universo, poiché esso segna la transizione da universo *opaco* alla radiazione, costituito da plasma ionizzato, a universo *trasparente* alla radiazione nel quale i fotoni possono propagarsi liberamente diventando osservabili. Le prime misurazioni dettagliate della CMB eseguite dal satellite *COBE (Cosmic Background Explorer)*, mostrano che essa è una curva di emissione di corpo nero perfetto a  $\sim 2.7\text{ K}$ . Grazie a telescopi che lavorano nello spettro delle microonde, sono state inoltre ottenute delle immagini della CMB che mostrano come appariva l'universo quando è diventato trasparente (figura 2.1).

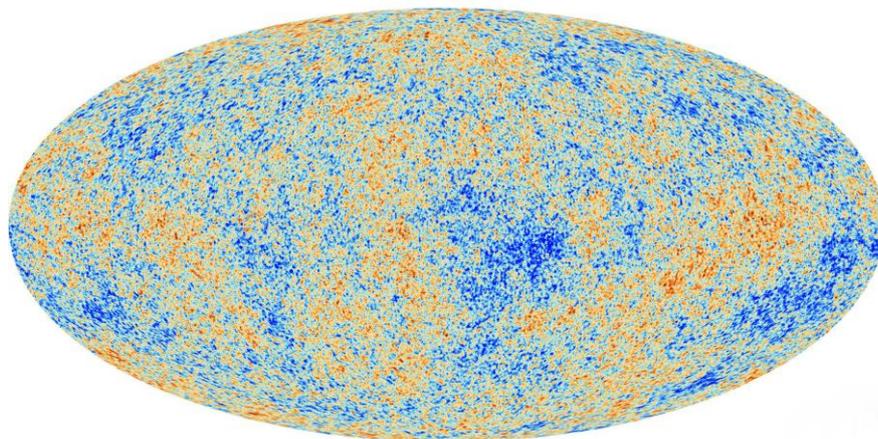


Figura 2.1: Mappa della Radiazione Cosmica di fondo ( $T_{\text{CMB}} = 2.725 \pm 0.002\text{ K}$ ,  $\lambda_{\text{max}} = 1.06\text{ mm}$ ) [Fonte: ESA].

Questa mappa evidenzia una generale uniformità della radiazione, anche se sono presenti delle piccolissime *fluttuazioni* di temperatura, che qui sono state amplificate. Le fluttuazioni derivano dalla distribuzione della *densità di materia* al momento del disaccoppiamento: se un fotone è stato emesso in una regione di spazio più densa, perde energia per riuscire ad uscire dalla buca di potenziale della materia (redshift), viceversa se la densità è minore rispetto alla media, i fotoni perdono meno energia (blueshift). Queste fluttuazioni sono dovute anche al percorso che i fotoni compiono per giungere all'osservatore, cioè causate da una combinazione di *redshift e blueshift gravitazionali* che cambiano la frequenza dei fotoni, causati da strutture massive, come ammassi di galassie, oppure da buche di potenziale di materia oscura. Da misurazioni risulta che le fluttuazioni della densità della *materia barionica* sono dell'ordine di  $10^{-5}$ , mentre quelle della *materia oscura*, non barionica, sono di circa  $10^{-3}$ , due ordini di grandezza maggiori rispetto alle prime. Ciò vuol dire che la materia oscura ha permesso la condensazione della materia barionica.

Infine è opportuno specificare che la *teoria dell'inflazione* riesce anche a spiegare il motivo dell'uniformità della CMB, infatti la velocità di espansione assunta durante l'inflazione, prevede che l'universo abbia raggiunto le dimensioni attuali partendo da un minor volume rispetto a quello previsto dal Big Bang Standard. Questo ha permesso alla luce di percorrere l'intero volume dell'universo prima dell'inizio dell'inflazione, rendendo omogenei i valori della CMB. L'inflazione ha poi allontanato regioni di universo a distanze tali da non renderle visibili, poiché la loro velocità di allontanamento era *superiore* a quella della luce. Questo *non* è in contraddizione con la relatività generale, perché essa vieta agli oggetti di superare la velocità della luce nel loro moto attraverso lo spazio, ma non pone limiti alla loro velocità di recessione dovuta all'espansione dello spazio stesso. Per cui regioni dello spazio osservabile che oggi non sono connesse, lo sono state in passato, e questo spiega l'omogeneità della CMB.

# Capitolo 3

## Modello cosmologico standard $\Lambda$ CDM

Il modello  $\Lambda$ CDM *Lambda Cold Dark Matter* è il modello cosmologico che, ad oggi, meglio riproduce le osservazioni cosmologiche del Big Bang. Tale modello riesce a spiegare le fluttuazioni della CMB, l'espansione accelerata dell'universo misurata per mezzo delle supernovae, la struttura a grande scala dell'universo e il problema della densità critica.

Secondo questo modello, l'universo è costituito da un 68% di *energia oscura* rappresentata dalla *costante cosmologica*  $\Lambda$ , da un 27% di *materia oscura fredda*, rilevabile solo gravitazionalmente e da un restante 5% di *materia barionica*, cioè da materia ordinaria, mentre la *radiazione* è trascurabile. L'energia oscura ha densità costante, riempie omogeneamente lo spazio, è l'equivalente dell'energia del vuoto e su grande scala prevarrebbe sulla gravità agendo come forza repulsiva.

Il modello standard si basa sul *principio cosmologico*, ovvero sull'assunzione che l'universo, su grande scala, sia *isotropo* e *omogeneo*, cioè che le sue proprietà fisiche siano le stesse in tutte le direzioni e in ogni punto per qualunque osservatore.

Riuscire a comprendere con precisione come l'espansione dell'universo si evolva nel tempo, dipende dalla possibilità di determinare il suo contenuto complessivo di materia e di energia. Considerando l'universo nella sua totalità è possibile definire la sua *curvatura*, cioè come la *geometria globale* dell'universo viene influenzata dalla massa e dall'energia.

### 3.1 Geometria dell'universo

L'*equazione di Friedmann* che descrive l'espansione dell'universo è l'equazione più importante in cosmologia. È possibile derivare tale equazione tramite una trattazione newtoniana senza bisogno di utilizzare la relatività generale, poiché entrambi i metodi portano allo stesso risultato. Tuttavia, la derivazione newtoniana si basa su un modello di universo semplificato ed è lontana dall'essere rigorosa, ma risulta utile.

Questo modello prevede di essere al centro di un universo con volume sferico, occupato da un fluido *omogeneo* e *isotropo*, con densità costante  $\rho$ , in cui agisca solo la gravità, trascurando pressione e temperatura. Sia  $m$  la massa di una particella posta ad una distanza  $R(t)$  dal centro dell'universo, essa risente della forza gravitazionale della massa  $M$  contenuta a raggi inferiori:

$$M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \qquad F = \frac{G4\pi R^3 \rho m}{3R^2} = \frac{G4\pi R \rho m}{3}$$

L'energia potenziale e cinetica della particella test sono:

$$V = -\frac{GMm}{R} = -\frac{G4\pi R^2 \rho m}{3} \qquad T = \frac{1}{2}m \dot{R}^2$$

Per la conservazione dell'energia: 
$$U = T + V = \frac{1}{2} m \dot{R}^2 - \frac{4G\pi R^2 \rho m}{3} \quad (3.1)$$

L'omogeneità dell'universo permette di usare le coordinate comoventi  $s_0$ , introducendo la funzione  $a(t)$  detta *fattore di scala* dell'universo che misura il suo tasso di espansione:

$$\mathbf{R}(t) = a(t) \mathbf{s}_0 \quad ; \quad \dot{\mathbf{R}} = \dot{a}(t) \mathbf{s}_0 \quad (3.2)$$

Sostituendo (3.2) in (3.1):

$$U = \frac{1}{2} m \dot{a}^2 s_0^2 - \frac{4G\pi a^2 s_0^2 \rho m}{3}$$

e moltiplicando entrambi i membri per  $\frac{2}{ma^2 s_0^2}$  si ottiene:

$$\frac{2U}{ma^2 s_0^2} = \frac{\dot{a}^2}{a^2} - \frac{8}{3} G\pi\rho \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8}{3} G\pi\rho + \frac{2U}{ma^2 s_0^2}$$

Con la sostituzione  $-\frac{2U}{ms_0^2} = Kc^2$  si ottiene l'equazione di Friedmann:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8}{3} G\pi\rho - \frac{K}{a^2} c^2 \quad (3.3)$$

$K$  nell'interpretazione relativistica è il *parametro di curvatura* dello spazio.

Sono possibili tre diversi valori per  $K$  che indicano tre possibili curvaturei dell'universo a cui corrispondono tre diverse geometrie, come mostrato nella figura 3.1.

- $K = 0$  *Modello di universo di Einstein-de Sitter, piatto a curvatura nulla.*  
Esso rappresenta qualitativamente un universo ad espansione parabolica, localmente euclideo. In questo caso il raggio si espande come  $R \propto t^{\frac{2}{3}}$  e la velocità di espansione tende a zero per  $t \rightarrow \infty$ . Uno spazio piatto a curvatura nulla è infinito.
- $K < 0$  *Modello di universo iperbolico aperto, a curvatura negativa.*  
Inizialmente l'espansione va come  $R \propto t^{\frac{2}{3}}$ , poi all'infinito  $R \propto t$ , quindi da un certo tempo in poi l'espansione avviene a velocità costante.  
L'energia cinetica domina su quella potenziale e tale modello prevede un universo essenzialmente vuoto. Anche in questo caso, essendo l'iperboloide una figura geometrica di estensione infinita, anche lo spazio sarebbe tale.
- $K > 0$  *Modello di universo chiuso, sferico a curvatura positiva.*  
In questo caso l'energia potenziale domina su quella cinetica ed è prevista un'oscillazione della struttura dello spazio-tempo, che rappresenta la simmetria tra Big Bang e Big Crunch, cioè un ricollasso dello spazio-tempo. Lo spazio risulta finito, essendo che la superficie sferica è finita.

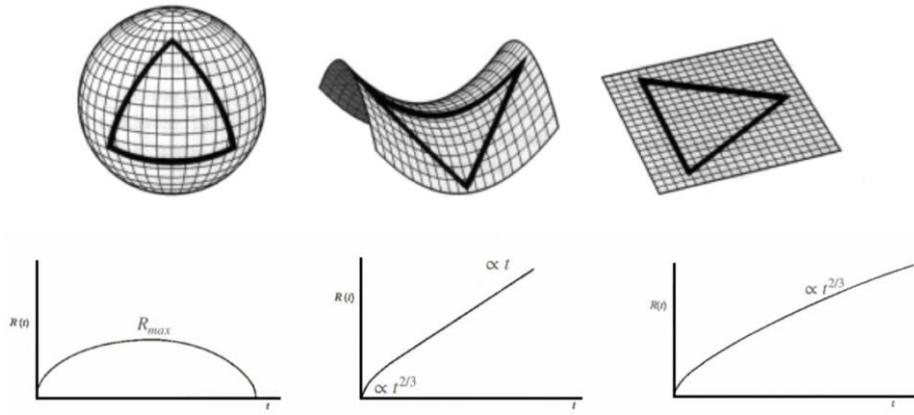


Figura 3.1: A sinistra si osserva il modello di universo chiuso con  $K > 0$ , al centro il modello di universo aperto con  $K < 0$  e a destra il modello di universo piatto con  $K = 0$ . È evidente che tutti i possibili scenari appena descritti hanno in comune il loro inizio, che al tempo  $t = 0$  prevede la nascita dell'universo con il Big Bang.

## 3.2 Densità critica e parametro di densità $\Omega$

L'evoluzione temporale dell'universo dipende da un particolare valore della densità di materia, chiamato *densità critica*  $\rho_{cr}$ . Nei primi istanti di vita dell'universo, se la densità fosse stata maggiore della sua densità critica, la gravità avrebbe prevalso e l'universo si sarebbe subito chiuso. Se fosse stata inferiore invece, si sarebbe espanso così velocemente da apparire sostanzialmente vuoto.

Recenti misurazioni hanno mostrato che la densità dell'universo è uguale alla densità critica, ricavata dalle equazioni di Friedmann con  $K=0$  ovvero il caso di un universo a curvatura nulla.

Dall'equazione di Friedmann (3.3) con  $K = 0$  e dalle equazioni (3.2), si ottiene:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho_{cr}$$

Considerando la legge di Hubble  $\dot{R} = H_0 R(t)$  e sostituendo  $\dot{R}^2 = H_0^2 R^2$ , si ricava:  $H_0^2 = \frac{8\pi G \rho_{cr}}{3}$  da cui la densità critica risulta:

$$\rho_{cr} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

Ad oggi la stima più precisa della densità critica è:  $\rho_{cr}(t_0) \approx 1.88 \cdot 10^{-26} h^2 \text{ kg m}^{-3}$  (dove  $h = H_0/100 \text{ km/s/Mpc}$ ). Invece di utilizzare la densità  $\rho$ , si definisce il *parametro di densità*  $\Omega$ .

$$\Omega(t) = \frac{\rho(t)}{\rho_{cr}(t)}$$

Il modello di universo piatto ( $K = 0$ ) corrisponde al caso con  $\Omega = 1$ . Il modello di universo aperto ( $K < 0$ ), corrisponde al caso con  $\Omega < 1$ , mentre il modello di universo chiuso ( $K > 0$ ), si riferisce al caso con  $\Omega > 1$ .

Con misure sulle fluttuazioni della CMB si è mostrato che lo spazio è piatto ( $\Omega = 1$ ). Tale risultato, ottenuto con l'esperimento *BOOMERanG*, utilizzando un pallone sonda lanciato dal Polo Sud, è stato successivamente confermato da osservazioni effettuate con i telescopi *WMAP* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) della NASA e da *Planck* dell'ESA.

Poiché l'universo piatto richiede che  $\Omega = 1$  e  $\rho = \rho_{cr}$ , è quindi necessario stimare il parametro di densità  $\Omega$  riferendolo alla somma di tutte le componenti di energia e materia presenti nell'universo.

Le quantità che contribuiscono a tale parametro sono la *materia oscura* ( $\Omega_{DM}$ ), la *materia barionica* ( $\Omega_{bar}$ ), i *fotoni* ( $\Omega_\gamma$ ) e i *neutrini* ( $\Omega_\nu$ ), anche se il contributo di questi ultimi due elementi è trascurabile rispetto a quello della materia.

Dalle analisi più recenti risulta che  $\Omega_{DM} + \Omega_{bar} = 0.25 + 0.05 = 0.3$ .

È evidente che i conti non tornano: da una parte si è sicuri che  $\Omega_{TOT} = 1$  ma dall'altra che il contributo della materia è  $\Omega_m \{ \Omega_{bar}, \Omega_{DM} \} = 0.3$ .

Si ipotizza quindi la presenza di una componente priva di massa, l'*energia oscura* ( $\Omega_\Lambda$ ), che contribuisca al 70% del parametro di densità totale:

$$\Omega_{TOT} = \Omega_{DM} + \Omega_{bar} + \Omega_\Lambda = 1.$$

L'energia oscura agisce in modo repulsivo e antigravitazionale, favorendo l'espansione dell'universo. Oltre all'utilizzo delle fluttuazioni della radiazione di fondo, tali risultati sono anche confermati da altre evidenze sperimentali come ad esempio dalla struttura a grande scala della materia. Le galassie infatti non si distribuiscono nello spazio in modo casuale, la loro disposizione nei filamenti di materia, nei nodi ad alta densità, e le caratteristiche dei vuoti cosmici, dipendono dalla densità di materia nell'universo. Quindi lo studio della struttura a ragnatela cosmica dell'universo, mostrata nella figura 3.2, permette di ottenere stime dei parametri  $\Omega$ .

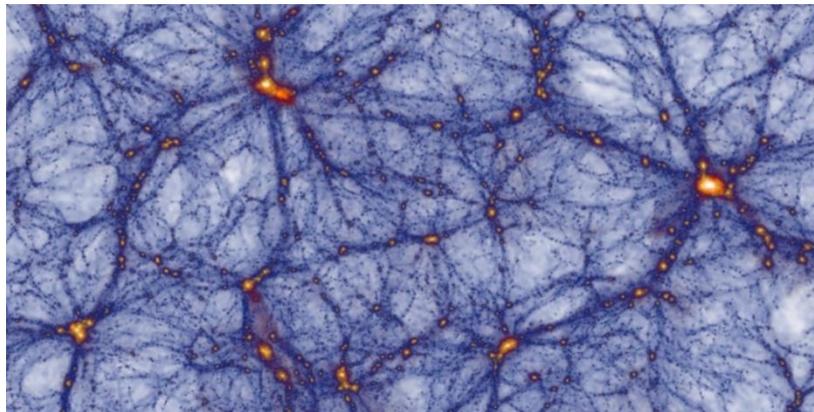


Figura 3.2: Struttura a ragnatela cosmica dell'universo (porzione di  $\sim 173 \times 90$  Mpc), in giallo si osservano le zone più dense dove si formano gli ammassi di galassie. [Fonte: simulazione cosmologica Millennium XXL].

# Capitolo 4

## Materia oscura

Nel 1884 Lord Kelvin fu tra i primi a tentare una stima della quantità di materia oscura nella Via Lattea, cercando di stabilire una relazione tra le dimensioni della galassia e la velocità delle stelle, applicando la “teoria dei gas”. Successivamente nel 1906 Henri Poincaré, colpito dall’idea di Lord Kelvin, menzionò esplicitamente la “materia oscura” in una sua pubblicazione. Nel 1932 Jan H. Oort si accorse che la massa complessiva nei dintorni del Sole doveva essere il doppio di quella luminosa. Solo nel 1933 grazie a Fritz Zwicky si ebbe il primo risultato quantitativo, ottenuto grazie allo studio di un *ammasso di galassie* nella costellazione della *Chioma di Berenice*.

Gli ammassi di galassie sono oggetti legati gravitazionalmente, sono composti dalle stelle delle singole galassie e da gas caldo riscaldato dal potenziale gravitazionale dell’ammasso, visibile nella banda X.

Zwicky stimò prima la massa totale dell’ammasso grazie alla sua luminosità, poi ottenne una seconda stima basata sulla misura di dispersione delle velocità delle galassie nell’ammasso ( $\sim 1000 \text{ km/s}$ ): il risultato indicava una massa *400 volte più grande* di quella ottenuta precedentemente.

Studi simili sono stati estesi a molti ammassi galattici e i risultati, ottenuti anche dallo studio del gas caldo, sono sempre stati analoghi alle conclusioni di Zwicky.

Il gas caldo fornisce un’importante stima del quantitativo di materia oscura: avendo una forte pressione si espande e la forza di attrazione tra le particelle che lo compongono, non è abbastanza forte per contrastare l’espansione. Tuttavia esso rimane legato gravitazionalmente all’ammasso a causa dell’attrazione gravitazionale esercitata dalla materia oscura che lo confina, impedendone la dispersione. Le stime indicano che la massa di un ammasso galattico è per il 15% gas caldo, le galassie costituiscono il 5% e il restante 80% è da attribuire alla materia oscura. Si pensa che la materia oscura sia una forma di materia che, a differenza della materia ordinaria barionica, non emette, disperde o assorbe radiazione elettromagnetica risultando invisibile in qualunque regione dello spettro. Tale materia è però rilevabile attraverso i suoi effetti gravitazionali essendo dotata di massa. Altri indizi sulla presenza di materia oscura sono stati ottenuti con lo studio della curva di rotazione delle galassie a spirale e del lensing gravitazionale.

### 4.1 Curva di rotazione delle galassie a spirale

Le curve di rotazione delle galassie a spirale descrivono la velocità con cui stelle e gas orbitano in funzione della distanza dal centro della galassia. Gli studi indicano che la velocità di rotazione nelle parti esterne del disco, è molto più alta di quanto ci si aspetta dalla materia luminosa osservata. Consideriamo adesso la velocità  $v_c$  di una stella, all’interno di una galassia con massa  $M(R)$  ad una certa distanza  $R$  dal centro galattico (galactic center GC).

Le galassie sono dei sistemi stabili in cui la forza gravitazionale è controbilanciata dalla forza centrifuga che spingerebbe il disco ad allargarsi:

$$a_g = \frac{GM(R)}{R^2} = \frac{G}{R^2} \int_0^R 4\pi r^2 \rho(r) dr = \frac{v_c^2(R)}{R} \Rightarrow v_c^2(R) = \frac{GM(R)}{R}$$

La curva di rotazione delle galassie a spirale può essere suddivisa in tre diversi regimi: il bulge, il disco e a grandi distanze dal GC.

Bulge: si assume un modello sferico per la distribuzione di massa e una densità costante  $\rho_0$ .

$$M(R) = 4\pi \int_0^R r^2 \rho_0 dr = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho_0 \quad \Rightarrow \quad v_c^2(R) = \frac{G \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \rho_0 \right)}{R} = \frac{4G\pi R^2 \rho_0}{3}$$

Da cui risulta che all'interno di una sfera omogenea  $v_c(R) \propto R$ : la velocità cresce linearmente all'aumentare della distanza dal centro.

Disco: si considera una densità superficiale  $\Sigma = \Sigma(r)$  ottenendo che la velocità lineare  $v_c(R)$  è *costante* e che la velocità angolare diminuisce dall'interno verso l'esterno.

A grandi distanze dal centro galattico: la massa può essere considerata come puntiforme e si ottiene una caduta Kepleriana.

$$a_g = \frac{GM_{gal}}{R^2} = \frac{v_c^2(R)}{R} \quad \Rightarrow \quad v_c(R) \propto \frac{1}{\sqrt{R}}$$

In realtà dalle osservazioni è emerso che la curva di rotazione delle stelle dentro le galassie a disco, non mostra l'andamento Kepleriano atteso e la velocità rimane costante anche a grandi distanze, come si osserva nella figura 4.1.

Negli anni '70 si è scoperto che le galassie sono circondate da un alone di idrogeno neutro HI osservabile a 21 cm, questo riesce a spiegare in parte l'andamento costante della curva di rotazione.

Il problema è che la massa sembra continuare ad *aumentare* anche se non sono più visibili stelle e gas per cui tale discrepanza, tra i dati osservativi e l'andamento atteso, può essere spiegata introducendo un enorme *alone di materia oscura*

contenente le galassie, che mantiene costante la curva di rotazione anche a grandi distanze. La presenza di materia oscura quindi è dominante dove le stelle e il gas non sono presenti, cioè in zone sempre più lontane dal GC. In conclusione, se non ci fosse sufficiente DM le galassie a disco verrebbero *disgregate* dalla forza centrifuga; nel caso della Via Lattea  $M_{TOT} = 10^{12} M_{\odot}$ , mentre la massa stellare è  $M_{stellare} = 5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$  (5% del totale).

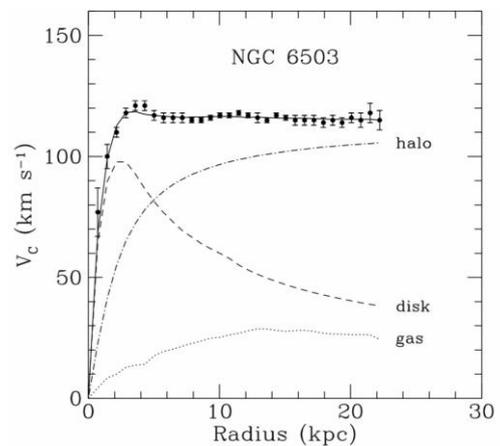


Figura 4.1: curva di rotazione della galassia NGC 6503 con i contributi di tutte le sue parti, i dati con le barre di errore rappresentano le velocità osservate. [Fonte: M. Kamionkowski 1998].

## 4.2 Lenti gravitazionali

Le lenti gravitazionali, previste dalla relatività generale, offrono la possibilità di mappare la *distribuzione di materia oscura* su scala cosmologica.

Nella relatività generale di Einstein, lo spazio-tempo può essere distorto e influenzato dalla presenza di materia e di energia, ed una delle implicazioni è che anche la traiettoria della radiazione elettromagnetica, come la luce, può essere curvata a causa della deformazione dello spazio-tempo.

Consideriamo un oggetto luminoso, posto ad una certa distanza dall'osservatore, che emette un raggio di luce, se nello spazio tra sorgente ed osservatore è interposto un oggetto massivo, esso è in grado di curvare lo spazio-tempo modificando così la traiettoria della luce che giunge all'osservatore. Pertanto l'osservatore vedrà la sorgente spostata rispetto alla sua posizione reale, ad opera della massa interposta che viene chiamata *lente gravitazionale*.

Le prime evidenze sperimentali di tale effetto risalgono al 1919, quando A. Eddington sfruttando un'eclissi totale di Sole, osservò la deflessione dei raggi luminosi delle stelle sul fondo, prospetticamente vicine al Sole, che in questo caso agisce come lente gravitazionale.

Le lenti gravitazionali possono agire anche su scala galattica o su ammassi di galassie, come si osserva nella figura 4.2. Ad esempio è possibile vedere i così detti *archi gravitazionali* presenti in molti ammassi galattici: tali archi sono immagini distorte di galassie che si trovano a distanze maggiori dell'ammasso ma prospetticamente dietro di esso e che assumono la forma di un arco ad opera dell'ammasso che agisce come lente gravitazionale. È possibile anche osservare quattro immagini virtuali, quando una singola galassia di grande massa si trova allineata ad un altro oggetto più distante, come per esempio la *Croce di Einstein*, prodotta dalla galassia ZW 2237 +030 e dal quasar G2237 +0305 collocato direttamente dietro di essa (figura 4.2).

Grazie alle caratteristiche delle immagini virtuali, si riesce a stimare la massa totale della lente ( $M_{barioni} + M_{DM}$ ) e con questo metodo sono state determinate le masse di numerose galassie e ammassi confermando sempre la presenza di un grande quantitativo di DM.

I tipi di lente gravitazionale si differenziano anche in base alla densità di materia oscura: se la luce di una sorgente attraversa una zona della lente gravitazionale con un'alta densità di DM, l'immagine è fortemente distorta e l'effetto prende il nome di *lente gravitazionale forte*. Viceversa se la densità di DM è bassa, l'arco gravitazionale è molto debole e l'effetto si chiama *lente gravitazionale debole*.



Figura 4.2: A sinistra si osserva la croce di Einstein, al centro archi prodotti da un ammasso di galassie e a destra un'immagine ad anello generata da singole galassie. [Fonte: NASA, ESA e riadattata].

## 4.3 Ipotesi sulla composizione della materia oscura

Una ipotesi sulla composizione della DM, prevede che essa sia formata da materia e particelle note, ma che per qualche ragione non riusciamo ad osservare, ad esempio perché emette radiazione elettromagnetica troppo debole per essere rilevata; questa materia prende il nome di *materia oscura barionica*. Sono stati ipotizzati due principali tipi di materia oscura barionica: *microscopica* e *macroscopica*. Nel primo caso la DM sarebbe composta da particelle atomiche o subatomiche di origine conosciuta, ma tale ipotesi non è plausibile a causa della elevata sensibilità dei telescopi che riuscirebbero a rilevarne le emissioni.

Nel caso macroscopico, invece si ipotizza che la DM sia costituita da una vasta popolazione di oggetti compatti chiamati *MACHO* (*Massive Compact Halo Objects*), cioè oggetti di dimensioni astrofisiche come ad esempio nane brune, nane bianche, nane nere, stelle di neutroni e buchi neri, estremamente difficili da osservare direttamente.

Un modo per riuscire ad individuare tali oggetti è quello del *microlensing*: se c'è un grande numero di MACHO nell'alone della nostra galassia interposto tra noi e le stelle di fondo al di fuori della Via Lattea, come le stelle delle *Nubi di Magellano*, è statisticamente probabile che un oggetto compatto passi davanti ad una di queste stelle causando un effetto di lente gravitazionale e provocando un temporaneo aumento della luminosità della stella di fondo. Grazie al progetto MACHO, che ha analizzato la luminosità di circa 12 milioni di stelle nella Grande Nube di Magellano, in 6 anni sono stati rilevati 17 eventi di microlensing, ma tali risultati indicano che solo il 15-20% della DM presente nell'alone della Via Lattea possa essere attribuita agli oggetti MACHO. Questo significa che il restante 80-85% non ha ancora una spiegazione plausibile secondo tale ipotesi.

L'ipotesi introdotta per spiegare questa discrepanza, prevede la presenza di *materia oscura non barionica*, costituita da particelle a noi del tutto ignote. Sappiamo però che esse devono avere alcune caratteristiche fondamentali: devono essere dotate di *massa* in modo tale da interagire con la gravità, devono essere *stabili* per spiegare la loro attuale abbondanza e devono essere *elettricamente neutre*, altrimenti emetterebbero radiazioni e sarebbero osservabili. Tra le possibili particelle candidate, anche se ad oggi nessuna di essa è stata identificata in modo certo, ci sono:

Assioni: particelle elettricamente neutre, stabili che hanno masse ipoteticamente molto piccole dell'ordine di  $10^{-3} - 10^{-5} eV$ . Queste particelle potrebbero generare dei fenomeni osservabili sia in ambito astrofisico sia nei laboratori sulla Terra, ad esempio si ipotizza che gli assioni, attraversando un campo elettromagnetico, possano essere convertiti in fotoni (è plausibile anche il processo inverso), per cui gli esperimenti, svolti sia in laboratorio sia sfruttando sorgenti come il Sole, hanno lo scopo di ricercare tali processi di conversione.

WIMP (*Weakly Interacting Massive Particles*): particelle stabili, neutre e dotate di massa (tra i GeV e i TeV) che interagiscono debolmente con la materia barionica. Queste particelle non sono previste dal Modello Standard delle particelle elementari, ma all'interno di alcune sue estensioni come ad esempio in *SUSY* (*SUPER SYMMETRY*) in cui ogni particella avrebbe una *particella partner* con massa e spin diverso. La nomenclatura prevede l'aggiunta di una "s" (neutrino → sneutrino) oppure il suffisso "ino" (fotone → fotino). Le particelle più promettenti candidate WIMP sono il così detto *neutralino*  $\chi$ , le particelle di *Kaluza-Klein*, il *gravitino*, i *neutrini sterili* e il *fotone oscuro*.



# A1: Ricerca di WIMP e teorie alternative alla materia oscura

Ad oggi non è ancora stata identificata con certezza nessuna particella di materia oscura per mezzo di esperimenti tradizionali, anche a causa della loro debole interazione con le particelle ordinarie.

Uno degli esperimenti volti alla ricerca di queste particelle si basa sulla collisione ad altissima energia (10 TeV) di particelle ordinarie, come protoni e ioni, accelerate fino ad oltre il 99% della velocità della luce all'interno degli *acceleratori di particelle* (come ad esempio LHC al CERN). Durante queste collisioni si formano delle particelle che possono sopravvivere oppure decadere e in questo modo si può cercare di identificare una particella di tipo WIMP che si manifesterebbe con una *violazione del principio di conservazione dell'energia*, perché incapace di interagire con la materia scomparirebbe senza lasciare traccia nella strumentazione.

Un secondo tipo di esperimento invece si basa sulla probabilità che una particella di tipo WIMP collida con un nucleo atomico (ad oggi sono stati utilizzati atomi di xeno, argon e lo ioduro di sodio drogato al tallio) con un trasferimento di una parte della sua energia cinetica. Tale trasferimento provocherebbe dei fenomeni osservabili, come una emissione di luce UV o una possibile ionizzazione. Questi esperimenti vengono svolti in luoghi il più possibile isolati, come sotto il *massiccio del Gran Sasso d'Italia* o in una miniera abbandonata in *South Dakota*, per evitare falsi segnali di origine terrestre, come la radioattività naturale dell'ambiente.

Un altro esperimento, in questo caso di tipo astronomico, consiste nell'ipotesi che le particelle WIMP siano soggette a qualche processo di *annichilazione* o *decadimento spontaneo* che produca *particelle ordinarie* oppure *fotoni X o gamma*. Questi esperimenti vengono condotti grazie all'uso di telescopi spaziali che operano nella banda X e gamma, osservando galassie sferoidali nane, che dovrebbero contenere una grande quantità di DM. Il problema, in questo caso, sono le contaminazioni da altri fotoni emessi da normali fenomeni astrofisici ad alta energia.

Ad oggi però nessuno di questi esperimenti ha prodotto dei risultati conclusivi, per cui sono state proposte delle *teorie alternative* alla materia oscura, che ipotizzano la *non validità* universale delle *leggi della dinamica*, della *legge di gravitazione universale di Newton* e della *relatività generale di Einstein*. Queste teorie alternative si basano sulla così detta *gravità modificata*, cioè scenari teorici completamente alternativi in cui non c'è necessità di introdurre la DM e in cui le leggi che conosciamo possono avere delle variazioni su scale cosmologiche.

La teoria alternativa più importante è stata proposta nel 1983 da *M. Milgrom* ed è la teoria *MOND (MODified Newtonian Dynamics)*, ideata per cercare di risolvere il problema delle curve di rotazione delle galassie a spirale senza utilizzare gli aloni di DM, i quali impedirebbero la disgregazione delle galassie ad opera della forza centrifuga. La MOND vuole modificare il modo con il quale un corpo massivo viene accelerato dalla forza gravitazionale, introducendo una nuova costante di accelerazione  $a_0 = 1.2 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$  per cui:

- Se  $a \gg a_0$ : vale la gravità Newtoniana.
- Se  $a \ll a_0$ : si entra nel regime di gravità modificata.

In quest'ultimo caso, l'intensità della forza di gravità va come  $\frac{1}{r}$  invece di  $\frac{1}{r^2}$ , cioè la gravità diminuisce più lentamente a grandi distanze di come previsto dalla legge di Newton. Secondo Milgrom, la seconda legge di Newton  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  deve essere modificata:

$$\mathbf{F}_N = m\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)\mathbf{a}$$

dove  $\mathbf{F}_N$  è la forza Newtoniana,  $m$  la massa dell'oggetto soggetto alla forza,  $\mathbf{a}$  la sua accelerazione e  $\mu(x)$  è una funzione chiamata *funzione di interpolazione*, tale che:

$$\begin{aligned}\mu(x) &= 1 \quad \text{se } |x| \gg 1 \\ \mu(x) &= x \quad \text{se } |x| \ll 1\end{aligned}$$

- Se  $a \gg a_0 \Rightarrow \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \rightarrow 1$  la legge si riduce alla forma Newtoniana  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ .
- Se  $a \ll a_0 \Rightarrow \mu\left(\frac{a}{a_0}\right) \rightarrow \frac{a}{a_0}$  la legge diviene  $F_N = m\left(\frac{a^2}{a_0}\right)$ , quadratica nell'accelerazione.

Ad oggi la MOND però gode di un consenso molto ridotto, perché essa ha significato nelle galassie ma non riesce ad eliminare completamente la necessità di DM in tutti i sistemi astrofisici.

Sono state proposte anche altre teorie alternative che prevedono una profonda modifica della forza di gravità, ad esempio aggiungendo una *dipendenza dal tempo*. Nonostante le numerosissime teorie, la materia oscura resta ancora la migliore risposta in grado di spiegare la globalità dei fenomeni osservativi.

## A2: Aloni di materia oscura e NGC 1052-DF2

Circa 379 000 yr dopo il Big Bang ( $z = 1089$ ), a causa del raffreddamento dell'universo, il tasso di ricombinazione degli elettroni e dei protoni nel formare idrogeno neutro risulta maggiore rispetto al tasso di reionizzazione: pertanto un'enorme massa di gas neutro permea l'universo primordiale.

La composizione chimica di tale gas è dominata da atomi di idrogeno ed elio neutri, con tracce di deuterio e litio.

A questa epoca cosmica si assegna il nome di *era buia* (*dark ages*) in quando gli oggetti luminosi, come le stelle e le galassie, non si sono ancora formati.

Non si è a conoscenza di quanto questa *era buia* sia durata, ma le stime indicano che potrebbe aver avuto una estensione compresa in un intervallo di tempo tra 0.4 *milioni* e 500 *milioni* di anni dopo il Big Bang.

Con il passare del tempo si iniziano a formare anche alcune molecole semplici come ad esempio quella di idrogeno  $H_2$  e a causa dell'espansione dell'universo il gas si raffredda e la sua densità diminuisce.

È necessario sottolineare che questa miscela di atomi e molecole neutre rappresenta solo la componente di materia barionica, mentre nell'universo dominava già la materia oscura non barionica, con una massa molto più importante.

In questo contesto si sono osservate delle piccolissime fluttuazioni della densità e della temperatura, come mostrato dalle mappe della CMB, e alcune di queste variazioni di densità rappresentano i “*semi*” che portano alla formazione degli *aloni di materia oscura* e successivamente di stelle e galassie. Si ritiene che il processo di formazione degli aloni di materia oscura abbia seguito le seguenti modalità:

- Nelle zone dello spazio in cui la densità è maggiore rispetto alla media, si accumula la materia oscura e, dato che la forza di gravità aumenta localmente, viene richiamata anche quella circostante.
- L’espansione dell’universo però tende ad allontanare le particelle le une dalle altre, pertanto i due processi sono in competizione.
- In alcune zone, dove la densità della materia oscura supera una certa soglia, il collasso riesce ad avvenire perché, in queste circostanze, la gravità vince contro l’espansione.
- Quando viene raggiunto un equilibrio tra la forza di gravità e la tendenza delle particelle alla fuga, si forma un *alone di materia oscura*, che successivamente permetterà alla materia barionica di condensare e porterà alla formazione di strutture massive come galassie e ammassi di galassie.
- Nelle zone in cui si formano gli aloni di materia oscura, la gravità è molto maggiore rispetto alle zone circostanti, infatti inizialmente la distribuzione di materia era quasi uniforme.
- Gli aloni di grande massa fungono da punti di accumulazione e attirano gli aloni di piccola massa e la materia oscura circostante.
- Aumenta la massa degli aloni di materia oscura in funzione dell’età dell’universo, poiché tale processo prosegue inevitabilmente.
- Gli aloni odierni sono molto più grandi di quelli che si sono formati inizialmente, a causa di questo processo di crescita gerarchica della massa in funzione del tempo.

La materia oscura è essenziale nell’evoluzione dell’universo, perché i suoi intensi effetti gravitazionali, all’interno degli aloni, consentono la formazione delle galassie e degli ammassi.

Diversamente, dopo il Big Bang, la materia ordinaria non avrebbe mai subito alcun processo di collasso gravitazionale e le galassie non si sarebbero formate. Da questo, ci si aspetta che ogni galassia contenga una consistente quantità di materia oscura.

Ma le cose non sembrano essere così per la galassia *NGC 1052-DF2* (figura a2): una galassia ultra diffusa a bassa luminosità superficiale, prospetticamente nella costellazione della Balena ed identificata grazie ad una survey del gruppo di galassie NGC 1052. Questa galassia ha una forma sferoidale, senza nucleo, bracci a spirale né un disco di stelle, infatti ha così poca materia barionica che può essere considerata trasparente.

Utilizzando la misura della velocità radiale di 10 *ammassi globulari* appartenenti a questa galassia per stimare la massa totale del sistema, è emerso che il rapporto tra la materia oscura e quella luminosa è circa 400 volte inferiore rispetto a quello atteso.

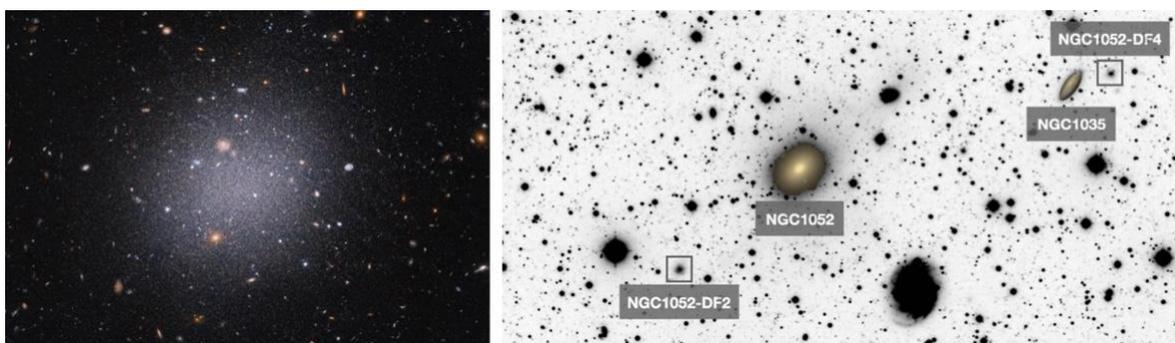
Da questo risultato sembra quindi che la materia oscura non sia sempre accoppiata alla materia barionica.

Ci sono state alcune discordanze sull'effettiva distanza della galassia, dalla quale è possibile risalire alla sua massa attraverso la luminosità intrinseca, ma le ultime stime pongono la distanza a  $\sim 22.07 \text{ Mpc}$  e nel giugno 2021 ulteriori osservazioni di Hubble hanno confermato che è carente di materia oscura.

Esiste un'altra galassia *NGC 1052-DF4* che sembra essere priva di materia oscura, ma in questo caso la spiegazione potrebbe essere la rimozione della materia oscura dalla galassia dovuta alle forze di marea esercitate da un'altra galassia di passaggio.

La scoperta di queste galassie che, a differenza di tutte le altre, hanno una piccolissima quantità di materia oscura, potrebbe confermare la sua esistenza: se la materia oscura fosse solo un effetto di una gravitazione diversa da quella newtoniana, allora tutte le galassie dovrebbero mostrarne la presenza.

È quindi possibile concludere che la materia oscura rappresenta ad oggi la miglior risposta alle osservazioni.



*Figura a2: A sinistra galassia NGC 1052-DF2 ripresa con la Hubble Advanced Camera for Surveys, fra il dicembre 2020 e il marzo 2021. A destra disposizione spaziale delle galassie NGC 1052 -DF2, NGC 1052-DF4, NGC 1052 ed NGC 1035. [Fonte: ESA/Hubble, NASA a sinistra, "A Tip of the Red Giant Branch Distance of  $22.1 \pm 1.2 \text{ Mpc}$  to the Dark Matter Deficient Galaxy NGC 1052-DF2 from 40 Orbits of Hubble Space Telescope Imaging" Pieter van Dokkum et al., 2021, a destra].*



# Bibliografia e sitografia

- [1] H. Karttunen, P. Kröger, H. Oja, M. Poutanen, K.J. Donner, *Fundamental Astronomy*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [2] A. Cimatti, *L'universo oscuro - Viaggio tra i più grandi misteri del cosmo*, Carrocci Editore, Città della scienza, 2021.
- [3] J. Herrmann, *Atlante di astronomia*, Arnoldo Mondadori Editore, Milano, 1975.
- [4] P. Focardi, *L'uomo e il cosmo - Breve viaggio nella scienza che ci ha resi infinitamente piccoli*, 1088press-bytes, 2019.
- [5] A. Liddle, *An introduction to modern cosmology*, Wiley, Edinburgh, 2015.
- [6] L. Ciotti, *Astrofisica extragalattica appunti*, Università di Bologna Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2021.
- [7] F.R. Ferraro, *Astrofisica stellare appunti e dispense*, Università di Bologna Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2021.
- [8] D. Dallacasa, *Processi di radiazione e MHD appunti e dispense*, Università di Bologna Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2020.
- [9] L. Moscardini, *Calcolo per l'astronomia appunti e dispense*, Università di Bologna Dipartimenti di Fisica e Astronomia, 2020.
- [10] B. Cavalazzi, R. Orosei, *Introduzione all'astrobiologia appunti e dispense*, Università di Bologna Dipartimento di Fisica e Astronomia, 2020.
- [11] A. D'Ercole, *Inflazione: due indizi che fanno (forse) una prova*, Giornale di Astronomia, Osservatorio Astronomico di Bologna, 2013.
- [12] G. Bertone, D. Hooper et al., *A history of dark matter*, Fermilab, 2016.
- [13] <http://galformod.mpa-garching.mpg.de/mxxlbrowser/#zoom>
- [14] <https://www.nasa.gov>
- [15] <https://www.esa.int>
- [16] <https://www.media.inaf.it/2021/06/22/il-mistero-della-materia-oscuro-mancante/>

