
Un universo oscuro

Fare ricerca vuol dire guardare ciò che altri hanno visto e vedere ciò che gli altri non hanno guardato.

Luigi Tedesco

Dipartimento interateneo di Fisica Università di Bari
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Bari

Il Cosmo è molto più di quello che vediamo. Noi stessi, il nostro mondo, lo spazio nell'universo, è permeato da qualcosa che non conosciamo. Da un lato abbiamo una componente che sembra essere materia e formata da particelle che non conosciamo e che però costituiscono il cuore delle strutture nell'universo, la chiamiamo "materia oscura". Dall'altro lato una forma di energia, anch'essa di natura ignota e distribuita in modo uniforme ovunque, ma inosservata e con la particolarità di generare una potente forza antigravitazionale che costringe lo spazio nell'universo ad espandersi sempre più rapidamente, la chiamiamo "energia oscura". L'aggettivo oscura è la traduzione dall'inglese di *dark* che contiene più informazione di quanto non sia la sua traduzione italiana. Il significato di *dark* è legato non solo al fatto che queste due entità non si vedono, ma significa anche "non spiegate, misteriose", appunto, oscure. L'universo è composto per circa il 70% da energia oscura, il restante 30% da materia di cui circa il 25% è materia oscura e il 5% è materia ordinaria. Possiamo quantificare il tutto affermando che meno di 1/20 della densità totale del cosmo è il mondo che conosciamo, tutto il resto è un mistero fitto.

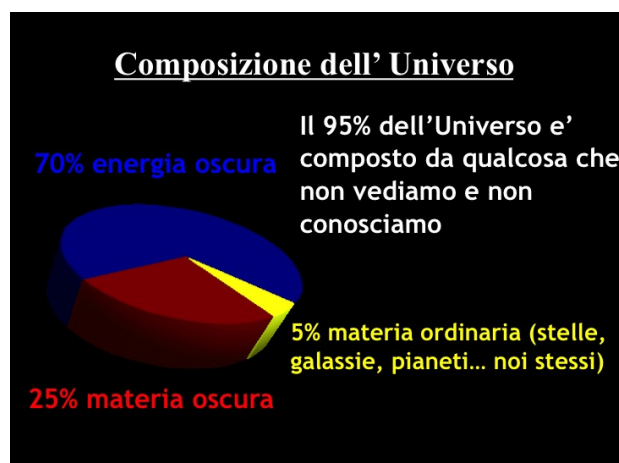


Figura 1: Percentuale in energia e materia di cui è composto l'universo

Introduzione

L'uomo ha sempre cercato di capire di cosa siamo fatti. Nei secoli si sono scoperti elementi chimici che compongono la struttura della materia e in seguito si sono scoperte particelle quantistiche che hanno consolidato le nostre conoscenze su ciò di cui siamo fatti. Oggi tutto questo castello di conoscenze non fornisce più una visione onnicomprensiva della materia, ma neppure della energia, che si trova nell'universo. Entrambe assumono caratteristiche e proprietà completamente ignote. La cosa che accomuna la materia oscura e l'energia oscura è l'enorme portata concettuale, oltre al fatto che vengono coinvolte le nostre conoscenze su tutte le scale della fi-

sica dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande.

Le conoscenze attuali ci dicono che materia oscura ed energia oscura sono molto abbondanti nel cosmo, la somma delle due componenti è circa il 95% del contenuto dell'universo e queste proporzioni già di per sè rappresentano un vero enigma.

La materia ordinaria, che compone tutto ciò che conosciamo è circa il 5% del totale. La percentuale di massa in una galassia è composta da circa 10% materia ordinaria e 90% materia oscura. Questo rapporto non è costante, nel senso che vi son galassie piccole per cui il 99% è materia oscura.

Se della materia oscura non conosciamo praticamente nulla, sappiamo che è una forma di materia non ordinaria, per quanto riguarda l'energia oscura ne sappiamo ancora meno, perchè come vedremo, non capiamo il vero motivo per cui lo spazio vuoto nell'universo sembra avere una energia i cui effetti sono simili ad una forza anti-gravitazionale! Il termine "energia oscura" fu introdotto da M. Turner e da D. Huterer. Si tenne a Princeton nel 1996 un convegno dal titolo "Critical dialogues in cosmology" dove parteciparono studiosi di prima grandezza, come Jim Peebles, Martin Rees, Richard Gott, David Spergel e tanti altri. L'ultimo relatore fu Michael Turner dell'Università di Chicago che ipotizzò per la prima volta che l'universo potesse essere permeato da una energia costante che chiamò "energia oscura", e questo ben due anni prima della scoperta delle supernovae IA. I partecipanti rimasero molto freddi. La consacrazione del termine "energia oscura" avvenne successivamente con l'articolo di Ref. [1].

Nelle nostre dinamiche mentali, quando parliamo di materia oscura e di energia oscura facciamo riferimento a qualcosa che sta fuori da noi, nello spazio cosmico. Invece non è così, le due componenti oscure sono qui, nel nostro mondo, accanto al lettore di queste pagine, nella stanza in cui ci troviamo, invisibili e dappertutto. In questo momento miliardi di particelle della materia oscura ci stanno attraversando, senza che noi ce ne accorgiamo.

Diciamo subito che le due componenti oscure si differenziano perchè mentre la materia oscura, come vedremo, non è distribuita in modo omo-

geneo, ma è spesso solidale con la galassia, distribuendosi intorno e rappresenta circa 6/7 volte la materia ordinaria, l'energia oscura è 15 volte più abbondante della materia ordinaria ed è perciò la componente più presente nell'universo.

Da un punto di vista teorico, spiegare l'energia oscura è una avventura ancora più affascinante ed intrigante del mistero della materia oscura perchè essa è qualcosa di omogeneo, che permea tutto l'universo, senza buchi nonostante abbia una densità molto piccola. In un volume come la terra si può calcolare che vi sono circa 7 mg di essa.

La letteratura scientifica sulla materia oscura e sulla energia oscura è sterminata (si vedano i suggerimenti bibliografici alla fine di questo articolo) ed in questo articolo discuterò solo alcune linee generali per una semplice e non esaustiva panoramica. Non sarà una lezione, non ne ha le caratteristiche, ma solo una affascinante ed incompleta avventura intellettuale su uno dei più spinosi e incomprensibili misteri della natura.

La materia oscura: un enigma che continua

Zwicky (1898-1974)

Chi ha pronunciato per la prima volta la frase "materia oscura"? La prima notizia in questo senso risale al 1877 quando il gesuita e astronomo Angelo Secchi parla di "masse oscure" [2]; nel 1906 Henry Poincarè affermava che le stelle a noi vicine avendo un moto lento escludono la presenza di materia oscura¹. Nei primi anni del secolo scorso, l'astronomo olandese Jacobus Cornelius Kapteyn e il britannico astronomo, matematico e fisico James Hopwood Jeans discutevano della presenza di materia oscura vicino al Sole in base alla velocità delle stelle. In [5] Kapteyn dice testualmente:

"It is incidentally suggested when the theory is perfected it may be possible to

¹H. Poincarè, in Ref [3], usava un termine francese "matière obscure" in relazione ad un commento ad un calcolo di Lord Kelvin del 1884. Infatti Kelvin calcolò il numero di stelle attorno al Sole in base alla velocità di rotazione delle stesse stelle, stabilendo che forse molte di esse non erano luminose ma "corpi oscuri" [4].

determine 'the amount of dark matter' from its gravitational effect."

Nel 1930 Knut Lundmark comprese, per primo, che l'universo dovesse contenere più materia di quanto se ne osservava [6].

Kapteyn e il suo studente famoso Jan Hendrik Oort furono attaccati dal fisico svizzero Fritz Zwicky che, nel 1933, sosteneva che la materia oscura vicino al Sole fosse quantitativamente molto più presente (si veda Ref. [7]).

Nel 1932, Oort pensò alla esistenza di materia oscura vicino al Sole a causa di uno strano moto ortogonale al piano della Via Lattea di alcune stelle [8]. Nel 1933 Zwicky propose in modo sistematico il concetto di materia oscura. Egli studiò l'ammasso della Chioma di Berenice² che aveva ha 1000 galassie ed in particolare analizzò la velocità della galassie nell'ammasso [9]. Trovò che le velocità di rotazione erano eccessive e questo voleva dire che la somma delle masse delle singole galassie visibili era di gran lunga inferiore alla massa necessaria a far girare le galassie nell'ammasso, in modo da controbilanciare l'attrazione gravitazionale e quindi fuggire dall'ammasso stesso (dopo vedremo più in dettaglio questa questione).

Zwicky stimò che l'ammasso della Chioma dovesse avere 400 volte la somma di tutte le masse delle sue galassie e chiamò questo surplus di massa "materia oscura". In verità la stima era eccessiva perchè Zwicky trascurò la materia ordinaria sotto forma di gas intergalattico. Ma Zwicky fece un altro errore, perchè stimava in modo errato l'espansione dell'universo, parametro fondamentale se si vuole determinare la posizione delle galassie.

Un ricalcolo diceva che la quantità di massa necessaria era ~ 150 volte quella visibile affinché l'ammasso stesso non collassasse o non evaporasse, cioè raggiungesse l'equilibrio.

C'è da dire che gli astronomi dell'epoca per la maggior parte, forse tutti, erano convinti che migliorando le osservazioni la materia oscura sarebbe scomparsa per cui non diedero molto

²Questo ammasso non ha alcuna stella luminosa. Il nome fu dato nel 246 a.c. dal matematico Conone, maestro di Archimede, in onore della moglie di Tolomeo III, Berenice II. La chioma è visibile ad occhio nudo a forma di V vicino alla coda dell'Orsa Maggiore.



Figura 2: Ammasso della Chioma o Abell 1656. Si trova a circa 350 milioni di anni luce da noi. La maggior parte dei corpi nella foto è data da galassie. I corpi che presentano nella foto una croce invece sono stelle della nostra Via Lattea. *Image Credit: Russ Carroll, Robert Gendler, e Bob Franke; Dan Zowada Memorial Observatory.*



Figura 3: Fritz Zwicky nel suo studio

peso a questa novità che stava emergendo dalle analisi di Zwicky.

Certamente, come mise in evidenza l'astronomo olandese Sidney van der Bergh nel 1960 [10], con tale velocità di rotazione delle galassie attorno all'ammasso, si sarebbe avuta una evaporazione dell'ammasso stesso. Oggi sappiamo che negli ammassi di galassie, mediamente il 10% è materia ordinaria di cui il 9% è gas e l'1% galassie, il rimanente 90% è materia oscura.

Il lavoro di Zwicky fu dimenticato per quasi 40

anni (anche se questa cosa non è del tutto vera³). Il principale motivo è legato al fatto che Zwicky aveva un pessimo carattere. Non fu preso sul serio anche perchè rimase mitica la sua frase celebre secondo cui "tutti gli astronomi sono bastardi sferici" [11] perchè la sfera non aveva angoli per cui da qualunque parte li si osservava rimanevano tali. Ma esiste anche un motivo scientifico per cui non fu preso sul serio, infatti Zwicky usava il teorema del viriale (che vedremo dopo) per analizzare l'ammasso della Chioma. Ma il teorema del viriale è applicabile solo se il sistema è in equilibrio, cosa che nessuno poteva garantire per quell'ammasso. Vi era anche un motivo legato al fatto che i "collegi sferici" dell'epoca ritenevano, come detto in precedenza, che in fondo migliorando le tecniche sperimentali quell'eccesso di massa necessario per far tornare i conti, sarebbe sparito. Inoltre, Zwicky fu assecondato anche perchè difendeva idee che si erano rivelate non corrette, come ad esempio quella che contestava il modello di universo in espansione e che spiegava lo spostamento verso il rosso della luce delle galassie con la "teoria della luce stanca" in cui la frequenza dei fotoni emessi variava in modo strano.

Inoltre, lo stesso Zwicky era in disaccordo con se stesso, attribuendo ai gas e alle polveri la velocità eccessiva delle stelle nella galassia.

Vera Rubin (1928-2016)

Vera Rubin è stata una astronoma americana. Nel 1948 ottenne la Bachelor, una sorta di laurea di primo livello all'università di Vassar, nello stato di New York. Dopo tentò l'iscrizione a Princeton che la rifiutò in quanto donna (questo vergognoso rifiuto delle donne sopravvisse fino al 1975). Rubin andò in un'altra università, la Cornell ed ebbe come professori R. Feynman e H. Bethe. Alla Cornell University e conseguì un master nel 1951. Nel 1954 conseguì il dottorato di ricerca all'università di Georgetown sotto la direzione di George Gamow. Qui Vera Rubin sperimentò

³Nel 1939 l'astronomo Horace Babcock misurò la velocità di rotazione delle stelle più esterne della galassia di Andromeda [12]. Nel 1940 analoghe misurazioni furono fatte da Ian Oort [13] che ottenne stessi risultati: la velocità di rotazione delle stelle presupponeva una enorme quantità di materia invisibile.

ancora una volta la discriminazione di genere perchè Gamow la invitò ad incontrarlo nella biblioteca del Dipartimento di Magnetismo Terrestre del Carnegie Institute vicino Washington, praticamente nell'atrio della università, perchè le donne non potevano entrare. Nove anni dopo ottenne un posto a tempo indeterminato a Washington, al Carnegie Institute.



Figura 4: In alto: Vera Rubin alle prime armi negli anni '50. In basso: nel 2009 - la seconda da sinistra in occasione della conferenza sulle donne in astronomia (fonte Jay Freidlander NASA).

Nel dicembre del 1950, 6 mesi prima di acquisire il master presentò al congresso dell'American Astronomical society ad Havenford (Pennsylvania) i risultati di un suo lavoro in cui misurava il red-shift di 108 galassie, sottraendo i moti recessionali, quelli dovuti al fatto che l'universo si espande. Ciò che rimaneva erano naturalmente i moti peculiari, in altri termini le galassie erano gravitazionalmente legate e quindi non risentivano della espansione dell'universo, come ad esempio il pianeta intorno al Sole. Lo studio fu accolto con estremo scetticismo. I motivi di tale freddezza erano diversi: era una donna, i risultati furono presentati malissimo, i dati erano deboli e poi, cosa non trascurabile, non si accordavano con la legge di Hubble. Vera Rubin pensò che fosse normale tra gli astronomi un tale atteggiamento che rasentava lo snobismo, dato che era la prima volta che faceva una presentazione.

Il Washington Post il giorno dopo ne fece un articolo dal titolo, da sottolineare come fu appellata, non come studiosa o ricercatrice ma: "Giovane madre individua il centro della creazione con i moti delle stelle". Vera Rubin era talmente

principiante che neppure lei stessa si rese conto della portata delle sue analisi. In ogni caso Vera Rubin non aveva mai fatto osservazioni con un telescopio per cui non si considerava una astronoma. Furono pochissimi che presero seriamente questi risultati fra cui l'astronomo francese che lavorava in Australia, Gerard de Vancoulers, che in quel periodo stava ipotizzando l'esistenza di ammassi di galassie.

Vera Rubin prese i dati esistenti ipotizzando le galassie in 3D, in funzione della posizione nel cielo ed il 15 luglio 1954 pubblicò il suo studio di tesi nei proceedings della National Academy of Science, in cui diceva essenzialmente che le galassie a causa della gravità si raggruppavano tra loro. La reazione fu: silenzio assoluto! Vera Rubin rimase senza lavoro e qualche anno dopo, nel 1964 chiese di lavorare al suo amico radioastronomo Bernard Burke. Burke rimase stupito della richiesta e nella mensa dell'istituto presentò W. Kent Ford, esperto strumentista, col quale in seguito divise la stanza al Carnegie Institution di Washington.

Lo spettrografo costruito da Ford, molto usato in seguito da entrambi, era un tubo che convertiva i deboli fotoni catturati da un corpo celeste e li convertiva in corrente elettrica che incideva su uno schermo fosforescente la cui regione colpita si illuminava. In pratica questa tecnica rivoluzionaria riduceva del 90% il tempo di esposizione della luce ricevuta da un corpo celeste.

Loro due si misero a studiare le velocità delle stelle nelle galassie a spirale e venne fuori una delle più chiare prove della esistenza della materia oscura⁴.

Analizzarono circa 60 galassie e ciò che si aspettavano era che maggiore era la distanza della stella dal centro della galassia più lentamente doveva orbitare, altrimenti la forza centrifuga avrebbe strappato le stelle dalla galassia ospitante. Niente di tutto ciò fu trovato, anzi utilizzando l'effetto Doppler delle nubi di idrogeno esterno delle galassie, usate quindi come traccianti, trovarono i grafici in Figura 5.

Nel 1970 Vera Rubin e Kent Ford pubblicarono un lavoro su *Astrophysical Journal* intitolato "Rotazione della nebulosa di Andromeda a

⁴Per correttezza bisogna dire che nello stesso periodo l'astronomo australiano Ken Freeman osservò una strana rotazione anomala in diverse galassie a spirale.

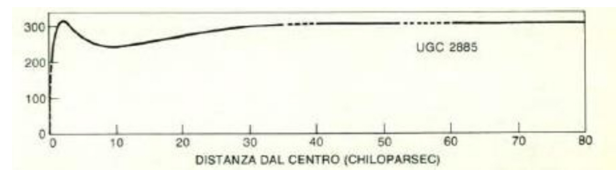
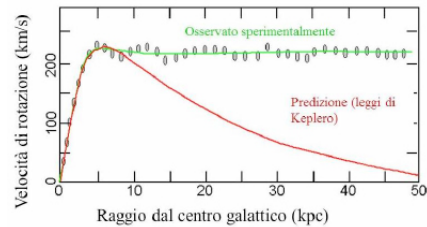


Figura 5: In alto - Curva di rotazione di una galassia. La curva rossa è quella attesa secondo le leggi di Keplero, quella verde è dovuta ai dati sperimentali (fonte Marco Casolino - Scienza per tutti INFN). In basso - Curva di rotazione della galassia UGC 2885 ricavata da Vera Rubin.

partire da una indagine spettroscopica delle regioni di emissione" [14]. In pratica, puntarono il loro telescopio verso Andromeda, dove vi era una enorme concentrazione di stelle al centro e si aspettavano che le miriadi di stelle che ruotavano attorno al centro galattico lo facessero seguendo la legge di Newton, come fanno i pianeti attorno al Sole, più sono lontani dal centro più lentamente si muovono. Ad esempio il pianeta Mercurio gira intorno al Sole in 88 giorni, mentre Nettuno per compiere un giro completo attorno al Sole impiega 165 anni. Ci vollero più di due anni per calcolare le velocità di 90 stelle di Andromeda. La cosa sorprendente fu che tutte le stelle si muovevano alla stessa velocità indipendentemente dalla distanza dal centro: 250 km/s. E questa cosa fu trovata in tutte le galassie.

Stabilire la velocità di rotazione di una stella che si trova ad una certa distanza r dal centro della galassia non è una cosa complessa. Schematizzando il problema, dalla fisica classica, come conseguenza della legge di Newton, la velocità del corpo in orbita, v è data da

$$v = \sqrt{\frac{Gm}{r}} \quad (1)$$

con m la massa che attrae il corpo. In altri termini, se conosciamo la velocità di rotazione delle stelle, siamo in grado di risalire a quanta massa c' è all'interno dell'orbita tra il centro e la distanza r dove si trova la stella, proprio attraverso l'

Equazione (1). D'altra parte la cosa è intuitiva, se non fosse così, cioè se la massa all'interno non fosse sufficiente a trattenere il corpo celeste, questo fuggirebbe via dando luogo alla cosiddetta "evaporazione delle galassie".

La cosa sorprendente fu che la massa ottenuta in questo modo era di gran lunga maggiore della massa luminosa che componeva il sistema in esame. In altri termini è come se, nella Equazione (1), all'aumento di r al denominatore ci sia una compensazione data dall'aumento simultaneo della massa, in modo tale che il rapporto rimanga costante.

Altra evidenza astrofisica

Un'altra evidenza astrofisica dell'esistenza della materia oscura è legata alla luminosità delle galassie a spirale. Si considerano le galassie a spirale perchè sono abbastanza regolari nel senso che hanno un nucleo centrale luminoso, un disco piatto formato da braccia a spirale e un alone sferico.

Indichiamo con L la luminosità del disco ed R_0 il cosiddetto **raggio ottico** cioè la distanza tra il centro della galassia e il punto in cui la luminosità non è più rilevabile, cioè si confonde col fondo.

La legge empirica che collega L ad R , dove R è una distanza generica dal centro, è la seguente

$$L(R) = L_0 e^{-3.2 \frac{R}{R_0}} \quad (2)$$

con L_0 più o meno costante per tutte le galassie a spirale. Ora, se $R < R_0$ la velocità di rotazione del disco si misura con strumenti ottici, se invece $R > R_0$, dato che l'immagine non è più rilevabile per definizione, la velocità di rotazione si misura con mezzi radio. Dallo studio dell'Eq. (2) si rileva che la velocità di rotazione è costante come se la massa della galassia fosse proporzionale alla distanza, vedi Eq. (1).

Questa modalità di rivelazione fa sì che si possano misurare curve di rotazione fino a $10R_0$ senza che la velocità di rotazione diminuisca e quindi si può dedurre da questi rilievi che la massa delle galassie esaminate sia almeno 10 volte maggiore di quella rilevabile otticamente.

La cosa interessante è che le galassie a spirale e quelle ellittiche, hanno proprietà completamen-

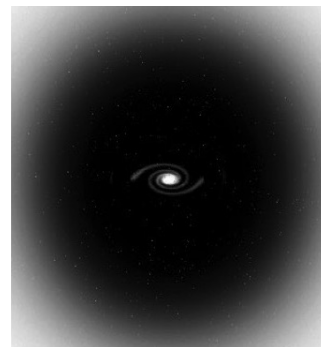


Figura 6: La galassia visibile è una piccola frazione di ciò di cui è composta. L'alone sferico in questa riproduzione dà il senso delle grandezze degli aloni sferici intorno alla galassia ospite. Uno dei padri "degli aloni sferici" è il premio nobel P.J.E. Peebles. Il puntino bianco al centro è la galassia. L'alone nero attorno è la materia oscura.

te differenti, ma la distribuzione della materia oscura in entrambe sembra essere la stessa e cioè una sfera.

Un altro aspetto interessante è che lo studio della materia oscura nelle galassie è diverso dallo studio della materia oscura negli ammassi di galassie. L'analisi sperimentale della materia oscura nelle galassie e tra gli ammassi di galassie è strettamente connessa al processo di formazione delle strutture su grandi scale: si sono formati prima gli ammassi e dopo le galassie o viceversa, prima le galassie che raggruppandosi per l'attrazione gravitazionale hanno dato origine agli ammassi? Nel primo caso avremmo che la materia oscura esisterebbe in grande quantità anche negli ammassi. Nel secondo caso sarebbe meno probabile trovare materia oscura nello spazio tra le galassie in quanto la gravità, nella formazione delle galassie, farebbe convogliare sulle galassie in formazione la materia oscura vagante. La risposta finale sembra essere la seconda e cioè che la materia oscura sia collegata ed associata alle galassie (si veda ad esempio [15]). Questo chiarisce un aspetto dirimente e cioè che tutta la materia oscura deve essere correlata alle galassie e quando parliamo di materia oscura degli ammassi dobbiamo intendere la somma della materia oscura delle singole galassie e non materia oscura nello spazio tra le galassie che costituiscono gli ammassi.

Come appena detto, secondo il "modello cosmologico standard" prima si formano le galassie

e poi la gravità fa il resto generando gli ammassi di galassie. È notizia recentissima (settembre 2023) di uno studio guidato da Elena Asencio dell'Università di Bonn [16] in cui si è stimata con grande precisione, utilizzando il *lensing gravitazionale*, la massa di un gigantesco ammasso di galassie detto "El Gordo" (il grasso) generato dallo scontro tra due ammassi di galassie quando l'età dell'universo era di circa 6 miliardi di anni. Ora è molto improbabile che a quell'età l'universo avesse già potuto generare questo mega-ammasso, non ne avrebbe avuto il tempo. Le cose, in questo senso si fanno sempre più intricate, anche in relazione alla materia oscura.

Teorema del viriale

Ci sono diversi modi di stimare quantitativamente il contenuto di materia in una regione dell'universo. Uno dei primi è stato quello legato al teorema del viriale, metodo che fu applicato da Zwicky e poi da tutti gli altri studiosi per ricavare in modo semplice ma efficace, la presenza di materia oscura. Anche se verrà introdotto qui in modo molto semplificato, è semplice la logica che c'è dietro.

Consideriamo un sistema in equilibrio, fatto di N stelle, che ipotizziamo puntiformi, ognuna con massa m_i e con velocità v_i . Chiamiamo r_{ij} la distanza tra l' i -esimo e il j -esimo corpo celeste. Siano E_c l'energia cinetica ed E_p l'energia potenziale del sistema globale, date rispettivamente da

$$E_c = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad E_p = \sum_{i < j}^N G \frac{m_i m_j}{r_{ij}}. \quad (3)$$

Si definisce **viriale** del sistema la seguente quantità

$$\text{Vir} = 2E_c - E_p. \quad (4)$$

Da considerazioni generali, come la conservazione dell'energia, si ottiene il "teorema del viriale" che asserisce che per un sistema di punti in equilibrio si ha

$$\text{Vir} = 0. \quad (5)$$

Ora, ricavando m_i dalle misure di luminosità, si ha che, ad esempio, $\text{Vir} \neq 0$, per cui è necessario aumentare m_i di un fattore 3, per esempio, per far sì che si riottenga eq.(5). Questo ragionamento, che sembra molto semplificato, in realtà è

molto profondo e trova che, ad esempio intorno al Sole, la massa oscura deve essere il doppio di quella che vediamo. L'applicazione del teorema del viriale consente di ritenere che la massa delle galassie sia almeno 10 volte maggiore di quella che si deduce otticamente nel visibile. Naturalmente questo è un modo di rifrasare l'Eq. (1) che è il frutto di eguaglianza tra forza centrifuga e forza newtoniana se consideriamo un'orbita circolare.

Ci siamo riferiti alla massa delle galassie, ma il teorema del viriale conferma che si sottostima la massa di un fattore 5-10 anche per gli ammassi di galassie.

Lensing gravitazionale

Nel 1936 Einstein riteneva che osservare amplificazioni della luce di un corpo celeste, che passa nelle vicinanze di un altro corpo celeste, avrebbe avuto evidenze sperimentali talmente minimali da essere praticamente trascurabili (*lensing gravitazionale*). Nel 1937 Zwicky, nell'articolo in cui usa il teorema del viriale applicato alla Chioma Berenice [17], aggiunse un piccolo capitolo in cui riteneva, contrariamente a quanto diceva Einstein, che l'effetto sarebbe stato non trascurabile anche se le sorgenti non fossero state stelle, ma galassie.

Questa tecnica del *lensing gravitazionale* non è legata alla materia luminosa, quindi alla cinematica stellare, ma fa riferimento alla stessa luce. L'argomento è molto complesso per cui analizzarlo in questa sede non è possibile. Si accennerà solo a qualche principio che consente di inquadrare il problema [18].

In base alla Relatività Generale la gravità è la deformazione dello spazio-tempo ad opera della massa/energia. Questa deformazione, tra le tante conseguenze, ha anche quella del fenomeno del *lensing gravitazionale*: quando la luce si propaga in uno spazio-tempo curvo, essa si propaga su traiettorie curve, venendo deflessa, contrariamente a quanto accade in uno spazio-tempo piatto.

Il *lensing gravitazionale* si traduce in effetti osservabili, che coinvolgono le sorgenti da cui la luce è stata emessa:

- 1) la distorsione della forma della loro sorgente;
- 2) la presenza di immagini multiple;

3) l'amplificazione (o meno) del flusso luminoso;

4) il ritardo nella propagazione luminosa.

Collegando le proprietà modificate della sorgente alla massa che funge da lente, si è in grado di risalire al valore della massa della lente stessa. Rispetto alla analisi dinamica, che fa riferimento a traccianti luminosi, il vantaggio del *lensing* gravitazionale sta nel fatto che consente di esplorare regioni molto esterne agli aloni galattici, zone in cui la stessa analisi dinamica non sarebbe possibile. Vi sono 3 tipi di situazioni.

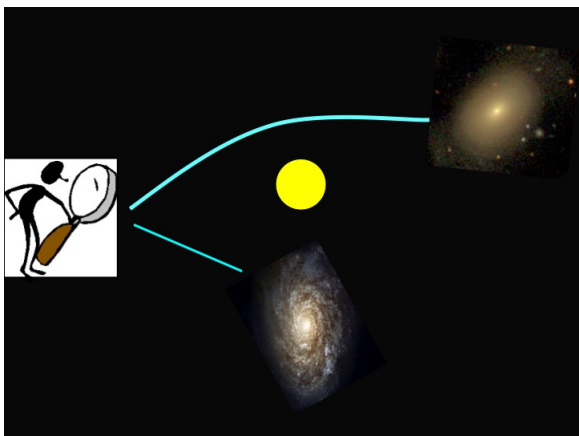


Figura 7: Lensing gravitazionale. Lo spazio-tempo curvo piega i raggi luminosi in prossimità di un corpo celeste, in giallo in figura.

1) Lensing forte



Figura 8: Ammasso di galassie SDSS J103842.59+484917.7. (Immagine del telescopio Hubble).

Si ha quando si vede una galassia o un ammasso di galassie insieme ad un arco molto grande.

La stima della massa-lente presente nella circonferenza che contiene l'arco gigante (detto anche anello di Einstein) non è difficile. Vi è molta differenza tra questa stima e quella che si ha sommando la materia luminosa nella stessa regione. In Figura 8 vi è un famoso ammasso di galassie che si trova nella costellazione dell'Orsa Maggiore, noto come SDSS J103842.59+484917.7 lontano da noi circa 4.6 miliardi di anni luce. I due corpi celesti al centro più luminosi sono due galassie ellittiche. Gli archi che si vedono sono galassie lontanissime e sono la dimostrazione dell'effetto lente che ha amplificato e distorto l'immagine a causa della presenza di SDSS J103842.59+484917.7, è un esempio di effetto gravitazionale forte, che genera l'anello di Einstein.

2) Lensing debole

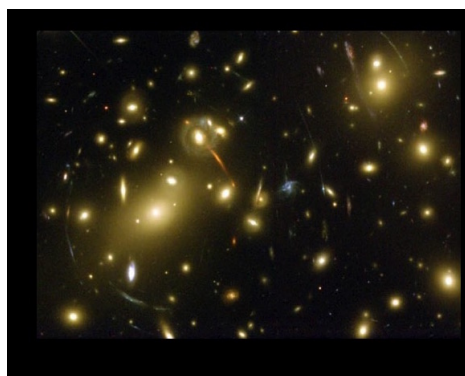


Figura 9: Si notano gli archetti sullo sfondo in questo agglomerato di galassie.

In questo caso compaiono nella lente tanti archetti luminosi che rappresentano immagini deformate delle galassie. Una sola immagine non fornisce alcuna indicazione, lo studio statistico invece dei piccoli archi consente di avere informazione sulla massa della lente che ne deforma la traiettoria.

Il motivo è semplice, nel senso che se non ci fosse *lensing* si avrebbe una distribuzione uniforme delle galassie che stanno sullo sfondo, invece la presenza di archetti e quindi la deviazione dalla configurazione isotropa, consente di avere informazione sulla massa della lente. Questa analisi rivela la presenza considerevole di materia oscura.

3) Microlesing galattico

Questa tecnica fa riferimento alla materia oscura sotto forma di MACHO (Massive Astronomical Compact Halo Object) cioè corpi celesti presenti nell'alone galattico, tipo nane bianche, stelle di neutroni, buchi neri, pianeti, nane brune, nane rosse, nubi di gas freddo. Un altro modo più intuitivo è dire che i corpi celesti MACHO sono materia barionica oscura. Quello che è importante è che questi possono avere il titolo di MACHO solo se non si trovano nel piano galattico. Il problema è che questa è materia barionica, e poi che la somma in una galassia delle masse dei MACHO non dà conto della massa mancante. Ragionevolmente, la materia oscura si può anche avvalere della massa dei MACHO insieme alla materia non barionica.

Perchè l'idrogeno è un ottimo tracciante

Nello stato fondamentale dell'atomo dell'idrogeno, lo spin dell'elettrone e del protone sono antiparalleli. Il primo stato eccitato corrisponde alla situazione in cui i due spin sono invece paralleli. La transizione da quest'ultimo stato a quello fondamentale emette radiazione elettromagnetica con una frequenza di circa 1420 MHz o equivalentemente ad un'onda radio di 21.049 cm. Teoricamente queste linee di emissione a 21 cm furono predette dall'astronomo e matematico olandese Hendrik van Hulst nel 1945 [19], mentre da un punto di vista sperimentale queste linee furono osservate nel 1951 da H. Ewen e E. Purcell [20].

L'atomo di idrogeno è un ottimo tracciante per evidenziare, nelle regioni lontanissime dal centro galattico, la presenza di materia oscura. Vediamo perchè. L'idrogeno si trova in grandi quantità nelle parti più esterne delle galassie ed è possibile misurare con grande precisione le righe di emissione ed assorbimento in laboratorio. Quando il gas si avvicina a noi, ruotando, ha una frequenza spostata verso il blu, mentre quando si allontana da noi ha una frequenza spostata verso il rosso, a causa dell'effetto Doppler. Ma seguire in questo modo le nubi di idrogeno ha un ulteriore vantaggio perchè ad una distanza considerevole dal centro della galassia, le stelle sono molto poche e quindi è difficile effettuare misure su

di esse. Ma come si fa in pratica a capire tutto ciò? La densità media dell'idrogeno è circa 1 atomo per cm^3 nello spazio interstellare? Anche se raramente, gli atomi di idrogeno si urtano, pertanto un atomo che prima dell'urto era nello stato $J = 0$, in cui gli spin dell'elettrone e del protone sono antiparalleli, dopo l'urto può passare nello stato eccitato $J = 1$, in cui i due spin sono allineati. Quasi tutti gli atomi eccitati poi ritornano nello stato fondamentale in urti successivi e una piccola frazione di questi atomi emetterà spontaneamente un fotone con una energia data da 5.9×10^{-6} eV. Anche se il processo è raro, mediamente una volta ogni 10 milioni di anni, data la quantità enorme di idrogeno presente, il fenomeno è osservabile e misurabile. In definitiva questo eccitamento e diseccitamento degli atomi di idrogeno nello spazio cosmico, con connesso ribaltamento delle relative direzioni degli spin, produce emissione di energia raggiante con fotoni la cui lunghezza d'onda è di 21 cm (microonde). Questo è vantaggioso anche perchè le onde radio attraversano facilmente tutto ciò che si frappone tra l'emissione e il radiotelescopio sulla terra. Usando radiotelescopi calibrati alla radiazione di 21 cm si possono determinare con precisione le zone in cui sono presenti nubi di idrogeno.

Fu proprio con questo approccio che nel 1957 Hendrick van der Hulst stimò per la galassia di Andromeda una massa circa 200 volte la massa luminosa che la componeva [21]. In seguito misure di Morton nel 1966 con onde radio, confermarono la costanza della velocità di rotazione dei corpi celesti, indipendentemente dalla distanza dal centro [22].

Bullet Cluster

Uno dei più interessanti ammassi di galassie che ci siano si chiama **Bullet Cluster** (o ammasso proiettile) e fu osservato nei dettagli dall'osservatorio spaziale Chandra nel 2006. Si trova a circa 3.5 miliardi di anni luce da noi ed è formato da due ammassi di galassie. La fotografia in Figura 10 è un fermo immagine di ciò che resta 150 milioni di anni dopo lo scontro tra i due ammassi. L'immagine di per se è spettacolare ed è la cristallizzazione di un ammasso che attraversa l'altro alla velocità relativa di 10^7 km/h. A destra

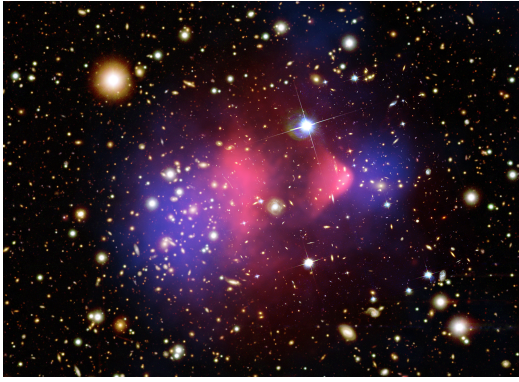


Figura 10: Immagine del *Bullet Cluster*. La foto è nell'ottico, ma sono state sovrapposte zone rosse indicanti gas tra i cluster, e zone blu, indicanti gas con maggiore potenziale gravitazionale. Sia le zone rosse che blu sono state individuate tramite *lensing* gravitazionale (credit: NASA - Chandra X-ray Observatory, Hubble Space Telescope, Magellan Telescope).

vi è un piccolo ammasso e a sinistra un ammasso molto più grande. L'ammasso più piccolo ha attraversato quello più grande come se fosse un proiettile alla velocità di circa 3000 km/s. I due ammassi non si sono fusi indicando che nella collisione è come se fossero stati trasparenti l'uno all'altro. E questa è la vera sorpresa di tutta la faccenda. L'ammasso di destra è caratterizzato da una specie di arco, come un'onda d'urto.

Dall'analisi dei raggi X emessi dal gas caldo (circa 10^7K), altamente ionizzato, si può avere idea della densità e della distribuzione della materia. Ebbene ciò che emerge è che senza materia oscura non è possibile che le strutture siano gravitazionalmente stabili. Inoltre gli elettroni liberi del gas caldo vengono colpiti dai fotoni con frequenza delle microonde del Big Bang e la diffondono modificandone l'energia (effetto Sunyaev-Zel'dovich)⁵.

L'importanza di questo Bullet Cluster è che potrebbe essere il primo caso di osservazione diretta della materia oscura perchè quando i due ammassi si sono scontrati le galassie che compongono i due ammassi non hanno quasi avvertito lo scontro conservando la loro posizione relativa. Invece il gas dell'ammasso più piccolo scontrandosi con quello più grande ha avuto la

⁵Gli elettroni del gas vengono colpiti dalla radiazione cosmica di fondo per cui l'interazione tra questi fotoni primordiali e gli elettroni liberi del gas dà origine ad una misurabile modifica della energia.

Materia oscura calda e fredda

Per materia oscura calda si intende materia formata da particelle molto leggere, poco massive, dell'ordine della massa dell'elettrone o inferiore, che quindi possono viaggiare a velocità ultra-relativistiche. Per materia oscura fredda invece si intende materia composta da particelle dotate di una certa massa, dell'ordine della massa del muone o superiore, per cui non raggiungendo velocità elevate produrrebbero, appunto, materia fredda.

peggio rimanendo indietro e creando una specie di onda d'urto che ha dato origine a ciò che vediamo: materia ordinaria e gas sono state separate. La materia oscura in questo scontro non ha risentito affatto delle interazioni tra i due ammassi. Al di là delle analisi tecniche specifiche, questo cluster ci dà forte indicazione di una componente dominante non elettromagnetica non collisionale. Questa componente interagisce solo gravitazionalmente.

Formazione di strutture nell'universo, materia barionica e non barionica

Nella formazione delle strutture (ammassi di galassie, galassie, stelle, pianeti, ecc.) la materia oscura ha un ruolo fondamentale. Alla base della formazione delle strutture vi è l'instabilità gravitazionale, nel senso che zone con maggior aggregazione di materia erano seme per un maggior accrescimento rispetto ad altre zone. Il cosmologo Jakov Zel'dovich era dell'idea che la materia oscura fosse calda dato che considerava le particelle che avrebbero composto la materia oscura, molto leggere [23]. Questa visione era in contrasto con le osservazioni anche perchè se la materia oscura fosse stata calda si sarebbero cancellate le variazioni di densità, anche per questo motivo, ma non è l'unico, siamo portati a pensare che la materia oscura debba essere considerata fredda anche ai primordi dell'universo. Infatti, quando si effettuano simulazioni, considerando materia oscura calda, queste non sono capaci di conservare le piccole strutture nel cosmo, nel senso che si parte dalla formazione di quelle più grandi e man mano si va a strutture sempre più piccole

Ricombinazione

L'universo primordiale era una enorme fornace composta da plasma, cioè da nuclei ed elettroni dissociati e da fotoni che vagavano interagendo con entrambi. L'alta densità dell'universo impediva ai fotoni di coprire grandi distanze prima di collidere; rimanevano intrappolati, per cui l'universo era opaco (e questo è il motivo per cui non riusciamo a vedere l'universo prima di questo momento per cui non potrebbero mai raggiungerci i fotoni di questo periodo o precedente a questo periodo di tempo). Inoltre l'alta energia di questi fotoni impediva ai nuclei atomici e agli elettroni di congiungersi, nonostante fossero attirati elettricamente. Dopo circa 380 mila anni circa dal Big Bang, a causa delle continue collisioni con nuclei ed elettroni, l'energia dei fotoni era diminuita, tanto da non poter più dissociare degli atomi di idrogeno che si formavano. Questo particolare momento della storia dell'universo si chiama "ricombinazione".

che la materia oscura calda disgrega. Se invece si fanno simulazioni con materia oscura fredda, il processo di aggregazione è inverso, dal basso verso l'alto: prima si formano le strutture più piccole, che fungono da semi per processi di aggregazione e poi si formano strutture sempre più grandi. In questo caso tutto è più stabile.

La radiazione cosmica di fondo (CMB), 370 mila anni dopo il big bang, mette in evidenza i semi primordiali che poi hanno dato origine alle strutture nell'universo, infatti una forte indicazione della esistenza della materia oscura primordiale viene proprio dalla CMB. Se fosse stata presente la sola materia ordinaria nei semi primordiali della CMB, questa non avrebbe avuto la forza aggregante intorno ai semi piccoli. Occorreva un seme più grande, dato appunto dalla materia oscura, che avrebbe dovuto avere la funzione aggregante, insomma doveva essere il cemento che consentiva ai semi più piccoli di esistere ed essere efficienti nelle aggregazioni di materia. La sola materia barionica non avrebbe potuto provvedere a far questo.

La materia ordinaria e quella oscura non barionica seguono strade molto diverse durante l'evoluzione dell'universo. Vediamo un po' più in dettaglio perchè serve la materia oscura per migliorare l'efficienza nella crescita delle strutture nell'universo.

Prima della ricombinazione, i fotoni sono un ostacolo al movimento dei barioni ordinari e questo in pratica vuole dire che non si addensano grumi di materia nelle zone perturbate. L'aggregazione della materia attorno a dei semi è ostaco-

lata fino alla ricombinazione. Questo però non accade per la materia oscura non barionica, che non interagendo con la radiazione elettromagnetica comincia presto il processo di aggregazione sui semi primordiali e quindi parte prima nel formare le strutture su grandi scale. Dopo la ricombinazione la materia ordinaria trova tutto pronto dato che gran parte del lavoro di aggregazione è stato già fatto dalla materia oscura. In pratica questo vuole anche dire che la materia oscura fa sì che i semi primordiali su cui si aggrega la materia ordinaria possono essere molto più piccoli, ad esempio, di quelli considerati negli anni '70, quando si considerava solo la materia ordinaria.

In Inghilterra il cosmologo Carlos Frenk si fece promotore di una complicatissima simulazione con una enorme quantità di equazioni, per capire se partendo da una nuvola di gas primordiale si riusciva ad avere strutture come le galassie [24]. All'inizio non ci riuscì perchè la sola presenza di materia ordinaria non garantiva la gravità necessaria a non far dissipare la materia. Aggiungendovi materia oscura le simulazioni riproducevano le galassie. È come se solo la presenza di materia oscura potesse garantire la generazione e formazione di strutture su grandi scale.

Le ipotesi di partenza utilizzate per effettuare queste simulazioni sono raggruppate sotto il nome di legge di Navarro-Frenk-White (N-F-W), dal nome dei tre cosmologi che si sono occupati di questa simulazione [24]. Sembra che questo modello di formazione delle strutture con materia oscura fredda sia quello che meglio è in

grado di riprodurre le nostre osservazioni. Ma gli interrogativi sono numerosi. 1) Qual è il vero ruolo della materia ordinaria in questi processi di aggregazione e formazione delle strutture? 2) Se si calcolano il numero di galassie nane col modello di N-F-W vien fuori un numero molto, troppo alto rispetto al numero reale. 3) Le simulazioni forniscono un andamento a cuspidi nella distribuzione della materia oscura nelle parti centrali delle galassie, andamento non riscontrato nelle osservazioni che invece indicano che la luminosità della galassia presenta un massimo pronunciato al centro con una diminuzione molto rapida con la distanza radiale, mai a cuspidi, anche se questo problema sembra essere stato in parte superato, a scapito di un aumento del numero di parametri.

Dalla Supersimmetria alla materia oscura: WIMP

Il Modello Standard presenta una grande quantità di simmetria che permette di indagare molte caratteristiche della natura ed in particolare della materia che conosciamo. Una specie di generalizzazione di questa simmetria è la cosiddetta supersimmetria, che in verità non è contemplata tra le simmetrie del Modello Standard. Alla parola simmetria si aggiunge il prefisso super per indicare una particolare caratteristica per cui ad ogni particella vi è un partner con le stesse proprietà della particella, sia nucleari che elettriche. Il motivo per cui queste particelle supersimmetriche non sono ancora state scoperte potrebbe essere legato al fatto che sarebbero particelle talmente massive che gli attuali acceleratori non hanno abbastanza energia per produrle. La supersimmetria vuole elevare ad un livello più elevato la semplicità e se si vuole, la regolarità nelle leggi che governano il mondo.

I modelli supersimmetrici sono in grado di fornire una soluzione al cosiddetto “problema gerarchico” dando una giustificazione alla differenza tra la scala di rottura della simmetria elettrodebole (100 GeV) e quella della grande unificazione 10^{15} GeV.

Per far sì che il modello diventi supersimmetrico è necessario che si introducano altre particelle con un criterio in fondo semplice: ad ogni particella con spin intero (o frazionario) il partner su-

persimmetrico ha spin frazionario (o intero). Ad esempio al fotone che ha spin 1, il partner supersimmetrico è il fotino con spin 1/2 o all'elettrone con spin 1/2 abbiamo il partner supersimmetrico che è il seletttrone con spin 0.

I partner supersimmetrici hanno masse molto elevate e sono caratterizzati da una forte attenuazione delle interazioni elettromagnetiche.

Una spiegazione del fatto che non vediamo i partner supersimmetrici può essere dovuta al fatto che le energie ora sono molto basse, ma poco dopo il Big Bang avrebbero potuto benissimo esistere particelle e partner supersimmetrici, che avevano masse molto più elevate. Questo le ha portate a decadere più e più volte fino a scomparire. Questo decadimento multiplo e conseguente scomparsa potrebbero non essere stati un processo efficiente e ciò che è rimasto di questi residui supersimmetrici lo chiamiamo (Weak Interacting Massive Particle) WIMP .

Stime teoriche ci dicono che una particella con una massa compresa tra 10 e 1000 masse del protone e che interagisce solo con interazioni deboli e la gravità soddisfa i requisiti connessi con le caratteristiche della materia oscura non barionica. Queste particelle sono dette, genericamente WIMP e non sono presenti nel Modello Standard.

Una ipotesi sulla loro origine potrebbe essere questa. L'universo primordiale era denso e molto caldo per cui il plasma era composto da particelle con energia elevata. Questa energia si trasformava in massa, per cui questa conversione produceva particelle molto più massive delle particelle originarie. Queste sono le particelle che potrebbero comporre la materia oscura e questo spiega perchè dovrebbe avere una massa così elevata. Ora man mano che l'universo si espandeva si raffreddava, per cui non era più possibile produrre WIMP e quindi il loro numero è rimasto congelato.

Le WIMP dovrebbero essere state prodotte nell'intervallo temporale 10^{-6} s - 10^{-9} s dal Big Bang. Il problema è che non vi sono particelle simili nel Modello Standard perchè il neutrino, il bosone Z e il bosone di Higgs sono le particelle che interagiscono debolmente. Solo i neutrini hanno un tempo di vita lungo, ma queste particelle non possono essere considerate come candidati per la composizione della materia oscura perchè la loro massa è troppo piccola e poi dovrebbero essere

prodotti da una materia oscura calda essendo relativistici.

Il Neutralino

La particella più leggera prevista dalle teorie supersimmetriche è il neutralino (composta da un fotino + zino, che è la parte supersimmetrica del bosone Z , + 2 higgsini) che ha tutte le caratteristiche di essere giusta per essere materia oscura, e questo perchè 1) è neutra, 2) ha la massa giusta per produrre l'abbondanza della materia oscura; stime danno una massa diverse centinaia di volte più pesante del protone; 3) è stabile; 4) è sensibile solo all'interazione debole, oltre a quella gravitazionale. La sua stabilità garantisce che durante il tempo cosmico ha fatto da collante per le strutture cosmiche.

Fino a temperature di 10 GeV i neutralini potevano essere in equilibrio con le altre particelle del plasma primordiale. Vi sono delle condizioni secondo le quali il disaccoppiamento dei neutralini dalle altre componenti lasciava un residuo di neutralini che avrebbero composto la materia oscura e questo implica un limite inferiore (detto limite di Lee-Weinberg [25]) alla massa dei neutralini dell'ordine del GeV. I neutralini non sono mai stati identificati.

L'assione

Questo argomento è molto tecnico e va oltre gli scopi di questo articolo. In modo sommario diciamo che l'interazione forte rispetta la simmetria di CP (prodotto di due simmetrie discrete C = coniugazione di carica e P = parità), mentre la cromodinamica quantistica, la teoria che descrive l'interazione forte, ne prevede la violazione, mai osservata. Se la simmetria di CP fosse violata si avrebbe un grosso momento di dipolo elettrico del neutrone, cosa non ancora vista.

Roberto Peccei e Helen Quinn nel 1977 [26] risolsero il problema della non osservata violazione della simmetria CP nell'interazione forte, proponendo un meccanismo, o meglio una nuova simmetria, detta simmetria di Peccei-Quinn. Successivamente Weinberg [27] e Wilczek [28] trovarono che la nuova simmetria implicava l'esistenza di una nuova particella a cui diedero il nome di assione.

L'assione non è elettricamente carico, dovrebbe avere una massa tra $10^{-2} - 10^{-5}$ eV, dovrebbe interagire molto debolmente con la materia ordinaria. Data la sua piccola massa l'assione dovrebbe essere troppo leggero per essere un candidato opportuno per la materia oscura. Però gli assioni primordiali verrebbero prodotti subito dopo il Big Bang in abbondanza con un meccanismo non termico e questo significa che essi verrebbero generati in modo non efficiente, non veloce e non abbondante, e non vengono mai termalizzati. Questa produzione dipende da diversi fattori, dalla massa, dal tipo di interazione, e da quale particella li produce.

Essendo molto leggeri, rispetto alle particelle componenti la massa oscura, dovevano dare origine ad una massa oscura calda, invece le loro caratteristiche ne facevano una componente fredda e questo è connesso alla produzione non-termica, quindi di particelle leggere e non calde.

Per correttezza bisogna dire che molti della comunità scientifica nutrono dubbi sulla esistenza di questa particella anche perchè la sua eventuale esistenza potrebbe creare problemi rilevanti per l'astrofisica. La presenza di assioni altererebbe la formazione delle strutture su grandi scale, dato che si addenserebbero in enormi strutture ad anello (che non sono mai state osservate). Se esistessero, in presenza di forti campi magnetici, come vicino alle Magnetar, si avrebbe una conversione estremamente efficiente di fotoni in assioni cosa che produrrebbe dei segnali inequivocabili, come particolari righe di assorbimento nello spettro delle Magnetar. Tutto ciò non è mai stato visto. I problemi di tipo cosmologico, legati all'esistenza degli assioni sono presentati in [29].

Extradimensioni, stringhe e materia oscura

Uno sconosciuto matematico tedesco Theodor Kaluza mandò ad Einstein un lavoro nel 1919, nel quale presentava una teoria di unificazione della gravità e dell'elettromagnetismo (le due uniche forze conosciute all'epoca), la particolarità era che le dimensioni dello spazio non erano 3 ma 4, per cui lo spazio-tempo era pentadimensionale, ma la quarta dimensione spaziale non era ancora stata vista da nessuno. Kaluza aveva fatto una cosa semplice e cioè quando si consi-

deravano 4 (spazio) + 1 (tempo) dimensioni, le equazioni di Einstein facevano comparire altre equazioni che altro non erano che le equazioni di Maxwell. Il sogno di unificazione di Einstein poteva essere sui binari giusti. Einstein non cestinò il lavoro. C'era un problema non semplice: non vi era traccia empirica della quarta dimensione spaziale. L'articolo fu pubblicato due anni dopo [30] grazie all'interessamento di Einstein. Qualche anno dopo, nel 1926, il fisico Oskar Klein [31] capì dove potesse essere la dimensione nascosta: era una dimensione accartocciata, arrotolata in una dimensione spaziale normale, per cui un ipotetico osservatore si potrebbe muovere avanti o indietro in una dimensione spaziale ordinaria e muoversi circolarmente attorno a questa dimensione. Il raggio della dimensione doveva essere dell'ordine della lunghezza di Planck (non accessibile agli esperimenti). Questo studio dava concretezza alla proposta di Klein per cui la teoria fu chiamata teoria di Kaluza-Klein. Purtroppo questa teoria aveva grosse difficoltà a trovare all'elettrode una giustificazione geometrica, anche Einstein la considerò e studio fino agli inizi degli anni '40. Poi fu messa nel dimenticatoio.

La teoria delle stringhe, nota dal lavoro pionieristico del fisico Gabriele Veneziano nel 1968 [32], cominciò a farsi strada negli anni '70 del secolo scorso. Alla base di questa teoria c'è il fatto che le particelle sono considerate come strutture non più puntiformi ma come cordicelle. C'è un fatto però, e cioè che le interazioni (considerando anche la supersimmetria) possono essere descritte nel modo giusto solo se le stringhe sono considerate in uno spazio pluridimensionale e questo perché i modi di vibrazione delle stringhe, cioè le particelle elementari, sono influenzati dalle dimensioni extra. Le vecchie teorie di Kaluza e Klein ritornano a galla!

Ma che relazione c'è tra le extradimensioni e la materia oscura? Volendo semplificare la questione è questa. Quando si considerano le extradimensioni, quello che accade ad ogni particella nota è che si associano nuove particelle identiche a quelle originali, ma con massa crescente, con regolarità. Alla particella del Modello Standard con massa m , vi è la corrispondente scala di particelle con massa $2m, 3m, 4m, \dots$. Ora il raggio della quarta dimensione spaziale e massa m sono grandezze correlate, una l'inversa dell'al-

tra. Queste particelle con massa $2m, 3m, \dots$ sono poco stabili per cui se venissero prodotte decadrebbero, la particella $B(2m)$ di massa $2m$ in 2 particelle $A(m)$ di massa m , la particella $C(3m)$ di massa $3m$ in 3 particelle A ecc.. Se ad esempio A fosse un fotone di massa m , nato dalla supersimmetria e per qualche ragione non potesse decadere, avremmo ottenuto la materia oscura perché non decadendo è stabile, è neutro e ha massa m . Per onestà bisogna dire che questa è una interessante congettura, non ancora vagliata dagli esperimenti.

Cosa pensiamo di sapere e... altro...

Elenco sommariamente cosa sappiamo o meglio cosa pensiamo di sapere della materia oscura e delle sue caratteristiche, facendo un sunto schematico delle nostre conoscenze.

- 1) Non ha quasi mai interazione con la materia ordinaria.
- 2) Fino ad ora non è mai stata vista o rivelata da nessuno strumento.
- 3) Interagisce solo con la gravità, in caso contrario l'avremmo già vista da tempo attraverso le tracce lasciate su eventuali rivelatori. Gli effetti gravitazionali ne manifestano la presenza e le caratteristiche.
- 4) È stabile.
- 5) L'individuazione della materia oscura non coinvolge emissione di onde elettromagnetiche,
- 6) Non ha carica di colore perché non interagisce con l'interazione forte.
- 7) L'ottimo accordo con i dati sull'abbondanza dei nuclei prodotti nella nucleosintesi primordiale ottenuto considerando soltanto le particelle a noi note, implica che la materia oscura sia costituita da particelle che ancora non abbiamo identificato.
- 8) La radiazione cosmica di fondo ci dice che il plasma primordiale non poteva avere tra i suoi componenti la materia oscura. Quindi la materia oscura non è composta da particelle con carica elettrica, pertanto non poteva essere un plasma.

9) Deve avere una vita media almeno dell'ordine dell'età dell'universo perchè la percentuale di materia oscura al tempo della nucleosintesi e della ricombinazione è la stessa di adesso.

10) Non ha autointerazione, tantè che vi sono Cluster di galassie come il Bullet Cluster che ci dice che la materia oscura non interagisce con se stessa attraversandosi. È come se la materia oscura fosse oscura a se stessa!

11) Deve essere costituita da particelle pesanti essenzialmente perchè se non fossero tali avrebbero una velocità elevata e questo pregiudicherebbe il fatto di trovare materia oscura in spazi compatti e ci sarebbero problemi seri sulla formazione delle strutture. Pertanto la bassa velocità della materia oscura, non relativistica, ci dice che essa deve essere fredda. Nessuna particella nota però soddisfa a questi requisiti.

12) L'alone sferico che circonda ogni galassia dovrebbe essere esteso per circa 50 mila parsec oltre il disco galattico.

13) L'alone sferico dovrebbe contenere da 2-10 volte più materia di quanto ne contiene la galassia stessa (materia barionica).

14) Gli aloni di materia oscura nei superammassi tendono a formarne uno gigantesco, una sorta di superalone, che potrebbe essere rivelato tramite il fenomeno delle lenti gravitazionali.

La materia oscura presenta diversi aspetti contraddittori, ne citiamo solo qualcuno anche se sono molti di più. Le velocità molto elevate delle stelle periferiche nelle galassie induce a pensare alla presenza di materia oscura nella galassia ma anche alla presenza di aloni esterni molto più grandi della galassia stessa. La quantità di materia oscura e barionica, dovrebbe essere davvero moltissima, tanto da non essere trascurabile nel processo di rallentamento dell'espansione dell'universo, ma di questo non si fa mai menzione.

Un altro aspetto strano è l'inaspettata distribuzione omogenea della materia oscura. La distribuzione della materia oscura nell'alone che circonda la galassia è molto regolare rispetto alla distribuzione della materia visibile.

Un altro aspetto bizzarro riguarda un fenomeno mai chiarito e cioè le galassie ruotano, facendo perno su un nucleo centrale, ma sono avvolte da una gigantesca nube di materia oscura, che stranamente sembra non partecipare al moto di rotazione della galassia. La galassia centrale gira vorticosamente attorno a se stessa mentre l'alone gigantesco che l'avvolge sembra fermo. Abbastanza strano ed illogico come comportamento.

Le perplessità sulla esistenza della materia oscura non sono poche. Forse in parte avevano ragione i contemporanei di Zwicky che ritenevano che molte anomalie viste da Zwicky sarebbero scomparse alla luce di nuove scoperte e affinamenti sperimentali. Cito un recente lavoro, tra i cui autori c'è Francesco Sylos Labini del centro studi E. Fermi, in cui si esaminano i dati del satellite Gaia, lanciato 10 anni fa, ma gli ultimi dati rilasciati sono del 2022 [33]. Questo risultato è straordinario e chiaramente in contrasto con la stima della massa della via Lattea, che secondo questo studio potrebbe mancare all'appello circa mille miliardi di masse solari e quindi ci potrebbe essere molta meno massa di quella che normalmente si richiede per far tornare i conti introducendo la materia oscura. È un forte indizio di non congruità e di profonde implicazioni fuori dal coro.

Energia oscura: il mistero più fitto

Così tutto è iniziato

I posti erano tutti occupati quell'8 gennaio 1998 nella sala conferenze del Georgetown Hilton di Washington, c'erano oltre 20 giornalisti anche del New York Times e del Washington Post. Tra i tanti presenti c'erano anche Peter Garnavich per l'High-z teams e Samuel Perlmutter per l'SCP (Supernova Cosmology Project), Ruth Daly con i suoi dati sperimentali su radiogalassie e Neta Bahcall con quelli sugli ammassi di galassie. I quattro scienziati portavoce di quattro collaborazioni diverse con un'unica voce dissero che l'universo di sarebbe espanso per sempre, ma una delle quattro voci fu più altisonante delle altre, era quella di Perlmutter che tenne una minicon-

La costante di Hubble

L'espansione dell'universo è il risultato di una gigantesca esplosione avvenuta al Big Bang che ha dilatato lo spazio. Il fatto che l'universo si stia espandendo è la conclusione dell'osservazione che le righe dello spettro provenienti da galassie lontane sono affette da uno spostamento verso il rosso (*red shift*). Il *red-shift* è un fenomeno per il quale un corpo celeste in allontanamento da noi emette una radiazione elettromagnetica che quando ci raggiunge ha una lunghezza d'onda maggiore di quella che aveva all'emissione. Si chiama spostamento verso il rosso perché se la radiazione elettromagnetica è la luce visibile, la luce rivelata, di un certo elemento, nelle osservazioni spettroscopiche è spostata verso il rosso dello spettro. In modo analogo se il corpo si avvicina a noi, lo spettro è spostato verso il blu. È il fenomeno noto come "effetto Doppler", in cui si dilatano le lunghezze d'onda di una sorgente che si allontana dall'osservatore e, al contrario, si contraggono quelle di una sorgente che si avvicina. È un dato osservativo che il valore del *red shift* cresce con la distanza della sorgente da noi, e questa è una indicazione dell'espansione dell'universo. In prima approssimazione la distanza tra due corpi celesti e la velocità di allontanamento sono legate da una relazione lineare la cui costante di proporzionalità è la costante di Hubble, che prende il nome da chi l'ha scoperta sperimentalmente.

ferenza di un'ora ai giornalisti parlando alla sua normale velocità e cioè velocissimo!

Il giorno dopo, il cosmologo Michael Turner si avvicinò agli otto poster di Perlmutter, in particolare al sesto che era tratto dall'articolo apparso una settimana prima dove l'SPC aveva pubblicato i risultati di 7 supernovae, ma accanto a destra vi erano i dati di oltre 40 supernovae, non ancora pubblicati, che definivano in modo chiaro la questione.

Ma facciamo un passo indietro. Nel 1995, Perlmutter e Ariel Goobar pubblicarono un lavoro su "The Astrophysical Journal" [34] in cui ritenevano che si potessero usare le supernovae per dimostrare che l'universo era tutta materia e costante cosmologica $\Lambda = 0$ (presenteremo in seguito la costante cosmologica).

I risultati delle 7 supernovae riportati in un pannello quell'8 gennaio 1998 davano, secondo la loro interpretazione, $\Lambda = 0$; la sola materia bastava a spiegare tutta la composizione dell'universo. A destra di quel pannello, 40 supernovae, invece, sempre dello stesso gruppo, davano un risultato in profondo contrasto con le 7 supernovae precedenti e quindi in disaccordo totale con le osservazioni fatte dallo stesso gruppo di ricerca! The Astrophysical Journal accettò il lavoro con le 7 supernovae nel febbraio 1997, pubblicandolo a luglio [35]. I risultati di queste supernovae erano stati presi con strumenti a terra e per mi-

gliorare e confermare i risultati, le misurazioni fotometriche furono eseguite con il telescopio spaziale. Purtroppo i risultati furono in contrasto con quelli ottenuti a terra: i segnali erano molto più deboli di ciò che ci si aspettasse, le supernovae erano meno luminose, voleva dire che erano più lontane di quanto ci si attendesse. Infatti nel grafico delle magnitudo (misura standard della luminosità per i corpi celesti) in funzione della distanza, ci si aspettava di vedere una retta con inclinazione di 45° , in sintonia con la legge di Hubble. Invece le supernovae erano distanti, nel grafico, dalla retta.

Peter Nugent studiò le prime due supernovae dell'HST (Hubble Space Telescope), con una attenta analisi fotometrica. Si ipotizzava $\Omega = 1, \Lambda = 0$, cioè un universo piatto formato da sola materia, anche perché se l'universo fosse stato riempito di materia e radiazione, allora ci si sarebbe aspettati un rallentamento nella espansione cosmica, rallentamento prodotto dalla gravitazione universale. Con sorpresa, nel grafico magnitudo-*red-shift* Nugent trovò che, posizionando 2 supernovae secondo la loro distanza, le loro magnitudo erano 1.6 volte più deboli di quanto ci si aspettasse. Il tutto faceva pensare che $\Lambda \neq 0$, anche se questa informazione era a dir poco straordinaria! Il dubbio nasceva dal fatto che i dati si riferivano solo a due casi. Il gruppo di Nugent si scambiò una serie di *mail* in cui

Nugent invitava a fare molto presto per la pubblicazione. La cosa non fu fatta. In quella estate del 1997, il gruppo di Nugent eliminò 2 delle 7 supernovae perchè una non era una supernova IA e la seconda perchè presentava un forte anomalia. Alla fine, nel settembre del 1997 le supernovae rimaste indicavano un totale disaccordo col lavoro pubblicato da loro stessi due mesi prima. Il gruppo presentò il lavoro a Nature agli inizi di ottobre [36], ma la prosa dell'articolo era infarcita di frasi prudenti, perchè dovevano giustificare la contraddittorietà dei risultati con quelli del loro stesso lavoro precedente.

Anche il gruppo di High-*z* fece un lavoro sulle stesse supernovae [37], però col telescopio spaziale, ed il 13 ottobre con Garnavich primo autore, venne pubblicato *on-line* il lavoro, i cui risultati convergevano col gruppo di Nugent.

Il gruppo di High-*z* era il gruppo concorrente, tra cui spiccava la figura di Adam Riess. La collaborazione era in ritardo rispetto al gruppo SCP, che non poteva esse battuto sulla quantità dei dati ma solo sulla qualità. Nella sua tesi di dottorato Riess si era interessato dei metodi per eliminare il contributo della polvere contenuta nella galassia che ospitava la supernova. Il suo metodo, noto come MLCS Multicolor light-curve shape, consentiva di ripulire i dati. I dati erano relativi a 22 supernovae vicine osservate al telescopio di Mount Hopkins, dati mai pubblicati. C'era un problema però, e cioè quei dati indicavano un universo con massa negativa, ma se si introduceva nei programmi una costante cosmologica, $\Lambda \neq 0$, tutto tornava, la massa dell'universo diventava positiva. Riess inviò i dati al direttore del gruppo, Brian Schmidt che ricontrollò tutto il calcolo scrivendo un programma per conto suo.

La storia potrebbe continuare, ma il capitolo finale, quello che conta, è che l'universo sta accelerando, contrariamente a quanto si è sempre pensato. Stranamente, però, il premio Nobel per la fisica è stato assegnato a Riess, al suo capo Schmidt e a Perlmutter. Gli attori decisivi di questa avventura erano molti di più e molto più determinanti. L'assegnazione del premio Nobel è un mistero, più oscuro di quelli dell'universo...

Il lettore si sta chiedendo, ma perchè si sono usate le supernovae IA, cosa c'entra la costante Λ , ma soprattutto, la domanda delle doman-

de è: cosa genera questa forza repulsiva anti-gravitazionale che accelera lo spazio-tempo nel cosmo?

Cerchiamo di fare ordine e partiamo dalla prima domanda.

Le supernovae IA e le distanze in cosmologia

Perchè le supernovae IA?

Attraverso catene di reazioni nucleari, una stella come il sole converte l'idrogeno in elementi più pesanti incrementando l'energia cinetica dei nuclei coinvolti. Come conseguenza si ha un incremento della temperatura della stella e, quindi, della pressione del gas che la compone. Questo processo induce un equilibrio tra la pressione gravitazionale della stella, che la farebbe collassare, e la pressione generata dalla fusione dell'idrogeno, che la farebbe espandere. Man mano che vengono prodotti carbonio ed ossigeno nelle stelle, il processo di fusione si arresta perchè servirebbe una temperatura molto più elevata per fondere questi nuclei, quindi la pressione termica non compensa più l'attrazione gravitazionale e si produce il collasso gravitazionale.

Se la massa della stella è maggiore del limite di Chandrasekhar, che è di 1.38 masse solari, il collasso procede aumentando la temperatura fino a permettere di fondere i nuclei di carbonio e ossigeno. Il processo continua attraverso una serie di reazioni nucleari che formano nuclei sempre più pesanti e che producono sempre più energia. Il processo si ferma quando vengono prodotti nuclei di ^{56}Fe . La fusione di nuclei più pesanti non produce più energia ma la necessita. A questo punto l'equilibrio tra pressione termica e gravitazionale si rompe, ed inizia il collasso, che si interrompe quando il nocciolo della stella raggiunge la densità della materia nucleare. A questo punto si genera un rimbalzo della materia che sta collassando. Lo scontro tra materia che rimbalza e quella che collassa genera un'onda d'urto e quindi l'esplosione da Supernova. Questo è il meccanismo alla base delle Supernovae di tipo IB, IC, o II, nelle cui righe spettrali si trovano tracce anche di elementi leggeri come l'idrogeno e l'elio perché contenuti nella stella progenitrice. A grandi linee, ciò che rimane dopo l'esplosione è un buco nero, se la massa della stella collassata

è di circa una ventina di masse solari. Per masse stellari inferiori si ha una stella di neutroni, individuata come *pulsar*.

Se, invece, la massa della stella progenitrice è inferiore al limite di Chandrasekhar, il collasso si interrompe perché la pressione gravitazionale è compensata da quella prodotta dal gas degenerato di elettroni liberi soggetti al principio di esclusione di Pauli. È un dato di fatto che due fermioni non possono occupare lo stesso stato quantistico, cioè non possono avere la stessa energia, spin, e quantità di moto. Cosicché gli elettroni, che sono fermioni, devono occupare stati con livelli di energia sempre più elevata e questo impedisce di comprimere il gas di elettroni in un unico stato di energia minima. Questo fenomeno produce nella stella una pressione verso l'esterno che bilancia la pressione gravitazionale. La stella rimane in uno stato di equilibrio, ed è una nana bianca.

Se la nana bianca si trova in un sistema binario, magari legata ad una gigante rossa, a causa della estrema volatilità della zona esterna della gigante rossa, la nana bianca attira gli strati esterni della compagna gigante rossa. Questo processo fa aumentare considerevolmente la massa della nana bianca fino a superare il limite di Chandrasekhar, per cui salta l'equilibrio tra pressione gravitazionale e pressione quantistica degli elettroni. In pochissimo si ha il collasso della nana bianca, la temperatura diventa elevatissima, tanto da fondere carbonio ed ossigeno, generando elementi molto più pesanti. Si produce così una gigantesca quantità di energia che induce la nana bianca ad esplodere: la sua luminosità di picco è paragonabile a quella della galassia a cui appartiene se non addirittura di più. È una supernova di tipo IA, e produce questa luminosità per qualche giorno espellendo gran parte della sua massa.

Le supernovae IA (SNIA), che sono quelle che ci interessano, sono caratterizzate dal fatto che i loro spettri di luce non hanno righe di idrogeno e neppure di elio. Questo perché la stella progenitrice è una nana bianca che non contiene questi due elementi. Le SNIA raggiungono quasi tutte lo stesso picco di luminosità nel senso che la curva di luce (di quanto varia nel tempo la luminosità) è identica per tutte queste SNIA. Il motivo di tale uniformità è legato al fatto che la stella progenitrice di questo tipo di supernovae



Figura 11: Nana bianca che accresce la sua massa a scapito della stella compagna, di solito una gigante rossa, i cui gas esterni sono gravitazionalmente meno legati e quindi più facilmente catturabili dalla nana bianca. (credit: NASA)

è sempre una nana bianca la cui composizione elementare è ben definita, al contrario delle stelle progenitrici degli altri tipi di supernova, che possono avere masse molto differenti, e quindi composizioni elementari molto differenti.

Vi è un problema, e cioè l'esplosione di queste SNIA è un evento molto raro ed improvviso. Mediamente, in una galassia, ne esplodono 2 o 3 ogni millennio, e, inoltre, le SNIA sono una piccola percentuale delle supernovae. Ma dato l'elevatissimo numero di galassie la frequenza con cui si vedono queste supernovae non è trascurabile.

In cosmologia molta informazione proviene dalla luce emessa da un corpo celeste e su questa si fondano i nostri ragionamenti e le nostre conclusioni.

La determinazione delle distanze dalla Terra di un corpo celeste si basa su una idea molto semplice: quanto più è lontano il corpo celeste da noi, tanto più fioca apparirà la luce emessa. La **luminosità apparente** è la luminosità del corpo se osservata dalla Terra, luminosità che diminuisce come la superficie su cui si diffonde, cioè con l'inverso del quadrato della distanza, quindi molto rapidamente, mentre la **luminosità intrinseca** è la luminosità che il corpo avrebbe se osservato da vicino. Dal confronto delle due luminosità possiamo calcolare la distanza. Naturalmente la difficoltà maggiore sta nel determinare la luminosità intrinseca, e questo è affidato (come vedremo) alle supernovae IA.

Detto in altri termini, se vogliamo determinare il tasso di espansione dell'universo, dobbiamo

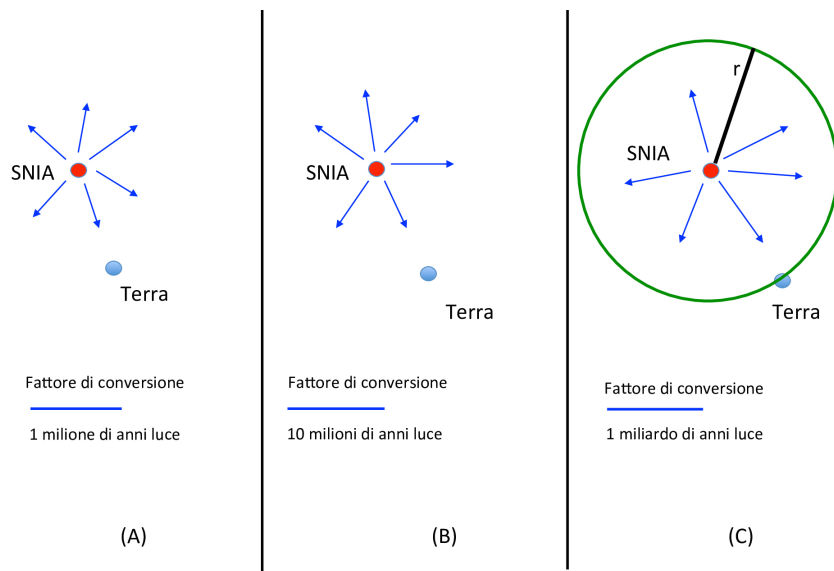


Figura 12: (A) La luce della SNIA parte e si diffonde. (B) Man mano che la luce viaggia lo spazio si espande, cambia il fattore di scala. (C) La luce della SNIA raggiunge la Terra, il fattore di scala è quello su cui fare i conti. Dal confronto con la luminosità apparente e quella intrinseca riusciamo a risalire al raggio della sfera con centro nella SNIA, passante per la Terra

puntare il nostro telescopio verso un faro illuminato. Dallo spostamento Doppler della luce del faro siamo in grado di determinare la velocità alla quale il faro si sta allontanando o avvicinando a noi. Però non basta, per determinare il tasso di espansione c'è bisogno di sapere quanto è lontano il faro da noi (questo si ricava dalla brillantezza intrinseca della luce del faro). Combinando queste due informazioni, velocità e distanza siamo in grado di risalire al tasso di espansione.

Le SNIA sono ottimi indicatori di distanza e candele standard perchè hanno: 1) una piccola dispersione in prossimità del picco di luminosità e dopo il picco, 2) sono molto luminose, 3) il meccanismo di esplosione è abbastanza noto, 4) le incertezze dovute al *red-shift* sono ben controllate, 5) c'è un gran numero di *test* su SNIA locali.

Le distanze in cosmologia

È necessario porsi una domanda che spesso si trascura quando ci si occupa di questi argomenti. Che distanza misurano gli astronomi? La distanza tra noi e la SNIA al momento della emissione della luce, oppure la distanza tra la nostra posizione oggi e la SNIA quando essa ha emesso la luce, oppure è la distanza tra le due posizioni attuali tra noi e la posizione della SNIA? Diciamo subito che la risposta giusta è la terza (che in certo qual modo è anche la seconda). Per capire la questione per nulla accademica, facciamo un esempio. Consideriamo due punti sulla superficie di un palloncino che si espande. I due punti

non si muovono, ma la loro distanza aumenta, anche se relativamente al raggio della sfera tutto rimane identico. In modo del tutto analogo, man mano che l'universo si espande, o più correttamente lo spazio tra i corpi celesti si espande, mentre i corpi celesti rimangono fermi, è necessario considerare il fattore di conversione giusto, che i cosmologi chiamano col nome di **fattore di scala**, il quale aumenta all'aumentare della espansione dell'universo.

L'attenuazione della luce delle SNIA è legata alla grandezza della sfera su cui si diffonde la luce. Vi è però un'ulteriore complicazione dovuta al fatto che la dilatazione dello spazio, nell'espansione, aumenta la lunghezza d'onda dei fotoni, spostando verso il rosso la lunghezza d'onda λ emessa dalla SNIA. In definitiva l'attenuazione dell'intensità luminosa proveniente dalla SNIA è dovuta non solo alla diminuzione della densità dei fotoni che si sparpagliano su una superficie sempre più grande ma anche all'aumento della lunghezza d'onda dei fotoni emessi fatto che ne diminuisce l'energia secondo la legge di Planck $E = hc/\lambda$, con c velocità della luce e h costante di Planck. È necessario considerare tutto questo quando si quantificano questi concetti.

La distanza di luminosità e l'accelerazione dell'universo

I fari erano le SNIA e furono impiegati i telescopi più potenti esistenti, Keck Telescope alle Hawaii, il Cerro Tololo Inter-American Telescope in Cile e l'Hubble Space Telescope (HST). Gli astronomi

lavoravano in due gruppi, il Supernova Cosmology Project (SPC) e l'High-z Supernovae Search Team. Ciò che loro cercavano con le SNIA era con quale tasso di rallentamento l'universo diminuiva la sua espansione cosmica, essendo tutti convinti che l'universo stesse rallentando la sua espansione. Contro ogni attesa le SNIA erano molto meno brillanti di quanto ci si aspettava, in altri termini lo spazio aveva scagliato nell'universo queste SNIA più velocemente di quanto atteso. Il verdetto era uno solo: l'universo sta accelerando!

Fondamentale è la determinazione della distanza di luminosità d_L ⁶, inoltre dallo spettro della galassia ospite possiamo determinare il *red-shift* z , per cui è facile costruire il grafico d_L in funzione di z .

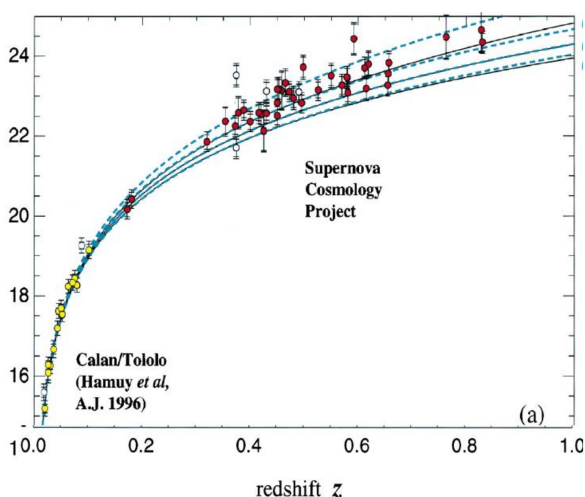


Figura 13: Diagramma di Hubble di 42 SNIA da Supernova Cosmology Project (in rosso) e 18 supernovae da Calan/Tololo (in giallo). In ascissa il *red-shift* sulle ordinate il modulo di distanza. Se l'universo non stesse accelerando i puntini rossi seguirebbero la curva più bassa, invece si posizionano al di sopra di essa, su una curva che descrive i dati sperimentali e che considera l'universo composto per il 70% circa di energia oscura e 30% di materia (oscura e non) (figura tratta da [38]).

⁶La distanza di luminosità può essere espressa come $d_L = \sqrt{L/(4\pi F)}$ con F flusso ed L luminosità. Se il corpo celeste è vicino, ad esempio nella nostra galassia, d_L e la distanza ordinaria nello spazio euclideo sono praticamente la stessa cosa. Se il corpo celeste è lontano da noi bisogna tenere conto di altri fattori quali la dilatazione temporale, il *red-shift* e la curvatura.

La distanza di luminosità è data da

$$d_L(z) = c(1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \quad (6)$$

con c velocità della luce, z *red-shift*, $H(z)$ parametro di Hubble. Definiamo la **magnitudine apparente** $m(z)$ come la luminosità di un corpo celeste determinata dalla Terra, la **magnitudine assoluta** M che è la luminosità apparente che avrebbe il corpo celeste se si trovasse a 10 pc dall'osservatore e la si assume costante per le SNIA (dopo opportune correzioni). Ciò che gli astronomi utilizzano in questi casi è il **modulo di distanza** μ che è dato da

$$\mu = m(z) - M = 5 \log_{10} \left[\frac{d_L(z)}{\text{Mpc}} \right] + 25 \quad (7)$$

dove il termine 25 è determinato dalla scala di riferimento convenzionale assunta per M . Sperimentalmente, nel diagramma di Hubble si riportano in ascissa il valore del *red-shift* z ed in ordinata i valori sperimentali del modulo di distanza. Come si vede in Figura 13, nel diagramma di Hubble, i punti delle SNIA si posizionano in punti più in alto di quelli attesi. L'interpretazione è semplice: fissato z , cioè la distanza dalla terra, le SNIA invece di avere una certa luminosità attesa, risultano molto più flebili. Vuole dire che sono più lontane, ecco perché l'universo in base a questi dati, sta accelerando!

Come e perché fu introdotta la costante cosmologica Λ

L'astronomo tedesco Hugo von Seeliger (1849-1924) era professore di Astronomia a Monaco di Baviera dove era anche direttore del locale osservatorio astronomico. Tra i suoi studenti di dottorato c'era Karl Schwarzschild. Seeliger era un forte oppositore della Relatività e della cosmologia che scaturiva dalla applicazione della Relatività Generale. Secondo Seeliger lo spazio nell'universo non poteva essere curvo né la Relatività Generale poteva spiegare l'anomalia del perielio di Mercurio.

Per evitare che in un universo infinito il contributo della gravità newtoniana risultasse infinito, nel 1895 Seeliger modificò la legge di gravità di Newton introducendo il precursore della costante cosmologica. In questo modo, riusciva

ad avere una distribuzione di materia nell'universo infinita, senza alcun problema connesso, rendendo stabile l'universo stesso perché questo termine di repulsione cosmologica riusciva a bilanciare la gravità a grandi distanze. In fondo fece ciò che avrebbe fatto Einstein 22 anni dopo.

Negli stessi anni il matematico Carl Gottfried Neumann (1832-1925) arrivò agli stessi risultati di Seeliger [39]. In questo modo il cosmo descritto dalla meccanica newtoniana era salvo.

Il 15 febbraio 1917 Einstein pubblicò un articolo sulla famosa rivista prussiana delle Scienze della Reale Accademia, dal titolo "Considerazioni cosmologiche sulla teoria della relatività" [40], dove introdusse quella che lui chiamò "fantasticheria" che oggi chiamiamo **costante cosmologica**. In verità Einstein chiamò questa costante col nome "termine cosmologico" e solo dopo prese il nome di costante cosmologica, termine con quale oggi la conosciamo.

Il valore della costante cosmologica è tra i più intriganti, ma allo stesso tempo sconcertanti, problemi aperti connessi con la energia oscura perchè la stima della costante cosmologica, straordinariamente enorme, è calcolata con metodi e strumenti della fisica teorica estremamente consolidati.

Ma perchè Einstein introdusse la costante cosmologica nelle sue equazioni? Quando nel 1915 Einstein formulò le sue equazioni cosmologiche (identiche a quelle che lui stesso aveva trovato e rifiutato nel 1912), voleva ottenere una soluzione, e per farlo, due anni dopo, fece l'ipotesi più semplice, cioè che la materia e l'energia fossero distribuite uniformemente nello spazio in qualunque direzione (queste ipotesi sono utilizzate ancora oggi e prendono il nome di **principio cosmologico**).

Einstein era convinto che l'universo dovesse essere lo stesso ovunque, inoltre l'universo con queste caratteristiche rendeva le equazioni più semplici, ma predicavano un universo molto strano e cioè che tutte le porzioni di materia ed energia avrebbero cominciato a muoversi l'una rispetto all'altra e niente sarebbe rimasto fermo. È bene tenere presente che nel 1916 si aveva una mappa precisa della via Lattea, ma una idea molto vaga di ciò che c'era oltre: ad Einstein il cielo appariva statico.

Nel 1917 fu costretto a ricorrere ad un artificio

matematico e cioè ad introdurre nelle equazioni della Relatività Generale una nuova grandezza che lui stesso chiamò con la lettera greca Λ per controbilanciare il collasso dell'universo che veniva fuori dalle sue stesse equazioni e quindi stabilizzare il tutto, dato che l'azione di questa costante era di spingere in modo contrario alla gravità ed evitare il collasso stesso. Ad Einstein questa costante non piaceva perchè voleva dire, da un punto puramente estetico, rinunciare alla semplicità. Einstein nel 1917 disse ad Ehrenfest che "l'introduzione di Λ mi espone al pericolo di essere rinchiuso in un manicomio" [41]. Λ è una costante, da inserire nelle equazioni gravitazionali, ma è un parametro libero nella Relatività Generale che non ne predice il valore. Einstein non sapeva cosa fosse esattamente questa costante (in verità probabilmente non lo sappiamo neanche noi oggi), non l'aveva connessa con la materia, fu aggiunta alla geometria, ma non è abbinata alla curvatura dello spazio-tempo e non dipende da essa, però faceva bene ciò per cui era stata introdotta nelle equazioni della Relatività Generale: controbilanciava la gravità e rendeva l'universo stabile e non in espansione, per cui le due azioni uguali ed opposte rendevano l'universo in equilibrio statico.

Willem de Sitter (1872-1934), astronomo olandese della università di Leida, lesse il modello di universo con Λ ma capì che esisteva anche un universo, con piccolissima quantità di materia o senza materia, da non avere alcun effetto, nè utile a controbilanciare l'azione espansiva di Λ . Questo universo essenzialmente non aveva materia ma solo costante cosmologica. In altri termini de Sitter ipotizzava un universo con spazio-tempo curvo solo con costante cosmologica. L'universo di Einstein e quello di de Sitter erano entrambi statici, ma quello di de Sitter era strano perchè (come notò Hermann Weyl (1885-1955) [42]) se si fossero disseminate in questo universo corpi celesti, allora essi si sarebbero messi in movimento nonostante la geometria di questo universo fosse statica e non variabile nel tempo. Qualche settimana dopo che de Sitter ebbe l'articolo di Einstein (universo con costante cosmologica), trovò la soluzione che prende il suo nome e la inviò ad Einstein che non ne rimase entusiasta (si veda Ref. [43]). Einstein non concepiva che l'universo non potesse avere corpi celesti al suo

interno.

Alexander Friedman (1888-1925), fisico russo, negli anni 1922-1924 dimostrò che a prescindere da Λ , le equazioni di Einstein potevano contenere un universo in espansione, o in contrazione o statico [44, 45]. Tre anni dopo, il matematico e fisico belga, padre Georges Lemaître (1894-1966), fu il primo a intuire che l'espansione dell'universo era correlata con lo spostamento verso il rosso della luce ricevuta dai corpi celesti (proponendo quella che oggi è nota come la legge di Hubble) e conservando nelle sue equazioni la costante cosmologica [46]. Lemaître era profondamente convinto della espansione dell'universo senza limiti e fu il primo a proporre che l'universo avrebbe potuto avere un Big Bang che lui chiamò "ipotesi dell'atomo primigenio".

Dopo che Humanson e Hubble provarono l'espansione cosmica (1929) [47] ⁷ pescando dal punto di vista teorico nel modello di de Sitter e Friedman. I lavori di de Sitter e Friedman furono del tutto dimenticati e non considerati anche dallo stesso Einstein, che riteneva, ad esempio, che Friedman non avesse ragione e che gli studi di Lemaître fossero "abominevoli".

Einstein abbandonò Λ , dicendo la famosa frase secondo cui fu il suo più grande errore averla considerata. D'altra parte Arthur Eddington nel 1930 dimostrò che il modello di Einstein con costante cosmologica e statico, non era "affidabile" nel senso che sarebbe bastata una piccolissima variazione nella densità di materia che l'universo sarebbe espanso o contratto per sempre.

Riassumiamo per chiarezza:

- a) Einstein: modello di universo statico con materia e costante cosmologica;
- b) de Sitter: il suo universo non aveva materia ma solo costante cosmologica, e si espandeva;
- c) Friedman e Lemaître: il loro universo non aveva costante cosmologica, aveva materia ma poteva espandersi tranquillamente.

La costante cosmologica Λ non fu messa in cantina, nel 1948, Bondi e Gold da un lato e Hoyle dall'altro [49], nel tentativo di introdurre un

modello di universo che non avesse come inizio una singolarità con densità infinita, ma che fosse però in espansione, reintrodussero Λ anche loro come Einstein, non sapendo cosa volesse significare questa costante. In seguito, dopo che si trovò la radiazione cosmica di fondo, Λ fu di nuovo accantonata in quanto era necessario un Big Bang.

La costante Λ rispuntò nel 1967 quando tre cosmologi della Cornell University pubblicarono un articolo su *The Astronomical Journal* dal titolo " *Oggetti quasi stellari in un universo con una costante cosmologica non nulla*" [50], per spiegare i *quasar*. In seguito, capito meglio il comportamento dei *quasar*, Λ fu rimessa a riposo.

Nel 1975 la costante cosmologica riprese ad esistere anche grazie a J.E. Gunn e B.M. Tinsley [51] che intrecciando i dati del diagramma di Hubble, età delle galassie e densità dell'universo trovarono che esiste una costante cosmologica diversa da zero. Nel loro articolo, gli autori presentarono anche i possibili errori legati a queste analisi.

Dopo che alla fine degli anni '80 fu introdotta l'inflazione, il cosmologo Turner diceva spesso che "la costante cosmologica è l'ultimo rifugio dei cosmologi fuorilegge, a partire da Einstein" (si veda [52]). Negli anni successivi lo stesso Peebles aveva una idea di Λ molto seria anche se Turner ne era profondamente contrario. Dopo quasi 90 anni dopo la formulazione della teoria della Relatività Generale il termine Λ ritornava alla luce.

È bene ribadire che Λ non è né geometria né materia, ma Einstein sistemò la costante cosmologica vicino alla geometria e non alla materia, questo storicamente e fisicamente rimane comunque un mistero.

La costante cosmologica Λ ha avuto diverse interpretazioni fisiche, e nelle sezioni seguenti ne presenteremo due. La costante cosmologica è interpretabile come un fluido, ma è anche interpretabile come energia del vuoto secondo la teoria quantistica dei campi.

Λ come un fluido perfetto

Un fluido perfetto è un fluido senza viscosità, con densità costante e senza attriti interni nel senso che non ci sono interazioni tra le componenti del

⁷In realtà il primo ad accorgersi dello spostamento verso il rosso delle nebulose fu l'astronomo Vesto Slipher, nel 1912 [48], alla Lowell Observatory misurò lo *shift* della lunghezza d'onda di M31, che è una delle poche che mostra *blu-shift*. Fino al 1925 misurò le linee spettrali di quasi 40 galassie che per la maggior parte avevano lo spettro spostato verso il rosso.

fluido. Esso è caratterizzato da due quantità: la densità di energia ρ e la densità di pressione p . Questo modo di idealizzare il contenuto energetico dell'universo porta a forti semplificazioni, infatti le componenti di questo fluido sono le stelle, le galassie o anche gli ammassi di galassie e questo modo di descrivere rende le equazioni abordabili, in altri termini si imitano i fluidi perfetti per avere una descrizione matematica semplificata. L'equazione di stato del fluido riduce le variabili da due (ρ e p) ad una sola delle due e la relazione che lega il tutto è la seguente

$$p = w \rho. \quad (8)$$

Il valore di w è abbastanza arbitrario, regola il rapporto tra pressione e densità di energia, ma w non è una costante universale, infatti differenti osservatori in moto relativo ottengono differenti valori di w .

Una interessante proprietà di Λ è che è in grado di generare nelle equazioni di Einstein una pressione negativa, come vedremo tra poco. Una pressione positiva vuole dire che le particelle spingono, ad esempio, sulle pareti di un contenitore, invece pressione negativa vuole dire che c'è una tensione del fluido, tensione che ne riduce la capacità attrattiva, facendola diventare repulsiva. Se consideriamo un elastico teso, tutte le sue molecole tendono a tirare verso l'interno esercitando una pressione negativa o tensione. In Relatività Generale la pressione positiva genera una gravità attrattiva, mentre la pressione negativa genera sempre una gravità ma repulsiva. La costante cosmologica fornisce allo spazio una energia uniforme il cui valore è proprio dato dal valore di Λ , ma fornisce allo spazio anche una pressione uniforme negativa che genera una forza gravitazionalmente repulsiva.

Chiaramente, dato che l'eq. (8) dipende dall'osservatore, allora w dipende non solo da quale fluido stiamo considerando, ma anche dalla cinematica dell'osservatore. Ma allora nasce spontanea la domanda se esiste un particolare valore di w che sia lo stesso per qualunque osservatore, indipendentemente dal suo stato di moto. Questo valore esiste e fa sì che ogni osservatore formuli la stessa equazione di stato, ed esso è $w = -1$. Questo valore caratterizza un unico fluido, particolare, che può associarsi alla densità di energia

della costante cosmologica ed esso è lo stesso per qualunque osservatore.

È bene ribadire questa caratteristica fondamentale, questo particolare fluido con $w = -1$, è identico per qualunque osservatore, indipendentemente dal suo stato di moto. Pertanto Λ può essere interpretata come un fluido perfetto cosmico. Tutto ciò che caratterizza questo fluido ci fa venire in mente l'etere, con proprietà assolute e con le stesse caratteristiche simili al fluido appena esaminato. Einstein elimina l'etere con la relatività ristretta ed introduce Λ con proprietà simili. Davvero strano, intrigante e sorprendente tutto ciò.

Però per completezza bisogna dire che l'accelerazione dell'universo viene spiegata per qualunque valore di $w < -1/3$, quindi esiste da un punto di vista teorico un infinito ventaglio di possibilità che possono spiegare l'accelerazione dell'universo, a seconda di quanto vale w . Adirittura esistono anche teorie che considerano una unificazione nella materia oscura ed energia oscura, ritenendo che ci sia una sorta di fluido cosmico che li contempla entrambi. Dato che non ci facciamo mancare nulla, i teorici hanno contemplato anche il caso in cui ci sia una "energia fantasma" con $w < -1$, caso questo che fa sì che si possano aprire dei veri e propri squarci (*Big Rip*), che provocherebbero la distruzione di qualunque corpo celeste, dove alla fine di questo processo ogni atomo sarebbe solo con se stesso nell'universo. Insomma la fantasia non manca oltre a scenari molto teorici, forse fin troppo.

Λ e l'energia del vuoto quantistico dei campi

Mentre per i relativisti Λ è quel termine aggiunto nelle equazioni di Einstein, per i fisici delle particelle e per i "campisti" Λ ha un significato diverso. Nella teoria quantistica dei campi non esistono particelle ma solo campi, le cui fluttuazioni si identificano con le particelle. È come se ogni particella avesse le sue onde, con la carica, lo spin, la massa ecc..

Andando indietro nel tempo, al 1918, ci si chiese se eliminando la massa dell'universo, la gravità sarebbe scomparsa, e de Sitter rispose, affermando che ci sarebbe stata la gravità anche se tutte le masse fossero state escluse. In altri termi-

ni il vuoto cosmico genera la gravità e questa fu la conclusione a cui giunsero sia Einstein che de Sitter. È una gravità particolare nel senso che è uniforme nello spazio e nel tempo e quindi non è misurabile studiando ad esempio il moto di un corpo celeste.

Il vuoto quantistico è un particolare stato della materia che riesce ad imitare la costante cosmologica. Il problema, sottile, è proprio questo: il vuoto quantistico caratterizza ed imita Λ o è proprio Λ ? Non riusciamo a distinguere Λ da un campo quantistico nel suo stato fondamentale.

Ora, le equazioni originarie di Einstein sono queste (senza specificarne il significato dei simboli)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (9)$$

che riscriviamo in modo simbolico come $G = T$ dove G (cioè tutto il membro di sinistra) è essenzialmente la geometria e T (cioè tutto il membro di destra) è la sorgente materia/energia.

Riscriviamo queste equazioni mettendoci la costante cosmologica Λ , abbiamo due casi, con diverse interpretazioni fisiche.

Caso 1

$$\mathcal{K} = T + \Lambda \quad (10)$$

in questo caso la sorgente materia/radiazione è sempre T ma avendo messo a destra della equazione la costante cosmologica abbiamo una ulteriore sorgente che è il vuoto quantistico dei campi.

Caso 2

Se invece scriviamo, come ha fatto Einstein

$$\mathcal{K} + \Lambda = T \quad (11)$$

allora abbiamo che come sorgente vi è solo la materia/radiazione mentre questa posizione di Λ ci sta dicendo che vi è associato anche un'altro contributo alla metrica dato appunto da Λ quindi la costante cosmologica viene associata alle proprietà geometriche e non quelle delle sorgenti. I cosmologi hanno sposato questa seconda interpretazione anche se entrambe sono equivalenti (ma sono davvero equivalenti le due descrizioni?).

Cosa è il vuoto nella fisica moderna?

Dato un sistema fisico, tra tutti gli stati possibili, ve ne è uno caratterizzato da avere il minimo dell'energia, esso è detto **stato di vuoto** o **stato fondamentale**.

Si può dimostrare che la distribuzione dell'energia e dell'impulso del vuoto dei campi ha la stessa forma funzionale di Λ , cioè non siamo in grado di distinguere la Λ posta nelle equazioni di Einstein da un campo fisico nello stato fondamentale.

Immaginiamo di considerare una porzione di vuoto nel cosmo, e di eliminare ogni particella. Da un punto di vista classico questa porzione di spazio è stata svuotata completamente, da un punto di vista quantistico no. Il principio di indeterminazione di Heisenberg della meccanica quantistica ci dice che comunque vi è dell'energia, che non è zero ed è detta "energia di punto zero", proposta per la prima volta nel 1913 da Albert Einstein e Otto Stern [53]. L'energia di punto zero non può essere estratta, non può essere usata, non può essere eliminata, ed è infinita. L'energia del vuoto non dà contributo alla formazione delle strutture, anche se, essendo una energia, produce effetti gravitazionali. Il motivo di ciò è legato al fatto che questa energia del vuoto è equamente distribuita nel cosmo per cui non partecipa alla aggregazione di materia, per cui la sua presenza si manifesta a livello cosmologico e non a livello locale.

La meccanica quantistica prevede, nel vuoto, una costante creazione e distruzione di particelle virtuali, per cui risulta, almeno in linea teorica, che si può calcolare l'energia generata dalle fluttuazioni delle particelle virtuali nel vuoto. Da un punto di vista sperimentale questi concetti apparentemente astrusi sono stati messi alla prova nel 1948 dal fisico olandese Hendrik Casimir [54], che usando la meccanica quantistica, calcolò che il campo elettromagnetico poteva produrre, a causa delle fluttuazioni quantistiche, prove di tutto ciò. Considerò due lamine di metallo parallele, non cariche elettricamente, e distanti pochissimi micron tra le quali era stata tolta ogni forma di materia e a temperatura prossima allo zero assoluto. All'esterno delle piastre ci sarebbero state onde elettromagnetiche con tutte le frequenze, mentre tra le due piastre solo quelle

onde la cui lunghezza d'onda sarebbe stata un sottomultiplo intero della lunghezza tra le due lamine, in altri termini all'interno delle lamine vi dovevano essere meno oscillazioni ed esattamente solo quelle che si annullano ai bordi, sulle lamine. Questo in pratica selezionava natural-

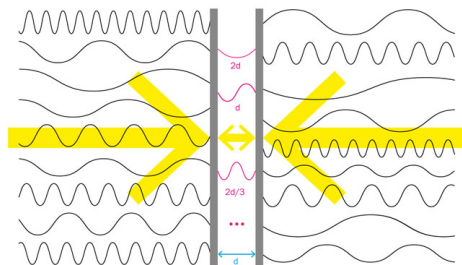


Figura 14: Effetto Casimir. Tra le lamine le lunghezze d'onda ammesse dei fotoni virtuali sono un sottomultiplo intero della distanza tra le lamine. La maggiore presenza di onde fuori dalle lamine favorisce la pressione esterna generando una forza di attrazione delle lamine. Il vuoto non è vuoto. (Dalla Ref. [55]).

mente il numero di lunghezze d'onda permesse all'interno. Pertanto la differenza di energia tra l'esterno e l'interno avrebbe generato una spinta che avrebbe fatto avvicinare le lastre stesse: le lamine si sarebbero attratte a causa della riduzione delle oscillazioni all'interno delle lamine rispetto a quelle esterne. Era la dimostrazione che il vuoto è pieno di particelle virtuali.

Nel 1958 Marcus Sparnaay misurò ad Eindhoven questa *forza di Casimir* di attrazione [56] e nel 1997 si ebbe l'ulteriore conferma sperimentale grazie a Steven Lamoreaux dell'università di Washington [57]⁸. In seguito l'esperimento fatto da altri ha avuto ulteriori conferme. Nel 1947 Willis Lamb scoprì e misurò un sottile spostamento nel livello di energia dell'atomo di idrogeno, noto come, come Lamb Shift [58]. La velocità dell'elettrone nell'atomo di idrogeno è circa l'1% della velocità della luce. Lo spettro dell'atomo di idrogeno si manifesta quando l'elettrone passa da uno stato quantico all'altro, solo che a causa della interazione tra l'elettrone ed il vuoto si

⁸Questo esperimento di Lamoreaux era tra una lente sferica e una lamina di quarzo. Farla con due lamine parallele era un esperimento difficile perchè mantenere le lamine parallele non è affatto semplice, ma questo è stato fatto da un gruppo di Padova con Gianni Carugno e Roberto Onofrio e collaboratori.

aveva uno spostamento per il livello $^2S_{1/2}$ che fu verificato sperimentalmente. Il vuoto non era vuoto!

Un campo quantistico si può considerare come una specie di sovrapposizione di onde, piccole, localizzate, con una lunghezza d'onda λ . Le particelle sono onde molto localizzate e con una energia di punto zero che va come l'inverso della lunghezza d'onda $1/\lambda$. Man mano che consideriamo valori sempre più piccoli di λ , vuol dire che stiamo considerando valori sempre più grandi di energia, ecco perchè l'energia del vuoto è infinita.

Un altro modo di guardare allo stesso problema è che la meccanica quantistica prevede una costante creazione e distruzione di particelle virtuali che altro non sono, in un linguaggio della teoria quantistica dei campi, che microscopiche oscillazioni. L'energia del vuoto è la risultante di tutte queste oscillazioni.

Il fatto che sia infinita l'energia non è un problema perchè in fisica si misurano solo le differenze di energia, per cui anche se lo stato di vuoto ha energia infinita, ciò non è osservabile. Un modo per stimare l'energia del vuoto è quello di trascurare le oscillazioni con lunghezze d'onda più piccole della lunghezza di Planck⁹ $\lambda_{Pl} = 10^{-33}$ cm per cui le onde con lunghezza d'onda minore di λ_{Pl} vengono trascurate e dato che l'energia del vuoto va come l'inverso della lunghezza d'onda $E_{vac} \sim 1/\lambda$ si ha che la densità di energia della costante cosmologica è circa 10^{120} volte più grande del valore osservato, questo assicura che la densità di energia del vuoto non sia infinita, ma il valore di Λ è comunque enorme e se fosse corretto avrebbe il potere di distruggere ogni forma di aggregazione di materia nell'universo.

Tutto ciò ci dice che una particolare proprietà del vuoto quantistico ci consente di interpretare la costante cosmologica. Le fluttuazioni dei campi quantistici sono generatori della costante cosmologica, cioè il contributo in energia da parte dei campi quantistici diffusa nel cosmo, porta alla idea di Λ .

⁹La lunghezza di Planck è pari a circa 1.616252×10^{-35} metri. Essa si può ottenere a partire da 3 costanti G, c, \hbar ed è la più piccola lunghezza sotto la quale perde di significato il concetto stesso di lunghezza, infatti si ritiene che al di sotto di questa lunghezza lo stesso spazio-tempo non segua più le leggi della fisica a noi note.

Fare affidamento sulla teoria quantistica dei campi su scale estremamente piccole, come la scala di Planck, non è mai una cosa buona anche perchè a queste scale la gravità non può essere trascurata. Tutto naturalmente vira nel considerare una futura teoria della gravità e della meccanica quantistica, la cui unificazione risolverebbe anche questo problema.

In ogni caso, bisogna fare attenzione quando si parla di gravità a questi livelli perchè in generale la si trascura sempre in laboratorio, data la sua debolezza. Però, se la si considera, le cose si fanno più complesse perchè secondo la teoria di Einstein anche l'energia genera un campo gravitazionale, pertanto il valore infinito della energia del vuoto crea seri problemi se si introduce la gravità.

Il fatto di associare l'energia del vuoto a Λ , porta a problemi ancora più gravi di quelli che si vuole risolvere: perchè il valore empirico di Λ , quello che proviene dalle osservazioni cosmologiche ed è inserito nella teoria della Relatività Generale, è estremamente piccolo e l'energia del vuoto, calcolata, è estremamente grande! La discrasia è intollerabile, c'è qualcosa di profondo che non abbiamo capito.

La cosa sorprendente è che la stima in energia contenuta nella agitazione quantistica è lontanissima dalla quantità di energia oscura che viene misurata nel nostro universo. Come detto in precedenza, usando una versione semplificata, che utilizza solo particelle del Modello Standard si trova che ci dovrebbe essere 10^{120} volte più energia oscura di quanto ne misuriamo. È necessario dire che questa discrepanza era già nota prima della introduzione della energia oscura e andava sotto il nome di "problema della costante cosmologica".

Un modo per uscirne è quello che i fisici teorici chiamano "effetto compensativo", nel senso che il calcolo di Λ dà un numero enorme che potrebbe essere annullato da contributi opposti, riducendo così la nostra costante cosmologica quasi a zero. I fisici teorici hanno pensato che la supersimmetria potrebbe dare un contributo in questo senso, dato che il contributo alla energia di punto zero di un campo dovrebbe essere annullato dal campo del partner supersimmetrico, ma questo sarebbe stato vero se le coppie di particelle avessero la stessa massa, cosa che non

è ¹⁰.

Il destino dell'universo, il problema della coincidenza e il principio antropico

Tra i vari problemi che pone la costante cosmologica ve ne è uno molto importante legato alla evoluzione dell'universo. Attualmente la composizione dell'universo è per il 70% di costante cosmologica e il restante 30% di materia (oscura e barionica) Ora, andando indietro nel tempo, essendo Λ costante, ovviamente aveva sempre lo stesso valore nel passato, mentre la densità di energia e materia erano certamente maggiori e sempre più grandi man mano che ci si sposta indietro nel tempo, diminuendo anche il volume a disposizione. Ora però dai dati di SNIA e non solo quelli, sappiamo che l'accelerazione dell'universo è un fatto abbastanza recente (circa 5 miliardi di anni fa, secondo le ultime stime) e da quel momento cominciava a diventare prevalente il contributo delle densità di Λ su quella di materia.

In altri termini, all'inizio e per diverso tempo la materia prevaleva e rallentava l'espansione dell'universo, vinceva sulla energia oscura poi man mano che passava il tempo il suo effetto si esaurì a causa della espansione dell'universo e l'azione della costante cosmologica, che ha aspettato miliardi di anni, si prende la rivincita iniziando una lenta, inesorabile, costante azione acceleratrice, diventando la sua azione predominante sulla materia.

Vi è stato un tempo in cui densità di materia e densità di Λ sono stati uguali. Rispetto alla vita dell'universo questo tempo è un epsilon, un infinitesimo, un battito di ciglia. Ebbene, questo momento particolarissimo è proprio ora! Stranissima storia, davvero sorprendente, incredibile coincidenza temporale!

Per spiegare questa coincidenza temporale, nel 1987 Steven Weinberg (1933-2021) (Nobel per la fisica) fu portato a rifare una proposta degli anni '70 del secolo scorso, dovuta a B. Carter, M.J. Rees, B. Carr, J. Barrow e F. Tipler, nota come *principio*

¹⁰Il motivo tecnico è semplice: la supersimmetria tiene conto dei bosoni e dei fermioni, ma i bosoni vengono descritti da variabili che commutano mentre i fermioni che anticommutano, da qui il segno opposto nelle oscillazioni quantistiche.

antropico [59, 60, 61, 62]. In fondo, questo principio, dal nome altisonante, dice semplicemente che un altro numero di parametri diversi non avrebbe consentito la nostra esistenza, di umani. Weinberg sostiene che per avere un universo in cui ci siamo noi, è necessario che ci sia la coincidenza tra Λ e materia. Quando Λ prevarrà in modo irreversibile, tutto sarà distrutto, qualunque forma di aggregazione di materia nell'universo. Questa spiegazione, anche condita da matematica raffinata, non è affatto soddisfacente, anche se molto di moda, lascia l'amaro in bocca e non sembra neppure molto scientifica.

Alcuni Problemi su Λ

Vale la pena a questo punto far una piccola sosta per riprenderci ed elencare per chiarezza e sintesi i problemi connessi con la costante cosmologica.

- 1) Il primo problema è perchè non abbiamo effetti osservabili a causa della gigantesca densità di energia connessa con le fluttuazioni quantistiche.
- 2) Il secondo problema consiste nel chiedersi come si elimina il contributo in energia a causa delle piccole lunghezze d'onda delle fluttuazioni dei campi quantistici.
- 3) Terzo problema, come si spiega questa strana coincidenza tra densità di energia oscura e densità di materia, oggi?
- 4) Quarto problema, forse il più grave di tutti. Trovare che la Λ debba essere 10^{120} volte quella attesa è la peggiore previsione che i fisici teorici abbiano mai potuto fare in tutta la storia della fisica. E questa cosa passa spesso con semplicità ed ineluttabilità, invece potrebbe essere la spia che c'è qualcosa di veramente profondo che non abbiamo capito e che ci sta trascinando in un abisso di incomprensione della realtà.

Quintessenza

Ci sono modelli, detti di "quintessenza", in cui la densità di energia varia nel tempo. Al modello standard della cosmologia si introduce un nuovo campo ϕ , solo che contrariamente a Λ , esso può variare nello spazio e nel tempo, e questo fa sì che l'energia cinetica sia grande. Se ϕ non varia, la massa associata è nulla, e quindi la sua energia è nulla; in pratica se ϕ rimane ovunque

costante nello spazio e nel tempo, può essere considerato Λ . In questo modello il problema della coincidenza è superato perchè essendo l'energia di ϕ variabile nel tempo, si possono generare dei meccanismi in grado di fornire in modo corretto quel valore che oggi vediamo.

Ora dato che i fotoni, neutrini, barioni e la materia oscura sono essenzialmente le particelle che formano l'universo, P. Steinhardt e R. Caldwell nel 1998 [63] hanno denominato questo campo ϕ , "quintessenza", in analogia al quinto elemento di Aristotele per spiegare e capire il movimento di un corpo.

Senza complicarci la vita, diciamo subito che il campo di quintessenza è la fotocopia dell'inflatone nell'universo inflazionario. La pressione di questo campo ϕ è dovuta a due contributi: energia cinetica (che contribuisce positivamente) ed energia potenziale (che contribuisce negativamente). È chiaro che se l'energia potenziale è di gran lunga superiore a quella cinetica la pressione risultante è negativa, che è ciò di cui abbiamo bisogno come abbiamo visto prima. Per essere in questo caso è necessario che la massa di ϕ debba essere 10^{33} volte più piccola della massa del neutrino.

La pressione negativa di ϕ non è costante nel tempo. Dalla SNIA si trova che ϕ dovrebbe avere una pressione molto vicina a quella di Λ ed essere quasi costante (come Λ), inoltre non genererebbe semi di strutture a grandi o piccole scale proprio perchè ϕ avrebbe pressione negativa.

Ora però, essendo la massa di ϕ quasi zero, questo campo potrebbe essere un mediatore di una forza a lunghissimo *range* (dato che il raggio di azione di una forza è inversamente proporzionale alla massa della particella mediatrice). Questa analisi fu fatta da Robert Dicke e da Carl Brans nel 1961 [64], infatti ϕ fu chiamato "campo di Brans-Dicke". L'idea fu accantonata perchè non vi erano evidenze sperimentali. Nel 1987 C. Wetterich [65], chiamò ϕ "comon" e cercava di capire quanto valesse Λ .

Gli studi su ϕ sono andati avanti e le cose da un punto di vista teorico si sono complicate. Un ricercatore canadese Gregory Horndesky propose nel 1974 [66] una lagrangiana, nota oggi come "lagrangiana di Horndesky". Egli non era un fisico ma un matematico, per cui non era interessato alla cosmologia ma a studiare una teoria

di campo scalare, la più generale possibile, nel secondo ordine nelle derivate. Il successo di questo approccio è che contempla la “quintessenza”, la teoria di Brans-Dicke e un’ampia gamma di campi scalari.

Come ben scritto nel libro di L. Amendola “L’altra faccia dell’universo” (vedi la bibliografia) il lavoro del 1974 ebbe una sola citazione nel 1976 ed un’altra nel 1978. Poi più nulla fino al 2011 dopo di che fu largamente citato. Il motivo era personale e non fisico, infatti intorno agli anni ’80 del secolo scorso, Horndesky visitò una mostra di Van Gogh, ne rimase colpito a tal punto che lasciò gli studi e l’università dove lavorava in Canada, e si mise lui stesso a dipingere, a Santa Fe, nel Nuovo Messico. Nel 2011, fisici teorici cercarono di trovare il più generale campo scalare al secondo ordine e si accorsero che nel 1974 Horndesky aveva già trovato la risposta a questa domanda.

In ogni caso, il campo di “quintessenza” non è mai stato trovato e rimane tutt’oggi una vaga possibilità teorica.

Considerazioni generali

L’energia oscura è una forma strana di energia che ha solo un effetto osservabile: accelerare l’espansione dello spazio cosmico.

C’è da dire che Λ è la spiegazione più immediata, e, se vogliamo, la più semplice dell’esistenza della energia oscura.

L’energia oscura non agisce come la massa o come l’energia che conosciamo, perchè queste spingono le componenti dell’universo ad attirarsi, mentre l’energia oscura ha un effetto repulsivo, di anti-gravità.

Ciò che lascia sconcertati non è solo l’origine ignota della energia oscura, ma anche la quantità di energia oscura nel cosmo, dato che la densità di energia oscura è circa $2/3$ della densità di materia oscura, quasi uguali, e questo di per sè disorienta perchè materia oscura ed energia oscura sembrano completamente non correlate tra loro: una strana coincidenza.

La domanda delle domande è se abbiamo capito davvero gli effetti della gravità dell’energia del vuoto, perchè tutto alla fine si riduce a questo livello di comprensione della realtà della energia oscura.

Inoltre, non abbiamo capito neppure perchè l’energia del vuoto ha quei valori che le osservazioni ci dicono.

C’è anche un’altra osservazione che spesso viene trascurata, e riguarda le due interpretazioni della costante cosmologica e cioè una connessa al fluido e l’altra come energia del vuoto: queste due interpretazioni non si danno fastidio, non cadono in contraddizione e coesistono una indipendentemente dall’altra. Come è possibile questo?

La via scelta dalla maggior parte dei fisici è una scelta con non molto coraggio. O vengono introdotti ingredienti strani, per i quali non c’è uno straccio di evidenza sperimentale oppure forzano in modo davvero incredibile le leggi della natura, però senza il coraggio vero di chi vuole scardinare il sapere consolidato, il tutto da modificare solo poco.

Gli scettici (pochissimi) si chiedono che forse materia oscura ed energia oscura siano la febbre di una malattia, che non quadra a livello di comprensione fondamentale. È come se si cercasse di mantenere a tutti i costi l’impianto di conoscenze acquisite, cercando di non molestare troppo la comprensione della fisica e della cosmologia odierna. Personalmente, credo che probabilmente abbiamo spinto troppo la teoria di Newton ed Einstein, al limite massimo che possiamo ottenere, per cui materia oscura e/o energia oscura sono la manifestazione di una inapplicabilità di quelle teorie, che quindi manifestano la loro eventuale incapacità a descrivere in modo corretto la natura, generando cose che forse potrebbero neppure esistere. A dare forza a questo modo di vedere le cose c’è il fatto che, ad esempio, per la descrizione delle curve di rotazione delle galassie le teorie di Newton ed Einstein producono risultati praticamente indistinguibili.

La materia oscura e l’energia oscura potrebbero essere solo la testimonianza di una nostra profonda incapacità a capire cosa stia accadendo nel cosmo che quindi rappresenterebbero una sorta di calderone di ignoranza con il quale nascondere sotto il tappeto la polvere della nostra incomprendenza di ciò che stiamo osservando di anomalo.

La cosa può essere vista in altro modo e cioè che la descrizione del nostro universo, quindi gravità newtoniana ed einsteiniana siano descri-

zioni non corrette, per cui materia oscura ed energia oscura sono l'espressione non di un mistero ma di una applicazione non corretta di leggi non ultime. Dissacrare le teorie cosmologiche dominanti è considerato un sacrilegio, ma è troppo fitto il mistero per non avere il dubbio che materia oscura ed energia oscura non siano delle stampe della cosmologia necessarie per mantenere lo *status quo* della fisica conosciuta e salvare tutto ciò che teoricamente si può salvare.

Tutte le teorie, o meglio congetture, sulla materia oscura ed energia oscura godono di una rilevanza e privilegio e, se si vuole, di un certificato di esistenza in vita, puramente teorico e congetturale.

La teoria delle stringhe con le dimensioni extra spiega l'accelerazione dell'universo e la materia oscura, ma questi modelli forniscono previsioni teoriche spesso difficili da verificare sperimentalmente, inoltre spiegano l'accelerazione dell'universo ma non il valore piccolissimo di Λ . Spesso queste teorie con dimensioni extra coinvolgono scale talmente piccole da non essere oggetto di osservazione, anche se esistono versioni con dimensioni compatte che potrebbe in futuro essere oggetto di sperimentazione.

Ci sono teorie che ritengono che vada scardinato qualche pilastro, come ad esempio l'omogeneità dell'universo, che essendo ad esempio un frattale, potrebbe mimare l'energia oscura, ipotesi, questa, che L. Pietronero, della Sapienza di Roma ha più volte proposto [67], ed è stata molto osteggiata perchè come molte proposte che non seguono il *mainstream* sono soggette ad attacchi anche violenti dagli addetti ai lavori.

Non sappiamo dove andremo con questa ricerca e linea di pensiero, quello che è certo è che ciò che pensiamo dell'Universo dovrà subire un cambio di paradigma senza precedenti e ci obbligherà a pensare a qualcosa di profondamente diverso rispetto alle nostre conoscenze. Lo stato di confusione è senza precedenti. Certo stanare l'energia oscura non è solo una cosa complessa da un punto di vista sperimentale, ma è forse ancora più complessa da un punto di vista teorico, perchè non ne abbiamo la più pallida idea con cosa abbiamo a che fare.

Si sono portate diverse modifiche alla gravità di Einstein, ma sempre con troppo rispetto per la Relatività Generale, il cui impianto è stato la-

sciato essenzialmente integro. È come ostinarsi a spiegare con la teoria di Newton il problema del perielio di Mercurio, possiamo fare tutte le congetture possibili, ma alla fine dobbiamo abbandonare la teoria della gravità di Newton e affidarci a quella di Einstein per avere chiarezza. Allo stesso modo, la teoria della gravità di Einstein l'abbiamo spinta quasi la massimo del suo rendimento (o meglio di ciò che sappiamo farne) e usandola, con tutta la cosmologia annessa, troviamo delle lacune nella nostra comprensione della realtà.

Personalmente penso che l'approccio condiviso da quasi tutto il mondo scientifico sia poco coraggioso, non può portarci lontano, perchè sarebbe come stare in una strada buia, e perdere le chiavi, e cercarle sotto l'unico lampione che si trova in quella strada solo perchè è l'unico posto illuminato.

La cosa che potrebbe sorprendere in futuro è che la materia oscura e l'energia oscura possano essere espressioni di risposte errate o domande mal poste al cosmo.

O, come dice qualcuno: "se l'universo è la risposta, qual è la domanda?"

Ringraziamenti

Questo lavoro è parzialmente supportato dall'INFN mediante il programma TAsP: *Theoretical Astroparticle Physics*, e dal progetto di ricerca numero 2022E2J4RK PANTHEON: *Perspectives in Astroparticle and Neutrino THEory with Old and New messengers* sotto il programma PRIN 2022 del Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR).

Un effetto collaterale nello scrivere questo articolo è l'aver conosciuto ed apprezzato l'amico e collega Giampalo Co' che ringrazio per aver reso migliore questo articolo con i suoi interessantissimi suggerimenti e le sue preziose correzioni.

Suggerimenti bibliografici

La bibliografia su materia oscura ed energia oscura è sterminata. Segnalo alcuni testi divulgativi di ottima fattura e qualche testo non divulgativo.

Testi divulgativi

- L. Amendola, *L'altra faccia dell'universo*, Il Mulino (2018).
- Amedeo Balbi, *Il buio oltre la siepe*, Codice edizioni (2011).
- John David Barrow, *Da zero a infinito*, Mondadori, (2002).
- Andrea Cimatti, *L'universo oscuro*, Carocci editore (2021).
- Marco Cirelli, *La materia oscura*, Ithaca: Viaggio nella Scienza XII, pag. 117 (2018).
- Frank Close, *Nulla*, Codice Edizioni (2011).
- Pedro G. Ferreira, *La teoria perfetta*, Rizzoli (2014).
- Maurizio Gasperini, *Gravità, stringhe e particelle*, Springer iblu (2014).
- Maurizio Gasperini *Teoria gravitazionale e applicazioni cosmologiche: possibili sviluppi*, "Ithaca: Sfide", XXI (2023) ISSN: 2282-8079, ESE (Salento University Publishing).
- Maurizio Gasperini, *L'universo prima del big bang*, Franco Murzio Editore (2002).
- Brian Green, *La trama del Cosmo*, Einaudi (2004).
- Brian Greene *La realtà nascosta*, Einaudi (2012).
- Danis Hooper, *Il lato oscuro dell'universo*, Edizioni Dedalo (2008).
- Lawrence Krauss, *Il mistero della massa mancante*, Raffaello Cortina Editore (2000).
- Mario Novello, *Qualcosa anziché il nulla*, Einaudi (2011).
- Massimo Pietroni, *Energia oscura, il motore dell'universo*, Ithaca: Viaggio nella Scienza XII, pag. 129 (2018).
- Richard Panek, *L'universo oscuro*, La Biblioteca delle Scienze (2011).
- Lisa Randall, *Bussando alle porte del cielo*, il Saggiatore (2012).
- Paul J. Steinhardt e Neil Turok, *Universo senza fine*, il Saggiatore (2008).
- James Owen Weatherall, *La fisica del nulla*, Boringhieri (2017).

Testi non divulgativi

- Luca Amendola e Shinji Tsujikawa, *Dark energy, theory and observations*, Cambridge University Press (2010).

Lefteris Papantonopoulos Editor (autori vari), *The invisible universe: dark matter and dark energy*, Springer (2007).

Marco Roncadelli, *Aspetti astrofisici della materia oscura*, Bibliopolis (2009).

Steven Weinberg, *Cosmology*, Oxford University Press (2008).



- [1] D. Huterer, M. S. Turner: *Prospects for probing the dark energy via supernova distance measurements*, Phys. Rev. D, 60 (1999) 0831.
- [2] A. Secchi: *Le stelle, saggio di astronomia siderale*, Fratelli Dumolard, Milano (1877).
- [3] H. Poincarè: *The milky way and the theory of gases*, Bulletin de la Société Astronomique de France, 20 (1906) 153.
- [4] Lord Kelvin: Appendice al libro *Baltimore lectures on molecular dynamics and the wave theory of light*, C.J. Clay and Sons, Londra (1904), p. 274.
- [5] J. C. Kapteyn: *First attempt at a theory of the arrangement and motion of the sidereal system*, Astrophysical Journal, 55 (1922) 302.
- [6] K. Lundmark: *Über die Bestimmung der Entfernungen, Dimensionen, Massen und Dichtigkeit für die nächstgelegenen anagalactischen Sternsysteme.*, Meddelanden Fran Lunds Astronomiska Observatorium Serie I, 125 (1930) 1.
- [7] G. Bertone, Dan Hooper: *A History of Dark Matter*, Rev. Mod. Phys., 90 (2018) 45002.
- [8] J. H. Oort: *The Force Exerted by the Stellar System in the Direction Perpendicular to the Galactic Plane and Some Related Problems*, Bulletin of the Astronomical Institute of the Netherlands, 6 (1932) 249.
- [9] F. Zwicky: *The red shift of extragalactic nebulae*, Helvetica Physica Acta, 6 (1933) 651.
- [10] S. van der Bergh: *The stability of clusters of galaxies*, Astrophys. J., 66 (1960) 558.
- [11] L. Amendola: *L'altra faccia dell'universo*, Il Mulino, Bologna (2018).
- [12] H.W. Babcock: *The rotation of the Andromeda Nebula*, Lick Observatory Bulletin, 19 (1939) 41.
- [13] J.H. Oort: *Some Problems Concerning the Structure and Dynamics of the Galactic System and the Elliptical Nebulae NGC 3115 and 4494*, Astrophysical Journal, 91 (1940) 273.
- [14] V.C. Rubin, W. K. Ford: *Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions*, Astrophysical Journal, 159 (1970) 379.
- [15] M. Roncadelli: *Aspetti astrofisici della materia oscura*, Bibliopolis, Napoli (2009).
- [16] E. Asencio, I. Banik, P. Kroupa: *The El Gordo Galaxy Cluster Challenges Λ CDM for Any Plausible Collision Velocity*, Astrophysical Journal, 954 (2023) 162.

- [17] F. Zwicky: *On the Masses of Nebulae and of Clusters of Nebulae*, The Astrophysical Journal, 86 (1937) 3.
- [18] F. De Paolis et al.: *Macro / micro / retro lensing gravitazionale*, Ithaca, V (2015) 19.
- [19] H. C. van de Hulst: *Radiostraling uit het wereldruim. II. Herkomst der radiogolven*, Nederlandsch Tijdschrift voor Natuurkunde, 11 (1945) 210.
- [20] H. I. Ewen, E. M. Purcell: *Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: Radiation from Galactic Hydrogen at 1,420 Mc./sec*, Nature, 168 (1951) 356.
- [21] H.C. van de Hulst: *Light scattering by small particle*, Wiley, Hoboken, New Jersey, Stati Uniti (1957).
- [22] R.S. Morton: *A high resolution 21 cm hydrogen-line survey of the Andromeda nebula*, Astrophysical Journal, 159 (1966) 639.
- [23] S. Gershtein, Y. a. Zeldovich: *Rest mass of muonic neutrinos and cosmology*, JETP Lett., 4 (1966) 120.
- [24] J. F. Navarro, C. S. Frenk, S. D. M. White: *The Structure of Cold Dark Matter Halos*, The Astrophysical Journal, 462 (1996) 563.
- [25] B. W. Lee, S. Weinberg: *Cosmological lower bound on heavy-neutrino masses*, Phys. Rev. Lett., 39 (1977) 165.
- [26] R. D. Peccei, H. R. Quinn: *CP Conservation in the Presence of Pseudoparticles*, Phys. Rev. Lett., 38 (1977) 1440.
- [27] S. Weinberg: *A New Light Boson?*, Phys. Rev. Lett., 40 (1978) 223.
- [28] F. Wilczek: *Problem of Strong P and T Invariance in the Presence of Instantons*, Phys. Rev. Lett., 40 (1978) 279.
- [29] K.J. Mack, P.J. Steinhard: *Cosmological problems with Multiple Axion-like fields*, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 1105 (2011) 001.
- [30] T. Kaluza: *Unitätsproblem in der Physik*, Sitzungsberrichte der Koniglich Akademieder Preussischen Akademie der Wissenschaften, 1 (1921) 966.
- [31] O. Klein: *Quantentheorie und fünfdimensionale Relativitätstheorie*, Z. Physik, 37 (1926) 895.
- [32] G. Veneziano: *Construction of a crossing-symmetric, Regge-behaved amplitude for linearly rising trajectories*, Nuovo Cim. A, 57 (1968) 190.
- [33] Z. Chrobáková., M. López-Corredoira, F. Sylos Labini, H.F. Wang, R. Nagy: *Gaia-DR2 extended kinematical maps. III. Rotation curves analysis, dark matter*, Astronomy & Astrophysics, 642 (2020) 95.
F. Sylos Labini, G. De Marzo, M. Straccamore, S. Comeron: *The Tully-Fisher relation and the Bosma effect*, ArXiv:2310.1573.
- [34] A. Goobar, S. Perlmutter: *Feasibility of Measuring the Cosmological Constant Lambda and Mass Density Omega Using Type IA Supernovae*, Astrophysical Journal, 450 (1995) 14.
- [35] S. Perlmutter et al.: *Measurements of the Cosmological Parameters Ω and Λ from the First Seven Supernovae at $z \geq 0.35$* , The Astrophysical Journal, 483 (1997) 565.
- [36] S. Perlmutter et al.: *Discovery of a supernova explosion at half the age of the universe and its cosmological implications*, Nature, 391 (1998) 51.
- [37] P. M. Garnavich et al.: *Constraints on cosmological models from Hubble Space telescope observations of high z supernovae*, Astrophys. J. Lett., 493 (1998) L53.
- [38] S. Perlmutter et al.: *Measurements of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae*, The Astrophysical Journal, 517 (1999) 565.
- [39] C. G. Neumann: *Allgemeine Untersuchungen über das Newton'sche Princip der Fernwirkungen mit besonderer Rücksicht auf die elektrischen Wirkungen*, Monatsh. f. Mathematik und Physik, 7 (1896) A50.
- [40] A. Einstein: *Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie*, Sitz. König. Preuss. Akad., (1917) 142. -152.
- [41] A. Einstein: Lettera a Paul Ehrenfest, 14 febbraio 1917 CPAE 8 (Doc. 298).
- [42] H. Weyl: *Temp, Espace, Matière*, Libraire Scientifique Albert Blanchad, Parigi (1922).
- [43] P. Ferreira: *La teoria perfetta*, Rizzoli, Bologna (2014).
- [44] A. Friedman: *Über die krümmung des raumes*, Z. Phys., 10 (1922) 377.
- [45] A. Friedman: *Über die Möglichkeit einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes*, Z. Phys., 21 (1924) 326.
- [46] G. Lemaître: *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques*, Annales de la Société Scientifique de Bruxelles, 47 (1927) 49.
- [47] E. Hubble: *A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 15 (1929) 168.
- [48] V. Slipher: *The radial velocity of the Andromeda Nebula*, Lowell Observatory Bulletin, (1912) 2.56.
- [49] H. Bondi, T. Gold: *The steady-state of the expanding Universe*, Monthly Notice Royal Astronomical Society, 108 (1948) 3.
- [50] V. Petrosian, E. Salpeter, P. Szekeres: *Quasi-Stellar Objects in Universes with Non-Zero Cosmological Constant*, Astrophys. J., 147 (1967) 1222.
- [51] J.E. Gunn, B.M. Tinsley: *An accelerating universe*, Nature, 247 (1975) 454.
- [52] Richard Panek: *L'universo oscuro* La Biblioteca delle Scienze (2011).
- [53] A. Einstein, O. Stern: *Einige Argumente für die Annahme einer molekularen Agitation beim absoluten Nullpunkt*, Annalen der Physik, 40 (1913) 551.
- [54] H.B.G. Casimir: *On the attraction between two perfectly conducting plates*, Proc. 'kon. Ned. Akad. Wetenschap., ser. B,, 51 (1948) 793.
- [55] A. Urbano: *La ricchezza del niente*, Asimmetrie, 24 (2018) 3.
- [56] M. J. Sparnaay: *Measurements of attractive forces between flat plates*, Physica, 24 (1958) 751.
- [57] S. Lamoreaux: *Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6 μm Range*, Phys. Rev. Lett., 78 (1997) 5.
Phys. Rev. Lett., 81 (1998) 5475 (erratum).

- [58] W. E. Lamb, R.C. Retherford: *Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method*, Phys. Rev., 72 (1947) 241.
- [59] B. Carter: *Large Number Coincidences and the Anthropic Cosmological Principle*, "Confrontation of Cosmological Theories with Observational Data", a cura di M.S. Longair, Reidel, Dordrecht (1974) 291.
- [60] B. Carr, M. Rees: *The Anthropic Principle and the Structure of the Physical World*, Nature, 278 (1979) 605.
- [61] J. Barrow: *Anthropic Definitions*, Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society, 24 (1983) 146.
- [62] J. Barrow, F. Tipler: *The Anthropic Cosmological Principle*, Clarendon Press, Oxford (1986).
- [63] R. R. Caldwell, R. Dave, P. J. Steinhardt: *Cosmological Imprint of an Energy Component with General Equation-of-State*, Phys. Rev. Lett., 80 (1998) 1582.
- [64] C. Brans, R. H. Dicke: *Mach's principle and a relativistic theory of gravitation*, Phys. Rev., 124 (1961) 925.
- [65] C. Wetterich: *Cosmology and the fate of dilatation symmetry*, Nucl. Phys. B, 302 (1988) 668.
- [66] G. W. Horndesky: *Second-order scalar-tensor field equations in a four dimensional space*, International Journal of Theoretical Physics, 10 (1974) 363.
- [67] L. Cosmai, G. Fanizza, F. Sylos Labini, L. Pietronero, L. Tedesco: *Fractal universe and cosmic acceleration in a Lemâitre-Tolman-Bondi scenario*, Class. Quantum Grav., 36 (2019) 045007.



Luigi Tedesco: è professore di Fisica teorica presso il Dipartimento Interateneo di Fisica di Bari. Si occupa nelle sue ricerche di Relatività e Cosmologia.