
Energia Oscura, il motore dell'Universo

Massimo Pietroni

Dipartimento di Scienze Matematiche, Fisiche ed Informatiche dell'Università di Parma e INFN - Sezione di Padova

Le evidenze che l'espansione dell'Universo stia accelerando si sono accumulate in questi ultimi anni in modo sempre più convincente. Esse comprendono gli studi sulle Supernovae di tipo Ia, ma anche lo studio, completamente indipendente da queste, della radiazione cosmica di fondo e della struttura dell'Universo a grande scala. I risultati sono in accordo tra loro: circa il 70 % della densità di energia dell'universo attuale è in una forma totalmente *esotica*, avente le proprietà di un fluido con pressione negativa. Dal punto di vista teorico, una spiegazione convincente del fenomeno è molto lontana, e tutti i modelli proposti scontano o un *fine tuning* innaturale dei parametri, o inconsistenze fisico-matematiche insuperabili.

Introduzione

Vent'anni fa, nel 1998, due gruppi di ricerca, lo High-Z Supernova Search Team, capeggiato da Adam Riess e Brian Schmidt, e il Supernova Cosmology Project, diretto da Saul Perlmutter, annunciarono al mondo che lo studio di una particolare classe di Supernovae, quelle di tipo Ia, mostrava, con forte evidenza, che l'espansione dell'Universo sta accelerando. Se interpretata nell'ambito della teoria della gravitazione di Al-

bert Einstein, cioè della Teoria della Relatività Generale, questa osservazione implica che la maggior parte della materia-energia dell'Universo, pari a circa il 70 per cento, è in una forma esotica, del tutto differente da quelle a noi familiari. A questa forma di energia fu presto dato il nome di Energia Oscura. Un aggettivo doppiamente adeguato: da una parte indica che essa non interagisce con la radiazione luminosa, e quindi non emette luce, ma dall'altro esprime efficacemente il fatto che la ricerca verso una spiegazione soddisfacente della natura di questa componente fondamentale del nostro Universo procede a tentoni e senza fari concettuali definiti e accettati da tutti. Ma procediamo con ordine.

La sciocchezza di Einstein

Il nostro universo non è un sistema statico. Dalle osservazioni di Edwin Hubble negli anni '20 sappiamo che se osserviamo galassie via via più lontane, esse mostrano di allontanarsi da noi a velocità sempre crescenti, in misura proporzionale alla distanza. È la famosa legge di Hubble:

$$v = H d, \quad (1)$$

dove v è la velocità di allontanamento, d è la distanza, e H è un parametro, detto "costante di Hubble", che misura circa 70 km/s/Mpc, con un'incertezza attorno a qualche per cento. Il Mpc (Megaparsec) è l'unità di misura di lunghezza

appropriate per la cosmologia, e corrisponde a circa 3,26 miliardi di anni luce. L'interpretazione più naturale della legge di Hubble, che vale per distanze superiori alle centinaia di Mpc, è che l'Universo è globalmente in espansione: le distanze tra galassie lontane aumentano al passare del tempo in modo da lasciare invariate le rispettive proporzioni. Qualunque altro osservatore, situato su una qualunque altra galassia, troverebbe risultati in accordo con la legge di Hubble, solo che in questo caso posizioni e velocità delle altre galassie sarebbero riferite alla sua posizione e non a quella della Terra. Questa scoperta era stata in qualche modo anticipata dallo stesso Einstein, quando aveva provato ad applicare la Relatività Generale all'Universo nel suo complesso. Con disappunto, aveva dovuto ammettere che le sue equazioni non ammettevano un Universo statico: questo doveva o espandersi oppure contrarsi. Dato che all'epoca (nel 1917) non si aveva alcuna evidenza dell'espansione dell'Universo, e dato che trovava più soddisfacente, da un punto di vista estetico, un Universo statico, Einstein corse ai ripari aggiungendo alle sue equazioni un termine assente nella formulazione originaria, ma tuttavia compatibile con le simmetrie della Relatività Generale. Tale termine, che egli chiamò Costante Cosmologica, se calibrato opportunamente era in grado di rendere statico un Universo a geometria chiusa, anche se questa configurazione è instabile sotto piccole perturbazioni. Una volta appresa la notizia della scoperta di Hubble dell'espansione dell'Universo, Einstein rigetto rapidamente questa sua macchinosa invenzione, definendola, pare, la sua più grande sciocchezza.

Accelerazione e pressione negativa

Le soluzioni cosmologiche della Relatività Generale, nell'approssimazione di Universo perfettamente omogeneo, furono ottenute nel 1922 dal fisico russo Alexander Friedmann e successivamente e in modo indipendente dall'abate belga Georges Lemaitre, confermando che queste prevedono che l'Universo si espande. In particolare, queste equazioni determinano la dinamica del

fattore di scala, $a(t)$, definito come

$$a(t) = d(t)/d_0, \quad (2)$$

dove d_0 è la distanza attuale tra due punti dell'Universo e $d(t)$ la distanza tra gli stessi due punti al tempo t (con questa definizione il fattore di scala oggi vale uno). In particolare, l'equazione per l'accelerazione del fattore di scala è data da

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi}{3}G_N(\rho + 3P), \quad (3)$$

dove i due punti indicano la derivata seconda rispetto al tempo, G_N è la costante gravitazionale di Newton, ρ è la densità di energia dell'Universo e P la pressione. A diverse forme di materia-energia corrispondono diverse relazioni tra la densità di energia e la pressione, e diverse relazioni di queste col fattore di scala. In particolare, la materia (stelle, pianeti, particelle elementari dotate di massa e aventi velocità molto inferiori a quella della luce) si comporta come un fluido a densità di energia positiva e pressione nulla, e quindi è associata a una decelerazione dell'espansione dell'Universo, perché il segno del membro di destra dell'equazione è negativo. Questo è perfettamente in linea con l'esperienza comune: se lanciamo un sasso verso l'alto, questo comincia a decelerare immediatamente dopo aver lasciato la nostra mano, dato che la forza in gioco, la gravità, è attrattiva. Infatti, nel caso $P = 0$, l'equazione per il fattore di scala scritta qui sopra può essere ottenuta anche nella teoria newtoniana della gravitazione, senza dover ricorrere alla Relatività Generale. Per "materia" intenderemo qui sia la materia ordinaria (tutto ciò che oggi è formato di protoni, neutroni ed elettroni) che la Materia Oscura, in quanto le due specie, dal punto di vista gravitazionale, si comportano allo stesso modo.

Un'espansione decelerata si ottiene anche nel caso in cui l'energia dell'Universo è sotto forma di particelle che viaggiano a velocità relativistiche, cioè prossime a quella della luce, come i fotoni e i neutrini (nel caso in cui questi ultimi abbiano massa molto piccola). In questo caso, la pressione non è nulla, ma è legata alla densità di energia dalla relazione $P = \rho/3$, e quindi il termine fra parentesi diventa in questo caso 2ρ che, essendo ancora positivo, non cambia segno

all'accelerazione, che rimane quindi negativa.

Per avere accelerazione è necessario che la pressione sia negativa, in particolare, sempre dall'equazione scritta precedentemente, dobbiamo avere

$$P < -\frac{1}{3}\rho < 0, \quad (4)$$

dato che la densità di energia ρ è positiva. Per "Energia Oscura" si intende, quindi, una forma di energia a pressione negativa, in grado di accelerare l'espansione dell'Universo secondo l'equazione riportata in precedenza. Dato che tutti i tipi di materia nota, come abbiamo visto, presentano pressione nulla o positiva, l'Energia Oscura è una forma di materia del tutto esotica, mai osservata in alcun esperimento in laboratorio e della cui esistenza esistono solo prove indirette, attraverso le osservazioni cosmologiche.

Evidenze dell'Energia Oscura

La prima di queste prove, in ordine cronologico, è rappresentata dallo studio delle Supernovae di tipo Ia, che ha portato al premio Nobel per la fisica nel 2011 per Riess, Schmidt e Perlmutter. Una Supernova di tipo Ia viene prodotta quando, in un sistema binario (composto cioè da due stelle) una delle due, una nana bianca, aumenta la sua massa a spese dell'altra, fino a raggiungere un valore di soglia, detto "massa di Chandrasekar", pari a 1,4 volte la massa del Sole, come illustrato schematicamente nella Figura 1.

A quel punto si ha un'esplosione nucleare dalle caratteristiche abbastanza definite, così da far ritenere molto simili tra loro, per intensità luminosa, tutti gli eventi di questo tipo. In prima approssimazione, possiamo assumere che questo tipo di supernovae siano delle "candele standard", cioè degli oggetti che, ovunque si trovino nel nostro Universo, hanno la stessa luminosità intrinseca. Misurando il flusso luminoso che arriva fino a noi da una supernova di questo tipo, è quindi possibile ricavarne la distanza. In realtà questa prima approssimazione non è del tutto corretta, in quanto esiste una variabilità fra le luminosità delle diverse Supernovae Ia osservate. Questa però può essere in buona misura ridotta utilizzando una relazione empirica tra la luminosità massima della supernova e la durata della sua evoluzione, da quando esplose, fino

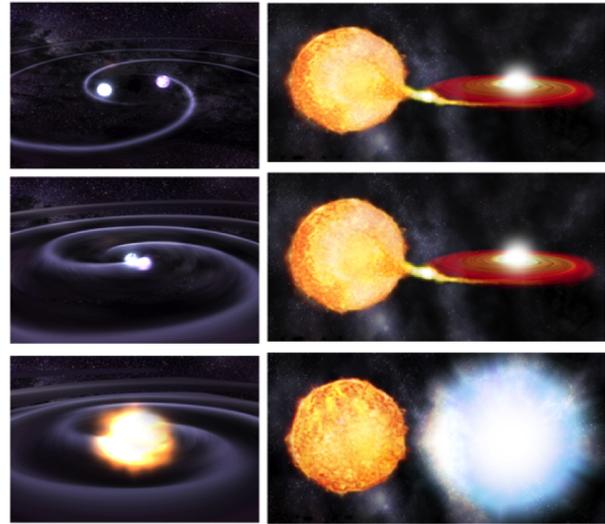


Figura 1: Schema di esplosione di una Supernova Ia. Una nana bianca accresce materia da una stella vicina, fino a raggiungere un valore limite oltre al quale diventa instabile ed esplose.

a quando si "spenge", nel giro di 30-40 giorni, come mostrato in Figura 2.

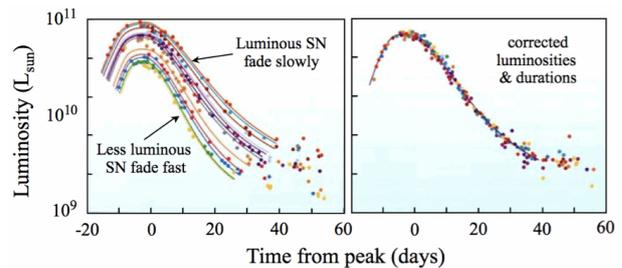


Figura 2: Le curve di luce (luminosità in funzione del tempo) di diverse supernovae di tipo Ia, mostrano una variabilità della luminosità di picco (sinistra). Tuttavia è possibile ridurre questa variabilità ricorrendo a una correlazione, empirica, tra la luminosità di picco e la larghezza temporale della curva di luce. Il campione, ricalibrato in questo modo (destra) permette di usare le Supernovae Ia come candele standard.

Oltre alla luminosità, l'altro parametro fondamentale misurato per ogni supernova è il redshift, o "spostamento verso il rosso". Con questo nome si intende il fatto che a causa dell'espansione dell'Universo, le lunghezze d'onda della luce della stella vengono dilatate, nel loro viaggio fino alla Terra, di un fattore $1/a(t)$, dove t è il tempo al quale è stata emessa la luce, cioè quando è esplosa la Supernova. Questo effetto può essere misurato analizzando lo spettro della stella e quindi ci dà una misura di quanto fosse "più piccolo" l'Universo, rispetto alle dimen-

sioni attuali, quando la luce ha lasciato la stella. Quindi, mentre la distanza ci dà una misura di quanto tempo ha viaggiato la luce, il redshift ci dice quale fosse il valore del fattore di scala all'epoca dell'esplosione. Misurando Supernovae a distanze via via crescenti, è quindi possibile ricostruire l'evoluzione di $a(t)$ col tempo, e quindi misurare non solo la velocità dell'espansione ma anche la sua decelerazione o accelerazione. Il risultato è mostrato in Figura 3. Sull'asse delle x è

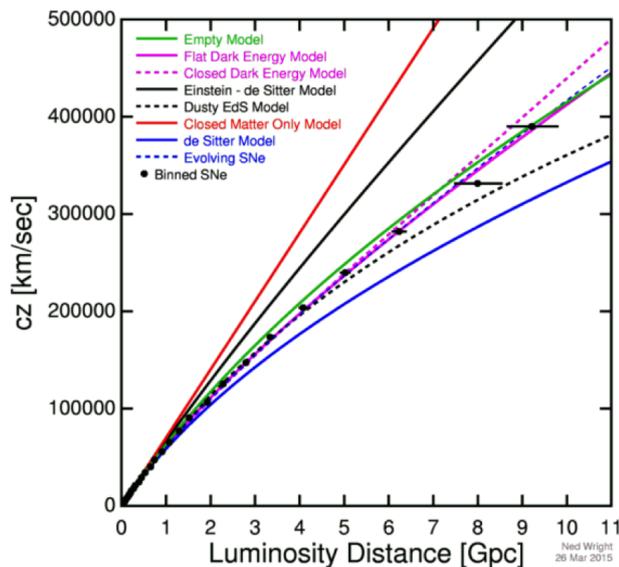


Figura 3: Il fattore di scala (o meglio la quantità $z \equiv 1/a - 1$, moltiplicata per la velocità della luce) in funzione della distanza. I punti neri con barre di errore sono i punti sperimentali misurati con le Supernovae Ia, mentre le curve rappresentano vari modelli teorici (vedi testo).

riportata la distanza, in Gigaparsec (1 Gpc=1000 Mpc), mentre in asse y la quantità $z \equiv a^{-1} - 1$, moltiplicata per la velocità della luce. I punti con le barre di errore rappresentano i dati sperimentali ottenuti con le Supernovae Ia, e le diverse linee le predizioni di diversi modelli teorici. Come si può vedere anche "ad occhio" la linea viola, corrispondente a un modello con il 70% di Energia Oscura (nel grafico si è assunta pressione $P = -\rho$) e un restante 30% sotto forma di materia non relativistica, è quello che riproduce meglio i dati sperimentali, mentre, per confronto, il modello in con il 100% di materia e nessun contributo di Energia Oscura è rappresentato dalla linea nera, è chiaramente escluso a diversi sigma. Sperimentalmente, quello che si osserva, è che, a parità di redshift, cioè fissato un valore sull'asse delle y, le Supernovae sono meno lumi-

nose di quanto sarebbero in un Universo senza Energia Oscura, questo perché sono più lontane dalla Terra. È da notare che tutte le curve concordano a piccole distanze, alle quali la pendenza corrisponde alla velocità attuale dell'espansione, ma differiscono a grandi distanze (maggiori del Gpc), e quindi a tempi remoti, cioè proprio nelle predizioni sull'accelerazione odierna.

Altre prove

Se le Supernovae Ia hanno fornito la prima prova convincente dell'esistenza dell'Energia Oscura, oggi questa è confermata, in maniera forse ancora più decisiva, da altre misure cosmologiche. Prima fra tutte, l'analisi della radiazione cosmica di fondo (Cosmic Microwave Background radiation, CMB) combinata allo studio della distribuzione della materia su grande scala nell'Universo, cioè della distribuzione delle galassie. Queste misure permettono di ricostruire la storia dell'espansione in modo del tutto indipendente dagli studi delle Supernovae Ia, fornendo risultati in perfetto accordo con questi. Invece di candele standard, la CMB e la distribuzione delle galassie contengono informazione su un "righello standard" cioè su una scala di lunghezza fisica nota che, misurata in varie epoche dell'evoluzione cosmologica, ci consente, ancora una volta, di ricostruire la storia della funzione $a(t)$. Il "righello standard" corrisponde, in questo caso, alla cosiddetta "scala acustica", una proprietà del fluido barioni-fotoni ad alta temperatura che costituiva, insieme alla materia oscura, il nostro Universo fino a un'età di circa 380000 anni dopo il Big Bang. Senza entrare nei dettagli della fisica delle oscillazioni acustiche di quel fluido, ci basta sapere che queste provocarono oscillazioni che hanno potuto propagarsi per una distanza massima ben nota, la scala acustica appunto, pari oggi a circa 140 Mpc. Le oscillazioni acustiche hanno lasciato un'impronta sia sulla CMB che nella distribuzione della galassie a epoche molto successive, così come rappresentato schematicamente nella Figura 5. La misura sempre più precisa della scala acustica è l'obiettivo delle maggiori survey di galassie attuali e di quelle future, come quella che verrà compiuta dal satellite Euclid dell'ESA, che produrrà il censimento più ampio mai realizzato.

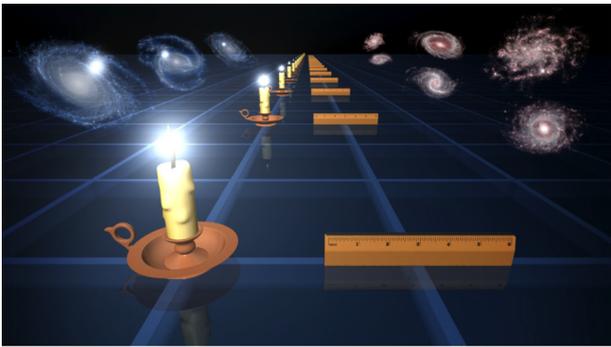


Figura 4: Per misurare le distanze cosmologiche abbiamo bisogno di “candele standard” o di “righelli standard”. Le prime sono classi di oggetti (per esempio stelle) che abbiano, idealmente, tutti la stessa luminosità assoluta, nota. Da misure di flusso luminoso è quindi possibile risalire alle distanze dei singoli oggetti. I righelli standard, invece, sono oggetti aventi tutti la stessa dimensione trasversa rispetto alla linea di vista. Misurando l’angolo sotto il quale si vede un singolo oggetto, è possibile inferirne la distanza.

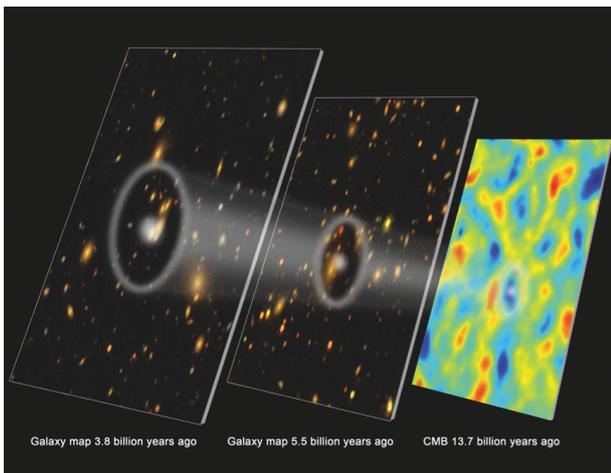


Figura 5: La scala acustica barionica rappresenta un preziosissimo righello standard. Questa può essere misurata sia nella CMB, generata quando il fattore di scala dell’Universo era circa un millesimo di quello attuale (circa 13 miliardi di anni fa), che nella distribuzione delle galassie a tempi molto più recenti.

Una porta oscura verso la Nuova Fisica

Se le evidenze dell’Energia Oscura sono ormai schiacciati, il capitolo della spiegazione teorica della sua natura è invece più aperto che mai. Il candidato che al momento riproduce meglio i dati è quello già menzionato, e riportato dalla linea viola in Figura 3, in cui la pressione è

esattamente uguale a meno la densità di energia. Questo è esattamente il comportamento previsto dalla “vecchia” costante cosmologica! Una volta aggiunta a un Universo con curvatura nulla, la creatura rinnegata di Einstein può dare luogo all’accelerazione osservata, anche se questo necessita una regolazione molto accurata del suo valore. Un valore diverso, più grande o più piccolo, porterebbe a un Universo che si è espanso in passato così rapidamente da non aver permesso la formazione delle galassie, o, nel caso opposto, a un Universo che non accelera, in contrasto con le osservazioni.

La determinazione del valore della costante cosmologica a partire da principi primi è probabilmente il problema aperto in Fisica Teorica per cui la soluzione è più lontana, se non altro da un punto di vista quantitativo. Se proviamo a stimarne il valore, in base alle nostre conoscenze di Teoria dei Campi Quantistici, il valore che otteniamo è ridicolo: circa 120 ordini di grandezza maggiore di quello osservato!

Soluzioni alternative si basano sull’ipotesi che la Teoria della Relatività Generale, cessi di essere valida su scale cosmologiche. Dopotutto, questa teoria è stata costruita sulla base degli esperimenti effettuati in laboratori terrestri, ed è stata testata su scale dell’ordine del Sistema Solare, ma non è mai stata verificata, se non indirettamente, su scale galattiche o degli ammassi di galassie. Anche in questa direzione, però, la ricerca teorica non ha fornito finora risposte incoraggianti. Spesso le teorie che provano a modificare il costrutto di Einstein incorrono in gravi inconsistenze, che le rendono inaccettabili dal punto di vista fisico.

In ogni caso, il problema dell’Energia Oscura, così come la sua controparte, quello della Materia Oscura, stanno davanti a noi, forti di evidenze sperimentali inoppugnabili, a sbarrarci la strada verso la comprensione della nuova fisica ma, allo stesso tempo, a segnalarci la sua esistenza. Nessuno ha ancora trovato la chiave per superare questi due cerberi, ma l’impresa merita tutto lo sforzo e l’intelligenza dei fisici di questa generazione, e di quelle che seguiranno.



Massimo Pietroni: è primo ricercatore INFN presso la sezione di Padova e Professore Straordinario presso l'Università degli studi di Parma. Si occupa di Cosmologia e Fisica delle Particelle.