



Ruggero Stanga

Dipartimento di
Fisica ed Astronomia
Università di Firenze

Il premio Nobel per la Fisica 2011: l'espansione accelerata dell'Universo

Il premio Nobel per la Fisica è stato assegnato nel 2011 a tre astrofisici: Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt e Adam G. Riess, per avere scoperto, grazie alle osservazioni di supernovae distanti, che l'espansione dell'Universo sta accelerando. La cosmologia, branca del sapere ai confini fra scienza e speculazione, anche grazie a questi lavori è diventata una scienza osservativa.

La storia di questa scoperta comincia nella prima metà degli anni '20 del secolo scorso, una quarantina di anni prima che gli attuali premi Nobel nascessero. Edwin Hubble, allora, era alle prese con l'osservazione di Cefeidi in parecchie nebulose a spirale (oggetti ben distinti dalle nebulose planetarie, che sono tutt'un altro fenomeno). Le variabili Cefeidi hanno una notevole importanza in astronomia, perché grazie a Henrietta Swan Leavitt¹ agli inizi del secolo scorso era stata trovata una relazione precisa fra il periodo di variabilità e la distanza di ciascuna Cefeide. Le osservazioni di Hubble permisero di determinare la distanza della nebulosa a spirale in cui si trova una Cefeide e dimostrarono che le nebulose a spirale in questione non sono parte della nostra Via Lattea, ma sono esterne ad essa, a grandi distanze, parecchi milioni di parsec. All'epoca non esisteva ancora nessuna prova certa della localizzazione delle nebulose a spirale: si ricorda ancora il *Gran Debate*, gran dibattito nel 1920 tenuto pubblicamente da due grandi astronomi, Harlow Shapley e Heber D. Curtis, nel Museo di Storia Naturale dello Smithsonian, proprio relativo alle dimensioni dell'Universo. La scoperta di Hubble allargò inequivocabilmente l'orizzonte e moltiplicò il numero delle strutture simili alla Via Lattea: le galassie, costituite ciascuna da centinaia di miliardi di stelle. Nulla nell'Universo sta in quiete rispetto alla nostra Terra, né rispetto alla nostra Galassia, e in particolare il moto relativo delle galassie rispetto alla Via Lattea è misurabile dai loro spettri grazie all'effetto Doppler. Hubble provò a correlare la distanza, misurata con il metodo delle Cefeidi, e la velocità misurata tramite l'effetto Doppler, per il campione di galassie che aveva esaminato. Una volta eliminato l'effetto delle galassie più vicine, che introducono una dispersione nella correlazione fra velocità e distanza, concluse che le galassie si allontanano dalla Via Lattea, con una velocità che in media cresce con la distanza; la legge, che porta il suo nome, si esprime con l'equazione:

$$v = H_0 d$$

in cui compare H_0 , la costante di Hubble, il cui valore attualmente stimato è 74 km/s per Megaparsec (http://www.lescienze.it/news/2009/05/09/news/una_nuova_stima_della_costante_di_hubble-575139/).

Una seconda scoperta, che farebbe di Hubble un degnissimo premio Nobel. Peccato che solo qualche anno dopo la sua morte il Comitato di assegnazione prese la decisione che ebbene sì, anche i lavori in astrofisica potevano essere valutati per un premio Nobel in Fisica.

Le galassie, dunque, si allontanano l'una dall'altra a velocità crescente con la distanza. La legge di Hubble fu un fatto sperimentale veramente inatteso: si era appena scoperto che l'Universo era molto più ampio di quanto si credeva, ed ora si scopriva che le dimensioni dell'Universo non rimanevano costanti, ma addirittura aumentavano nel tempo.

Per interpretare la legge di Hubble è necessario generalizzare la nozione di spazio tridimensionale piatto, quello in cui vale la geometria euclidea, a spazio-tempo quadridimensionale, curvo, lo spazio-tempo della Relatività Generale. Se teniamo conto di principi generali quali l'omogeneità e l'isotropia dello spazio-tempo, si può dimostrare che la forma più generale che può assumere la "distanza" fra due eventi, cioè la separazione fra quello che succede in un punto in un certo istante, e quello che accade in un altro punto, in un altro istante, è:

$$\Delta s^2 = -c^2 \Delta t^2 + a(t)(\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2)$$

in cui $a(t)$ è un fattore di scala che può variare nel tempo. Risulta relativamente semplice collegare il fattore di scala alla costante di Hubble:

$$H_0 = H(t_0) = \frac{\dot{a}(t_0)}{a_0}$$

in cui il pedice indica l'epoca attuale: la costante di Hubble valutata da un altro osservatore in un'epoca diversa avrebbe un valore diverso. Come evolve nel tempo il fattore di scala? Per rispondere, ci occorre un modo di misurare le distanze spaziali, anche le più grandi. Concettualmente, il metodo è molto semplice: se sappiamo quanta luce emette una sorgente, e misuriamo quanta radiazione riceviamo, possiamo dedurre la distanza. Abbiamo due problemi: il primo, è quello di determinare il legame fra distanza, fattore di scala, e parametri fisici dell'Universo; per fare ciò, occorre una teoria che colleghi la geometria dello spazio-tempo al contenuto di materia dell'Universo: la Teoria della Relatività Generale è una di queste. Il secondo problema consiste nel trovare una "candela standard", cioè una sorgente di cui possiamo conoscere la luminosità intrinseca. E qui finalmente cominciano ad entrare in gioco i nostri premi Nobel. La motivazione parla dell'osservazione di supernovae distanti: le candele standard sono proprio alcune delle supernovae, le supernovae di tipo "Ia". Solo queste, in virtù del meccanismo particolare che porta all'esplosione: la stella che esplose fa parte di un sistema binario, è molto compatta, una nana bianca, ed accresce materiale dalla compagna, fino a quando si innesca una esplosione term nucleare che coinvolge l'intera stella, senza lasciare residui. L'accrescimento e l'esplosione in pratica cancellano quasi completamente l'individualità della stella singola. Basta allora misurare l'evoluzione temporale della brillantezza della stella (la curva di luce), per risalire alla luminosità intrinseca. L'utilità di questo metodo sta nella luminosità molto alta delle supernovae, anche 10^{11} volte la luminosità del Sole, che le rendono visibili fino a grandi distanze.

Perlmutter, Riess e Schmidt con due progetti di ricerca diversi, *Supernova Cosmology Project* il primo, e *High-z SN search*, i secondi, hanno misurato la luminosità intrinseca di un gran numero di supernovae distanti. La difficoltà sta nel



Figura 1. Esempio dell'osservazione delle supernovae.

fatto che tali supernovae sono molto rare, una galassia ne ospita una o due ogni millennio, e che esse sono totalmente imprevedibili: non c'è nessun indizio che segnali la galassia in cui sta per esplodere una supernova.

Inoltre, per quanto siano luminose le SN Ia, quando le osserviamo in galassie molto distanti il loro segnale sarà inevitabilmente debole, il che rende più problematica la misura della curva di luce. In figura 1 c'è l'esempio di come può apparire una SN Ia (S. Perlmutter, "Supernovae, dark energy, and the Accelerating Universe", *Physics Today*, April 2003, p. 53).

Le osservazioni cominciarono nella metà degli anni '90 del secolo scorso, e proseguono tutt'ora, e l'analisi dei dati usa tecniche raffinate per discriminare gli effetti spuri. Anzitutto, bisogna essere in grado di osservare migliaia di galassie, per aumentare la probabilità di trovare una supernova; un numero molto grande di immagini deve essere analizzato, per identificare una supernova, dopo avere eliminato effetti spuri dovuti per esempio alla differente trasparenza dell'atmosfera in tempi diversi. Correzioni vanno applicate, per tenere conto dei redshift diversi delle supernovae. Poi, una volta trovata, bisogna osservarla molte volte nel giro di poche settimane per determinare la curva di luce. Non basta misurare la radiazione che raggiunge la Terra, bisogna anche osservare lo spettro della supernova, per identificare se essa è una Ia. Come si vede, anche in questo caso, il successo non deriva solo da un'idea particolarmente brillante, ma dalla determinazione, dall'affinamento e dall'esplorazione delle possibilità di tutte le tecniche, osservative, analitiche, statistiche a disposizione.

Quali sono le conclusioni? Le distanze delle supernovae nel quadro della Teoria della Relatività Generale sono legate al redshift z ed al parametro di Hubble dalla relazione

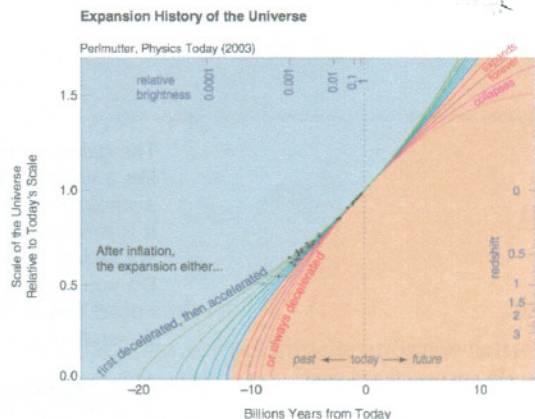
$$d_L = \left(\frac{z}{H_0} \right) \left[1 + \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\dot{H}_0}{H_0^2} \right) z \right].$$

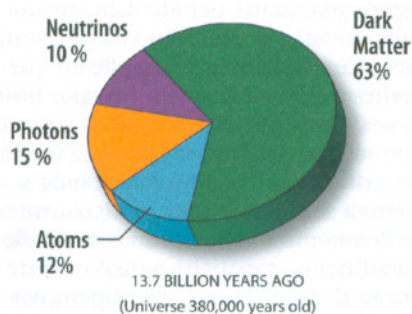
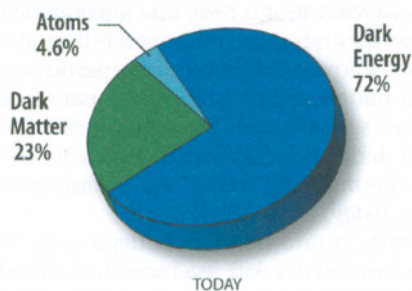
Vediamo subito che questa espressione si riconduce alla legge di Hubble quando z è molto più piccolo di 1; d'altra parte, sono stati misurati per galassie e quasars anche z maggiori di uno: il valore più alto misurato ad oggi è $z = 8.6$ (la luce lasciò la galassia in questione solo 600 milioni di anni dopo il Big Bang), e i lavori di Perlmutter, Riess e Schmidt arrivano a redshift poco maggiori di 1.

Il termine

$$q_0 = \frac{\dot{H}_0}{H_0^2}$$

esprime appunto l'accelerazione dell'espansione, positiva o negativa che sia. Le misure, riportate nel grafico mostrano che effettivamente l'espansione dell'Universo è al tempo presente in accelerazione. Ora, la materia, sia quella direttamente visibile tramite radiazione elettromagnetica, sia quella deducibile dagli effetti gravitazionali che genera (materia oscura) non riesce a spiegare tutte le caratteristiche della geometria dello spazio osservate, accelera-





zione dell'espansione dell'Universo inclusa. Le misure della radiazione di fondo, un altro pilastro della cosmologia osservativa, stimano ad esempio il contenuto in materia dell'Universo in un po' meno del 30% del contenuto totale di materia ed energia. Il resto è imputato ad una forma nuova di energia, che viene definita *Dark Energy*, energia oscura. Essa deve essere distribuita in maniera omogenea, interagire con la materia solo tramite la gravitazione, ma può avere una densità bassa (e quindi difficilmente osservabile in laboratorio): la sua influenza profonda sull'evoluzione dell'Universo è dovuta alla sua ubiquità. La natura dell'energia oscura è tuttora ignota.

L'importanza del lavoro di Perlmutter, Riess e Schmidt sta dunque nell'aver introdotto un nuovo personaggio di grande rilevanza, ma di sfuggente carattere sulla scena, e di

avere confermato un altro fatto: ogni avanzamento delle tecniche di indagine, che nel nostro racconto vanno dalla misura delle distanze delle Cefeidi, alla determinazione del redshift, resa possibile da telescopi più grandi, alla misura della distanza con il metodo delle supernovae, introdotto grazie all'avanzamento della analisi della struttura stellare, apre l'indagine a nuove domande, a nuovi problemi, prima nascosti dall'ignoranza.

Per le figure: www.supernova.lbl.gov

Note ¹ Si veda nella rubrica "Il Fisico della Settimana", dedicata nel 2009 all'Anno Internazionale dell'Astronomia, la biografia di H. Leavitt, E. Hubble ed altri (www.aif.it) [NdR].

The galaxy swings round
like a wheel of lighted smoke,
a smoke composed of stars.
It is sunsmoke.
For lack of other words we call it sunsmoke,
Do you see.
I don't feel languages are equal
To what that vision comprehends.

Harry Martinson, *Aniara*