Insegnare relatività

nel XXI secolo

Espansione dell'Universo e legge di Hubble

La legge di Hubble

Studiando distanze e moto delle galassie si trova che quelle più vicine si muovono in maniera abbastanza caotica.

Negli anni '20, ad opera principalmente di Hubble e grazie al telescopio di due metri e mezzo di Monte Wilson, si scoprì un sistematico spostamento verso il rosso (*redshift cosmologico*) nella luce di galassie più lontane.

Si vide che lo spostamento è *proporzionale alla distanza* della galassia.

Questa è la *legge di Hubble*.

I limiti strumentali

La legge di Hubble può essere scoperta – e soprattutto ben verificata – solo se si hanno a disposizione un numero sufficientemente grande di galassie *abbastanza lontane*.

Per le galassie vicine l'effetto è più difficile da vedere: in primo luogo perché se lo spostamento è proporzionale alla distanza, per quelle vicine sarà piccolo.

Poi perché allo spostamento *sistematico* si sovrappone un effetto di “agitazione termica”: i moti casuali, disordinati, delle galassie, detti “moti peculiari”.

Questi possono essere così grandi da produrre un effetto Doppler che maschera il redshift cosmologico.

Di qui la necessità di un grosso telescopio: se non si riesce a guardare abbastanza lontano, il redshift non è abbastanza grande.

Numeri...

Le velocità tipiche delle galassie di un ammasso possono arrivare a 10^3 km/s, e producono quindi uno spostamento Doppler disordinato (rumore)

$$\Delta\lambda/\lambda = v/c \sim 0.003.$$

Dato il valore della costante di Hubble (v. dopo) per avere un redshift nettamente al disopra del rumore, per es. 0.01, occorre andare a distanze di decine di Mpc.

(La distanza della galassia più vicina, M31 “galassia di Andromeda”, è circa 0.7 Mpc.)

Difficoltà

Per stabilire la legge di Hubble bisogna evidentemente misurare, per ciascuna galassia, il *redshift* e la *distanza*.

Delle due *la distanza è la più difficile* da misurare: si tratta infatti di una *misura assai indiretta*, e perciò soggetta a una quantità di possibili errori.

Ancor oggi l'incertezza delle distanze è il punto debole.

La determinazione della distanza diventa tanto più difficile, e tanto più incerta come fondamento, quanto più si va lontano.

E purtroppo *le grandi distanze sono le più utili* per capire la struttura dell'Universo.

Gli atomi sono sempre gli stessi

Invece *non è difficile determinare il redshift*: la luce che viene da una galassia è la somma della luce emessa da tutte le stelle della galassia, e nella luce delle stelle ci sono le *righe di assorbimento*.

Queste righe sono dovute a determinati atomi o ioni, e le loro lunghezze d'onda sono conosciute da *misure di laboratorio*.

Un esempio è la riga H_α, la prima riga della *serie di Balmer* dell'idrogeno: la sua lunghezza d'onda di laboratorio è *ben nota*.

È lecito assumere che nelle condizioni delle stelle che costituiscono le galassie la lunghezza d'onda non cambi, perché *gli atomi d'idrogeno sono sempre gli stessi*.

Il principio di uniformità

Occorre sottolineare questo principio fondamentale: *la fisica* degli atomi d'idrogeno nelle stelle di una galassia lontana milioni o miliardi di anni luce *è la stessa* che conosciamo sulla Terra.

Il *principio di uniformità* delle leggi di natura in tutto l'Universo è essenziale per il nostro argomento.

Il parametro di redshift

Dunque la lunghezza d'onda λ_e della riga H_α nella luce della galassia *è la stessa* che noi misuriamo in laboratorio.

D'altra parte noi osserviamo la galassia allo spettroscopio e misuriamo la lunghezza d'onda λ_r della luce ricevuta.

Risulta $\lambda_r > \lambda_e$ e *in questo consiste il redshift*.

Ripeto: non possiamo misurare λ_e *nella galassia*: assumiamo di conoscerla perché l'identifichiamo con la lunghezza d'onda della riga H_α dell'idrogeno *in laboratorio*.

Quindi *abbiamo due misure*: una è fatta sulle righe spettrali degli elementi in laboratorio; l'altra si ricava dallo spettro della luce che viene dalla galassia.

Confrontando questa con quella, si può calcolare la variazione relativa

$$z = (\lambda_r - \lambda_e) / \lambda_e$$

che si chiama *parametro di redshift*.

Redshift, ossia spostamento verso il rosso, appunto perché la lunghezza d'onda è *aumentata*.

Interpretazione del redshift

L'interpretazione più immediata è che sia dovuto a un moto di allontanamento della galassia con una certa velocità, sia cioè anch'esso un effetto Doppler: allora al primo ordine sarà $z = v/c$.

Se la velocità di allontanamento non fosse piccola rispetto a quella della luce, si dovrebbe far uso della formula relativistica; ma per il momento non ce ne preoccupiamo.

Ciò non significa che l'effetto relativistico sia trascurabile in generale: oggi sono noti oggetti con redshift $z \simeq 10$.

Un tale redshift sarebbe impossibile se fosse sempre $z=v/c$, perché implicherebbe una velocità maggiore di c.

Ai tempi di Hubble il campo delle distanze accessibili era tale che le velocità erano sempre piccole, e il problema non si poneva.

La costante di Hubble

Se la causa del redshift è nell'effetto Doppler, z è dunque *proporzionale alla velocità.*

Le osservazioni ci dicono che z è *proporzionale* alla distanza d.

Quindi *v è proporzionale a d*.

Abbiamo così trovato la legge di Hubble nella forma più consueta.

In formula:

$$v = Hd$$

dove la costante di proporzionalità H è la *costante di Hubble*.

Il valore di H, quale risulta dalle osservazioni, è (70 ± 3) km s^{-1} Mpc^{-1}.

La strana unità di misura di H (km s^{-1} Mpc^{-1}) richiede una spiegazione: è conseguenza di certe convenzioni pratico-strumentali.

Come si vede dalla definizione, la costante di Hubble ha le dimensioni dell'inverso di un tempo; quindi la sua unità di misura sarebbe il s^{-1}.

Ma il megaparsec è un'unità di lunghezza: la lunghezza al numeratore e quella al denominatore si cancellano e rimane un tempo al denominatore, come doveva.

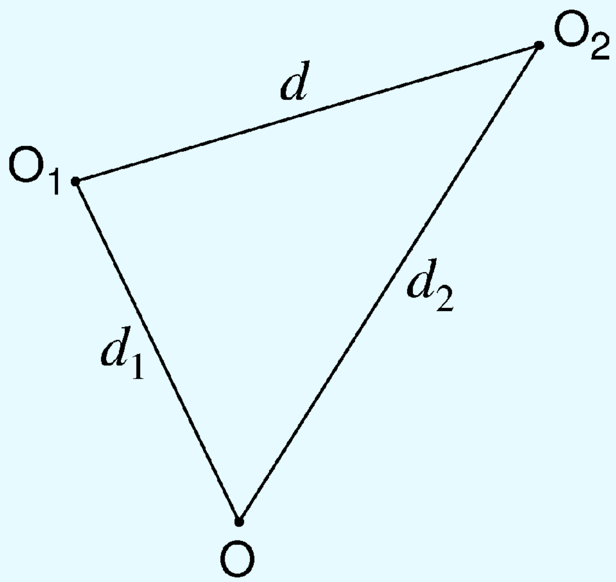
H si esprime con questa unità perché in astronomia la velocità di allontanamento di una stella o di una galassia si misura comunemente in km/s.

D'altra parte il megaparsec (abbreviato Mpc) è un'unità di distanza comunemente usata in astronomia galattica e cosmologia: abbiamo visto che la distanza di M31 è 0.7 Mpc, pari a poco più di 2 milioni di anni-luce.

Relatività dell'effetto di espansione

Il moto generale di allontanamento delle galassie non significa affatto che noi ci troviamo *al centro dell'Universo*.

Consideriamo il triangolo formato dall'osservatore O sulla Terra e da due altri osservatori, O_1 e O_2, su due galassie lontane.



Chiamiamo d_1 e d_2 le distanze OO_1 e OO_2 rispettivamente; allora la legge di Hubble ci dice che d_1 cresce col tempo, e più precisamente che

$$d_1(t) \ = \ d_1(0) + v_1\, t \ = \ d_1(0)\,(1 + H\, t).$$

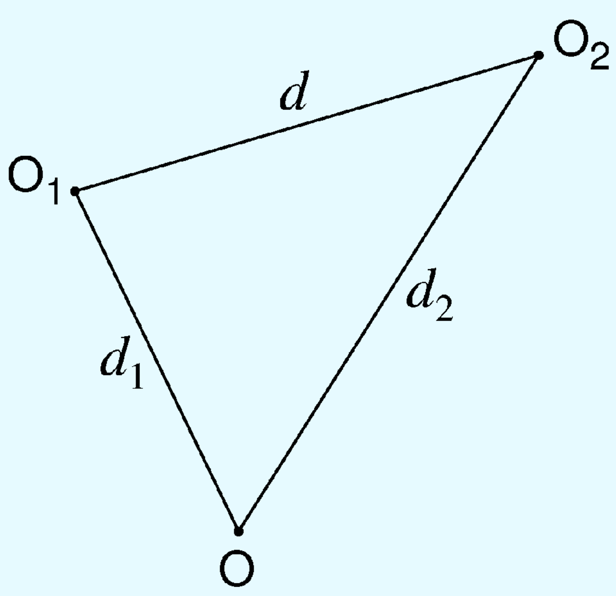
Lo stesso vale per d_2:

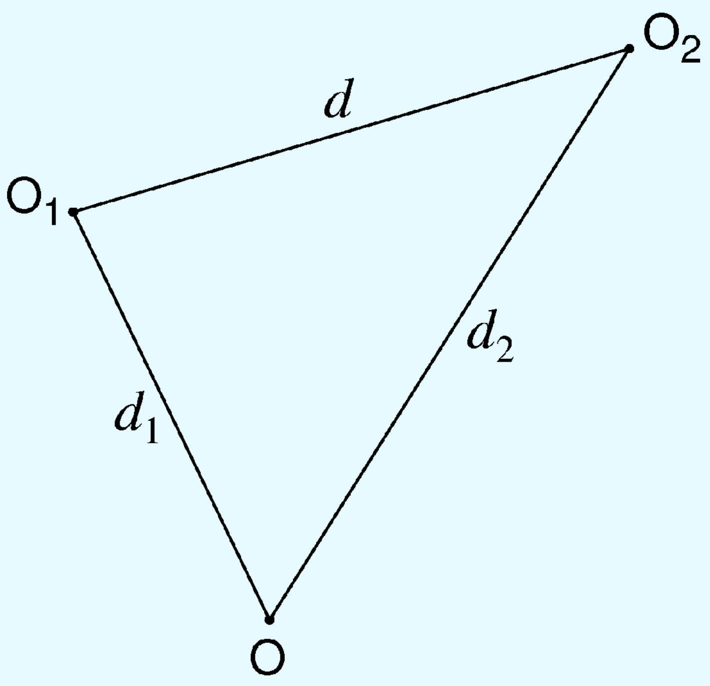
$$d_2(t) \ = \ d_2(0) + v_2\, t \ = \ d_2(0)\,(1 + H\, t).$$

Se quindi andiamo a rifare la figura al tempo t troviamo un nuovo triangolo *simile* a quello di prima, perché i due lati OO_1 e OO_2 si sono allungati in proporzione, e l'angolo compreso non è cambiato.

Ne segue che anche la distanza O_1O_2 *è cresciuta nella stessa proporzione*:

$$d(t) = d(0)\,(1 + H\,t).$$





Dunque anche gli astronomi della galassia 1 troverebbero la legge di Hubble, come l'abbiamo trovata noi.

E lo stesso vale per gli astronomi della galassia 2.

Nessuna di queste galassie occupa una *posizione privilegiata*: nessuno degli osservatori può dire che l'Universo si espande intorno a lui, e che lui sta al centro: *si tratta solo di un moto relativo*.