

Redshift

Utilizzando il più grande dei telescopi di Mount Wilson in California, verso la fine degli anni venti del Novecento Edwin Hubble divenne famoso per aver stimato le distanze approssimative di un gruppo di *nebuloase* (così venivano chiamate le galassie) grazie allo studio delle curve di luce delle stelle variabili Cefeidi¹, scoprendo anche che le galassie erano costituite da miliardi di stelle e con misure paragonabili alla nostra galassia, che quindi non poteva costituire l'intero universo come si credeva al tempo. Confermò inoltre, misurando lo spostamento verso il rosso delle righe di emissione negli spettri (*redshift*), che queste *nebuloase* sembravano allontanarsi da noi, con una velocità che aumentava con la distanza, secondo un parametro di proporzionalità $H(t_u)$ funzione del tempo, detto *parametro di Hubble*, indicato come H_0 e considerato costante se calcolato al valore attuale (cfr [Hubble, 1929]).

Lo scopritore del redshift di sorgenti cosmologiche e delle prime stime delle velocità di recessione (e di avvicinamento, per Andromeda) fu però Vesto Slipher (1875-1979) al Lowell Observatory in Arizona, che pubblicò nel 1913 il lavoro *The radial velocity of the Andromeda Nebula*, anche se non riuscì a dare una interpretazione sistematica delle velocità che aveva osservato. Le stime furono ripetute e ampliate in séguito anche da altri astronomi e analizzate teoricamente nei modelli cosmologici da Georges Lemaître (1894-1966). Lemaître pubblicò nel 1927, in francese, le sue congetture sulla singolarità iniziale e i modelli cosmologici di Einstein e di Willem De Sitter (1872-1934) e sull'espansione dell'universo come interpretazione del redshift²; il lavoro di Lemaître divenne noto solo quando fu ripubblicato in inglese nel 1931 da Arthur Eddington (1882-1944) col titolo *The expanding universe*, quando Eddington (uno degli astronomi più influenti dell'epoca) cambiò parere sulle idee di Lemaître che aveva inizialmente respinto senza approfondire³.

Interpretazione del redshift

Il redshift z , spostamento verso il rosso che si osserva nelle righe spettroscopiche di sorgenti cosmologiche, è definito come:

$$z \equiv \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{\lambda_0}{\lambda_e} - 1 \quad [1a]$$

$$z \equiv \frac{v_e - v_0}{v_0} = \frac{v_e}{v_0} - 1, \quad [1b]$$

¹ Le Cefeidi possono essere utilizzate come *standard candle* (sorgenti di luminosità nota) perché il loro periodo è proporzionale alla luminosità quindi alla magnitudine assoluta (M), che insieme a quella apparente (m) consente di ottenere la stima della distanza (d , in parsec) con il cosiddetto *modulo di distanza* (salvo assorbimento della radiazione da parte del mezzo intergalattico): $m - M = 5 \lg(d) - 5$

² [Lemaître, 1927]; egli le pubblicò dopo aver cercato invano di coinvolgere Einstein, che nella sua convinzione dell'universo statico lo respinse con la famosa affermazione: «I suoi calcoli sono corretti ma la parte fisica è abominevole»; citato da George Smoot (1945-) in [Smoot, 1993] edizione italiana pag. 49

³ Racconto di [Smoot, 1993] edizione italiana pag. 49-51

dove la lunghezza d'onda λ_e e la frequenza ν_e sono relative al momento dell'emissione del fotone e λ_0 e ν_0 sono quelle osservate⁴; tale redshift è comunemente interpretato come effetto Doppler lungo la LOS (line of sight), dovuto al movimento con velocità v della sorgente rispetto all'osservatore in un universo in espansione⁵:

$$z \approx \beta = v/c \quad \beta \ll 1 \text{ ovvero } v \ll c \quad [2a]$$

$$z = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} - 1 \quad \forall v < c. \quad [2b]$$

Nell'universo locale, ovvero a distanze significativamente inferiori al raggio di Hubble (circa 4.3 Gpc), la metrica applicabile è quella euclidea di Minkowski, dove gli effetti di curvatura sono localmente trascurabili, la coordinata temporale si suppone universale e il redshift è interpretato come effetto Doppler; per distanze maggiori si adotta la metrica spaziotemporale di Robertson-Walker, che considera le variazioni con il *fattore spaziale di scala* cosmico [3a], che portano al tradizionale redshift cosmologico:

$$z = \frac{R(t_0)}{R(t_e)} - 1 \quad \text{ovvero} \quad a(t_u) = \frac{R(t_u)}{R_0} = \frac{1}{1+z} \text{ [adimensionale]}. \quad [2c]$$

Poiché tutti gli oggetti cosmologici remoti sono visti allontanarsi, salvo moti propri, le osservazioni sono state considerate la conferma che l'universo fosse in espansione, quindi che tutte le distanze aumentassero e ne conseguissero le velocità misurate. La spiegazione classica (in due dimensioni) di questa interpretazione utilizza l'analogia del palloncino sul quale siano indicati dei riferimenti, che all'espandersi del palloncino si allontanano tutti reciprocamente (o in tre dimensioni l'analogia del panettone con l'uvetta, quando lievita).

Nella cosmologia tradizionale formalmente si presuppone, in base al *principio cosmologico*, un universo isotropo e omogeneo costituito da un *fluido cosmico* e l'esistenza di un *tempo universale* t_u per gli osservatori fondamentali comoventi; in questo universo si definisce un *fattore di scala* $a(t_u)$, funzione adimensionale del tempo t_u , che rappresenta la proporzionalità tra le grandezze $R(t_u)$ e R_0 quindi l'espansione relativa dell'universo:

$$a(t_u) \equiv \frac{R(t_u)}{R_0} \text{ [adimensionale]}, \quad [3a]$$

dove R_0 è il valore della lunghezza $R(t_u)$ per $t_u = t_0$ (il tempo attuale).

Una espansione radiale, ovvero una *distanza propria* tra eventi separati nel tempo, sarà espressa come:

⁴ Si adotta la convenzione che il pedice ₀ si riferisca sempre al tempo attuale e/o all'osservatore

⁵ Per velocità non trascurabili rispetto a c , il redshift deve essere corretto moltiplicandolo per il fattore di Lorentz $\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$ e dalla [2a], sommando 1 a entrambi i membri, si ottiene $1+z = (1+v/c)\gamma$ da cui la relazione [2b], che si ottiene anche dalla relazione relativistica $\nu_e = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \nu_0$, conseguente alla relazione più generale $\nu_e = \gamma(1+\beta \cos \theta) \nu_0$ tra le frequenze osservate ed emesse tra sorgenti in reciproco moto inerziale con velocità v , dove θ è l'angolo tra la LOS e la direzione di movimento della sorgente ($\theta=0$ per LOS cosmologica)

$$R(t_u) = r a(t_u) \text{ [m]} \quad [3b]$$

con r coordinata comovente⁶.

Per una trattazione formale si rimanda a [Landau e Lifšits, 1947], edizione italiana pag. pag. 470 e pag. 478-480, nel quale si evidenzia anche matematicamente come, in un universo euclideo infinito, la parziale *regione visibile* dello spazio rappresenti la sezione dello spaziotempo quadridimensionale tagliata dal *cono di luce*, che rappresenta quindi un orizzonte degli eventi conoscibili.

References

Hubble, 1929 - Edwin Hubble, *A Relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae* (National Academy of Sciences of the USA, Volume 15, Issue 3, pp. 168-173, 1929)

Landau e Lifšits, 1947 - Lev Landau e Evgenij Lifšits, *Fisica Teorica II, Teoria dei campi* (prima edizione Editori riuniti, 2076); edizione originale (Nauka, Mosca, 1947)

Lemaître, 1927 - Georges 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, 1927, A47, p. 49-59)

Smoot, 1993 - George Smoot e Keay Davidson, *Nelle pieghe del tempo. La scoperta dell'universo neonato* (CDE spa, 1995); edizione originale *Wrinkles in Time* (1993)

⁶ La distanza comovente tra due osservatori fondamentali è costante, mentre la distanza propria tra due osservatori fondamentali varia col tempo, secondo il fattore spaziale di scala $a(t_u)$