

Lo spostamento gravitazionale verso il rosso (Effetto Einstein).

Calcoleremo la variazione che subisce la frequenza della luce nel propagarsi sotto l'effetto di forze gravitazionali. Supponiamo che la luce giunga al pavimento di un laboratorio terrestre partendo dal soffitto.

Poiché l'altezza di un laboratorio è di pochi metri, possiamo considerarci in presenza di un campo sostanzialmente uniforme. Ciò permette di <<eliminare>> il campo gravitazionale, immaginando che all'istante in cui la luce viene emessa, al laboratorio venga impressa un'accelerazione g verso l'alto. Per il principio di equivalenza ciò non comporterà alcuna differenza nei fenomeni che hanno luogo nel laboratorio.

È possibile ora calcolare la variazione di frequenza che subisce la luce nel percorso dal soffitto al pavimento. Se h è l'altezza del laboratorio, la luce impiega un tempo $t = \frac{h}{c}$ per coprire la distanza. Mentre la luce sta viaggiando, il pavimento sviluppa una velocità $v = gt = \frac{gh}{c}$ diretta dal basso verso l'alto, e ciò fa sì che compaia un effetto Doppler nella frequenza della luce misurata al livello del pavimento, in conseguenza del quale è

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = +\frac{v}{c}.$$

Il segno più sta a indicare il fatto che, muovendosi il ricevitore "verso" la sorgente, la frequenza della luce risulta aumentata (corrispondendo a uno spostamento verso il violetto). Lo spostamento per effetto Doppler è dunque uno spostamento verso il violetto di ampiezza

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{gh}{c^2}, \quad (8)$$

Se ora torniamo al punto di vista gravitazionale, notiamo che gh è la "differenza di potenziale gravitazionale" che c'è fra sorgente e ricevitore. Se indichiamo questa differenza con $\delta\phi$, vediamo che la luce, viaggiando attraverso una differenza di potenziale gravitazionale $\delta\phi$, subisce una variazione di frequenza $\delta\phi/c^2$.

Questo effetto viene solitamente indicato come spostamento gravitazionale verso il rosso ("red shift" gravitazionale).

L'espressione "verso il rosso" venne usata originariamente perchè i primi tentativi di individuare l'effetto di spostamento vennero fatti sulla luce proveniente dal Sole e da un particolare tipo di stelle, le nane bianche; in questi casi la luce viaggia "in senso contrario" alla gravità, per cui la variazione di frequenze appare come uno spostamento verso il rosso. Se si osserva sulla Terra una riga spettrale emessa dal Sole, la sua frequenza dovrà dunque risultare spostata verso il rosso rispetto alla corrispondente riga emessa da una sorgente terrestre, e lo spostamento sarà dato da

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{\Phi_T - \Phi_S}{c^2}, \quad (9)$$

dove Φ_T è il valore del potenziale gravitazionale sulla Terra (praticamente trascurabile) e $\Phi_S = -\frac{GM_S}{R_S}$ sulla superficie del Sole. Il calcolo numerico porta al seguente risultato:

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{GM_S}{c^2 R_S} = 2,12 \cdot 10^{-6}, \quad (10)$$

corrispondente a un effetto Doppler di 0,636 km/s.

Le osservazioni esistenti non costituiscono però una verifica ottica veramente decisiva del principio di equivalenza. Il tentativo di usare le nane bianche per una verifica del principio di equivalenza fu “romantico ma deludente”.

Sirio B, la compagna di Sirio (α Canis Majoris) è una nana bianca che ha la massa pressoché uguale a quella del Sole, solo un cinquantesimo del suo raggio e densità 10^8 kg/m^3 , ovvero 100 t/dm^3 : ci si dovrebbe aspettare dunque un “red shift” cinquanta volte maggiore. Seguendo il suggerimento di Eddington, Adams misurò lo spostamento e annunciò che il risultato era prossimo a quello previsto teoricamente.

La notizia venne accolta con entusiasmo, ma, sfortunatamente, non sopravvisse a un serio esame critico: il valore dato da Adams al raggio di Sirio B era inattendibile, e lo spettro di Sirio B era così inestricabilmente mischiato con lo spettro di Sirio stessa che lo spostamento nelle righe di Sirio B non poteva essere misurato con sicurezza.

La stessa triste storia si verificò per le poche altre nane bianche prese in esame.

Ma nel 1958 un giovane fisico tedesco, **Rudolf Ludwig Mössbauer**, studiando l'emissione dei raggi γ [lunghezza d'onda λ compresa fra 10^{-4} e 10^{-2} nm ed energia del loro fotone $\varepsilon = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ (qui $h = 6,626075 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ è la costante di **Planck**) compresa fra 0,124 e 12,4 MeV], scoprì l'effetto che porta il suo nome e che consiste nel fatto che, operando a bassissime temperature, il quanto γ trasporta praticamente tutta l'energia emessa nella transizione del nucleo ed è pertanto in grado di indurre in un nucleo uguale a quello che lo ha emesso la stessa transizione in senso inverso (eccitazione). Se per una causa qualsiasi l'energia del quanto γ emesso varia anche di poco, esso non produrrà eccitazione e pertanto non verrà assorbito. Si ha in tal modo un mezzo di estrema sensibilità per mettere in evidenza ogni perturbazione che provoca una variazione di frequenza (e quindi di energia della radiazione emessa).

Sfruttando questo “effetto Mössbauer”, nel 1960 ad Harvard, **Robert Pound** e **Glen Rebka** effettuarono la verifica in laboratorio facendo cadere attraverso una distanza $h = 74 \text{ piedi} = 22,56 \text{ m}$ i raggi γ emessi da un campione radioattivo di ferro-57. La prevista variazione relativa della frequenza è

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = \frac{gh}{c^2} = 2,46 \cdot 10^{-15}.$$

Questa variazione è stata misurata con una precisione dell'1%. Dopo tante vicissitudini, lo spostamento di Einstein era infine stato rilevato sperimentalmente.