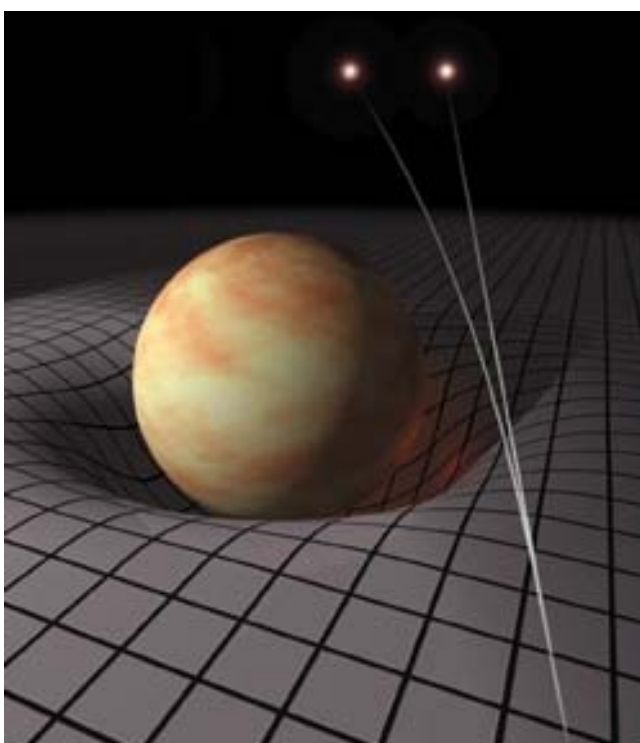


Orologi atomici e teoria della relatività

La teoria della relatività di Einstein, sia nella sua formulazione ristretta che in quella generale, descrive il mondo fisico come un continuo di spazio tempo, dove intervalli di spazio e di tempo, in verità eguali, possono apparire diversi ad osservatori che li misurino in condizioni di diversa velocità o in presenza di diverse masse gravitazionali. Detto altrimenti, la velocità relativa degli osservatori e la presenza di masse che generino campi gravitazionali, influenzano la percezione e la misura dello spazio e del tempo.



Essendo i campioni atomici di frequenza, quindi gli orologi atomici, soggetti alle stesse leggi, ci si può domandare se essi siano in grado di avvertire l'effetto della relatività einsteiniana e a quale livello.

I moderni orologi atomici sono in grado di mettere in rilievo effetti relativistici anche su scala terrestre, dentro i laboratori. Ancora maggiore è la visibilità degli effetti di relatività, se confrontiamo orologi posti ad altezze relative molto differenti, come possono essere orologi atomici a terra e orologi presenti a bordo di satelliti. Un caso particolare, ma di attualità, sono i sistemi di navigazione satellitare come lo statunitense Global Position System (GPS), che è fondato su misure d'intervallo di tempo tra osservatori a terra ed orologi atomici su satelliti, cioè in sostanza su misure di distanze.

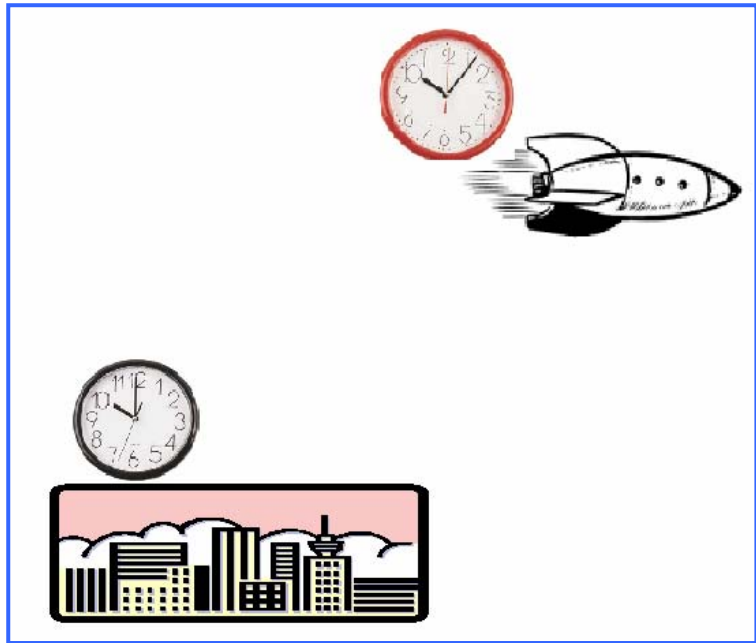
Illustriamo ora due tra i principali effetti relativistici, dovuti uno alla presenza della gravità terrestre (effetto di relatività generale), l'altro alla velocità relativa tra due diversi orologi (noto come effetto Doppler relativistico o del secondo ordine, effetto di relatività ristretta). La trattazione è volutamente semplificata, con il solo scopo di rendere un'idea quantitativa sulle entità degli effetti in gioco.

Rispetto ad un orologio fermo sulla superficie terrestre e posto al livello del mare, la frequenza ν dell'atomo di cesio dell'orologio posto sul satellite si sposta di una quantità relativa $\Delta\nu/\nu$ che risente dell'effetto gravitazionale e dell'effetto Doppler.

Il contributo di questi due effetti può essere espresso come:

$$\Delta\nu/\nu = \frac{g}{c^2} \frac{R_T}{h} (h - R_T) - v^2 / 2c^2$$

dove h è l'altezza in metri dell'orologio rispetto al centro della Terra, R_T è il raggio terrestre (~6400 Km), g è l'accelerazione di gravità (~ 9,8 m/s²), c la velocità della luce (~3·10⁸ m/s) e v la velocità relativa al sistema di riferimento considerato.



Consideriamo un orologio posto a terra e uno a bordo di un satellite GPS. Quest'ultimo si trova ad una altezza dal centro della Terra di ~27 000 Km, e si muove con velocità di ~3800 m/s, mentre l'orologio a Terra si trova a ~6400 Km dal centro e viaggia a ~465 m/s. Secondo la relazione riportata sopra, gli orologi manifesteranno tra di loro uno scarto relativo di frequenza, in valore assoluto, pari a circa $4.5 \cdot 10^{-10}$ ossia, nell'arco di tempo $t = 1$ giorno, l'indicazione dell'orologio sul satellite accumulerà uno scarto di tempo Δt , in valore assoluto, pari a:

$$\Delta t = \Delta\nu/\nu \cdot t \cong 4,5 \cdot 10^{-10} \cdot 86400 \text{ s} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cong 38,9 \text{ } \mu\text{s}$$

Convertendo ora questo ritardo Δt in "errore di distanza" Δs , mediante la relazione:

$$\Delta s = c \cdot \Delta t$$

dove Δt è lo scarto di tempo tra gli orologi, Δs quello di spazio e c la velocità della luce, si ottiene:

$$\Delta s = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot \Delta t = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} \cdot 38,9 \cdot 10^{-6} \text{ s} \cong 12 \text{ Km}$$

che costituisce un errore significativo nella distanza, e che si ripercuote poi nel calcolo della posizione dell'utente a terra.

Per questi motivi, gli orologi installati sui satelliti GPS vengono spostati in frequenza, prima del lancio, di una quantità tale da compensare lo scarto di frequenza atteso per l'orbita su cui verrà posizionato il satellite.

Con queste semplici considerazioni, si può vedere quanto le correzioni relativistiche siano importanti per gli orologi e per i loro impieghi nel campo della navigazione ed in altre attività industriali.