

Insegnare relatività nel XXI secolo

L'esperimento
di
Hafele e Keating

È il primo dei “nuovi esperimenti”, realizzato nel 1971.

Due orologi atomici sono stati montati su due aerei che facevano il giro del mondo: l'uno in senso orario, l'altro in senso antiorario (uno verso Est, l'altro verso Ovest).

Gli orologi erano stati sincronizzati alla partenza; quando atterrarono di nuovo all'aeroporto dal quale erano partiti, segnavano tempi diversi.

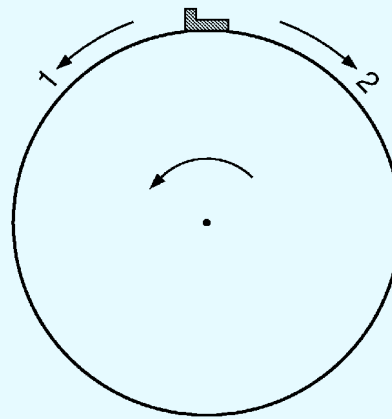
Più esattamente:

Alla fine del viaggio, durato un po' più di due giorni, l'orologio che aveva viaggiato verso Ovest era *avanti* rispetto all'altro di 332 ns.

Schematizziamo l'esperimento

In primo luogo supporremo che tutto il viaggio degli aerei si svolga *lungo l'equatore*.

Supponiamo poi che il moto degli aerei sia *uniforme* (con la stessa velocità per entrambi) e la *quota costante*; in particolare trascureremo le variazioni di quota al decollo e all'atterraggio.



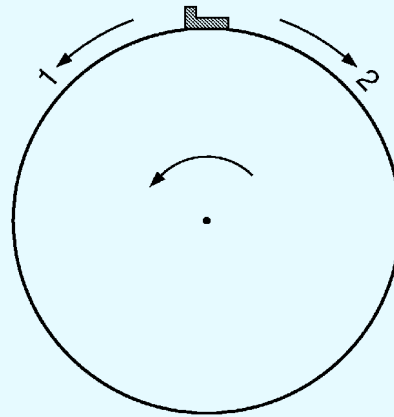
Gli orologi partono dall'aeroporto A posto all'equatore; l'orologio **1** gira in senso *antiorario*, l'orologio **2** in senso *orario*.

Quando ritornano in A, si confronta l'intervallo di tempo $\Delta\tau_1$ segnato dall'orologio **1** con quello $\Delta\tau_2$ segnato dall'orologio **2**.

L'esperimento mostra che

$$\Delta\tau_2 > \Delta\tau_1:$$

questo dobbiamo discutere e interpretare.



Una piccola divagazione

Ho detto “l'orologio 1 gira in senso antiorario” e forse non ci avete trovato niente da ridire.

Eppure qualcosa da dire c'è: avrei dovuto dire “gira in senso antiorario *guardando da Nord*”.

Allo stesso modo, sebbene sia corretto dire che la Terra *ruota da Ovest a Est*, non è altrettanto corretto dire che la rotazione è *antioraria*. Lo è solo se vista da Nord, mentre per chi la guardi da Sud è oraria.

Discussione dell'esperimento

Contro le apparenze, i due orologi *non sono in condizioni simmetriche*, causa la rotazione terrestre.

Sia **K** un RI che si muove insieme alla Terra ma senza ruotare: in **K** l'orologio **1** ha velocità *maggiore* di **2**.

Anzi: rispetto a **K** ambedue gli orologi *viaggiano verso Est*: infatti la velocità di un aereo normale è minore della velocità periferica della Terra.

All'equatore questa vale circa **460 m/s**, ben superiore alla velocità del suono; ma gli aerei di linea non sono supersonici!

La differenza fra i due aerei è che (sempre rispetto a **K**) uno viaggia più velocemente dell'altro, perché **1** *somma* la sua velocità a quella della Terra, mentre **2** *la sottrae*.

Il tempo segnato da un orologio dipende dal suo moto?

Il condizionamento dovuto alla tradizione spinge a leggere il risultato dell'esperimento H–K in un certo modo, che non è il migliore.

Questo è un punto centrale, che occorre esaminare attentamente.

È molto facile credere che l'esperimento dimostri che il tempo segnato da un orologio *dipende dal suo moto*.

La nostra discussione sarà centrata proprio su questo punto.

Il ritardo è genuino?

Un dubbio che può venire in mente è: come possiamo sapere che durante il viaggio sugli aerei gli orologi non siano stati disturbati in qualche modo?

È un problema presente in qualunque esperimento di fisica.

È giusto ricordare che agli esperimenti non si deve credere ciecamente: un esperimento può anche essere sbagliato, può essere stato fatto in condizioni scorrette.

Ma gli esperimenti significativi vengono verificati, analizzati, vagliati sotto tutti i punti di vista: alcuni resistono, altri no.

Se l'esperimento H–K ha retto alle critiche, conviene accettarne il risultato.

La marcia di un orologio non dipende dal suo moto

Perché non si può dire che il tempo segnato dall'orologio dipende dalla velocità dell'aereo?

In primo luogo, *per il PR*.

Questo ci obbliga a dire che *ogni orologio che sta in un RI è uguale a qualunque altro*.

Non ci può essere nessuna differenza tra i due: altrimenti l'esperimento ci permetterebbe di determinare lo stato di moto di un orologio.

La seconda controindicazione è che in tal modo si apre la strada a una serie di fraintendimenti filosofici (presunto ruolo dell' "osservatore", soggettività dei dati dell'esperienza, ecc.) che non hanno niente a che fare con la fisica, ed è bene tenere lontani il più possibile.

Ma soprattutto:

Qui non stiamo discutendo il classico caso di due orologi in moto relativo uniforme, osservati dal rif. in cui uno è fermo e l'altro è in moto.

Qui ci sono sì due orologi, ma nel momento in cui li confrontiamo – alla partenza e all'arrivo – essi sono in *quiete relativa*: entrambi fermi all'aeroporto.

Quest'osservazione apre però la porta a un'obiezione più fondamentale.

Visto che partono e arrivano insieme, *i due orologi non possono trovarsi entrambi in RI*, che per definizione sono in moto relativo TRU.

A dire il vero, i RI di cui ho appena parlato sono quelli newtoniani.

Resterebbe aperta la possibilità che due RI in caduta libera possano effettivamente rincontrarsi.

In casi speciali ciò accade, ma non ce ne dobbiamo preoccupare: di sicuro i nostri aerei *non sono in caduta libera!*

Gli orologi di H–K non sono in riferimenti inerziali!

Ma se un aereo che viaggia intorno alla Terra non è un RI, il richiamo al PR è *fuori luogo*.

Ragioniamo...

È senz'altro vero che gli orologi sono accelerati, con accelerazione v^2 / R (se v è la velocità rispetto a **K**).

A conti fatti, le accelerazioni sono risp. 0.07 m/s^2 e 0.009 m/s^2 : in entrambi i casi piccole rispetto a g , oltre un fattore 100 (il che prova che non sono in caduta libera).

Ma nemmeno un orologio fermo sulla Terra è in caduta libera; perciò la vera domanda diventa questa: *che effetto ha sugli orologi atomici usati da Hafele e Keating, il fatto che gli aerei sono accelerati?*

Chiediamo aiuto al PE

L'effetto di tali accelerazioni sarà del tutto equivalente a quello di una variazione di g .

Nel nostro caso, una variazione inferiore all'1%.

(Infatti sugli aerei agisce anche la forza di gravità: l'accelerazione ha solo l'effetto di cambiarne un po' il valore).

Ma noi sappiamo che la marcia un orologio atomico è influenzata *in modo trascurabile* da variazioni di g di quell'ordine.

Quindi la risposta è **no**: *a questo livello gli effetti dell'accelerazione degli aerei sono irrilevanti.*

La relatività è una

Qui si vede, su un esempio concreto ma fondamentale, che cosa vuol dire che *la relatività è una*.

Non si può discutere un problema come questo, che tradizionalmente sarebbe considerato di RR, senza far uso del PE, ossia senza idee che appartengono alla RG.

Riepilogando

Il moto, nel senso di moto uniforme dell'aereo, non ha effetto grazie al PR.

L'accelerazione centripeta del rif. possiamo ritenerla equivalente alla forza di gravità.

L'effetto di questa sull'orologio possiamo studiarlo in laboratorio e mostrare che è trascurabile.

Il tempo assoluto non esiste

Torniamo dunque all'esperimento.

Sappiamo che gli orologi vanno bene, che non ci sono ragioni fisiche perché non debbano segnare il tempo giusto.

Quindi se nell'esperimento H–K i due orologi, *partiti d'accordo*, ritornano segnando *tempi diversi*, non si può più parlare di *tempo assoluto*.

Ciascun orologio segna *il suo tempo*, che dipende dal modo come esso percorre lo spazio-tempo.

Un'analogia: i percorsi stradali

(È un'analogia che vale molto di più di quanto può sembrare a prima vista...)

È ovvio che non c'è una sola distanza fra due città: *dipende dalla strada*.

Non ci verrà certo in mente di dire che il contachilometri della nostra macchina funziona diversamente a seconda della strada che facciamo: è la lunghezza del percorso che *non è assoluta*.

Da una città all'altra si può andare per più strade (concettualmente infinite) e *ciascun percorso ha una sua lunghezza*.

Nessuno ci trova niente di strano, perché ci siamo abituati per lunga esperienza.

Ora stiamo scoprendo che *con lo spazio-tempo succede la stessa cosa.*

Fissati due punti dello spazio-tempo, *esistono infiniti percorsi* (ossia moti di corpi) che li uniscono, e ciascuno ha una sua “lunghezza” (leggi: *tempo segnato dall'orologio*).

È questo il quadro concettuale che in relatività *sostituisce il tempo assoluto* newtoniano.