

La misura degli intervalli di tempo: teoria ed esperimento

Giuseppe Giuliani

<http://fisica.unipv.it/percorsi>

AIF, XIX Scuola di Storia della Fisica

2 marzo 2021

- Il formalismo spazio - temporale sarà usato solo per delineare la trattazione del tempo nella relatività generale

Premessa

- Il formalismo spazio - temporale sarà usato solo per delineare la trattazione del tempo nella relatività generale
- La luce verrà considerata come composta da fotoni

Premessa

- Il formalismo spazio - temporale sarà usato solo per delineare la trattazione del tempo nella relatività generale
- La luce verrà considerata come composta da fotoni
- Quindi. . .

- Il formalismo spazio - temporale sarà usato solo per delineare la trattazione del tempo nella relatività generale
- La luce verrà considerata come composta da fotoni
- Quindi...
- ...l'effetto Doppler e l'effetto della gravità sugli orologi atomici verranno trattati come problemi di dinamica relativistica [emissione e assorbimento di fotoni da parte di atomi in moto e/o in un campo gravitazionale]

- Il formalismo spazio - temporale sarà usato solo per delineare la trattazione del tempo nella relatività generale
- La luce verrà considerata come composta da fotoni
- Quindi...
- ...l'effetto Doppler e l'effetto della gravità sugli orologi atomici verranno trattati come problemi di dinamica relativistica [emissione e assorbimento di fotoni da parte di atomi in moto e/o in un campo gravitazionale]
- Per una rivisitazione delle descrizioni ondulatoria e corpuscolare della luce, si può vedere [Buonaura, Giuliani](#)

Il tempo: che cosa è. I

- Il concetto di tempo è stato sviluppato dalla specie umana per descrivere il cambiamento delle cose

Il tempo: che cosa è. I

- Il concetto di tempo è stato sviluppato dalla specie umana per descrivere il cambiamento delle cose
- Si è valutato che i testi (articoli o libri) pubblicati tra il 1900 e il 1980 e potenzialmente rilevanti per uno studio sistematico del concetto di tempo siano circa 65000 [Fraser J., Report on the Literature of Time, in: Fraser J, Lawrence N, Park D., (ed.), *The Study of Time* IV, Springer - Verlag 1981, p. 234 - 270.

Il tempo: che cosa è. I

- Il concetto di tempo è stato sviluppato dalla specie umana per descrivere il cambiamento delle cose
- Si è valutato che i testi (articoli o libri) pubblicati tra il 1900 e il 1980 e potenzialmente rilevanti per uno studio sistematico del concetto di tempo siano circa 65000 [Fraser J., Report on the Literature of Time, in: Fraser J, Lawrence N, Park D., (ed.), *The Study of Time* IV, Springer - Verlag 1981, p. 234 - 270.
- Una breve, ma densa sinossi degli studi sul concetto di tempo in fisica si trova in: Jammer M, Concepts of Time in Physics: A Synopsis, *Phys. Perspect.* 9 2007 266 - 280

Il tempo: che cosa è. I

- Il concetto di tempo è stato sviluppato dalla specie umana per descrivere il cambiamento delle cose
- Si è valutato che i testi (articoli o libri) pubblicati tra il 1900 e il 1980 e potenzialmente rilevanti per uno studio sistematico del concetto di tempo siano circa 65000 [Fraser J., Report on the Literature of Time, in: Fraser J, Lawrence N, Park D., (ed.), *The Study of Time* IV, Springer - Verlag 1981, p. 234 - 270.
- Una breve, ma densa sinossi degli studi sul concetto di tempo in fisica si trova in: Jammer M, Concepts of Time in Physics: A Synopsis, *Phys. Perspect.* 9 2007 266 - 280
- Le prime riflessioni sul tempo almeno parzialmente indipendenti da credenze religiose sono dovute ai filosofi greci

Il tempo: che cosa è. I

- Il concetto di tempo è stato sviluppato dalla specie umana per descrivere il cambiamento delle cose
- Si è valutato che i testi (articoli o libri) pubblicati tra il 1900 e il 1980 e potenzialmente rilevanti per uno studio sistematico del concetto di tempo siano circa 65000 [Fraser J., Report on the Literature of Time, in: Fraser J, Lawrence N, Park D., (ed.), *The Study of Time* IV, Springer - Verlag 1981, p. 234 - 270.
- Una breve, ma densa sinossi degli studi sul concetto di tempo in fisica si trova in: Jammer M, Concepts of Time in Physics: A Synopsis, *Phys. Perspect.* 9 2007 266 - 280
- Le prime riflessioni sul tempo almeno parzialmente indipendenti da credenze religiose sono dovute ai filosofi greci
- Tuttavia, l'intreccio tra riflessioni sul tempo e credenze religiose persiste sino al XVII secolo

Il tempo: che cosa è. II

- Anche il tempo non esiste di per sé, ma dalle cose stesse deriva il senso di ciò che si è svolto, di ciò che è presente, di ciò che seguirà. Bisogna riconoscere che nessuno avverte il tempo di per sé, separato dal movimento e dalla placida quiete delle cose. [Lucrezio, De Rerum Natura, libro I, 459 - 463, I sec. a. C.].

Il tempo: che cosa è. II

- Anche il tempo non esiste di per sé, ma dalle cose stesse deriva il senso di ciò che si è svolto, di ciò che è presente, di ciò che seguirà. Bisogna riconoscere che nessuno avverte il tempo di per sé, separato dal movimento e dalla placida quiete delle cose. [Lucrezio, De Rerum Natura, libro I, 459 - 463, I sec. a. C.].
- Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione con alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamato durata. [Isaac Newton, Princìpi matematici della filosofia naturale, 1687].

Il tempo: che cosa è. II

- Anche il tempo non esiste di per sé, ma dalle cose stesse deriva il senso di ciò che si è svolto, di ciò che è presente, di ciò che seguirà. Bisogna riconoscere che nessuno avverte il tempo di per sé, separato dal movimento e dalla placida quiete delle cose. [Lucrezio, De Rerum Natura, libro I, 459 - 463, I sec. a. C.].
- Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione con alcunché di esterno, scorre uniformemente, e con altro nome è chiamato durata. [Isaac Newton, Princîpi matematici della filosofia naturale, 1687].
- Il tempo relativo, apparente e volgare, è una misura (esatta o inesatta) sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo: tali sono l'ora, il giorno, il mese, l'anno. [Isaac Newton, Princîpi matematici della filosofia naturale, 1687].

Il tempo: che cosa è. III

- Il tempo del primo capitolo è il tempo della nostra intuizione. Esso è, pertanto, una grandezza tale che le variazioni delle altre grandezze possono essere considerate come dipendenti dalla sua variazione; mentre esso è, di per sé, una variabile indipendente. [Heinrich Hertz, I principî della meccanica presentati in una nuova forma, 1899]

Il tempo: che cosa è. III

- Il tempo del primo capitolo è il tempo della nostra intuizione. Esso è, pertanto, una grandezza tale che le variazioni delle altre grandezze possono essere considerate come dipendenti dalla sua variazione; mentre esso è, di per sé, una variabile indipendente. [Heinrich Hertz, I principî della meccanica presentati in una nuova forma, 1899]
- Se vogliamo descrivere il moto di un punto materiale, diamo i valori delle sue coordinate in funzione del tempo. [Albert Einstein, Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento, 1905]

Il tempo: che cosa è. IV

- Il tempo è una **variabile matematica indipendente** con cui descriviamo la variazione del valore di una grandezza fisica in un punto dello spazio.

Il tempo: che cosa è. IV

- Il tempo è una **variabile matematica indipendente** con cui descriviamo la variazione del valore di una grandezza fisica in un punto dello spazio.
- Sperimentalmente, essa è **generata e mostrata da un orologio**.

Il tempo: che cosa è. IV

- Il tempo è una **variabile matematica indipendente** con cui descriviamo la variazione del valore di una grandezza fisica in un punto dello spazio.
- Sperimentalmente, essa è **generata e mostrata da un orologio**.
- Un orologio **NON** misura alcuna proprietà di qualcosa distinto dall'orologio.

Il tempo: che cosa è. IV

- Il tempo è una **variabile matematica indipendente** con cui descriviamo la variazione del valore di una grandezza fisica in un punto dello spazio.
- Sperimentalmente, essa è **generata e mostrata da un orologio**.
- Un orologio **NON** misura alcuna proprietà di qualcosa distinto dall'orologio.
- Esso mostra solo il valore della **variabile tempo** generata dall'orologio stesso.

Il tempo: che cosa è. IV

- Il tempo è una **variabile matematica indipendente** con cui descriviamo la variazione del valore di una grandezza fisica in un punto dello spazio.
- Sperimentalmente, essa è **generata e mostrata da un orologio**.
- Un orologio **NON** misura alcuna proprietà di qualcosa distinto dall'orologio.
- Esso mostra solo il valore della **variabile tempo** generata dall'orologio stesso.
- Con un orologio misuriamo la durata di un fenomeno che si svolge nelle vicinanze dell'orologio (nel punto in cui si trova l'orologio).

Come è fatto un orologio. Orologio a pendolo.

- Ogni orologio utilizza una **frequenza campione**, un **contatore** e un **sistema di visualizzazione** del conteggio effettuato dal contatore.

Come è fatto un orologio. Orologio a pendolo.

- Ogni orologio utilizza una **frequenza campione**, un **contatore** e un **sistema di visualizzazione** del conteggio effettuato dal contatore.
- In un orologio a pendolo, **la frequenza campione** è data dall'inverso del periodo di oscillazione del pendolo. . .

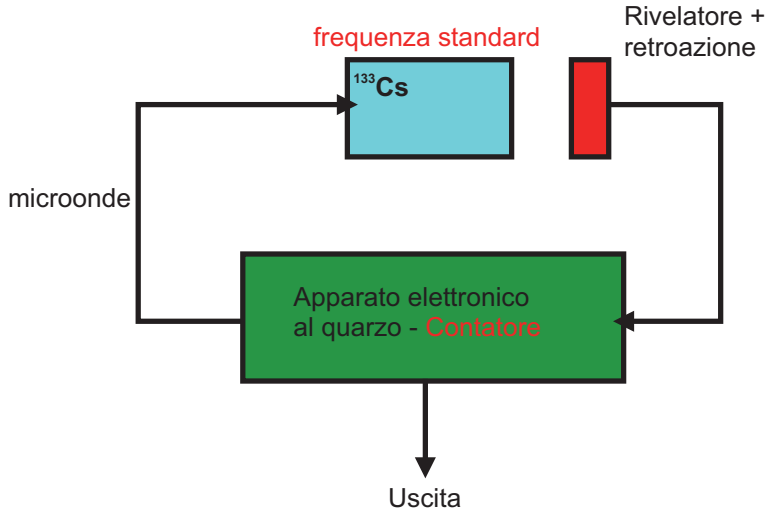
Come è fatto un orologio. Orologio a pendolo.

- Ogni orologio utilizza una **frequenza campione**, un **contatore** e un **sistema di visualizzazione** del conteggio effettuato dal contatore.
- In un orologio a pendolo, **la frequenza campione** è data dall'inverso del periodo di oscillazione del pendolo. . .
- . . . **il contatore** è costituito da un sistema meccanico che trasforma il conteggio delle oscillazioni complete del pendolo nel movimento discreto delle lancette. . .

Come è fatto un orologio. Orologio a pendolo.

- Ogni orologio utilizza una **frequenza campione**, un **contatore** e un **sistema di visualizzazione** del conteggio effettuato dal contatore.
- In un orologio a pendolo, **la frequenza campione** è data dall'inverso del periodo di oscillazione del pendolo. . .
- . . . **il contatore** è costituito da un sistema meccanico che trasforma il conteggio delle oscillazioni complete del pendolo nel movimento discreto delle lancette. . .
- . . . le lancette costituiscono il **sistema di visualizzazione**.

Orologio al ^{133}Cs .



Come è fatto un orologio. Orologio al ^{133}Cs .

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione assorbita dalla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale **imperturbato** del ^{133}Cs ...

Come è fatto un orologio. Orologio al ^{133}Cs .

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione assorbita dalla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale **imperturbato** del ^{133}Cs . . .
- . . . **il contatore** è costituito da una lamina di quarzo la cui frequenza di vibrazione è bloccata – per contro - reazione – dal segnale di assorbimento da parte del vapore di cesio . . .

Come è fatto un orologio. Orologio al ^{133}Cs .

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione assorbita dalla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale **imperturbato** del ^{133}Cs . . .
- . . . **il contatore** è costituito da una lamina di quarzo la cui frequenza di vibrazione è bloccata – per contro - reazione – dal segnale di assorbimento da parte del vapore di cesio . . .
- . . . **il visualizzatore** è digitale.

Come è fatto un orologio. Orologio al ^{133}Cs .

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione assorbita dalla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale **imperturbato** del ^{133}Cs . . .
- . . . **il contatore** è costituito da una lamina di quarzo la cui frequenza di vibrazione è bloccata – per contro - reazione – dal segnale di assorbimento da parte del vapore di cesio . . .
- . . . **il visualizzatore** è digitale.
- Il secondo, unità di tempo nel sistema SI, è **la durata di 9 192 631 770 periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale imperturbato dell'atomo di ^{133}Cs .**

Orologio a ione singolo

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione **assorbita** da **uno** ione intrappolato a basse temperature. . .

Orologio a ione singolo

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione **assorbita** da **uno** ione intrappolato a basse temperature. . .
- . . . **il contatore** è costituito dalla luce laser che eccita lo ione . . .

Orologio a ione singolo

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione **assorbita** da **uno** ione intrappolato a basse temperature. . .
- . . . **il contatore** è costituito dalla luce laser che eccita lo ione . . .
- . . . Questa frequenza è 'bloccata' da un circuito di contro - reazione, sensibile all'assorbimento del fotone da parte dello ione. . .

Orologio a ione singolo

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione **assorbita** da **uno** ione intrappolato a basse temperature. . .
- . . . **il contatore** è costituito dalla luce laser che eccita lo ione . . .
- . . . Questa frequenza è 'bloccata' da un circuito di contro - reazione, sensibile all'assorbimento del fotone da parte dello ione. . .
- . . . **il visualizzatore** è digitale.

Orologio a ione singolo

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione **assorbita** da **uno** ione intrappolato a basse temperature. . .
- . . . **il contatore** è costituito dalla luce laser che eccita lo ione . . .
- . . . Questa frequenza è 'bloccata' da un circuito di contro - reazione, sensibile all'assorbimento del fotone da parte dello ione. . .
- . . . **il visualizzatore** è digitale.
- L'accuratezza di questi orologi è dell'ordine di 10^{-18}

Orologio a ione singolo

- La **frequenza campione** è costituita dalla frequenza della radiazione **assorbita** da **uno** ione intrappolato a basse temperature. . .
- . . . **il contatore** è costituito dalla luce laser che eccita lo ione . . .
- . . . Questa frequenza è 'bloccata' da un circuito di contro - reazione, sensibile all'assorbimento del fotone da parte dello ione. . .
- . . . **il visualizzatore** è digitale.
- L'accuratezza di questi orologi è dell'ordine di 10^{-18}
- Questa accuratezza corrisponde alla deviazione di circa un secondo sull'età dell'Universo.

Classi di orologi

- Possiamo individuare quattro classi di orologi artificiali:

Classi di orologi

- Possiamo individuare quattro classi di orologi artificiali:
- orologi a pendolo

Classi di orologi

- Possiamo individuare quattro classi di orologi artificiali:
- orologi a pendolo
- orologi a molla

Classi di orologi

- Possiamo individuare quattro classi di orologi artificiali:
- orologi a pendolo
- orologi a molla
- orologi al quarzo

Classi di orologi

- Possiamo individuare quattro classi di orologi artificiali:
- orologi a pendolo
- orologi a molla
- orologi al quarzo
- orologi che utilizzano la radiazione elettromagnetica come campione di frequenza...

Classi di orologi

- Possiamo individuare quattro classi di orologi artificiali:
- orologi a pendolo
- orologi a molla
- orologi al quarzo
- orologi che utilizzano la radiazione elettromagnetica come campione di frequenza...
- ...tra questi: orologi atomici, orologi ottici, orologi basati su maser o cavità risonanti.

Criteri per la costruzione di orologi

- Non ci sono prescrizioni riguardanti la costruzione degli orologi ad eccezione di quella, essenziale, che i valori della variabile tempo generati debbono riflettere il più accuratamente possibile l'omogeneità della variabile matematica t . Per soddisfare al meglio questa condizione si confrontano differenti classi di orologi e la classe migliore è scelta sulla base di una valutazione empirica guidata dalle teorie che descrivono il funzionamento di ogni classe di orologi.

Orologi ideali ed orologi reali

- Definiamo **ideale** un orologio il cui periodo fondamentale non è modificato da alcuna interazione fisica.

Orologi ideali ed orologi reali

- Definiamo **ideale** un orologio **il cui periodo fondamentale non è modificato da alcuna interazione fisica**.
- Gli orologi considerati, direttamente o indirettamente, nelle teorie fisiche sono orologi ideali.

Orologi ideali ed orologi reali

- Definiamo **ideale** un orologio **il cui periodo fondamentale non è modificato da alcuna interazione fisica**.
- Gli orologi considerati, direttamente o indirettamente, nelle teorie fisiche sono orologi ideali.
- Costituisce un'importante eccezione la teoria della relatività generale: questa teoria richiede di considerare la dipendenza del periodo fondamentale di un orologio dalla gravità anche a livello teorico.

Orologi ideali ed orologi reali

- Definiamo **ideale** un orologio **il cui periodo fondamentale non è modificato da alcuna interazione fisica**.
- Gli orologi considerati, direttamente o indirettamente, nelle teorie fisiche sono orologi ideali.
- Costituisce un'importante eccezione la teoria della relatività generale: questa teoria richiede di considerare la dipendenza del periodo fondamentale di un orologio dalla gravità anche a livello teorico.
- Il fatto che gli orologi usati negli esperimenti siano orologi reali è una questione che riguarda gli sperimentatori: è compito loro tenere conto dell'influenza dell'ambiente fisico sul funzionamento degli orologi usati.

La velocità limite c .

- La proprietà fondamentale che caratterizza la cinematica e la dinamica relativistica è l'esistenza di una **velocità limite**: la velocità c della luce nel vuoto.

La velocità limite c .

- La proprietà fondamentale che caratterizza la cinematica e la dinamica relativistica è l'esistenza di una **velocità limite**: la velocità c della luce nel vuoto.
- È possibile costruire la cinematica relativistica studiando lo scambio di lampi di luce di durata idealmente nulla tra due orologi O ed O' in moto relativo rettilineo uniforme.

La velocità limite c .

- La proprietà fondamentale che caratterizza la cinematica e la dinamica relativistica è l'esistenza di una **velocità limite**: la velocità c della luce nel vuoto.
- È possibile costruire la cinematica relativistica studiando lo scambio di lampi di luce di durata idealmente nulla tra due orologi O ed O' in moto relativo rettilineo uniforme.
- Si ricavano così le formule della dilatazione del tempo, della contrazione delle lunghezze e le trasformazioni di coordinate di Lorentz.

Relatività speciale senza l'ipotesi dell'invarianza della velocità della luce. I

- Ipotesi: omogeneità e isotropia dello spazio, omogeneità della variabile 'tempo', principio di relatività cinematico.

Relatività speciale senza l'ipotesi dell'invarianza della velocità della luce. I

- Ipotesi: omogeneità e isotropia dello spazio, omogeneità della variabile 'tempo', principio di relatività cinematico.

-

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1 + V^2/\alpha}} (x - Vt)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 + V^2/\alpha}} \left(t + \frac{V}{\alpha} x \right)$$

(1)

dove α è un parametro diverso da zero, avente le dimensioni di una velocità al quadrato.

Relatività speciale senza l'ipotesi dell'invarianza della velocità della luce. II

- Se $\alpha < 0$, posto $\alpha = -\kappa^2$, le equazioni di trasformazione delle coordinate diventano quelle di Lorentz con la velocità limite κ al posto di c .

Relatività speciale senza l'ipotesi dell'invarianza della velocità della luce. II

- Se $\alpha < 0$, posto $\alpha = -\kappa^2$, le equazioni di trasformazione delle coordinate diventano quelle di Lorentz con la velocità limite κ al posto di c .
- Invece, se $\alpha > 0$, non c'è velocità limite ed è violato il principio di causalità: l'effetto precede la causa.

Relatività speciale senza l'ipotesi dell'invarianza della velocità della luce. II

- Se $\alpha < 0$, posto $\alpha = -\kappa^2$, le equazioni di trasformazione delle coordinate diventano quelle di Lorentz con la velocità limite κ al posto di c .
- Invece, se $\alpha > 0$, non c'è velocità limite ed è violato il principio di causalità: l'effetto precede la causa.
- Se si trovasse una velocità superiore a quella della luce, la relatività speciale sarebbe ancora valida.

Relatività speciale senza l'ipotesi dell'invarianza della velocità della luce. II

- Se $\alpha < 0$, posto $\alpha = -\kappa^2$, le equazioni di trasformazione delle coordinate diventano quelle di Lorentz con la velocità limite κ al posto di c .
- Invece, se $\alpha > 0$, non c'è velocità limite ed è violato il principio di causalità: l'effetto precede la causa.
- Se si trovasse una velocità superiore a quella della luce, la relatività speciale sarebbe ancora valida.
- Cambierebbe però gran parte della Fisica, a partire dall'Elettromagnetismo.

Relatività speciale senza l'ipotesi dell'invarianza della velocità della luce. II

- Se $\alpha < 0$, posto $\alpha = -\kappa^2$, le equazioni di trasformazione delle coordinate diventano quelle di Lorentz con la velocità limite κ al posto di c .
- Invece, se $\alpha > 0$, non c'è velocità limite ed è violato il principio di causalità: l'effetto precede la causa.
- Se si trovasse una velocità superiore a quella della luce, la relatività speciale sarebbe ancora valida.
- Cambierebbe però gran parte della Fisica, a partire dall'Elettromagnetismo.
- Vi ricordate i neutrini che corrono dal CERN al Gran Sasso?

Relatività speciale senza l'ipotesi dell'invarianza della velocità della luce. II

- Se $\alpha < 0$, posto $\alpha = -\kappa^2$, le equazioni di trasformazione delle coordinate diventano quelle di Lorentz con la velocità limite κ al posto di c .
- Invece, se $\alpha > 0$, non c'è velocità limite ed è violato il principio di causalità: l'effetto precede la causa.
- Se si trovasse una velocità superiore a quella della luce, la relatività speciale sarebbe ancora valida.
- Cambierebbe però gran parte della Fisica, a partire dall'Elettromagnetismo.
- Vi ricordate i neutrini che corrono dal CERN al Gran Sasso?
- La dichiarazione più “incauta” non fu quella di Mariastella Gelmini...

Dilatazione del tempo.



$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \Delta t' = \Gamma \Delta t'$$

Dilatazione del tempo.



$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \Delta t' = \Gamma \Delta t'$$

- $\Delta t'$ è la durata di un fenomeno che si svolge nel punto in cui si trova l'orologio O' : è la **durata propria** del fenomeno.

Dilatazione del tempo.



$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \Delta t' = \Gamma \Delta t'$$

- $\Delta t'$ è la durata di un fenomeno che si svolge nel punto in cui si trova l'orologio O': è la **durata propria** del fenomeno.
- O' informa O – inviando verso O un lampo di luce di durata nulla quando inizia il fenomeno e quando esso finisce.

Dilatazione del tempo.



$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \Delta t' = \Gamma \Delta t'$$

- $\Delta t'$ è la durata di un fenomeno che si svolge nel punto in cui si trova l'orologio O': è la **durata propria** del fenomeno.
- O' informa O – inviando verso O un lampo di luce di durata nulla quando inizia il fenomeno e quando esso finisce.
- O, sulla base delle informazioni ricevute, calcola che la durata del fenomeno – che si svolge lungo un segmento di retta – è data da Δt : la durata del fenomeno appare dilatata.

Dilatazione del tempo.



$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \Delta t' = \Gamma \Delta t'$$

- $\Delta t'$ è la durata di un fenomeno che si svolge nel punto in cui si trova l'orologio O': è la **durata propria** del fenomeno.
- O' informa O – inviando verso O un lampo di luce di durata nulla quando inizia il fenomeno e quando esso finisce.
- O, sulla base delle informazioni ricevute, calcola che la durata del fenomeno – che si svolge lungo un segmento di retta – è data da Δt : la durata del fenomeno appare dilatata.
- I due orologi sono equivalenti: se O informa O' della durata di un fenomeno che si svolge nel punto in cui si trova O (**durata propria**), allora O' calcola, sulla base delle informazioni ricevute che:

$$\Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \Delta t = \Gamma \Delta t$$

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Stark e Einstein, 1905 circa.

- Johannes Stark misurò nel 1905 lo spostamento Doppler al primo ordine in V/c di alcune righe emesse da atomi di idrogeno in volo.

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Stark e Einstein, 1905 circa.

- Johannes Stark misurò nel 1905 lo spostamento Doppler al primo ordine in V/c di alcune righe emesse da atomi di idrogeno in volo.
- Nel 1907, Einstein citando il lavoro di Stark, mostra come la relatività speciale possa predire questo fenomeno.

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Stark e Einstein, 1905 circa.

- Johannes Stark misurò nel 1905 lo spostamento Doppler al primo ordine in V/c di alcune righe emesse da atomi di idrogeno in volo.
- Nel 1907, Einstein citando il lavoro di Stark, mostra come la relatività speciale possa predire questo fenomeno.
- Einstein considera **un atomo in moto come un orologio** e...

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Stark e Einstein, 1905 circa.

- Johannes Stark misurò nel 1905 lo spostamento Doppler al primo ordine in V/c di alcune righe emesse da atomi di idrogeno in volo.
- Nel 1907, Einstein citando il lavoro di Stark, mostra come la relatività speciale possa predire questo fenomeno.
- Einstein considera **un atomo in moto come un orologio** e...
- “Come ho mostrato in un precedente lavoro, da questi principi segue che il ritmo di un orologio in moto uniforme è più lento **se valutato da un sistema [di riferimento] ‘stazionario’**”.

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Stark e Einstein, 1905 circa.

- Johannes Stark misurò nel 1905 lo spostamento Doppler al primo ordine in V/c di alcune righe emesse da atomi di idrogeno in volo.
- Nel 1907, Einstein citando il lavoro di Stark, mostra come la relatività speciale possa predire questo fenomeno.
- Einstein considera **un atomo in moto come un orologio** e...
- “Come ho mostrato in un precedente lavoro, da questi principi segue che il ritmo di un orologio in moto uniforme è più lento **se valutato da un sistema [di riferimento] ‘stazionario’**”.
- Pertanto, “se ν denota il numero di battiti dell’orologio per unità di tempo secondo l’osservatore in quiete e ν_0 il numero corrispondente per l’osservatore co - movente, allora:

$$\frac{\nu}{\nu_0} = \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Ives e Stilwell, 1938

- Come osservato da Einstein, il fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ caratterizza la dilatazione del tempo.

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Ives e Stilwell, 1938

- Come osservato da Einstein, il fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ caratterizza la dilatazione del tempo.
- Le verifiche sperimentali si propongono quindi di misurare questo fattore.

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Ives e Stilwell, 1938

- Come osservato da Einstein, il fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ caratterizza la dilatazione del tempo.
- Le verifiche sperimentali si propongono quindi di misurare questo fattore.
- La prima verifica sperimentale è dovuta a Ives e Stilwell, 1938.

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Ives e Stilwell, 1938

- Come osservato da Einstein, il fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ caratterizza la dilatazione del tempo.
- Le verifiche sperimentali si propongono quindi di misurare questo fattore.
- La prima verifica sperimentale è dovuta a Ives e Stilwell, 1938.
- Ives e Stilwell hanno misurato il fattore Γ per velocità abbastanza piccole rispetto a quelle della luce: $V/c \approx 5 \times 10^{-3}$.

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Ives e Stilwell, 1938

- Come osservato da Einstein, il fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ caratterizza la dilatazione del tempo.
- Le verifiche sperimentali si propongono quindi di misurare questo fattore.
- La prima verifica sperimentale è dovuta a Ives e Stilwell, 1938.
- Ives e Stilwell hanno misurato il fattore Γ per velocità abbastanza piccole rispetto a quelle della luce: $V/c \approx 5 \times 10^{-3}$.
- Hanno pertanto misurato il termine

$$\frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2}$$

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali. Ives e Stilwell, 1938

- Come osservato da Einstein, il fattore relativistico $\Gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$ caratterizza la dilatazione del tempo.
- Le verifiche sperimentali si propongono quindi di misurare questo fattore.
- La prima verifica sperimentale è dovuta a Ives e Stilwell, 1938.
- Ives e Stilwell hanno misurato il fattore Γ per velocità abbastanza piccole rispetto a quelle della luce: $V/c \approx 5 \times 10^{-3}$.
- Hanno pertanto misurato il termine

$$\frac{1}{2} \frac{V^2}{c^2}$$

- Ives e Stilwell hanno misurato l'effetto Doppler della riga H_β dell'atomo di idrogeno in volo rispetto ad uno spettrometro a reticolo, dotato di lastra fotografica.

- Ives era un **anti - relativista** e sosteneva una teoria basata sull'esistenza dell'Etere, ispirata dai lavori di Larmor e Lorentz.

Ives e Stilwell, 1938

- Ives era un **anti - relativista** e sosteneva una teoria basata sull'esistenza dell'Etere, ispirata dai lavori di Larmor e Lorentz.
- Secondo Ives e Stilwell, la misura del fattore relativistico $\approx (1/2)V^2/c^2$ dimostra che **il periodo fondamentale degli orologi in moto rallenta**.

Ives e Stilwell, 1938

- Ives era un **anti - relativista** e sosteneva una teoria basata sull'esistenza dell'Etere, ispirata dai lavori di Larmor e Lorentz.
- Secondo Ives e Stilwell, la misura del fattore relativistico $\approx (1/2)V^2/c^2$ dimostra che **il periodo fondamentale degli orologi in moto rallenta**.
- Questa conclusione è **errata** perché. . .

Ives e Stilwell, 1938

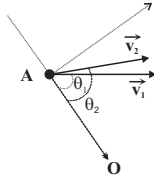
- Ives era un **anti - relativista** e sosteneva una teoria basata sull'esistenza dell'Etere, ispirata dai lavori di Larmor e Lorentz.
- Secondo Ives e Stilwell, la misura del fattore relativistico $\approx (1/2)V^2/c^2$ dimostra che **il periodo fondamentale degli orologi in moto rallenta**.
- Questa conclusione è **errata** perché...
- ...è in contraddizione con il principio di relatività secondo cui tutti i fenomeni fisici si svolgono nello stesso modo in ogni SRI, e...

- Ives era un **anti - relativista** e sosteneva una teoria basata sull'esistenza dell'Etere, ispirata dai lavori di Larmor e Lorentz.
- Secondo Ives e Stilwell, la misura del fattore relativistico $\approx (1/2)V^2/c^2$ dimostra che **il periodo fondamentale degli orologi in moto rallenta**.
- Questa conclusione è **errata** perché. . .
- . . . è in contraddizione con il principio di relatività secondo cui tutti i fenomeni fisici si svolgono nello stesso modo in ogni SRI, e. . .
- . . . come vedremo, le frequenze campione usate negli orologi atomici sono le stesse in ogni SRI.

Ives e Stilwell, 1938

- Ives era un **anti - relativista** e sosteneva una teoria basata sull'esistenza dell'Etere, ispirata dai lavori di Larmor e Lorentz.
- Secondo Ives e Stilwell, la misura del fattore relativistico $\approx (1/2)V^2/c^2$ dimostra che **il periodo fondamentale degli orologi in moto rallenta**.
- Questa conclusione è **errata** perché. . .
- ... è in contraddizione con il principio di relatività secondo cui tutti i fenomeni fisici si svolgono nello stesso modo in ogni SRI, e. . .
- ... come vedremo, le frequenze campione usate negli orologi atomici sono le stesse in ogni SRI.
- L'esperimento di Ives e Stilwell è stato ripetuto con maggiore accuratezza nel 1962 da **Mandelberg e Witten**.

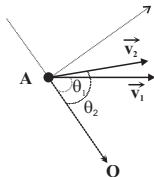
Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali: fotoni emessi da atomi in volo



Grandezze fisiche in gioco:

- E_1 , energia a riposo dell'atomo eccitato

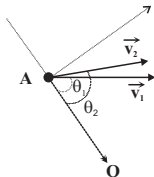
Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali: fotoni emessi da atomi in volo



Grandezze fisiche in gioco:

- E_1 , energia a riposo dell'atomo eccitato
- $E_2 = Mc^2$, energia a riposo dell'atomo nello stato fondamentale

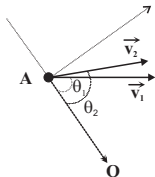
Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali: fotoni emessi da atomi in volo



Grandezze fisiche in gioco:

- E_1 , energia a riposo dell'atomo eccitato
- $E_2 = Mc^2$, energia a riposo dell'atomo nello stato fondamentale
- Quindi, $\Delta E = E_1 - E_2$ è la differenza di energia tra i due livelli della transizione atomica

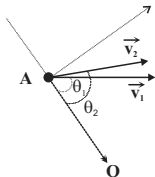
Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali: fotoni emessi da atomi in volo



Grandezze fisiche in gioco:

- E_1 , energia a riposo dell'atomo eccitato
- $E_2 = Mc^2$, energia a riposo dell'atomo nello stato fondamentale
- Quindi, $\Delta E = E_1 - E_2$ è la differenza di energia tra i due livelli della transizione atomica
- ΔE , essendo la differenza tra due energie a riposo, è un **invariante relativistico**

Dilatazione del tempo. Verifiche sperimentali: fotoni emessi da atomi in volo



Grandezze fisiche in gioco:

- E_1 , energia a riposo dell'atomo eccitato
- $E_2 = Mc^2$, energia a riposo dell'atomo nello stato fondamentale
- Quindi, $\Delta E = E_1 - E_2$ è la differenza di energia tra i due livelli della transizione atomica
- ΔE , essendo la differenza tra due energie a riposo, è un **invariante relativistico**
- Ne segue che: $E_1 = Mc^2 + \Delta E$

Fotoni emessi da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{emi} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

Fotoni emessi da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{emi} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

• dove

$$E_0^{emi} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] = \Delta E - E_R$$

Fotoni emessi da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{emi} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

• dove

$$E_0^{emi} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] = \Delta E - E_R$$

• è l'energia del fotone emesso quando l'atomo è in quiete prima dell'emissione

Fotoni emessi da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{emi} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

- dove

$$E_0^{emi} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] = \Delta E - E_R$$

- è l'energia del fotone emesso quando l'atomo è in quiete prima dell'emissione
- E_0^{emi} è un invariante relativistico

Fotoni emessi da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{emi} &= \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{emi} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

- dove

$$E_0^{emi} = \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \approx \Delta E \left[1 - \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] = \Delta E - E_R$$

- è l'energia del fotone emesso quando l'atomo è in quiete prima dell'emissione
- E_0^{emi} è un invariante relativistico
- Se l'energia (frequenza) E_0^{emi} è usata come campione di frequenza in un orologio, **essa ha lo stesso valore in ogni SRI.**

Fotoni assorbiti da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{abs} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

Fotoni assorbiti da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{abs} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

• dove

$$E_0^{abs} = \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] = \Delta E + E_R$$

Fotoni assorbiti da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{abs} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

- dove

$$E_0^{abs} = \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] = \Delta E + E_R$$

- è l'energia del fotone assorbito quando l'atomo è in quiete prima dell'assorbimento

Fotoni assorbiti da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{abs} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

- dove

$$E_0^{abs} = \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] = \Delta E + E_R$$

- è l'energia del fotone assorbito quando l'atomo è in quiete prima dell'assorbimento
- E_0^{abs} è un invariante relativistico

Fotoni assorbiti da atomi in volo



$$\begin{aligned} E_{ph}^{abs} &= \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2E_1} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} = \\ &= E_0^{abs} \frac{\sqrt{1 - V^2/c^2}}{1 - (V/c) \cos \theta} \end{aligned}$$

- dove

$$E_0^{abs} = \Delta E \left[1 + \frac{\Delta E}{2Mc^2} \right] = \Delta E + E_R$$

- è l'energia del fotone assorbito quando l'atomo è in quiete prima dell'assorbimento
- E_0^{abs} è un invariante relativistico
- Se l'energia (frequenza) E_0^{abs} è usata come campione di frequenza in un orologio, **essa ha lo stesso valore in ogni SRI.**

Larghezza naturale di una riga

- Osserviamo che $E_0^{abs} - E_0^{emi} = 2E_R$

Larghezza naturale di una riga

- Osserviamo che $E_0^{abs} - E_0^{emi} = 2E_R$
- Se un atomo E in quiete emette un fotone, allora un altro atomo **identico** A, in quiete lungo la direzione di propagazione del fotone, può assorbire questo fotone **se la larghezza naturale della riga è diversa da zero ed è – almeno – dell'ordine di grandezza di $2E_R$**

Dilatazione del tempo. Misure con fotoni gamma

- Sono state effettuate misure con fotoni gamma emessi dai nuclei di ioni ^{20}Ne (Olin et al. 1973).

Dilatazione del tempo. Misure con fotoni gamma

- Sono state effettuate misure con fotoni gamma emessi dai nuclei di ioni ^{20}Ne (Olin et al. 1973).
- La velocità degli ioni era di $4.9 \times 10^{-2}c$ o di $1.2 \times 10^{-2}c$, cioè, circa 10 volte quella usata da Ives e Stilwell.

Dilatazione del tempo. Misure con fotoni gamma

- Sono state effettuate misure con fotoni gamma emessi dai nuclei di ioni ^{20}Ne (Olin et al. 1973).
- La velocità degli ioni era di $4.9 \times 10^{-2}c$ o di $1.2 \times 10^{-2}c$, cioè, circa 10 volte quella usata da Ives e Stilwell.
- Quindi il termine V^2/c^2 era più grande di 100 volte di quello misurato da Ives e Stilwell.

Dilatazione del tempo. Misure con fotoni gamma

- Sono state effettuate misure con fotoni gamma emessi dai nuclei di ioni ^{20}Ne (Olin et al. 1973).
- La velocità degli ioni era di $4.9 \times 10^{-2}c$ o di $1.2 \times 10^{-2}c$, cioè, circa 10 volte quella usata da Ives e Stilwell.
- Quindi il termine V^2/c^2 era più grande di 100 volte di quello misurato da Ives e Stilwell.
- La tecnica usata era analoga a quella di Ives e Stilwell.

Dilatazione del tempo. Misure con fotoni gamma

- Sono state effettuate misure con fotoni gamma emessi dai nuclei di ioni ^{20}Ne (Olin et al. 1973).
- La velocità degli ioni era di $4.9 \times 10^{-2}c$ o di $1.2 \times 10^{-2}c$, cioè, circa 10 volte quella usata da Ives e Stilwell.
- Quindi il termine V^2/c^2 era più grande di 100 volte di quello misurato da Ives e Stilwell.
- La tecnica usata era analoga a quella di Ives e Stilwell.
- “Il fenomeno (spostamento Doppler) è una proprietà geometrica dello spazio - tempo, ed è intimamente connesso con il problema della sincronizzazione degli orologi in sistemi di riferimento differenti [p. 1633]”.

Dilatazione del tempo. Misure con luce laser

- La disponibilità di laser ha cambiato l'approccio alle misure della dilatazione del tempo.

Dilatazione del tempo. Misure con luce laser

- La disponibilità di laser ha cambiato l'approccio alle misure della dilatazione del tempo.
- La quantità misurata è diventata **l'energia dei fotoni assorbiti dagli atomi in volo.**

Dilatazione del tempo. Misure con luce laser

- La disponibilità di laser ha cambiato l'approccio alle misure della dilatazione del tempo.
- La quantità misurata è diventata **l'energia dei fotoni assorbiti dagli atomi in volo**.
- Le tecniche più recenti prevedono l'uso di ioni in orbite circolari in anelli di accumulazione.

Dilatazione del tempo. Misure con luce laser

- La disponibilità di laser ha cambiato l'approccio alle misure della dilatazione del tempo.
- La quantità misurata è diventata **l'energia dei fotoni assorbiti dagli atomi in volo**.
- Le tecniche più recenti prevedono l'uso di ioni in orbite circolari in anelli di accumulazione.
- Per esempio, Benjamin Botermann et al. (2014) hanno misurato il fattore Γ usando ioni ${}^7\text{Li}^+$ confinati in un anello di accumulazione alla velocità di $3.38 \times 10^{-1}c$ (circa 10 volte più grande di quella usata da Olin et al.)

Dilatazione del tempo. Misure con luce laser

- La disponibilità di laser ha cambiato l'approccio alle misure della dilatazione del tempo.
- La quantità misurata è diventata **l'energia dei fotoni assorbiti dagli atomi in volo**.
- Le tecniche più recenti prevedono l'uso di ioni in orbite circolari in anelli di accumulazione.
- Per esempio, Benjamin Botermann et al. (2014) hanno misurato il fattore Γ usando ioni ${}^7\text{Li}^+$ confinati in un anello di accumulazione alla velocità di $3.38 \times 10^{-1}c$ (circa 10 volte più grande di quella usata da Olin et al.)
- Il fattore Γ è stato misurato con una accuratezza di $\pm 2.3 \times 10^{-9}$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. I

- $$E_{ph} = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta}$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. I

$$E_{ph} = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta}$$



$$E_{ph}^P = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B}$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. I

$$E_{ph} = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B \cos \theta}$$



$$E_{ph}^P = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 - B}$$



$$E_{ph}^A = E_{ph}^0 \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 + B}$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. II


$$E_{ph}^P E_{ph}^A = E_{ph}^0{}^2$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. II

- $$E_{ph}^P E_{ph}^A = E_{ph}^0{}^2$$

- $$\frac{E_{ph}^P + E_{ph}^A}{2} = \Gamma E_{ph}^0$$

Dilatazione del tempo alla Ives & Stilwell: assorbimento. II

- $$E_{ph}^P E_{ph}^A = E_{ph}^0{}^2$$

- $$\frac{E_{ph}^P + E_{ph}^A}{2} = \Gamma E_{ph}^0$$

- Quindi, misurando E_{ph}^P e E_{ph}^A , si ottiene il fattore relativistico Γ .

Particelle instabili. I

- Il decadimento di particelle instabili in quiete è descritto dall'equazione

$$N = N_0 e^{-t/\tau_0}$$

Particelle instabili. I

- Il decadimento di particelle instabili in quiete è descritto dall'equazione

$$N = N_0 e^{-t/\tau_0}$$

- τ_0 è la vita media **propria** delle particelle (in quiete).

Particelle instabili. I

- Il decadimento di particelle instabili in quiete è descritto dall'equazione

$$N = N_0 e^{-t/\tau_0}$$

- τ_0 è la vita media **propria** delle particelle (in quiete).
- Se le particelle sono in moto inerziale con velocità v , la distanza media da loro percorsa è data da:

Particelle instabili. I

- Il decadimento di particelle instabili in quiete è descritto dall'equazione

$$N = N_0 e^{-t/\tau_0}$$

- τ_0 è la vita media **propria** delle particelle (in quiete).
- Se le particelle sono in moto inerziale con velocità v , la distanza media da loro percorsa è data da:

-

$$l = v\tau = v \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Particelle instabili. I

- Il decadimento di particelle instabili in quiete è descritto dall'equazione

$$N = N_0 e^{-t/\tau_0}$$

- τ_0 è la vita media **propria** delle particelle (in quiete).
- Se le particelle sono in moto inerziale con velocità v , la distanza media da loro percorsa è data da:

-

$$l = v\tau = v \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

- Siccome questa equazione è sperimentalmente corroborata, ne segue che è corroborata la formula della dilatazione del tempo:

Particelle instabili. I

- Il decadimento di particelle instabili in quiete è descritto dall'equazione

$$N = N_0 e^{-t/\tau_0}$$

- τ_0 è la vita media **propria** delle particelle (in quiete).
- Se le particelle sono in moto inerziale con velocità v , la distanza media da loro percorsa è data da:

•

$$l = v\tau = v \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

- Siccome questa equazione è sperimentalmente corroborata, ne segue che è corroborata la formula della dilatazione del tempo:

•

$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Particelle instabili. II

- Il primo esperimento di questo tipo fu eseguito da Bruno Rossi e David Hall nel 1941 usando muoni negativi (allora chiamati mesotroni) contenuti nei raggi cosmici.

Particelle instabili. II

- Il primo esperimento di questo tipo fu eseguito da Bruno Rossi e David Hall nel 1941 usando muoni negativi (allora chiamati mesotroni) contenuti nei raggi cosmici.
- A partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso, sono apparsi diversi lavori riguardanti il decadimento di particelle instabili in moto rettilineo uniforme prodotte in acceleratori.

Particelle instabili. II

- Il primo esperimento di questo tipo fu eseguito da Bruno Rossi e David Hall nel 1941 usando muoni negativi (allora chiamati mesotroni) contenuti nei raggi cosmici.
- A partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso, sono apparsi diversi lavori riguardanti il decadimento di particelle instabili in moto rettilineo uniforme prodotte in acceleratori.
- Il lavoro di Bailey et al. (1977) è interessante perché studia il decadimento di muoni negativi o positivi in moto circolare uniforme: il risultato è identico a quello che si sarebbe ottenuto se i muoni fossero stati in moto rettilineo uniforme.

Particelle instabili. II

- Il primo esperimento di questo tipo fu eseguito da Bruno Rossi e David Hall nel 1941 usando muoni negativi (allora chiamati mesotroni) contenuti nei raggi cosmici.
- A partire dagli anni Cinquanta del secolo scorso, sono apparsi diversi lavori riguardanti il decadimento di particelle instabili in moto rettilineo uniforme prodotte in acceleratori.
- Il lavoro di Bailey et al. (1977) è interessante perché studia il decadimento di muoni negativi o positivi in moto circolare uniforme: il risultato è identico a quello che si sarebbe ottenuto se i muoni fossero stati in moto rettilineo uniforme.
- Pertanto, gli autori concludono che l'accelerazione cui i muoni sono sottoposti ($a_c \approx 10^{18}g$) non influisce sulla vita media dei muoni.

Dilatazione del tempo. Riflessioni

- Consideriamo due orologi, O ed O' , in moto relativo rettilineo uniforme di allontanamento con velocità V lungo la direzione del comune asse $x = x'$. Se O vede O' in moto lungo la direzione positiva dell'asse $x = x'$, allora, O' vedrà O in moto lungo la direzione negativa dell'asse $x' = x$.

Dilatazione del tempo. Riflessioni

- Consideriamo due orologi, O ed O' , in moto relativo rettilineo uniforme di allontanamento con velocità V lungo la direzione del comune asse $x = x'$. Se O vede O' in moto lungo la direzione positiva dell'asse $x = x'$, allora, O' vedrà O in moto lungo la direzione negativa dell'asse $x' = x$.
- La dilatazione del tempo è un effetto simmetrico: la durata di un fenomeno che si svolge in O' (nel punto in cui si trova l'orologio O') appare ad O ingrandita di un fattore Γ ; la durata dello stesso fenomeno che si svolge in O (nel punto in cui si trova l'orologio O) appare ad O' ingrandita dello stesso fattore Γ .

Dilatazione del tempo. Riflessioni

- Consideriamo due orologi, O ed O' , **in moto relativo rettilineo uniforme di allontanamento** con velocità V lungo la direzione del comune asse $x = x'$. Se O vede O' in moto lungo la direzione positiva dell'asse $x = x'$, allora, O' vedrà O in moto lungo la direzione negativa dell'asse $x' = x$.
- La dilatazione del tempo è un effetto simmetrico: la durata di un fenomeno che si svolge in O' (nel punto in cui si trova l'orologio O') appare ad O ingrandita di un fattore Γ ; la durata dello stesso fenomeno che si svolge in O (nel punto in cui si trova l'orologio O) appare ad O' ingrandita dello stesso fattore Γ .
- La trattazione dell'emissione di un fotone da parte di un atomo in moto conferma questa simmetria tra i due apparati di misura. Se un atomo in quiete in O' emette un fotone verso O (lungo la direzione negativa dell'asse $x = x'$), l'energia del fotone misurata da O sarà:

Dilatazione del tempo. Riflessioni

- Consideriamo due orologi, O ed O' , in moto relativo rettilineo uniforme di allontanamento con velocità V lungo la direzione del comune asse $x = x'$. Se O vede O' in moto lungo la direzione positiva dell'asse $x = x'$, allora, O' vedrà O in moto lungo la direzione negativa dell'asse $x' = x$.
- La dilatazione del tempo è un effetto simmetrico: la durata di un fenomeno che si svolge in O' (nel punto in cui si trova l'orologio O') appare ad O ingrandita di un fattore Γ ; la durata dello stesso fenomeno che si svolge in O (nel punto in cui si trova l'orologio O) appare ad O' ingrandita dello stesso fattore Γ .
- La trattazione dell'emissione di un fotone da parte di un atomo in moto conferma questa simmetria tra i due apparati di misura. Se un atomo in quiete in O' emette un fotone verso O (lungo la direzione negativa dell'asse $x = x'$), l'energia del fotone misurata da O sarà:

$$E_{ph} = E_0^{emi} \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 + B}$$

Dilatazione del tempo. Riflessioni

- Consideriamo due orologi, O ed O' , in moto relativo rettilineo uniforme di allontanamento con velocità V lungo la direzione del comune asse $x = x'$. Se O vede O' in moto lungo la direzione positiva dell'asse $x = x'$, allora, O' vedrà O in moto lungo la direzione negativa dell'asse $x' = x$.
- La dilatazione del tempo è un effetto simmetrico: la durata di un fenomeno che si svolge in O' (nel punto in cui si trova l'orologio O') appare ad O ingrandita di un fattore Γ ; la durata dello stesso fenomeno che si svolge in O (nel punto in cui si trova l'orologio O) appare ad O' ingrandita dello stesso fattore Γ .
- La trattazione dell'emissione di un fotone da parte di un atomo in moto conferma questa simmetria tra i due apparati di misura. Se un atomo in quiete in O' emette un fotone verso O (lungo la direzione negativa dell'asse $x = x'$), l'energia del fotone misurata da O sarà:

$$E_{ph} = E_0^{emi} \frac{\sqrt{1 - B^2}}{1 + B}$$

- Analogamente, se un atomo in quiete in O emette un fotone verso O' (lungo la direzione positiva dell'asse $x = x'$), l'energia del fotone misurata da O' sarà data dalla stessa formula.

Paradosso degli orologi. I

- I due orologi O ed O_1 sono orologi ideali.

Paradosso degli orologi. I

- I due orologi O ed O_1 sono orologi **ideali**.
- Il loro **periodo fondamentale non è alterato da alcuna interazione fisica**.

Paradosso degli orologi. I

- I due orologi O ed O_1 sono orologi **ideali**.
- Il loro **periodo fondamentale non è alterato da alcuna interazione fisica**.
- O ed O_1 sono fermi nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.

Paradosso degli orologi. I

- I due orologi O ed O_1 sono orologi **ideali**.
- Il loro **periodo fondamentale non è alterato da alcuna interazione fisica**.
- O ed O_1 sono fermi nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- O_1 accelera lungo la direzione positiva dell'asse x , raggiunge la velocità V , viaggia per un certo intervallo di tempo con questa velocità, decelera e si ferma nel punto B_1 , distante l_{01} da O .

Paradosso degli orologi. I

- I due orologi O ed O_1 sono orologi **ideali**.
- Il loro **periodo fondamentale non è alterato da alcuna interazione fisica**.
- O ed O_1 sono fermi nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- O_1 accelera lungo la direzione positiva dell'asse x , raggiunge la velocità V , viaggia per un certo intervallo di tempo con questa velocità, decelera e si ferma nel punto B_1 , distante l_{01} da O .
- Riparte verso O con le stesse modalità del viaggio di andata.

Paradosso degli orologi. I

- I due orologi O ed O_1 sono orologi **ideali**.
- Il loro **periodo fondamentale non è alterato da alcuna interazione fisica**.
- O ed O_1 sono fermi nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- O_1 accelera lungo la direzione positiva dell'asse x , raggiunge la velocità V , viaggia per un certo intervallo di tempo con questa velocità, decelera e si ferma nel punto B_1 , distante l_{01} da O .
- Riparte verso O con le stesse modalità del viaggio di andata.
- Quando si incontrano di nuovo, O ed O_1 confrontano i loro quadranti.

Paradosso degli orologi. I

- I due orologi O ed O_1 sono orologi **ideali**.
- Il loro **periodo fondamentale non è alterato da alcuna interazione fisica**.
- O ed O_1 sono fermi nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- O_1 accelera lungo la direzione positiva dell'asse x , raggiunge la velocità V , viaggia per un certo intervallo di tempo con questa velocità, decelera e si ferma nel punto B_1 , distante l_{01} da O .
- Riparte verso O con le stesse modalità del viaggio di andata.
- Quando si incontrano di nuovo, O ed O_1 confrontano i loro quadranti.
- O prevede che O_1 mostri un valore del tempo minore.

Paradosso degli orologi. I

- I due orologi O ed O_1 sono orologi **ideali**.
- Il loro **periodo fondamentale non è alterato da alcuna interazione fisica**.
- O ed O_1 sono fermi nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- O_1 accelera lungo la direzione positiva dell'asse x , raggiunge la velocità V , viaggia per un certo intervallo di tempo con questa velocità, decelera e si ferma nel punto B_1 , distante l_{01} da O .
- Riparte verso O con le stesse modalità del viaggio di andata.
- Quando si incontrano di nuovo, O ed O_1 confrontano i loro quadranti.
- O prevede che O_1 mostri un valore del tempo minore.
- Ma O_1 , che aveva visto O effettuare un viaggio lungo la direzione negativa dell'asse x prevede che O mostri un valore minore.

Paradosso degli orologi. I

- I due orologi O ed O_1 sono orologi **ideali**.
- Il loro **periodo fondamentale non è alterato da alcuna interazione fisica**.
- O ed O_1 sono fermi nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- O_1 accelera lungo la direzione positiva dell'asse x , raggiunge la velocità V , viaggia per un certo intervallo di tempo con questa velocità, decelera e si ferma nel punto B_1 , distante l_{01} da O .
- Riparte verso O con le stesse modalità del viaggio di andata.
- Quando si incontrano di nuovo, O ed O_1 confrontano i loro quadranti.
- O prevede che O_1 mostri un valore del tempo minore.
- Ma O_1 , che aveva visto O effettuare un viaggio lungo la direzione negativa dell'asse x prevede che O mostri un valore minore.
- Da qui, il paradosso.

Paradosso degli orologi. II

- Il paradosso nasce perché i due orologi sono considerati equivalenti.

Paradosso degli orologi. II

- Il paradosso nasce perché i due orologi sono considerati equivalenti.
- Si tratta allora di capire se esiste una asimmetria tra i due orologi.

Paradosso degli orologi. II

- Il paradosso nasce perché i due orologi sono considerati equivalenti.
- Si tratta allora di capire se esiste una asimmetria tra i due orologi.
- Usualmente, l'asimmetria è attribuita al fatto che l'orologio O_1 subisce delle accelerazioni.

Paradosso degli orologi. II

- Il paradosso nasce perché i due orologi sono considerati equivalenti.
- Si tratta allora di capire se esiste una asimmetria tra i due orologi.
- Usualmente, l'asimmetria è attribuita al fatto che l'orologio O_1 subisce delle accelerazioni.
- Quindi, l'orologio che viaggia è O_1 e non O .

Paradosso degli orologi. II

- Il paradosso nasce perché i due orologi sono considerati equivalenti.
- Si tratta allora di capire se esiste una asimmetria tra i due orologi.
- Usualmente, l'asimmetria è attribuita al fatto che l'orologio O_1 subisce delle accelerazioni.
- Quindi, l'orologio che viaggia è O_1 e non O .
- L'accelerazione subita da O_1 serve solo per individuare l'asimmetria. Essa, non influenza il periodo fondamentale di O_1 , perché O_1 è un orologio ideale.

Paradosso degli orologi. II

- Il paradosso nasce perché i due orologi sono considerati equivalenti.
- Si tratta allora di capire se esiste una asimmetria tra i due orologi.
- Usualmente, l'asimmetria è attribuita al fatto che l'orologio O_1 subisce delle accelerazioni.
- Quindi, l'orologio che viaggia è O_1 e non O .
- L'accelerazione subita da O_1 serve solo per individuare l'asimmetria. Essa, non influenza il periodo fondamentale di O_1 , perché O_1 è un orologio ideale.
- L'asimmetria può anche essere individuata nel fatto che O_1 vede O e B , mentre O vede solo O_1 . Se Paolo sta a Roma e Giuseppe va a Parigi e torna, Paolo vede solo Roma, mentre Giuseppe vede Roma e Parigi.

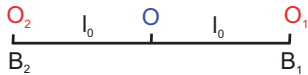
Paradosso degli orologi. II

- Il paradosso nasce perché i due orologi sono considerati equivalenti.
- Si tratta allora di capire se esiste una asimmetria tra i due orologi.
- Usualmente, l'asimmetria è attribuita al fatto che l'orologio O_1 subisce delle accelerazioni.
- Quindi, l'orologio che viaggia è O_1 e non O .
- L'accelerazione subita da O_1 serve solo per individuare l'asimmetria. Essa, non influenza il periodo fondamentale di O_1 , perché O_1 è un orologio ideale.
- L'asimmetria può anche essere individuata nel fatto che O_1 vede O e B , mentre O vede solo O_1 . Se Paolo sta a Roma e Giuseppe va a Parigi e torna, Paolo vede solo Roma, mentre Giuseppe vede Roma e Parigi.
- Quindi, l'orologio che al secondo incontro mostra un numero inferiore è O_1 .

Paradosso degli orologi. II

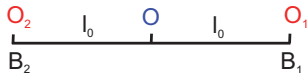
- Il paradosso nasce perché i due orologi sono considerati equivalenti.
- Si tratta allora di capire se esiste una asimmetria tra i due orologi.
- Usualmente, l'asimmetria è attribuita al fatto che l'orologio O_1 subisce delle accelerazioni.
- Quindi, l'orologio che viaggia è O_1 e non O .
- L'accelerazione subita da O_1 serve solo per individuare l'asimmetria. Essa, non influenza il periodo fondamentale di O_1 , perché O_1 è un orologio ideale.
- L'asimmetria può anche essere individuata nel fatto che O_1 vede O e B , mentre O vede solo O_1 . Se Paolo sta a Roma e Giuseppe va a Parigi e torna, Paolo vede solo Roma, mentre Giuseppe vede Roma e Parigi.
- Quindi, l'orologio che al secondo incontro mostra un numero inferiore è O_1 .
- Dovrebbe quindi esistere un **effetto viaggio**.

Il terzetto



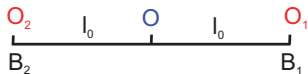
- Ora gli orologi sono tre.

Il terzetto



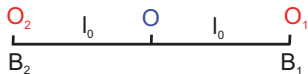
- Ora gli orologi sono tre.
- O , O_1 ed O_2 sono in quiete nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.

Il terzetto



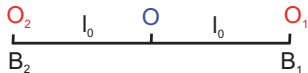
- Ora gli orologi sono tre.
- O , O_1 ed O_2 sono in quiete nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- Ad un certo istante, O_1 ed O_2 iniziano un viaggio analogo a quello effettuato da O_1 nel caso precedente: O_1 verso B_1 lungo la direzione positiva dell'asse x ; O_2 verso B_2 posto simmetricamente rispetto a B_1 .

Il terzetto



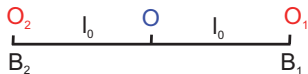
- Ora gli orologi sono tre.
- O , O_1 ed O_2 sono in quiete nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- Ad un certo istante, O_1 ed O_2 iniziano un viaggio analogo a quello effettuato da O_1 nel caso precedente: O_1 verso B_1 lungo la direzione positiva dell'asse x ; O_2 verso B_2 posto simmetricamente rispetto a B_1 .
- Al ritorno in O , i due orologi O_1 ed O_2 sono ancora sincronizzati.

Il terzetto



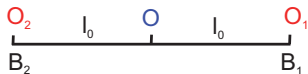
- Ora gli orologi sono tre.
- O , O_1 ed O_2 sono in quiete nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- Ad un certo istante, O_1 ed O_2 iniziano un viaggio analogo a quello effettuato da O_1 nel caso precedente: O_1 verso B_1 lungo la direzione positiva dell'asse x ; O_2 verso B_2 posto simmetricamente rispetto a B_1 .
- Al ritorno in O , i due orologi O_1 ed O_2 sono ancora sincronizzati.
- Secondo entrambi, il loro viaggio di andata e ritorno è durato $(2l_0/V)\sqrt{1 - V^2/c^2}$.

Il terzetto



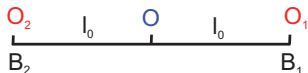
- Ora gli orologi sono tre.
- O , O_1 ed O_2 sono in quiete nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- Ad un certo istante, O_1 ed O_2 iniziano un viaggio analogo a quello effettuato da O_1 nel caso precedente: O_1 verso B_1 lungo la direzione positiva dell'asse x ; O_2 verso B_2 posto simmetricamente rispetto a B_1 .
- Al ritorno in O , i due orologi O_1 ed O_2 sono ancora sincronizzati.
- Secondo entrambi, il loro viaggio di andata e ritorno è durato $(2l_0/V)\sqrt{1 - V^2/c^2}$.
- Tuttavia, per O , la durata del loro viaggio è stata $(2l_0/V)$.

Il terzetto



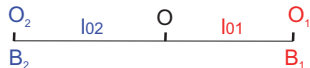
- Ora gli orologi sono tre.
- O , O_1 ed O_2 sono in quiete nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- Ad un certo istante, O_1 ed O_2 iniziano un viaggio analogo a quello effettuato da O_1 nel caso precedente: O_1 verso B_1 lungo la direzione positiva dell'asse x ; O_2 verso B_2 posto simmetricamente rispetto a B_1 .
- Al ritorno in O , i due orologi O_1 ed O_2 sono ancora sincronizzati.
- Secondo entrambi, il loro viaggio di andata e ritorno è durato $(2l_0/V)\sqrt{1 - V^2/c^2}$.
- Tuttavia, per O , la durata del loro viaggio è stata $(2l_0/V)$.
- Se durante il loro viaggio di allontanamento da O a velocità V , O_1 informa O_2 della durata di un fenomeno che avviene in O_1 , O_2 vede questa durata ingrandita (dilatata). E viceversa.

Il terzetto



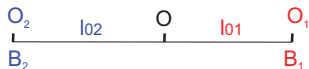
- Ora gli orologi sono tre.
- O , O_1 ed O_2 sono in quiete nell'origine del SRI del laboratorio e sono sincronizzati.
- Ad un certo istante, O_1 ed O_2 iniziano un viaggio analogo a quello effettuato da O_1 nel caso precedente: O_1 verso B_1 lungo la direzione positiva dell'asse x ; O_2 verso B_2 posto simmetricamente rispetto a B_1 .
- Al ritorno in O , i due orologi O_1 ed O_2 sono ancora sincronizzati.
- Secondo entrambi, il loro viaggio di andata e ritorno è durato $(2l_0/V)\sqrt{1 - V^2/c^2}$.
- Tuttavia, per O , la durata del loro viaggio è stata $(2l_0/V)$.
- Se durante il loro viaggio di allontanamento da O a velocità V , O_1 informa O_2 della durata di un fenomeno che avviene in O_1 , O_2 vede questa durata ingrandita (dilatata). E viceversa.
- Il caso del viaggio simmetrico di O_1 ed O_2 mostra che c'è dilatazione del tempo ma non effetto viaggio. L'effetto viaggio permane invece tra O_1 ed O e tra O_2 ed O .

Il terzetto asimmetrico



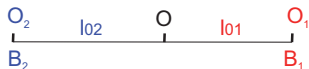
- Nel caso del terzetto asimmetrico, O_1 ed O_2 viaggiano verso B_1 e B_2 – distanti da O di l_{01} e l_{02} – con velocità il cui rapporto è $l_{01}/l_{02} = V_1/V_2$.

Il terzetto asimmetrico



- Nel caso del terzetto asimmetrico, O_1 ed O_2 viaggiano verso B_1 e B_2 – distanti da O di l_{01} e l_{02} – con velocità il cui rapporto è $l_{01}/l_{02} = V_1/V_2$.
- La durata Δt del viaggio di andata e ritorno di O_1 e O_2 è la stessa nel sistema di riferimento di O .

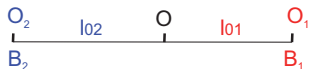
Il terzetto asimmetrico



- Nel caso del terzetto asimmetrico, O_1 ed O_2 viaggiano verso B_1 e B_2 – distanti da O di l_{01} e l_{02} – con velocità il cui rapporto è e $l_{01}/l_{02} = V_1/V_2$.
- La durata Δt del viaggio di andata e ritorno di O_1 e O_2 è la stessa nel sistema di riferimento di O .
- Il rapporto tra le durate proprie dei viaggi dei due orologi è invece dato da

$$\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2} = \sqrt{\frac{1 - V_1^2/c^2}{1 - V_2^2/c^2}} = \frac{c + V_1}{c - V_2} \sqrt{\frac{c - w}{c + w}}$$

Il terzetto asimmetrico

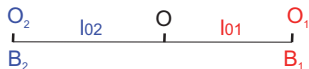


- Nel caso del terzetto asimmetrico, O_1 ed O_2 viaggiano verso B_1 e B_2 – distanti da O di l_{01} e l_{02} – con velocità il cui rapporto è e $l_{01}/l_{02} = V_1/V_2$.
- La durata Δt del viaggio di andata e ritorno di O_1 e O_2 è la stessa nel sistema di riferimento di O .
- Il rapporto tra le durate proprie dei viaggi dei due orologi è invece dato da

$$\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2} = \sqrt{\frac{1 - V_1^2/c^2}{1 - V_2^2/c^2}} = \frac{c + V_1}{c - V_2} \sqrt{\frac{c - w}{c + w}}$$

- Dove w è la velocità relativa tra O_1 ed O_2 .

Il terzetto asimmetrico



- Nel caso del terzetto asimmetrico, O_1 ed O_2 viaggiano verso B_1 e B_2 – distanti da O di l_{01} e l_{02} – con velocità il cui rapporto è e $l_{01}/l_{02} = V_1/V_2$.
- La durata Δt del viaggio di andata e ritorno di O_1 e O_2 è la stessa nel sistema di riferimento di O .
- Il rapporto tra le durate proprie dei viaggi dei due orologi è invece dato da

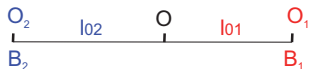
$$\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2} = \sqrt{\frac{1 - V_1^2/c^2}{1 - V_2^2/c^2}} = \frac{c + V_1}{c - V_2} \sqrt{\frac{c - w}{c + w}}$$

- Dove w è la velocità relativa tra O_1 ed O_2 .

•

$$\left[\frac{c - w}{c + w} = \frac{c - V_1}{c + V_1} \frac{c - V_2}{c + V_2} \right]$$

Il terzetto asimmetrico



- Nel caso del terzetto asimmetrico, O_1 ed O_2 viaggiano verso B_1 e B_2 – distanti da O di l_{01} e l_{02} – con velocità il cui rapporto è e $l_{01}/l_{02} = V_1/V_2$.
- La durata Δt del viaggio di andata e ritorno di O_1 e O_2 è la stessa nel sistema di riferimento di O .
- Il rapporto tra le durate proprie dei viaggi dei due orologi è invece dato da

$$\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2} = \sqrt{\frac{1 - V_1^2/c^2}{1 - V_2^2/c^2}} = \frac{c + V_1}{c - V_2} \sqrt{\frac{c - w}{c + w}}$$

- Dove w è la velocità relativa tra O_1 ed O_2 .

•

$$\left[\frac{c - w}{c + w} = \frac{c - V_1}{c + V_1} \frac{c - V_2}{c + V_2} \right]$$

- Il caso del terzetto asimmetrico può essere considerato la versione lineare dell'esperimento di Hafele&Keating in assenza di gravità.

Esperimento di Hafele e Keating: teoria semplificata. I

- Un orologio rimane fermo sulla superficie terrestre in un punto dell'equatore. Un altro orologio, posto su un aereo, è sincronizzato con il primo prima dell'esperimento; dopo aver raggiunto la quota h , percorre una circonferenza equatoriale verso Est e ritorna al punto di partenza.

Esperimento di Hafele e Keating: teoria semplificata. I

- Un orologio rimane fermo sulla superficie terrestre in un punto dell'equatore. Un altro orologio, posto su un aereo, è sincronizzato con il primo prima dell'esperimento; dopo aver raggiunto la quota h , percorre una circonferenza equatoriale verso Est e ritorna al punto di partenza.
- Un secondo esperimento prevede invece che l'orologio sull'aereo circumnavighi la Terra verso Ovest.

Esperimento di Hafele e Keating: teoria semplificata. I

- Un orologio rimane fermo sulla superficie terrestre in un punto dell'equatore. Un altro orologio, posto su un aereo, è sincronizzato con il primo prima dell'esperimento; dopo aver raggiunto la quota h , percorre una circonferenza equatoriale verso Est e ritorna al punto di partenza.
- Un secondo esperimento prevede invece che l'orologio sull'aereo circumnavighi la Terra verso Ovest.
- Gli esperimenti sono descritti in un sistema di riferimento non rotante con l'origine nel centro della Terra. In questo sistema di riferimento entrambi gli orologi sono in moto e immersi nel campo gravitazionale terrestre supposto generato da una massa sferica.

Esperimento di Hafele e Keating: teoria semplificata. I

- Un orologio rimane fermo sulla superficie terrestre in un punto dell'equatore. Un altro orologio, posto su un aereo, è sincronizzato con il primo prima dell'esperimento; dopo aver raggiunto la quota h , percorre una circonferenza equatoriale verso Est e ritorna al punto di partenza.
- Un secondo esperimento prevede invece che l'orologio sull'aereo circumnavighi la Terra verso Ovest.
- Gli esperimenti sono descritti in un sistema di riferimento non rotante con l'origine nel centro della Terra. In questo sistema di riferimento entrambi gli orologi sono in moto e immersi nel campo gravitazionale terrestre supposto generato da una massa sferica.
- Hafele e Keating usano il formalismo spazio - temporale, nell'approssimazione di campi gravitazionali deboli e velocità piccole rispetto a quelle della luce.

Esperimento di Hafele e Keating: teoria semplificata. II

- Si ottiene:

$$\frac{\Delta\tau - \Delta\tau_0}{\Delta\tau_0} = \frac{gh}{c^2} - \frac{2R\Omega u + u^2}{2c^2}$$

Esperimento di Hafele e Keating: teoria semplificata. II

- Si ottiene:

$$\frac{\Delta\tau - \Delta\tau_0}{\Delta\tau_0} = \frac{gh}{c^2} - \frac{2R\Omega u + u^2}{2c^2}$$

- Dove g è l'accelerazione di gravità all'equatore, h l'altitudine dell'aereo, R il raggio terrestre, Ω la velocità angolare della Terra intorno al proprio asse ed u la velocità dell'aereo rispetto al suolo. u è positiva per il volo verso Est e negativa per quello verso Ovest.

Esperimento di Hafele e Keating: teoria semplificata. II

- Si ottiene:

$$\frac{\Delta\tau - \Delta\tau_0}{\Delta\tau_0} = \frac{gh}{c^2} - \frac{2R\Omega u + u^2}{2c^2}$$

- Dove g è l'accelerazione di gravità all'equatore, h l'altitudine dell'aereo, R il raggio terrestre, Ω la velocità angolare della Terra intorno al proprio asse ed u la velocità dell'aereo rispetto al suolo. u è positiva per il volo verso Est e negativa per quello verso Ovest.
- Questa trattazione semplificata deve essere integrata considerando che: l'aereo non percorre una rotta equatoriale e non mantiene costanti la velocità rispetto al suolo, l'altitudine e la latitudine.

Esperimento di Hafele e Keating: teoria semplificata. II

- Si ottiene:

$$\frac{\Delta\tau - \Delta\tau_0}{\Delta\tau_0} = \frac{gh}{c^2} - \frac{2R\Omega u + u^2}{2c^2}$$

- Dove g è l'accelerazione di gravità all'equatore, h l'altitudine dell'aereo, R il raggio terrestre, Ω la velocità angolare della Terra intorno al proprio asse ed u la velocità dell'aereo rispetto al suolo. u è positiva per il volo verso Est e negativa per quello verso Ovest.
- Questa trattazione semplificata deve essere integrata considerando che: l'aereo non percorre una rotta equatoriale e non mantiene costanti la velocità rispetto al suolo, l'altitudine e la latitudine.
- Hafele e Keating, dopo aver confrontato le predizioni della teoria con i risultati dell'esperimento, concludono affermando “**Questi risultati forniscono una soluzione empirica non ambigua del famoso ‘paradosso’ degli orologi con orologi macroscopici**”.

Esperimento di Hafele e Keating. Commenti

- Alley (1979), commenta i risultati di Hafele e Keating così:

Esperimento di Hafele e Keating. Commenti

- Alley (1979), commenta i risultati di Hafele e Keating così:
- “Il confronto con le predizioni sembrano mostrare un’incertezza di circa il 13% per la direzione Ovest, ma [un’incertezza] di gran lunga peggiore per la direzione Est. È difficile attribuire un’incertezza all’interno del confronto tra gli effetti dovuti alla velocità e al potenziale [gravitazionale]: **ma la loro esistenza è certamente dimostrata**” [Halley, 1979](#).

Hafele&Keating e il “terzetto asimmetrico”.

- Nel caso del terzetto asimmetrico il rapporto tra le durate proprie dei viaggi dei due orologi è dato da

$$\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2} = \sqrt{\frac{1 - V_1^2/c^2}{1 - V_2^2/c^2}}$$

Hafele&Keating e il “terzetto asimmetrico”.

- Nel caso del terzetto asimmetrico il rapporto tra le durate proprie dei viaggi dei due orologi è dato da

$$\frac{\Delta\tau_1}{\Delta\tau_2} = \sqrt{\frac{1 - V_1^2/c^2}{1 - V_2^2/c^2}}$$

- Nel caso del volo **radente** verso Est, il rapporto tra le durate proprie misurate dai due orologi è dato da:

$$\frac{\Delta\tau_0}{\Delta\tau_E} = \sqrt{\frac{1 - v_0^2/c^2}{1 - v_E^2/c^2}}$$

che è identica all'equazione precedente.

Hafele&Keating: derivazione alternativa

- È possibile ricavare le equazioni di Hafele&Keating senza il formalismo spazio - temporale.

Hafele&Keating: derivazione alternativa

- È possibile ricavare le equazioni di Hafele&Keating senza il formalismo spazio - temporale.
- Si ricavano dapprima le formule dovute alla dilatazione del tempo [Giuliani, ERQ - FSE, p. 41].

Hafele&Keating: derivazione alternativa

- È possibile ricavare le equazioni di Hafele&Keating senza il formalismo spazio - temporale.
- Si ricavano dapprima le formule dovute alla dilatazione del tempo [Giuliani, ERQ - FSE, p. 41].
- Si introducono poi le correzioni dovute all'influenza della gravitazione sul periodo fondamentale degli orologi.

Hafele&Keating: derivazione alternativa

- È possibile ricavare le equazioni di Hafele&Keating senza il formalismo spazio - temporale.
- Si ricavano dapprima le formule dovute alla dilatazione del tempo [Giuliani, ERQ - FSE, p. 41].
- Si introducono poi le correzioni dovute all'influenza della gravitazione sul periodo fondamentale degli orologi.
- È possibile ricavare queste correzioni usando solo la relatività speciale [Giuliani, ERQ - FSE, p. 276].

Il tempo nella relatività generale

- In un punto qualsiasi dello spazio - tempo, è sempre possibile scegliere un sistema di assi coordinati tale che la metrica si riduca alla forma:

$$ds^2 = g_{00}c^2dt^2 - g_{11}dx_1^2 - g_{22}dx_2^2 - g_{33}dx_3^2$$

Il tempo nella relatività generale

- In un punto qualsiasi dello spazio - tempo, è sempre possibile scegliere un sistema di assi coordinati tale che la metrica si riduca alla forma:

$$ds^2 = g_{00}c^2dt^2 - g_{11}dx_1^2 - g_{22}dx_2^2 - g_{33}dx_3^2$$

- Ne segue che il periodo fondamentale di un orologio è dato da:

$$T_{grav} = \frac{T_0}{\sqrt{g_{00}}} > T_0$$

Il tempo nella relatività generale

- In un punto qualsiasi dello spazio - tempo, è sempre possibile scegliere un sistema di assi coordinati tale che la metrica si riduca alla forma:

$$ds^2 = g_{00}c^2dt^2 - g_{11}dx_1^2 - g_{22}dx_2^2 - g_{33}dx_3^2$$

- Ne segue che il periodo fondamentale di un orologio è dato da:

$$T_{grav} = \frac{T_0}{\sqrt{g_{00}}} > T_0$$

- dove T_0 è il periodo fondamentale dello stesso orologio in assenza di gravità.

Il tempo nella relatività generale

- In un punto qualsiasi dello spazio - tempo, è sempre possibile scegliere un sistema di assi coordinati tale che la metrica si riduca alla forma:

$$ds^2 = g_{00}c^2dt^2 - g_{11}dx_1^2 - g_{22}dx_2^2 - g_{33}dx_3^2$$

- Ne segue che il periodo fondamentale di un orologio è dato da:

$$T_{grav} = \frac{T_0}{\sqrt{g_{00}}} > T_0$$

- dove T_0 è il periodo fondamentale dello stesso orologio in assenza di gravità.
- Quindi, in relatività generale, non ha cittadinanza il concetto di orologio ideale, cioè di un orologio il cui periodo fondamentale non è modificato da alcuna interazione fisica.

Il tempo nella relatività generale

- In un punto qualsiasi dello spazio - tempo, è sempre possibile scegliere un sistema di assi coordinati tale che la metrica si riduca alla forma:

$$ds^2 = g_{00}c^2dt^2 - g_{11}dx_1^2 - g_{22}dx_2^2 - g_{33}dx_3^2$$

- Ne segue che il periodo fondamentale di un orologio è dato da:

$$T_{grav} = \frac{T_0}{\sqrt{g_{00}}} > T_0$$

- dove T_0 è il periodo fondamentale dello stesso orologio in assenza di gravità.
- Quindi, in relatività generale, non ha cittadinanza il concetto di orologio ideale, cioè di un orologio il cui periodo fondamentale non è modificato da alcuna interazione fisica.
- Non solo: è necessario assumere – a meno di non abbandonarsi alla ricerca, epistemologicamente insoddisfacente, di orologi che soddisfino l'equazione precedente – che la gravità modifica il periodo fondamentale di ogni classe di orologi allo stesso modo.

Il tempo nella relatività generale

- In un punto qualsiasi dello spazio - tempo, è sempre possibile scegliere un sistema di assi coordinati tale che la metrica si riduca alla forma:

$$ds^2 = g_{00}c^2dt^2 - g_{11}dx_1^2 - g_{22}dx_2^2 - g_{33}dx_3^2$$

- Ne segue che il periodo fondamentale di un orologio è dato da:

$$T_{grav} = \frac{T_0}{\sqrt{g_{00}}} > T_0$$

- dove T_0 è il periodo fondamentale dello stesso orologio in assenza di gravità.
- Quindi, in relatività generale, non ha cittadinanza il concetto di orologio ideale, cioè di un orologio il cui periodo fondamentale non è modificato da alcuna interazione fisica.
- Non solo: è necessario assumere – a meno di non abbandonarsi alla ricerca, epistemologicamente insoddisfacente, di orologi che soddisfino l'equazione precedente – che la gravità modifica il periodo fondamentale di ogni classe di orologi allo stesso modo.
- Tuttavia, è necessario comprendere **come** la gravità possa modificare il periodo fondamentale degli orologi.

Orologio atomico e gravità

- L'energia a riposo di un atomo posto in un **campo gravitazionale statico e debole** è data da:

$$E_{grav} = Mc^2 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}$$

dove M è la massa dell'atomo e χ è il potenziale gravitazionale newtoniano. Si noti che **il potenziale gravitazionale ha le dimensioni di una velocità al quadrato ed è negativo.**

Orologio atomico e gravità

- L'energia a riposo di un atomo posto in un **campo gravitazionale statico e debole** è data da:

$$E_{grav} = Mc^2 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}$$

dove M è la massa dell'atomo e χ è il potenziale gravitazionale newtoniano. Si noti che **il potenziale gravitazionale ha le dimensioni di una velocità al quadrato ed è negativo.**

- Se l'atomo è eccitato, questa equazione assume la forma:

$$E_{grav} = (mc^2 + \Delta E_0) \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}$$

dove m è la massa dell'atomo non eccitato e ΔE_0 è la differenza di energia tra lo stato eccitato dell'atomo e lo stato fondamentale in assenza di gravità.

Orologio atomico e gravità. II

- Pertanto, la frequenza della transizione elettronica considerata è data da:

$$\nu_{grav} = \nu_0 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}$$

dove ν_0 è la frequenza in assenza di gravità e...

Orologio atomico e gravità. II

- Pertanto, la frequenza della transizione elettronica considerata è data da:

$$\nu_{grav} = \nu_0 \sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}$$

dove ν_0 è la frequenza in assenza di gravità e...

- il periodo fondamentale dell'orologio sarà allora dato da:

$$T_{grav} = \frac{T_0}{\sqrt{1 + \frac{2\chi}{c^2}}} \approx T_0 \left(1 - \frac{\chi}{c^2}\right)$$

se T_0 è il periodo in assenza di gravità.

Esperimento di Pound e Rebka - 1960

- La dipendenza dal potenziale gravitazionale dell'energia di un fotone emesso da un nucleo è stata verificata sperimentalmente - per la prima volta - da Pound e Rebka nel 1960 [qui](#)

Esperimento di Pound e Rebka - 1960

- La dipendenza dal potenziale gravitazionale dell'energia di un fotone emesso da un nucleo è stata verificata sperimentalmente - per la prima volta - da Pound e Rebka nel 1960 [qui](#)
- Se due nuclei identici sono posti nei punti R e $R + h$ sulla verticale [R distanza dal centro della terra], l'energia del fotone emesso dal nucleo collocato nel punto R verso l'alto non è sufficiente per essere assorbito dal nucleo posto nel punto $R + h$

Esperimento di Pound e Rebka - 1960

- La dipendenza dal potenziale gravitazionale dell'energia di un fotone emesso da un nucleo è stata verificata sperimentalmente - per la prima volta - da Pound e Rebka nel 1960 [qui](#)
- Se due nuclei identici sono posti nei punti R e $R + h$ sulla verticale [R distanza dal centro della terra], l'energia del fotone emesso dal nucleo collocato nel punto R verso l'alto non è sufficiente per essere assorbito dal nucleo posto nel punto $R + h$
- Infatti:

$$\Delta E(R + h) \approx \Delta E(R) \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right)$$

Esperimento di Pound e Rebka - 1960

- La dipendenza dal potenziale gravitazionale dell'energia di un fotone emesso da un nucleo è stata verificata sperimentalmente - per la prima volta - da Pound e Rebka nel 1960 [qui](#)
- Se due nuclei identici sono posti nei punti R e $R + h$ sulla verticale [R distanza dal centro della terra], l'energia del fotone emesso dal nucleo collocato nel punto R verso l'alto non è sufficiente per essere assorbito dal nucleo posto nel punto $R + h$

- Infatti:

$$\Delta E(R + h) \approx \Delta E(R) \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right)$$

- Se $h = 22.55\text{m} \Rightarrow gh/c^2 = 2.46 \times 10^{-15}$

Esperimento di Pound e Rebka - 1960

- La dipendenza dal potenziale gravitazionale dell'energia di un fotone emesso da un nucleo è stata verificata sperimentalmente - per la prima volta - da Pound e Rebka nel 1960 [qui](#)
- Se due nuclei identici sono posti nei punti R e $R + h$ sulla verticale [R distanza dal centro della terra], l'energia del fotone emesso dal nucleo collocato nel punto R verso l'alto non è sufficiente per essere assorbito dal nucleo posto nel punto $R + h$

- Infatti:

$$\Delta E(R + h) \approx \Delta E(R) \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right)$$

- Se $h = 22.55\text{m} \Rightarrow gh/c^2 = 2.46 \times 10^{-15}$
- Pound e Rebka hanno usato i fotoni emessi senza rinculo per effetto Mössbauer da nuclei di Fe^{57}

Esperimento di Pound e Rebka - 1960

- La dipendenza dal potenziale gravitazionale dell'energia di un fotone emesso da un nucleo è stata verificata sperimentalmente - per la prima volta - da Pound e Rebka nel 1960 [qui](#)
- Se due nuclei identici sono posti nei punti R e $R + h$ sulla verticale [R distanza dal centro della terra], l'energia del fotone emesso dal nucleo collocato nel punto R verso l'alto non è sufficiente per essere assorbito dal nucleo posto nel punto $R + h$

- Infatti:

$$\Delta E(R + h) \approx \Delta E(R) \left(1 + \frac{gh}{c^2} \right)$$

- Se $h = 22.55\text{m} \Rightarrow gh/c^2 = 2.46 \times 10^{-15}$
- Pound e Rebka hanno usato i fotoni emessi senza rinculo per effetto Mössbauer da nuclei di Fe^{57}
- Recentemente, il red - shift gravitazionale è stato misurato usando ioni di alluminio intrappolati, posti ad una distanza, sulla verticale, di 17cm [qui](#)

Esperimento di Pound e Rebka - 1960



(a)



(b)

Robert Pound (a) e Glen Rebka (b)

Red shift con la relatività speciale

- Si consideri un atomo eccitato posto nel campo gravitazionale della Terra e si suppongano entrambi a riposo nel sistema di riferimento scelto. L'energia a riposo del complesso (atomo + Terra) sarà allora data da:

$$\mathcal{E}_0 = Mc^2 + (mc^2 + \Delta E) - \frac{GM}{r} \left(m + \frac{\Delta E}{c^2} \right)$$

Red shift con la relatività speciale

- Si consideri un atomo eccitato posto nel campo gravitazionale della Terra e si suppongano entrambi a riposo nel sistema di riferimento scelto. L'energia a riposo del complesso (atomo + Terra) sarà allora data da:

$$\mathcal{E}_0 = Mc^2 + (mc^2 + \Delta E) - \frac{GM}{r} \left(m + \frac{\Delta E}{c^2} \right)$$

- L'energia disponibile per l'emissione di un fotone da parte dell'atomo – o quella necessaria per il suo assorbimento – sarà quindi:

$$\Delta E(r) = \Delta E \left(1 - \frac{GM}{r} \frac{1}{c^2} \right) = \Delta E \left(1 + \frac{\chi(r)}{c^2} \right)$$

dove χ è il potenziale gravitazionale della Terra nel punto distante r dal suo centro.

E gli altri orologi?

- L'orologio a pendolo non soddisfa la relazione prevista dalla relatività generale, perché esso funziona solo in presenza di gravità.

E gli altri orologi?

- L'orologio a pendolo non soddisfa la relazione prevista dalla relatività generale, perché esso funziona solo in presenza di gravità.
- Inoltre il suo periodo dipende dalla accelerazione di gravità e non dal potenziale gravitazionale.

E gli altri orologi?

- L'orologio a pendolo non soddisfa la relazione prevista dalla relatività generale, perché esso funziona solo in presenza di gravità.
- Inoltre il suo periodo dipende dalla accelerazione di gravità e non dal potenziale gravitazionale.
- Gli orologi al quarzo si comportano come gli orologi che usano la radiazione elettromagnetica come campione di frequenza [Horizons Spacecraft](#).

E gli altri orologi?

- L'orologio a pendolo non soddisfa la relazione prevista dalla relatività generale, perché esso funziona solo in presenza di gravità.
- Inoltre il suo periodo dipende dalla accelerazione di gravità e non dal potenziale gravitazionale.
- Gli orologi al quarzo si comportano come gli orologi che usano la radiazione elettromagnetica come campione di frequenza [Horizons Spacecraft](#).
- Sarebbe interessante verificare se la vita media di particelle instabili dipende dal potenziale gravitazionale.
- Purtroppo, l'accuratezza con cui è nota la vita media dei muoni è dell'ordine di 10^{-6} , mentre – per esempio – la variazione del termine χ/c^2 dovuta al moto orbitale terrestre è dell'ordine di 10^{-12} .

La relatività nella vita quotidiana

- Il GPS (Global Positioning System) tiene conto della dilatazione del tempo e dell'influenza del potenziale gravitazionale sul periodo fondamentale degli orologi atomici [Ashby, 2003].

La relatività nella vita quotidiana

- Il GPS (Global Positioning System) tiene conto della dilatazione del tempo e dell'influenza del potenziale gravitazionale sul periodo fondamentale degli orologi atomici [Ashby, 2003].

-

$$d\tau = \frac{ds}{c} \approx \left[1 + \frac{(V - \Phi_0)}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right] dt$$

dove $d\tau$ è l'intervallo di tempo proprio misurato da un orologio su un satellite; V è il potenziale gravitazionale della Terra; Φ_0 il potenziale gravitazionale **effettivo** sul geoide (in un sistema rotante con la Terra); dt è invece il corrispondente intervallo di tempo misurato da un orologio in quiete sul geoide.

La relatività nella vita quotidiana

- Il GPS (Global Positioning System) tiene conto della dilatazione del tempo e dell'influenza del potenziale gravitazionale sul periodo fondamentale degli orologi atomici [Ashby, 2003].

-

$$d\tau = \frac{ds}{c} \approx \left[1 + \frac{(V - \Phi_0)}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right] dt$$

dove $d\tau$ è l'intervallo di tempo proprio misurato da un orologio su un satellite; V è il potenziale gravitazionale della Terra; Φ_0 il potenziale gravitazionale **effettivo** sul geoide (in un sistema rotante con la Terra); dt è invece il corrispondente intervallo di tempo misurato da un orologio in quiete sul geoide.

- Quindi, il GPS è una applicazione pratica della relatività nella vita quotidiana.

La relatività nella vita quotidiana

- Il GPS (Global Positioning System) tiene conto della dilatazione del tempo e dell'influenza del potenziale gravitazionale sul periodo fondamentale degli orologi atomici [Ashby, 2003].

-

$$d\tau = \frac{ds}{c} \approx \left[1 + \frac{(V - \Phi_0)}{c^2} - \frac{v^2}{2c^2} \right] dt$$

dove $d\tau$ è l'intervallo di tempo proprio misurato da un orologio su un satellite; V è il potenziale gravitazionale della Terra; Φ_0 il potenziale gravitazionale **effettivo** sul geoide (in un sistema rotante con la Terra); dt è invece il corrispondente intervallo di tempo misurato da un orologio in quiete sul geoide.

- Quindi, il GPS è una applicazione pratica della relatività nella vita quotidiana.
- Tuttavia, non si deve dimenticare il fatto che **la luce stessa è un fenomeno relativistico** perché la sua velocità di propagazione nel vuoto è una velocità limite.

Giuliani G 2019 Elettromagnetismo, relatività, quanti - Fisica, storia epistemologia, Pavia: Pavia University Press online [qui](#)

Buonaura B, Giuliani G 2016 Wave and photon descriptions of light: historical highlights, epistemological aspects and teaching practices *Eur.J.Phys.*, 37 [055303](#)