

Corso Scintille di Scienza

Incontro n.8

17 dicembre 2020



IL TEMPO E LO SPAZIO

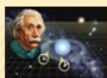


L'enigma chiave nelle discussioni con gli amici era... **cosa accadrebbe esattamente se viaggiassi lungo un'onda luminosa alla velocità della luce?**

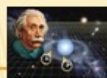
"Supponiamo che regga uno specchio... ..e mi muova alla velocità della luce."

" Muovendomi alla velocità della luce, la luce che emana dalla mia faccia riuscirebbe ad arrivare allo specchio?"

"... e se mi siedo in cima all'onda...
...allora la luce non si muove rispetto a me...
...e non può arrivare allo specchio ed esserne riflessa."



IL TEMPO E LO SPAZIO



Ecco cosa pensa Albert !..

La costanza della velocità della luce nel vuoto in tutti i sistemi inerziali .
È un fatto osservato sperimentalmente e che sta alla base della teoria

Qualunque sia il modo in cui la luce si propaga di luogo in luogo (etere, etc...) la mia immagine **non può** scomparire.

" Se mi muovo a 300.000 chilometri al secondo...
...e la luce si proietta dalla mia faccia a 300.000 Km al secondo..."

allora nella posizione relativa a terra la luce dovrebbe muoversi a
 $300.000 + 300.000 = 600.000$ Km al secondo! e quindi

un osservatore a terra vedrebbe la luce lasciare la faccia di Albert a una velocità doppia del normale! **ASSURDO**

IL TEMPO E LO SPAZIO

LA SIMULTANETA' DI EVENTI

Einstein si è imbattuto nel seguente paradosso:
se, nel vuoto, un uomo potesse inseguire un raggio luminoso alla sua stessa velocità, la luce gli apparirebbe ferma.

Ma le equazioni di Maxwell non prevedono l'esistenza della luce ferma e quindi deve essere valida una sola delle seguenti possibilità:

- le equazioni di Maxwell sono sbagliate;
- è impossibile che un corpo materiale possa viaggiare alla velocità della luce.

Mentre ,per la fisica newtoniana era possibile raggiungere qualunque velocità anche infinita

33

IL TEMPO E LO SPAZIO

LA SIMULTANETA' DI EVENTI

Il concetto di tempo non è altro che l'applicazione del concetto di simultaneità



L'affermazione "il treno arriva alle sette" non è altro che "l'arrivo del treno e il puntare delle lancette dell'orologio sulle ore sette sono eventi contemporanei"

34

IL TEMPO E LO SPAZIO

LA SIMULTANETA' DI EVENTI

Definizione di tempo in un sistema di riferimento



Alice è in A

Quando diremo che
l'orologio di Alice è
sincrono con
l'orologio di Bob?



Bob è in B

35

IL TEMPO E LO SPAZIO

LA SIMULTANETA' DI EVENTI



Alice è in A

Quando diremo che
l'orologio di Alice è
sincrono con
l'orologio di Bob?



Bob è in B



Hp.: la luce impiega lo stesso tempo a percorrere i due tratti AB e BA

Se $t_B - t_A = t_A' - t_B'$ \Rightarrow Gli orologi sono sincroni

36

IL TEMPO E LO SPAZIO

Definizione di tempo in un sistema di riferimento



Se l'orologio di Alice è sincrono con quello di Bob, allora anche l'orologio di Bob è sincrono con quello di Alice



Se l'orologio di Alice è sincrono con quello di Bob, e quello di Bob è sincrono con quello di Tom, allora anche l'orologio di Alice è sincrono con quello di Tom



37

IL TEMPO E LO SPAZIO

LA SIMULTANETA' DI EVENTI

Secondo Einstein il tempo non uguale per tutti ma dipende dall'osservatore.

Lo scorrere del tempo dipende dalla velocità dell'osservatore rispetto alla velocità della luce e dal punto dell'Universo in cui si trova.

IL TEMPO E LO SPAZIO

LA SIMULTANETA' DI EVENTI

Istante dopo che due fulmini hanno colpito i punti A e B, gli impulsi di luce si stanno propagando verso l'osservatore O, il quale vede i fulmini solo quando le luci lo raggiungono.



Se i due impulsi raggiungono O contemporaneamente, l'osservatore deduce che i due eventi sono stati simultanei.

Ciò segue dal secondo postulato, secondo il quale gli impulsi viaggiano alla medesima velocità: dato che le distanze OA e OB sono uguali, uguali sono anche gli intervalli di tempo richiesti alla luce per percorrerle.

L'osservatore O può così stabilire che i due eventi sono avvenuti simultaneamente.

Se d'altronde O vede arrivare la luce dal luogo di un evento prima che dall'altro, egli è sicuro che il primo è avvenuto in anticipo rispetto al secondo

39

SIMULTANEITÀ



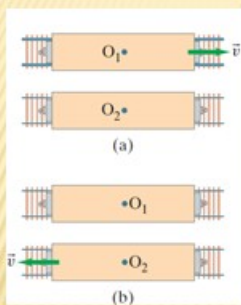
× Consideriamo una locomotiva ferroviaria di estremi A e B **ferma** alla banchina in stazione e

- **supponiamo che i due punti siano raggiunti da un fulmine.**
- **Diremo che il lampo di luce in A è simultaneo a quello in B se un osservatore che si trovi esattamente nel punto di mezzo tra A e B, vede i lampi contemporaneamente.**



40

SIMULTANEITÀ



× Vogliamo ora esaminare la seguente questione: se due eventi sono simultanei per un osservatore nel suo sistema di riferimento, lo sono anche per un altro osservatore in moto rispetto al primo?

Due osservatori O_1 e O_2 su due diversi treni (e due diversi sistemi di riferimento), si muovono con velocità relativa v .

O_2 dice che O_1 si sposta verso destra (a);

O_1 dice che O_2 si sposta verso sinistra (b).

Entrambi i punti di vista sono legittimi; tutto dipende dal sistema di riferimento.

[02] 41

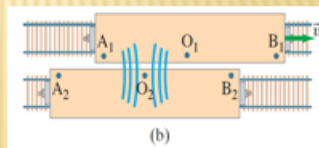
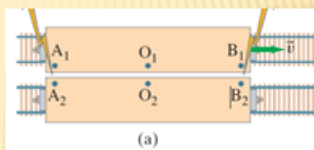
SIMULTANEITÀ

Esperimento mentale sulla simultaneità

Per l'osservatore O_2 il sistema di riferimento O_1 si muove verso destra.

In (a) un fulmine colpisce i due sistemi di riferimento in A_1 e A_2 , e un secondo fulmine si abbatte su B_1 e B_2 .

b) Un istante dopo la luce proveniente dai due eventi raggiunge contemporaneamente O_2 , di modo che questi ritiene che i due fulmini siano caduti simultaneamente.

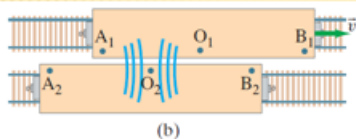


[02]

42

SIMULTANEITÀ

Esperimento mentale sulla simultaneità



Nel sistema di riferimento O_1 invece la luce proveniente da B_1 è già arrivata all'osservatore O_1 mentre quella in arrivo da A_1 deve ancora raggiungerlo.

Sicché nel sistema di riferimento di O_1 l'evento in B_1 deve essere avvenuto prima dell'evento in A_1 .

La simultaneità non è un concetto assoluto?

Potremmo essere tentati di domandare: «Quale osservatore ha ragione, O_1 o O_2 ?» **Tutti e due, secondo la relatività.**

Non esiste il «giusto» sistema di riferimento con il quale decidere chi dei due ha ragione. Entrambi i riferimenti sono egualmente validi.

Non ci resta che concludere che: **il concetto di simultaneità non è assoluto, ma relativo.**

[02] 43

La simultaneità di due eventi è relativa

- Due eventi che sono simultanei in un sistema di riferimento possono non esserlo in un altro sistema di riferimento
- Due eventi che sono simultanei in un sistema di riferimento e avvengono nello stesso punto sono simultanei in tutti i sistemi di riferimento.

SIMULTANEITÀ



✘ **Vediamo un esempio sulla simultaneità degli eventi:**

consideriamo un treno composto da una sola carrozza che sta passando ad alta velocità v davanti ad una stazione in cui vi è un osservatore fermo sulla banchina:

[02]

SIMULTANEITÀ

× L'osservatore O fermo in stazione vede simultaneamente la punta B e la coda A del treno colpiti da due fulmini,



cioè la scintilla in B e la scintilla in A arriveranno contemporaneamente agli occhi dell'osservatore O in stazione.

Tutto ciò nell'istante in cui il treno transita davanti ad O

48



SIMULTANEITÀ

Cosa osserva l'osservatore che si trova nel punto O' , sul treno, e che si muove ad alta velocità v ? Poiché la velocità della luce non è infinita (secondo postulato di Einstein) mentre la scintilla che scocca in B' percorre il tratto $B'O'$, l'osservatore O' si avvicina al punto B' con velocità v ; mentre la scintilla che scocca in A' percorre il tratto $A'O'$, l'osservatore O' si allontana da A' . Quindi **l'osservatore O' vedrà prima l'evento in B' e poi in A' .**

03

47

SIMULTANEITÀ

- × Se il treno viaggiasse con la stessa velocità v in verso opposto, lo stesso osservatore vedrebbe prima l'evento in A' e poi quello in B' .



- Possiamo concludere che il concetto di "simultaneità", di "prima" e di "dopo" sono concetti relativi, cioè il tempo non è assoluto ma relativo.

48

CONSIDERIAMO UN TRENO CHE PERCORRA LA LINEA A VELOCITÀ COSTANTE V



- × L'osservatore O in m vede due lampi simultanei in A e B .
- × L'osservatore O' in m' (che si muove verso B) vede arrivare **prima** la luce proveniente da B e **dopo** quella da A .
- × Per questo osservatore O' , i due eventi non sono simultanei!

Nei primi anni del 1900 ciò è chiaro a tutte le persone sufficientemente ragionevoli, cioè solo ad Albert Einstein! (La considerazione è del prof. Carlo Rovelli)

49

CONSIDERIAMO UN TRENO CHE PERCORRA LA LINEA A VELOCITÀ COSTANTE V



- × L'osservatore O in m vede due lampi simultanei in A e B .
- × L'osservatore O' in m' (che si muove verso B) vede arrivare **prima** la luce proveniente **da B** e **dopo** quella **da A** .
- × Per questo osservatore O' , i due eventi non sono simultanei!

Nei primi anni del 1900 ciò è chiaro a tutte le persone sufficientemente ragionevoli, cioè solo ad Albert Einstein! (La considerazione è del prof. Carlo Rovelli)

× due postulati della relatività.

- Fu questa la ragione che spinse Einstein a scrivere il famoso articolo del 1905, *Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento*, in cui si formulava la teoria della relatività ristretta.
- L'idea geniale di Einstein fu quella di insistere sulla necessità di avere leggi della fisica consistenti, a prescindere dallo stato di moto.

× due postulati della relatività.

- Per soddisfare questo requisito, Einstein modificò le equazioni in modo da rendere impossibile che, a seguito di un qualsiasi movimento, la velocità della luce si discostasse dal suo valore assoluto, c .

La velocità della luce assumeva così il suo ruolo di costante inespugnabile.

Anche se vi muovete verso una sorgente luminosa in quiete, la luce emessa viaggerà sempre verso di voi alla velocità.

Allontanatevi, e la luce vi supererà con velocità c .

Ed è proprio qui che si cela il legame tra l'energia e la massa

× due postulati della relatività (altra forma)

La luce si propaga nello spazio vuoto con la stessa velocità per tutti gli osservatori, indipendentemente dal loro moto o da quello della sorgente luminosa
(ovvero in tutte le forme di moto ondulatorio, la velocità di propagazione dell'onda è indipendente dal moto della sorgente)

Le leggi della fisica restano inalterate indipendentemente dalla scelta del sistema di riferimento inerziale
(ovvero è impossibile rilevare un moto uniforme rispetto all'etere)

1905: annus mirabilis

× Dopo aver così annullato il tempo assoluto della fisica newtoniana, Einstein impiegò poche settimane a ricavare le conseguenze sconvolgenti dei postulati della relatività:

- × dilatazione del tempo
- × contrazione delle lunghezze
- × variazione della massa con la velocità
- × addizione di velocità
- × equivalenza tra massa ed energia

DILATAZIONE DEL TEMPO E CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

- ✗ Newton scriveva nei *Principia*:
- ✗ “Lo spazio assoluto, per sua natura, resta sempre tale e invariabile senza alcuna relazione con l'esterno.
- ✗ Il tempo assoluto, vero e matematico, per sua natura scorre allo stesso modo, senza alcuna relazione con l'esterno”.

57

CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE E LA DILATAZIONE DEL TEMPO

- Un osservatore in quiete (**solidale con**) in un sistema inerziale A vede **dilatarsi** l'intervallo di tempo durante il quale si verifica un fenomeno in un altro sistema inerziale B in moto rispetto al proprio sistema A
- Un osservatore in quiete in un sistema inerziale A vede **accorciato** un oggetto **b**, che si trova in quiete rispetto (**solidale con**) a un altro sistema inerziale B, a sua volta in moto rispetto al proprio sistema A

Δt LA MISURA DEL TEMPO

EINSTEIN INIZIA I SUOI
<<GEDANKEN EXPERIMENTE>>

Δt LA MISURA DEL TEMPO

Confrontiamo le durate di uno stesso fenomeno secondo il punto di vista di due osservatori O ed O' in moto relativo.

I due osservatori vogliono misurare l'intervallo di tempo che un segnale luminoso impiega per percorrere una certa distanza.

L'osservatore O' si muove rispetto ad O a velocità costante.

Gli orologi di O ed O' sono inizialmente sincronizzati!

60

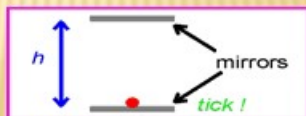
Δt LA MISURA DEL TEMPO

O' lancia un segnale luminoso verso uno specchio che lo riflette indietro.

Vogliamo misurare la durata di questo evento per i due osservatori.



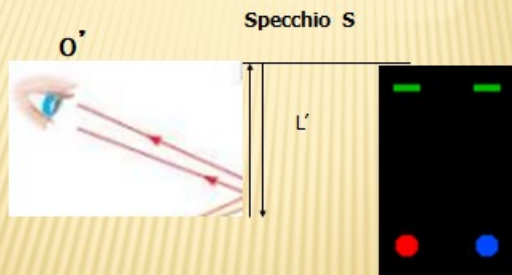
Ne vedremo delle belle!...



61

LA SITUAZIONE VISTA DA O'

Per O', solido con il sistema in moto, il fenomeno avviene nello stesso luogo! (tempo proprio)



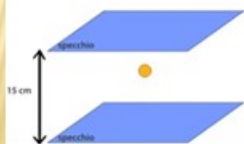
62

OROLOGIO A LUCE

Caso 1. Costruiamo un "orologio a luce"
L'orologio è fermo rispetto a me.



Caso 1. Costruiamo un "orologio a luce"
L'orologio è fermo rispetto a me.



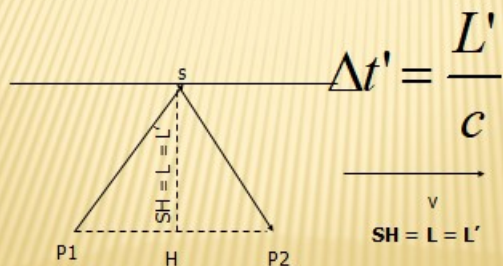
Il fotone urta lo specchio inferiore ogni 1 miliardesimo di secondo.

Dopo 1 miliardo di colpi, sarà passato un secondo.

05

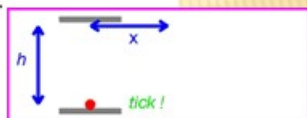
63

Δt RAPPRESENTA L'INTERVALLO DI TEMPO PROPRIO MISURATO
DALL'OSSERVATORE O' CHE SI STA MUOVENDO DI MOTO
UNIFORME RISPETTO ALL'OSSERVATORE O FERMO A TERRA



04

Caso 2. Metto un orologio **in moto** rispetto a me.



Mettiamolo in movimento a velocità costante quando il fotone rimbalza sullo specchio superiore l'orologio si sarà già spostato un poco in questo modo ,più tardi quando il fotone rimbalza di nuovo sullo specchio inferiore l'orologio si troverà in una nuova posizione in questo modo

Caso 2. Metto un orologio **in moto** rispetto a me.



04

Caso 2. Metto un orologio in moto rispetto a me.



Caso 2. Metto un orologio in moto rispetto a me.



Quindi dal mio punto di vista (che sono fermo):

Il fotone percorre un cammino più lungo per ritornare allo specchio inferiore

+

La velocità della luce è sempre la stessa, misurata da ogni osservatore.

=

L'orologio in moto va più piano del mio, perché impiega più tempo a battere un colpo.

Il fatto che la sorgente da lui ci si muova quindi stessa velocità della luce ma percorso più lungo quindi il fotone dell'orologio in moto impiega più tempo a battere un colpo a tornare allo specchio inferiore cioè l'orologio in moto va più piano e

04

66

La simultaneità di due eventi



Due raggi di luce emessi contemporaneamente da due sorgenti ferme l'una rispetto all'altra. I raggi compiono un identico percorso e un osservatore O Esterno (BLU) **stazionario** o **in moto rett. unif.** li vede tornare insieme.



Se uno dei due raggi è emesso da una sorgente in moto (sorgente blu), **l'osservatore stazionario O Esterno non li vede tornare insieme** perché la sorgente si muove, ma la velocità della luce è costante e la luce deve fare (per l'osservatore stazionario) un cammino più lungo: impiega quindi più tempo. Per un **osservatore stazionario** esterno **il tempo e quindi gli orologi nel sistema in moto sono rallentati (ticchettano meno rapidamente)**

67

Se la velocità della luce deve essere la *stessa* in tutti i sistemi di riferimento inerziali, ne segue che lo spazio ed il tempo devono essere relativi.



$T=t$ è la misura fatta dall'orologio fisso sul treno, cioè il tempo proprio dell'osservatore rosso, anche lui sul treno

$T=t'$ è la misura fatta sull'orologio visto dall'osservatore blu fuori dal treno in stazione, o in moto rettilineo uniforme

$$t' = \frac{2L}{c}$$

Inizialmente le due misure fatte dai due osservatori, a treno fermo, sono identiche.



68

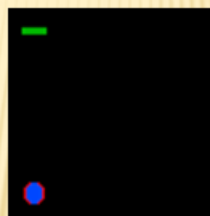
Se la velocità della luce deve essere la *stessa* in tutti i sistemi di riferimento inerziali, ne segue che lo spazio ed il tempo devono essere relativi.

CON IL
TRENO
FERMO



$$t' = \frac{2L}{c}$$

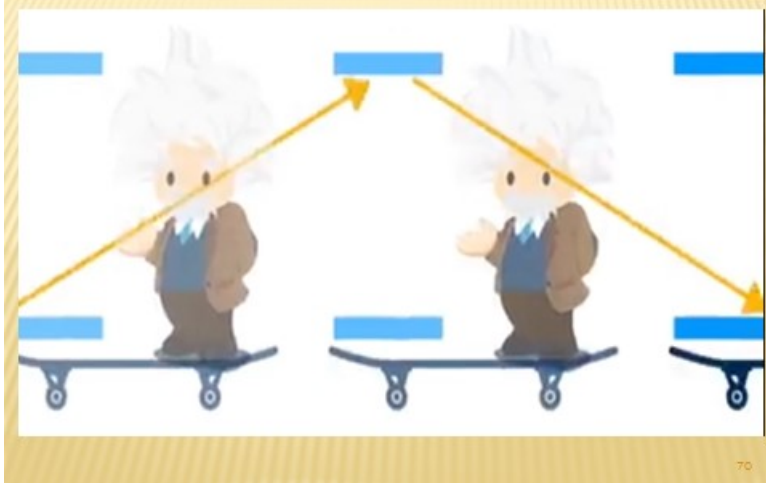
CON TRENO IN MOTO
A VELOCITÀ v



Quale sarà il tempo valutato per questo orologio in moto?



69



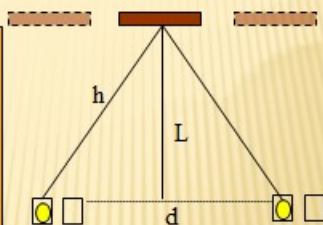
70

1. La dilatazione dei tempi

$$t = \frac{h}{c} + \frac{h}{c} = 2\frac{h}{c}$$

$$d = vt$$

$$h^2 = \left(\frac{1}{2}d\right)^2 + L^2$$



$$\left(\frac{ct}{2}\right)^2 = \left(\frac{1}{2}vt\right)^2 + \left(\frac{ct}{2}\right)^2$$

71

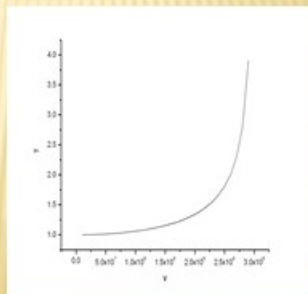
2. La dilatazione dei tempi

$$t = \frac{t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

coefficiente di dilatazione γ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \geq 1$$

*Einstein dice
che gli orologi
in moto
ritardano*



Mis.

Or. Luc.



72

Il tempo scorre diversamente nei due sistemi:
rallenta nel sistema in moto (rallentano tutti
gli orologi, anche quelli biologici . . .)

Simmetricamente :un osservatore in moto con la
sorgente blu **vedrebbe più lungo il cammino del
raggio inviato dalla sorgente rossa** (in moto
rispetto a lui nel verso opposto)

(i due osservatori sono totalmente simmetrici: **i
moti sono relativi**)

73

$$\Rightarrow \tau' = \Delta t'_{\text{a terra}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = T \times \gamma$$

L'intervallo di tempo $\Delta t_{\text{a terra}}$ misurato dall'osservatore **O** risulta dilatato rispetto a $\Delta t = \tau$ (**tempo proprio**) quello misurato da **O'** !!!

74

Il tempo scorre diversamente nei due sistemi: rallenta nel sistema in moto (rallentano tutti gli orologi, anche quelli biologici . . .)

$$T' = T \times \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = T \times \gamma$$

Il fattore γ è il fattore di conversione che permette di osservare il periodo T' , γ volte più lungo ovvero l'orologio **IN MOTO** sarà γ volte più lento rispetto a quello in stato di quiete

Esempio: Su un FRECCIAROSSA a 300 km/h (0,083333 km/s), la dilatazione temporale sarebbe pari a ,000000000000004. Sarebbero necessari più di 800.000 anni (25.228.800.000.000 secondi) per osservare una dilatazione di 1 secondo.

Per registrare differenze di almeno il 5% il FRECCIAROSSA dovrebbe viaggiare a più di 90.000 km/s (324 milioni di km all'ora)

75

$$T' = T_x \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = T_x \gamma$$

Il fattore γ è il fattore di conversione che permette di osservare il periodo T' (tempo esterno) γ volte più lungo ovvero l'orologio sarà γ volte più lento rispetto a quello in stato di quiete

Es: L'osservatore interno al sistema in moto con velocità $v=0,8 c$ rispetto ad un altro osservatore esterno in quiete o moto rett.unifor. , misura un tempo $T=1/10$ minuto = **6 sec** , detto tempo proprio perché riferito allo stesso orologio e stesso spazio sul treno.

Quanto misura il tempo T' , valutato da Oss.esterno, corrispondente al tempo proprio $T=1/10$ min.?

Da $v/c = 0,8 \Rightarrow \sqrt{1 - (v/c)^2} = 3/5 \Rightarrow T' = (1/10) * (5/3) = 1/6$ minuto = **10 sec**
 A **6 sec** (misura Interna) corrispondono **10 sec.** (misura Esterna)

76

$$T' = T_x \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = T_x \gamma$$

La dilatazione del tempo può essere un concetto difficile da accettare, dato che contrasta con le nostre comuni conoscenze. Si può vedere dall'equazione , che l'effetto di dilatazione del tempo è trascurabile quando v **non è** significativamente prossima a c .

Le velocità cui siamo abituati nella nostra vita quotidiana sono molto minori di c e non desta quindi grande meraviglia che non si abbia normalmente percezione della dilatazione del tempo.

Questo effetto è stato invece provato con appositi esperimenti, confermando le previsioni di Einstein.)

77

Nel 1971, per esempio, orologi atomici di estrema precisione hanno fatto il giro del mondo in aereo.

$$T = T_0 \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = T_0 \gamma$$

La velocità degli aerei (103 km/h) era ben lontana da c e pertanto, al fine di rilevare l'effetto di dilatazione del tempo, gli orologi presentavano un'accuratezza al Nanosecondo (10^{-9} s); essi confermarono l'esattezza dell'equazione entro gli errori sperimentali.

La dilatazione del tempo era già stata confermata decenni prima con osservazioni sulle «particelle elementari» dotate di massa molto piccola (in genere tra 10^{-30} e 10^{-27} kg) e quindi accelerabili, con poca spesa di energia, a velocità prossime a c . Molte di queste particelle non sono stabili e decadono dopo un certo tempo in particelle più leggere.

78

Un esempio è dato dal muone, la cui vita media è di 2,2 μ s, ($2,2 \times 10^{-6}$ sec.) se si trova a riposo.

$$T = T_0 \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = T_0 \gamma$$

Accurati esperimenti hanno mostrato che per un muone che viaggia a elevata velocità, viene misurata una vita media più lunga di quando è a riposo, proprio nella misura prevista dalla formula della dilatazione del tempo.

Per le particelle ad alta velocità, si evidenzia una dilatazione della vita e **una contrazione dello spazio percorso**

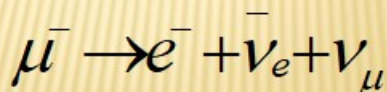
79

IL muone

(μ)

Particelle simili agli elettroni, ma con massa circa 200 volte superiore che si formano per interazione tra i raggi cosmici e l'atmosfera a quote abbastanza alte, circa **9000 metri!**

Sono particelle instabili. Decadono per interazione debole secondo il seguente schema:



80

Che significa: "è lo spazio stesso a contrarsi"?

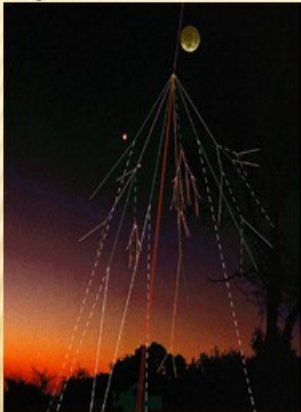
Esistono prove sperimentali? Il caso del "muone"

Il muone è una particella elementare con una vita media molto breve, pochi (circa 2) milionesimi di secondo, pure tuttavia riesce a giungere fin sulla Terra dagli strati alti dell'atmosfera dove si origina, percorrendo una distanza molto maggiore di quella che ci si aspetterebbe conoscendo la sua velocità (0.998c)

($\Delta s = v \Delta t$): 9 chilometri circa al posto di 600 metri.

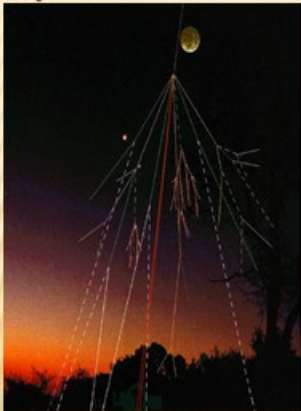
81

Esiste una evidenza sperimentale?



83

Esiste una evidenza sperimentale?



84

IL tempo medio di decadimento misurato in laboratorio è.....

- ✘ I muoni a riposo in laboratorio decadono, cioè si trasformano spontaneamente in altre particelle, mostrando un tempo di vita media di due milionesimi di secondo. I poveri muoni vivono la loro breve vita "con una pistola puntata alla tempia"; in media dopo due milionesimi di secondo dalla nascita il grilletto scatta e i muoni decadono in elettroni e neutrini.

Ma, se gli stessi muoni vengono fatti viaggiare dentro un acceleratore di particelle a velocità di poco inferiore a quella della luce, la loro vita media misurata dagli scienziati fermi in laboratorio aumenta in modo evidente. Sembra impossibile, ma è vero!

Al 99,5 per cento della velocità della luce la vita del muone si allunga di dieci volte.

85

IL tempo medio di decadimento misurato in laboratorio è

$$\tau = (2.19703 \pm 0.00004) \cdot 10^{-6} \text{ sec}$$

$$\tau \cong 2 \mu\text{s}$$

86

I muoni viaggiano alla velocità

$$V = 0.99777c$$

A tale velocità, prima di decadere, dovrebbero percorrere al massimo la distanza:

$$D = V\tau$$

$$D = 0.99777 \cdot 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \cdot 2 \cdot 10^{-6} s$$

Circa 600 metri

87

I rivelatori posti sulla superficie della Terra indicano la presenza di muoni provenienti dall'atmosfera: essi viaggiano, dunque, per 9000 metri!

Come è possibile?

88

I rivelatori posti sulla superficie della Terra indicano la presenza di muoni provenienti dall'atmosfera: essi viaggiano, dunque, per 9000 metri!

I muoni si formano quando i raggi cosmici impattano con l'atmosfera terrestre. Sono particelle instabili che decadono velocemente in un elettrone, un antineutrino elettronico e in un neutrino muonico

Ponendo quale velocità limite per ogni oggetto C , la velocità della luce nel vuoto, si nota una incongruenza tra il numero di muoni aspettati e quelli realmente contati.

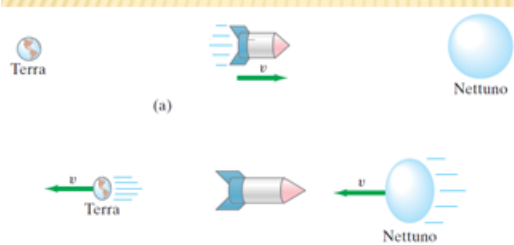
Dilatazione dello spazio e contrazione delle lunghezze risolvono l'apparente paradosso.

89

CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

Gli intervalli di tempo non sono i soli a subire modifiche passando da un sistema di riferimento all'altro. Anche gli intervalli di spazio, cioè lunghezze e distanze, subiscono la stessa sorte nell'ambito della relatività ristretta e per illustrare questo fenomeno ci affideremo ancora a un esperimento mentale

Un osservatore sulla Terra guarda una navicella spaziale in viaggio con velocità v , dalla Terra verso Nettuno.



(a) Una navicella spaziale in viaggio a velocità elevatissima dalla Terra verso Nettuno, vista dal sistema di riferimento terrestre.

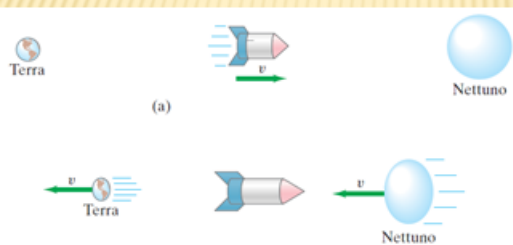
(b) Secondo un osservatore a bordo della navicella, la Terra e Nettuno si stanno muovendo ad altissima velocità v : la Terra «lascia» la navicella e dopo un certo tempo T il pianeta Nettuno «incontra» la navicella

90

CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

La distanza che separa i due pianeti, misurata dall'osservatore terrestre, sia L_0 . Il tempo richiesto per il viaggio, sempre secondo questo osservatore, è $T' = \Delta t_0 = L_0/v$. [Osservatore terrestre]

Un osservatore sulla Terra guarda una navicella spaziale in viaggio, con velocità v , dalla Terra verso Nettuno.



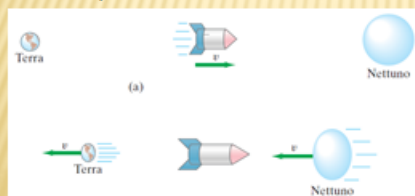
(a) Una navicella spaziale in viaggio a velocità elevatissima dalla Terra verso Nettuno, vista dal sistema di riferimento terrestre.

91

CONTRAZIONE DELLE LUNGHEZZE

Δt_0

La figura b) illustra il punto di vista dell'astronauta a bordo del veicolo spaziale. In questo sistema di riferimento l'astronave è a riposo. La Terra e Nettuno si muovono* invece con velocità di modulo v . Il tempo che intercorre tra la partenza dalla Terra e l'arrivo su Nettuno (rilevato dall'astronave) è il «tempo proprio» (i due eventi accadono nello stesso luogo, cioè sull'astronave). Questo tempo, misurato dall'astronauta, è pertanto minore di quello dell'osservatore terrestre, a causa della dilatazione del tempo.



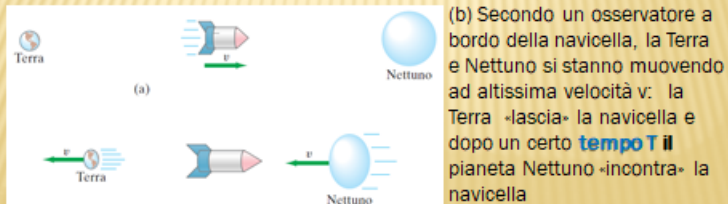
(b) Secondo un osservatore a bordo della navicella, la Terra e Nettuno si stanno muovendo ad altissima velocità v : la Terra «lascia» la navicella e dopo un certo **tempo T** il pianeta Nettuno «incontra» la navicella

92

Dato che per l'astronauta la velocità è la stessa ma l'intervallo di tempo tra i due eventi è inferiore, egli misurerà una distanza tra i pianeti pure inferiore.

È importante notare che la contrazione della lunghezza avviene solo nella direzione del moto.

Per esempio, la navicella della figura a) si accorcia nella direzione della lunghezza, ma la sua altezza rimane la stessa, come se fosse ferma.



93

SI DIMOSTRA, ALTRETTANTO SEMPLICEMENTE, CHE LE LUNGHEZZE SI CONTRAGGONO:

- × N.B. La lunghezza ΔL è misurata in moto, mentre $\Delta L'$ è la lunghezza in quiete.

$$\Delta L = \Delta L' \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < \Delta L'$$

94

La contrazione delle lunghezze

$$\Delta x' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Delta x$$

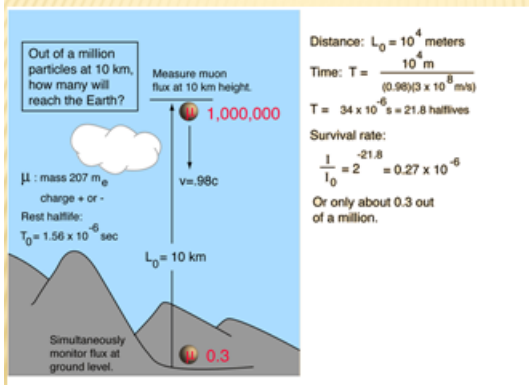
Se un corpo si muove appare più corto



95

I rivelatori posti sulla superficie della Terra indicano la presenza di muoni provenienti dall'atmosfera: essi viaggiano, dunque, per 9000 metri!

Dilatazione dello spazio e contrazione delle lunghezze risolvono l'apparente paradosso.



96

L'osservatore sulla Terra **non** si trova in un riferimento proprio perché gli eventi: produzione e rivelazione del muone non avvengono nello stesso suo luogo o sistema di osservazione !

Il tempo, dunque deve essere corretto secondo la formula della dilatazione:

$$T' = T_x \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = T_x \gamma \quad \Rightarrow \quad \Delta t = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \beta^2}} = 15\tau$$

$$\Rightarrow D = V \cdot 15\tau = 9000 \text{ m}$$

97

MA COSA PENSA IL MUONE DI TUTTO CIÒ?

Secondo il suo punto di vista, la distanza misurata in quiete (9000m) è contratta per effetto della velocità, secondo la relazione:

$$\Delta L = 9000 \cdot \sqrt{1 - \beta^2} = 600 \text{ m}$$

La spiegazione ci viene da un principio di Relatività : gli "orologi interni" dei muoni in moto sono molto più lenti di quelli stazionari e quando per questi ultimi (quelli stazionari) giunge l'ora della fine, per i primi (quelli in moto) è passato meno tempo e continuano a vivere ancora per un po'.

Questa è una prova assai diretta ed evidente degli effetti del moto sul tempo.

Pensate: se un uomo riuscisse a sfrecciare al 99,5 per cento della velocità della luce vivrebbe in media 700 anni

98

MA COSA PENSA IL MUONE DI TUTTO CIÒ?

veniamo al rovescio della medaglia.

Gli scienziati in laboratorio vedono che i muoni in moto vivono di più di quelli fermi; ciò è dovuto al fatto che per quelli in moto il tempo scorre più lentamente. Ora questo rallentamento si applica non solo ai loro orologi ma anche a tutte le loro attività.

Se per esempio un muone stazionario (che supponiamo sappia leggere!) riesce a leggere circa cento libri nella sua breve vita, lo stesso accade al muone in moto perché, anche se la sua vita sembra più lunga, la sua velocità di lettura e tutto il resto della sua vita rallenta allo stesso modo.

Dal punto di vista del laboratorio, il muone in moto vive al rallentatore e la sua esistenza si allunga, ma ciò che riesce quantitativamente a fare durante la sua vita non cambia.