

Seminari PLS

Le Indicazioni nazionali per la fisica nell'ultimo anno dei Licei

10 novembre 2015
Egidio Longo

DIPARTIMENTO DI FISICA



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

IDN per lo scientifico

Il percorso didattico comprenderà le conoscenze sviluppate nel XX secolo relative al microcosmo e al macrocosmo, accostando le problematiche che storicamente hanno portato ai nuovi concetti di spazio e tempo, massa ed energia. L'insegnante dovrà prestare attenzione a utilizzare un formalismo matematico accessibile agli studenti, **ponendo sempre in evidenza i concetti fondanti**.

Lo studio della teoria della relatività ristretta di Einstein porterà lo studente a confrontarsi con la simultaneità degli eventi, la dilatazione dei tempi e la contrazione delle lunghezze; l'aver affrontato l'equivalenza massa-energia gli permetterà di sviluppare un'interpretazione energetica dei fenomeni nucleari (radioattività, fissione, fusione).

L'affermarsi del modello del quanto di luce potrà essere introdotto attraverso lo studio della radiazione termica e dell'ipotesi di Planck (affrontati anche solo in modo qualitativo), e sarà sviluppato da un lato con lo studio dell'effetto fotoelettrico e della sua interpretazione da parte di Einstein, e dall'altro lato con la discussione delle teorie e dei risultati sperimentali che evidenziano la presenza di livelli energetici discreti nell'atomo. L'evidenza sperimentale della natura ondulatoria della materia, postulata da De Broglie, ed il principio di indeterminazione potrebbero concludere il percorso in modo significativo.

La dimensione sperimentale potrà essere ulteriormente approfondita con attività da svolgersi non solo nel laboratorio didattico della scuola, ma anche presso laboratori di Università ed enti di ricerca, aderendo anche a progetti di orientamento.

In quest'ambito, lo studente potrà approfondire tematiche di suo interesse, accostandosi alle scoperte più recenti della fisica (per esempio nel campo dell'astrofisica e della cosmologia, o nel campo della fisica delle particelle) o **approfondendo i rapporti tra scienza e tecnologia** (per esempio la tematica dell'energia nucleare, per acquisire i termini scientifici utili ad accostare criticamente il dibattito attuale, o dei semiconduttori, per comprendere le tecnologie più attuali anche in relazione a ricadute sul problema delle risorse energetiche, o delle micro- e nano- tecnologie per lo sviluppo di nuovi materiali).

IDN per il classico

La dimensione sperimentale potrà essere ulteriormente approfondita con attività da svolgersi non solo nel laboratorio didattico della scuola, ma anche presso laboratori di Università ed enti di ricerca, aderendo a progetti di orientamento.

E' auspicabile che lo studente possa affrontare percorsi di fisica del XX secolo, relativi al microcosmo e/o al macrocosmo, accostando le problematiche che storicamente hanno portato ai nuovi concetti di spazio e tempo, massa e energia.

Alla professionalità del docente si deve intendere affidata la responsabilità di declinare in modo coerente alla tipologia del Liceo in cui opera, i percorsi di cui si sono indicate le tappe concettuali essenziali.

Fisica Moderna

Prima di tutto sarebbe necessaria una visione moderna della fisica classica

- I principi della dinamica
- Simmetria e conservazione
- Centralità delle oscillazioni
- Momento angolare
- La propagazione delle onde
- Interferenza e diffrazione
- Forze ed interazioni

I principi della dinamica

**Come si insegnano
e (soprattutto) cosa ci insegnano
Perché sono così importanti i tre
principi della dinamica?
e prima di tutto, cosa dicono i
principi della dinamica?**

Il “modello standard”

il primo principio come principio di inerzia

il secondo principio come legge di Newton, $F=ma$

il terzo principio come principio di azione e reazione

Il modello standard

il primo principio come principio di inerzia

il secondo principio come legge di Newton, $F=ma$

il terzo principio come principio di azione e reazione

cosa c'è di male?

cosa c'è di male

**la circolarità delle forze
basi sperimentali in ombra
insostenibilità microscopica
terzo principio e azioni a distanza
leggi di conservazione
i tre principi parlano solo di “punti
materiali”**

la circolarità delle forze

definizione statica delle forze

se le forze possono essere definite staticamente
(e misurate, con un dinamometro)

allora rimuovendo una delle forze (p. es. un vincolo e
in particolare il dinamometro)

posso verificare sperimentalmente che $F=ma$

E' un procedimento solido?

Insostenibilità microscopica

la circolarità delle forze

se staticamente stabilisco la presenza di un campo di forze (per esempio la gravità), posso assumere che il campo sia presente indipendentemente dalle forze che lo bilanciano

funziona?

anche in linea di principio?

chi garantisce che nel caso del corpo in moto non compaiano altre forze? p.es. la resistenza del mezzo

ma anche p. es. per un campo elettrico l'effetto concomitante di un campo magnetico!

la circolarità delle forze

punto materiale isolato

- dipendenza delle forze dalla distanza

esistenza di sistemi inerziali e principio di relatività galileiana

- quel sistema in cui un corpo fermo rimane fermo

il problema della gravità

annullamento delle forze esterne

- vincolo, attrito, cuscino d'aria etc.

caduta libera

- l'ascensore di Einstein
- l'assenza di peso degli astronauti

conclusione sul “modello standard”

è su tutti i libri, facciamocene una ragione

Ricordamoci almeno di aggiungere il principio zero (la relatività galileiana) e di formulare il primo principio come l'esistenza di sistemi inerziali (sperimentale?)

una visione moderna

esistenza di sistemi inerziali

relatività galileiana

**conservazione della quantità di
moto**

**conservazione del momento
angolare**

una visione moderna

esistenza di sistemi inerziali

relatività galileiana

**conservazione della quantità di
moto**

**conservazione del momento
angolare**

cosa c'è di bello?

Cosa c'è di bello

**questi principi mantengono la loro
validità sperimentale su tutte le
scale note dell'universo**

sono legati a proprietà

**semplicissime di omogeneità e
isotropia dello spazio(-tempo)**

**sopravvivono al passaggio dalla
relatività di Galilei alla relatività di
Einstein**

terzo principio

**evidenza sperimentale della
conservazione della quantità di
moto e del momento angolare per
qualsunque sistema isolato**

**la risultante delle forze interne e dei
momenti delle forze interne sono
entrambe nulle!**

**le forze interne sono a due a due
uguali ed opposte, e dirette
secondo la stessa linea di azione**

indicazioni didattiche

sviluppare rapidamente i tre principi del modello standard (con gli accorgimenti ricordati)

introdurre prima possibile l'energia potenziale come energia legata alla posizione nello spazio

collegare (sperimentalmente) la forza alla variazione nello spazio dell'energia potenziale

Teorema dell'impulso o della quantità di moto

$$f = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow f \Delta t = m \Delta v = \Delta(mv)$$

estensione ai sistemi:

secondo teorema del centro di massa

(cancellazione delle forze interne)

Teorema delle forze vive o dell'energia cinetica

$$f = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t} \rightarrow f \Delta t = m \Delta v \rightarrow f v \Delta t = m v \Delta v$$

$$f \Delta x = m v \Delta v = \Delta\left(\frac{1}{2} m v^2\right)$$

estensione ai sistemi:

teorema di Koenig e ruolo delle forze interne

(non cancellazione del lavoro delle forze interne)

forze conservative

conservazione dell'energia

energia potenziale come integrale del lavoro per le forze conservative

energia potenziale come energia dipendente dalla posizione nello spazio

il potenziale della forza peso

il paradigma delle montagne russe

imparare a “vedere” la dinamica attraverso l'energia potenziale

conservazione dell'impulso e del momento angolare

la palestra dell'oscillatore armonico

le leggi di Keplero rivisitate

oscillazioni

1. Le leggi che governano un sistema oscillante possono essere ricavate in maniera completa e rigorosa utilizzando principi fisici di base e strumenti matematici piuttosto semplici.
2. E' piuttosto agevole riconoscere il rispetto di queste leggi nel comportamento di semplici oggetti come una molla, un lampadario che oscilla o un'altalena. Addirittura è possibile realizzare con poco sforzo qualche oscillatore meccanico su cui fare osservazioni e verifiche e poi complicare via via gli esperimenti, ad esempio realizzando l'accoppiamento di due di questi oscillatori.
3. Infine si può man mano scoprire che nel mondo che ci circonda moltissime cose, tra loro diversissime, si comportano in realtà come oscillatori. Le semplici leggi che avremo imparato ci aiuteranno quindi ad interpretare e comprendere fenomeni tra loro molto lontani per natura (dagli oscillatori meccanici ai circuiti elettrici) e per dimensioni (dalla scala atomica alla interpretazione delle orbite ellittiche dei pianeti).

propagazione per onde

onde, ottica

interferenza

l'interferenza in laboratorio

diffrazione e principio di indeterminazione

l'importanza dell'unificazione

**l'elettromagnetismo è citato come il primo
esempio di “unificazione”**

**ma anche la gravitazione “universale” è un
bellissimo esempio di unificazione**

l'unificazione è una via maestra.

unificazioni presenti e future

unificazioni “formali”

forza di Newton e forza di Coulomb

$$f_N \propto \frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad f_C \propto \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Forze o interazioni?

non si tratta di una differenza semantica:

le forze di Newton o di Coulomb rappresentano l'interazione a distanza tra due masse o due cariche

se muovo (o addirittura rimuovo) una delle due sorgenti, l'altra risente istantaneamente della variazione

le forze a distanza non sono tuttavia compatibili con la relatività ristretta, secondo la quale nessuna informazione si può propagare con velocità maggiore di quella della luce

nell'800, Faraday aveva già sviluppato l'idea di campo

la soluzione delle eq. di Maxwell di un'onda che si propagasi propaga dimostra che esiste qualcosa che rappresenta il campo elettromagnetico che continua a viaggiare nello spazio anche quando la carica che lo ha generato venisse eliminata (p. es. un dipolo oscillante emette un'onda che continua a propagarsi anche se le due cariche del dipolo vengono sovrapposte e azzerate)

mediatori delle interazioni

le quattro interazioni sono tutte “mediate” da particelle (il fotone, i bosoni intermedi, i gluoni e il gravitone)

campi di materia e campi di forza

in meccanica quantistica le interazioni sono sempre “locali”, tra un campo di forza e un campo di materia

Fisica Moderna

- relatività ristretta
- teoria dei quanti
- struttura atomica e subatomica
- le particelle elementari
- l'evoluzione dell'universo
- la relatività generale (!?)

dimensione teorico/concettuale, dimensione sperimentale e
dimensione tecnologica

generalmente si tende a privilegiare la prima

invece le tre dimensioni emergono in maniera evidente quando si
affronta la struttura atomica e subatomica:

- come facciamo a sapere che la struttura è proprio quella?
- non ce lo può dire certo né la relatività, né la meccanica quantistica

va notato che le scoperte sperimentali sono in genere molto più
semplici da descrivere che non le teorie conseguenti

relatività ristretta

i due postulati:

- equivalenza di tutti i sistemi di riferimento inerziali: le leggi fisiche sono le stesse in tutti i riferimenti in moto rettilineo e uniforme tra di loro
- invarianza della velocità della luce

combinati con i principi di invarianza e conservazione

l'energia totale, la quantità di moto e il momento angolare di un sistema isolato si conservano
una forza esterna varia sia la quantità di moto (teorema dell'impulso) che l'energia del sistema (teorema dell'energia cinetica)

discussione sull'insegnamento della relatività ristretta

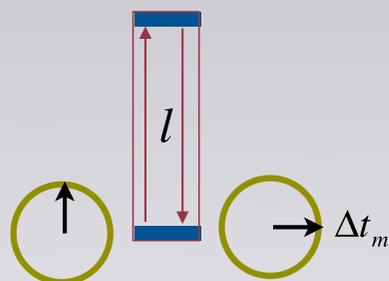
“Relativamente semplice” (articolo di G. Battimelli)

- invarianza della velocità della luce ed equazioni di Maxwell
 - (però l'interferometro di Michelson Morley è così affascinante!)
- non si può capire Lorentz senza Galilei
- costruire le trasformazioni di Lorentz
- chiarire esattamente quando la relatività diventa importante
- dare il giusto peso agli invarianti, piuttosto che alla relatività!
- rivisitare le leggi e i concetti della dinamica (quantità di moto, energia e loro conservazione) e il loro rapporto con le simmetrie dello spaziotempo
- conseguenze sperimentali della relatività ristretta
 - dilatazione del tempo e contrazione delle lunghezze
 - trasformazione di massa in energia

dilatazione dei tempi

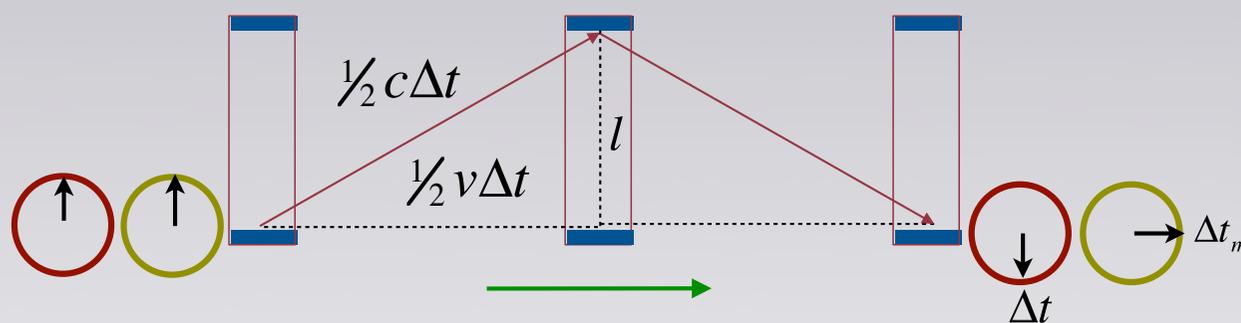
un orologio segna il tempo in base al tempo impiegato da un raggio di luce per andare avanti e indietro dalla sorgente luminosa al ricevitore

l'orologio (verde) segna un tempo Δt_m quando il raggio luminoso raggiunge il ricevitore:



$$2l = c\Delta t_m$$

se confrontiamo lo stesso orologio (verde) in movimento con due orologi (rossi) fermi e sincronizzati tra loro, rispetto ad essi il raggio luminoso impiega un tempo Δt maggiore:



$$c^2 \Delta t^2 = (v^2 \Delta t^2 + 4l^2)$$

$$(c^2 - v^2) \Delta t^2 = 4l^2 = \Delta t_m^2 c^2$$

$$\Delta t_m = \Delta t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < \Delta t$$

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

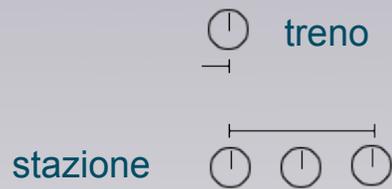


Fig. 1

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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

⊙ treno
→

stazione



Fig. 1

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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



stazione



Fig. 1



Fig. 2

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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

treno

stazione



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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



stazione



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3

Nota bene: il confronto è sempre tra un orologio in moto e un insieme di orologi sincronizzati nel riferimento in quiete

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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



stazione



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3

treno



Fig. 4

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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

treno

stazione



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3

treno



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

stazione



Fig. 4

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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

treno

stazione



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3

treno



stazione



Fig. 4

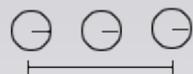


Fig. 5

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

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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

treno

stazione



Fig. 1



Fig. 2



Fig. 3

treno



Fig. 4

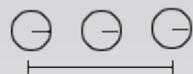


Fig. 5

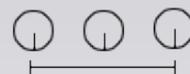


Fig. 6

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

stazione

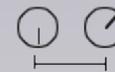


interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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



treno



stazione



stazione



Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 2'

treno



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

stazione



Fig. 4

Fig.5

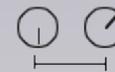
Fig. 6

interpretazione della dilatazione dei tempi (modello: treno e stazione)

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



treno



stazione



stazione



Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

Fig. 2'

treno



treno



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

stazione



stazione



Fig. 4

Fig.5

Fig. 6

Fig.5'

conseguenze

- contrazione delle lunghezze
- relatività della successione temporale
- trasformazione di Lorentz
 - trasformazione completa dei tempi
 - trasformazione delle posizioni

contrazione delle lunghezze

La lunghezza del treno, confrontata con la lunghezza della stazione nel sistema di riferimento in cui la stazione è ferma, risulta contratta, così come è contratta la lunghezza della stazione, confrontata con la lunghezza del treno nel riferimento in cui il treno è fermo (fenomeno della contrazione delle lunghezze).



Fig. 2'

Fig. 5'

relatività della successione temporale

Nel riferimento della stazione la coda del treno arriva in cima alla stazione prima che la testa del treno sia arrivata in fondo alla stazione, mentre nel riferimento del treno la testa del treno arriva in fondo alla stazione prima che la coda del treno sia arrivata in cima alla stazione



Fig. 2'

Fig. 5'

trasformazioni dei tempi

Per quanto riguarda gli orologi in moto, questi possono essere tanto in ritardo che in anticipo rispetto a un sistema di orologi fermi, a seconda della loro posizione spaziale. In altri termini, le semplici relazioni tra t e t' apparentemente contraddittorie, devono essere scritte più precisamente come

$$t_{x=0} = t' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad t'_{x=0} = t \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Per trovare la dipendenza dei tempi segnati dagli orologi dalla posizione degli orologi stessi, dovendo esservi una dipendenza lineare (come si può vedere considerando altri orologi equispaziati), poniamo:

$$t = t' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + kx \qquad (1)$$

Consideriamo il punto $x' = 0$, fermo in Σ' . La sua posizione in Σ è data da vt , in cui v è la velocità positiva del treno, mentre il tempo t' è dato dalla seconda delle due equazioni scritte sopra. Sostituendo si ottiene:

$$t = t' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} + kv t \Rightarrow 1 = 1 - \frac{v^2}{c^2} + kv \Rightarrow k = \frac{v}{c^2} > 0$$

in cui k risulta positivo in quanto il treno si muove con velocità positiva. Se riscriviamo l'eq. (1) separando le coordinate dei due sistemi di riferimento e ricavando t' , e poi ripetiamo la derivazione scambiando i ruoli dei due riferimenti, tenendo conto che la velocità della stazione rispetto al treno è $-v$, otteniamo le due trasformazioni di Lorentz per i tempi:

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

$$t = \frac{t' + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \left(t' + \frac{v}{c^2} x' \right)$$

trasformazione delle posizioni

Con semplici passaggi algebrici, dalle equazioni precedenti si possono ottenere le trasformazioni di Lorentz per le posizioni, che risultano:

$$x' = \gamma(x - vt)$$

$$x = \gamma(x' + vt')$$

trasformazioni di Lorentz

$$\beta = v_x/c$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}.$$

$$ct' = \gamma(ct - \beta x)$$

$$x' = \gamma(x - \beta ct)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$\begin{pmatrix} a'_0 \\ a'_1 \\ a'_2 \\ a'_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma a_0 - \beta\gamma a_1 \\ -\beta\gamma a_0 + \gamma a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}$$

un oggetto che si trasforma secondo le trasformazioni di Lorentz è detto quadrivettore

Le componenti di un quadrivettore devono essere grandezze fisiche omogenee



quadrivettori e invarianti relativistici

se definiamo il prodotto scalare tra due quadrivettori come il prodotto delle componenti temporali meno il prodotto scalare delle componenti spaziali abbiamo:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}' \cdot \mathbf{B}' &= a'_0 b'_0 - a'_1 b'_1 - a'_2 b'_2 - a'_3 b'_3 = \\ &= \gamma^2 (a_0 - \beta a_1)(b_0 - \beta b_1) - \gamma^2 (a_1 - \beta a_0)(b_1 - \beta b_0) - a_2 b_2 - a_3 b_3 = \\ &= \gamma^2 (1 - \beta^2)(a_0 b_0 - a_1 b_1) - a_2 b_2 - a_3 b_3 = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} \end{aligned}$$

$$dS^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2$$

il prodotto scalare tra due quadrivettori è invariante per trasformazioni di Lorentz, come il prodotto scalare di due vettori è invariante per traslazioni (e per trasformazioni di Galilei)

Intervallo tra due eventi

per due eventi che sono collegati da un segnale luminoso:

$$L^2 = (x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2$$

$$L^2 = c^2(t_2 - t_1)^2$$

$$c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 = 0$$

se $L^2 < c^2(t_2 - t_1)^2$

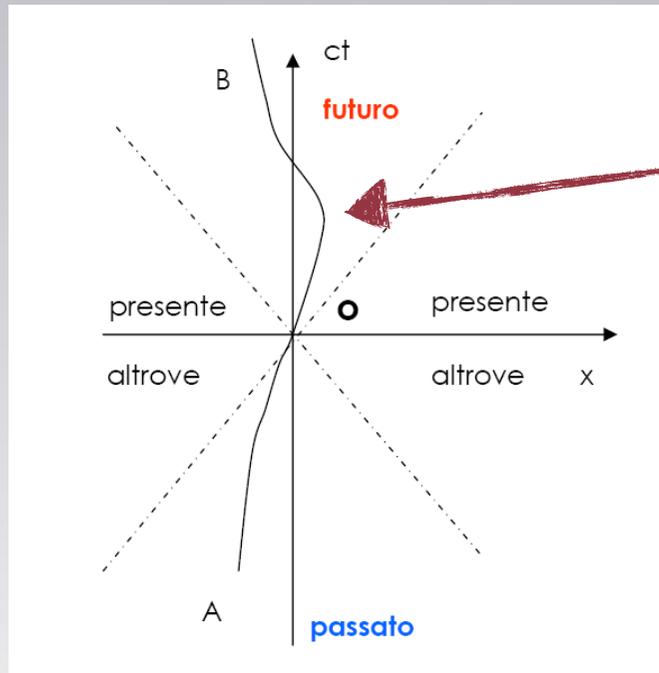
$$\Rightarrow c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 < 0$$

se $L^2 > c^2(t_2 - t_1)^2$

$$\Rightarrow c^2(t_2 - t_1)^2 - (x_2 - x_1)^2 - (y_2 - y_1)^2 - (z_2 - z_1)^2 > 0$$

$\Delta s \equiv (c\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z)$ è il quadrivettore intervallo spaziotemporale, e la sua proprietà di essere maggiore, minore o uguale a zero è quindi invariante per trasformazioni di Lorentz

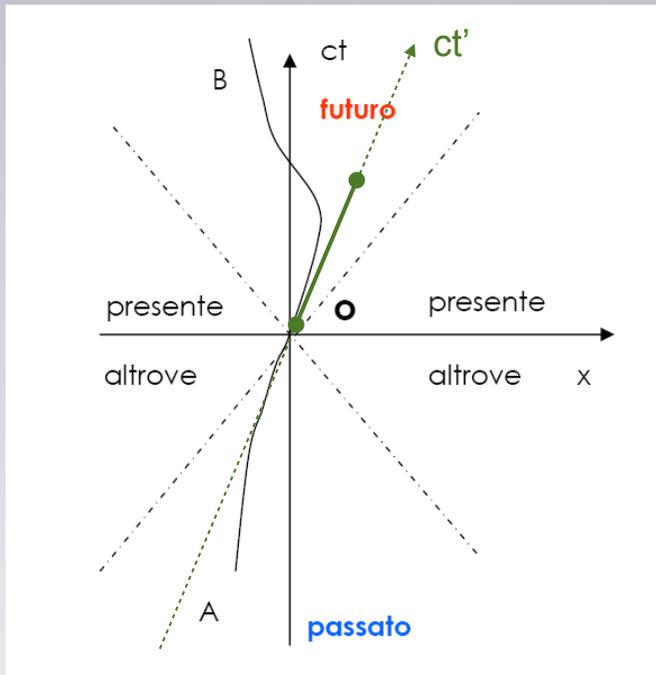
cono di luce e proprietà dello spazio-tempo



“linea di universo”: traiettoria di un punto materiale nello spaziotempo. La pendenza della tangente alla linea di universo è proporzionale all'inverso della velocità e non può mai essere minore di 45° (che corrisponde alla velocità della luce)

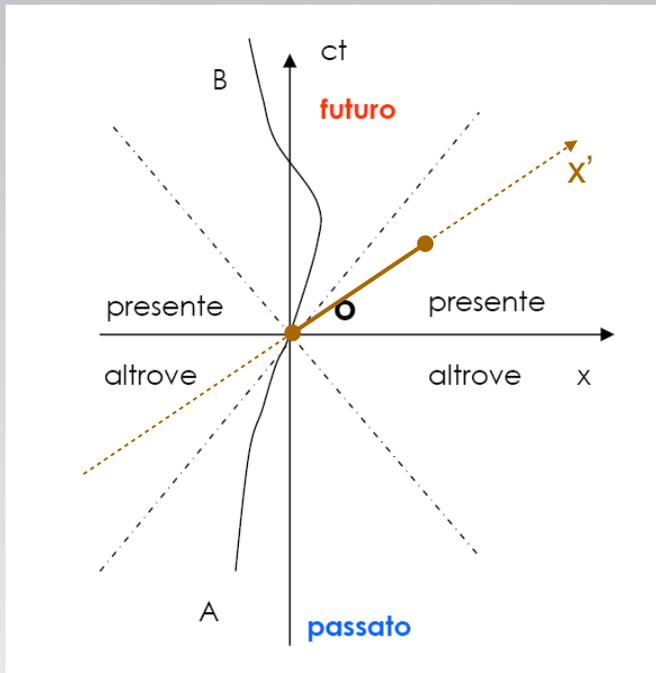
spazio di Minkowski

cono di luce e proprietà dello spazio-tempo



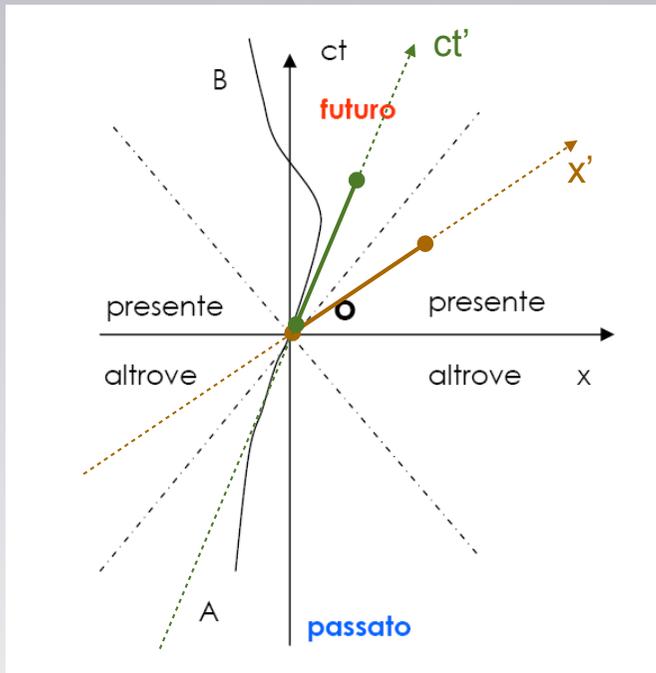
- $S_{12}^2 > 0$: tra i due eventi c'è una separazione di tipo tempo e sono quindi connessi causalmente vale a dire che esiste una linea di universo che li connette uno all'altro. Esiste inoltre una trasformazione di Lorentz ad un nuovo sistema di riferimento nel quale i due eventi coincidono spazialmente ($\vec{x}'_1 = \vec{x}'_2$) ma non temporalmente.

cono di luce e proprietà dello spazio-tempo



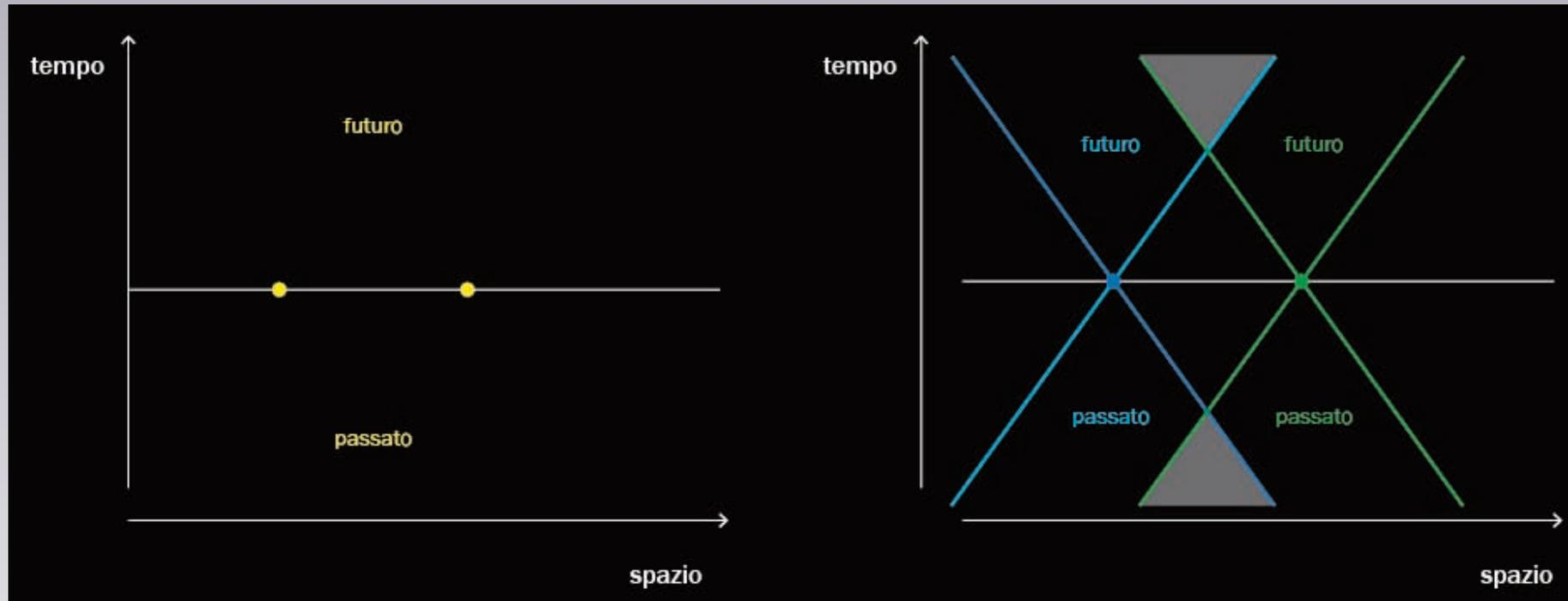
- $S_{12}^2 > 0$: tra i due eventi c'è una separazione di tipo tempo e sono quindi connessi causalmente vale a dire che esiste una linea di universo che li connette uno all'altro. Esiste inoltre una trasformazione di Lorentz ad un nuovo sistema di riferimento nel quale i due eventi coincidono spazialmente ($\vec{x}'_1 = \vec{x}'_2$) ma non temporalmente.
- $S_{12}^2 < 0$: tra i due eventi c'è una separazione di tipo spazio. Questi eventi non sono connessi perchè nessuna linea di universo può metterli in connessione (a meno di violare il limite rappresentato dalla velocità della luce). In questo caso esiste una trasformazione di Lorentz ad un sistema di riferimento nel quale i due eventi si verificano in punti diversi dello spazio ma nello stesso tempo ($t'_1 = t'_2$).
- $S_{12}^2 = 0$: il primo evento si trova sul cono di luce generato dal secondo e viceversa.

cono di luce e proprietà dello spazio-tempo



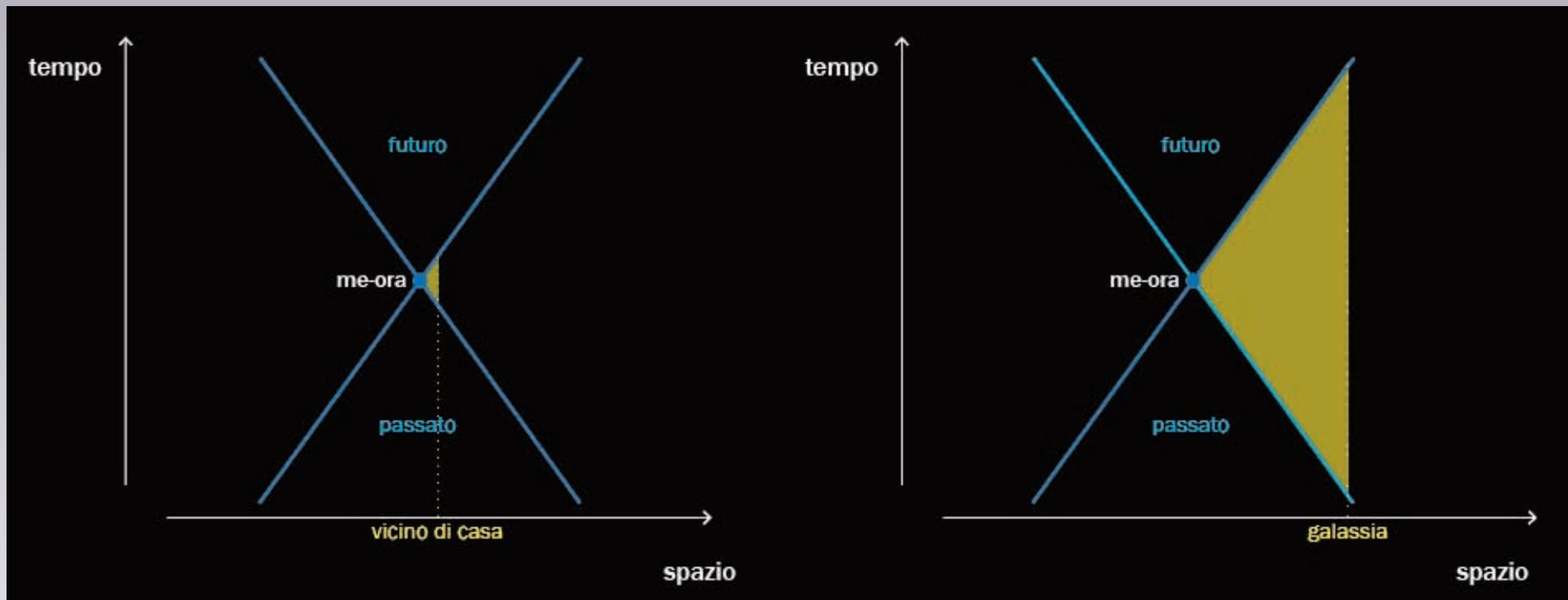
Una trasformazione di Lorentz può essere rappresentata sul piano di Minkowski con due assi simmetrici rispetto al cono di luce

la contemporaneità



Per la fisica newtoniana, due eventi che avvengono nello stesso istante, hanno lo stesso passato (semipiano inferiore) e lo stesso futuro (semipiano superiore). La linea orizzontale rappresenta il presente, ed è la stessa in qualunque sistema di riferimento.

Nella relatività ristretta, il punto blu e il punto verde sono simultanei solo in un particolare sistema di riferimento ed hanno un passato ed un futuro distinti, rappresentati dai due coni tridimensionali verde e blu. Le intersezioni dei due coni rappresentano il passato ed il futuro comuni dei due eventi.



L'intervallo di tempo degli eventi che non sono connessi causalmente a me-ora aumenta all'aumentare della distanza da me del punto dello spazio in cui questi eventi si verificano.

Questo intervallo di tempo è di qualche decina di nanosecondi per gli eventi che si verificano vicino a me (è per questo che tra me e il mio vicino di casa gli effetti sono impercettibili), è di qualche decina di minuti per eventi che si verificano, ad esempio, su Marte e può essere di milioni o di miliardi di anni per eventi che si verificano su una lontana galassia.