

IL PRINCIPIO DI RELATIVITA' E SUE CONSEGUENZE

Collegamento con la relatività galileiana

Tra gli argomenti che gli aristotelici opponevano all'ipotesi eliocentrica, uno dei più <<forti>> era quello delle gittate di due palle di cannone, sparate una verso est e l'altra verso ovest.

Come fa notare Galileo, il fatto che la gittata di due proiettili sparati in direzioni opposte sia la stessa, non implica necessariamente che il sistema terra + cannone sia in quiete. Ciò è garantito dal principio di relatività il quale afferma che le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali. Detto in altre parole, affermare che un sistema è in quiete non ha senso perché non esistono esperimenti in grado di distinguere se esso è in quiete o in moto rettilineo uniforme.

Proviamo ora ad immaginare una variante dell'esperimento citato: sostituiamo ai proiettili due raggi di luce. Supponiamo di negare il principio di relatività affermando che la luce si comporta come i proiettili (si muove cioè con la stessa velocità nelle due direzioni opposte) solo in un particolare sistema di riferimento. In generale ci aspettiamo, a meno di identificarci con questo stesso riferimento "assoluto", che la luce si muova nelle due direzioni opposte con velocità diverse. Un esperimento che provi il contrario ci farebbe concludere che il nostro sistema di riferimento è fermo, cioè solidale con quello assoluto. In particolare possiamo progettare un esperimento idoneo ad evidenziare il moto della terra.

Mentre ci accorgiamo che il nostro atteggiamento richiama quello degli anticopernicani, riflettiamo sul fatto che non è stato mai trovato un esperimento che confermi il moto della terra o di qualsiasi altro riferimento rispetto a quello assoluto.

Apparentemente non c'è nessuna necessità di evitare una estensione del principio di relatività ai raggi di luce e quindi dalla meccanica a tutti i fenomeni fisici..

La velocità della luce.

Dalle equazioni del campo elettromagnetico di Maxwell, risulta che la velocità della luce nel vuoto, come quella di ogni altra onda elettromagnetica, è costante e non dipende, quindi, dalla velocità della sorgente, né dalla velocità dell'osservatore che la misura. Questo è in contraddizione con il concetto di relatività: la velocità di un corpo dipende da quella del riferimento, di conseguenza non può essere invariante!

Da un lato, quindi, questa osservazione è in contraddizione con la relatività galileiana, poiché nega la composizione delle velocità nel caso della luce. C'è però un'altra osservazione da fare: secondo il principio di relatività galileiana, non è possibile determinare, all'interno di un sistema inerziale, se il sistema è in moto, o in quiete, tramite esperimenti di meccanica: ad esempio, è evidente che possiamo svolgere senza problemi qualsiasi attività su un treno che si muove con velocità uniforme su un rettilineo; allo stesso modo, la gittata di uno sparo non cambia in base alla direzione del colpo rispetto alla direzione del moto. Ma questo è ciò che accade con la luce: dato che la sua velocità è invariante, non ho modo di verificare il moto o la quiete del mio sistema, basandomi su di essa; questa considerazione si basa proprio sul principio di relatività galileiana! Quindi, da un lato l'invarianza della velocità della luce è in disaccordo con la relatività galileiana, mentre, dall'altro, è perfettamente coerente.

Facciamo un esempio: svolgiamo un esperimento in un vagone chiuso di un treno che si muove uniformemente; il nostro obiettivo è dimostrare che il treno è in moto osservando qualche comportamento anomalo in esperimenti di meccanica. Useremo una pallina dopo esserci posti al centro del vagone: lanciandola con la stessa forza e angolazione in qualunque direzione, la gittata del nostro lancio sarà identica rispetto a noi, perché la velocità con cui avvengono i lanci è sempre la stessa; ma,

visto che questo succede anche a treno fermo, non riusciamo in questo modo a rivelare alcun moto del treno. La gittata dei due lanci sarà però diversa per un osservatore sulla terra immobile, infatti le velocità con cui vengono lanciate le palline saranno per lui diverse, a causa del moto del treno, mentre per noi saranno uguali.

Proviamo a ripetere l'esperimento con la luce: inviamo raggi di luce in tutte le direzioni: verificheremo che la velocità dei raggi è sempre la stessa; neanche stavolta riusciamo a rivelare il moto del treno. Ma il comportamento dei raggi visto dall'esterno è "anomalo": **anche l'osservatore fermo a terra vede i raggi muoversi con la stessa velocità in tutte le direzioni.** Questo è in contrasto con la relatività classica di Galileo, ma non lo è all'interno del vagone! Ecco la contraddizione: l'esperimento con i raggi di luce, dall'interno del vagone convalida la teoria classica della relatività, mentre dall'esterno la nega! Visto che l'esperimento contemporaneamente afferma e nega una teoria, non si può sapere se salvare la teoria o trovarne una più corretta.

Riassumendo

Il principio di relatività afferma che **le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali.**

E' stato scoperto (e non è mai stato provato il contrario) che **la velocità della luce è la stessa in tutti i sistemi di riferimento.**

Secondo la fisica classica queste due asserzioni non possono essere entrambe vere. Per costruire una teoria fisica senza contraddizioni, che ammetta queste due affermazioni come postulati, è necessaria una revisione dei concetti di tempo e di spazio. Abbiamo constatato prima di avere a che fare con due affermazioni corrette ma in contrasto fra di loro secondo la fisica classica. Più precisamente esse non sono compatibili nel momento in cui viene accostato un postulato che la fisica classica sottintende: quello dell'**invarianza del tempo.**

Relatività della simultaneità

A questo punto, approfondiamo lo studio del concetto di tempo, finora dato per scontato come assoluto.

Partiremo da un concetto che sta alla base della definizione di tempo: quello della simultaneità di due eventi. Il senso comune ci farebbe dire che se due oggetti cadono per terra contemporaneamente in un sistema di riferimento questo accade anche per un altro osservatore, ma ciò non è sempre vero.

Ci chiediamo se due eventi che sono simultanei in un sistema di riferimento lo siano anche in un riferimento in moto rispetto al primo.

Prima però dobbiamo dare una definizione di <<simultaneità>>.

Riportiamo le parole di Einstein: <<... Questo concetto non esiste per il fisico fino a quando egli non ha la possibilità di scoprire nel caso concreto se tale concetto si verifichi oppure no. Abbiamo perciò bisogno di una definizione di simultaneità capace di fornirci il metodo per mezzo del quale decidere sperimentalmente, nel caso attuale, se entrambi i colpi di fulmine sono avvenuti simultaneamente o no >>. . (Nel brano si fa riferimento al noto paradosso del fulmine che colpisce simultaneamente due punti lontani, A e B, di una linea ferroviaria).

Definizione di simultaneità:

Sia M il punto medio tra A e B ed O un osservatore posto in M, fornito di un dispositivo che gli permetta di ricevere segnali luminosi provenienti da A e da B, per esempio i bagliori del fulmine.

Se O percepisce i segnali nel medesimo istante, allora i due eventi (i colpi di fulmine) sono simultanei.

L'operazione inversa (O lancia due segnali contemporaneamente, verso A e verso B) permette di sincronizzare due orologi , posti in A e in B rispettivamente.

Immaginiamo ora la seguente situazione: due osservatori si trovano alle due estremità di un vagone ferroviario e nel punto medio del vagone è posta una sorgente luminosa che emette impulsi

ripetutamente. Questi impulsi raggiungono i due osservatori simultaneamente per definizione di simultaneità. Poniamoci ora in un riferimento esterno a quello del vagone e proviamo a descrivere la stessa situazione. Dobbiamo tenere a mente il fatto che nel nostro sistema di riferimento (come in tutti gli altri) la luce si propaga in tutte le direzioni con la stessa velocità. In altri termini tutti gli osservatori devono descrivere il moto degli impulsi luminosi esattamente allo stesso modo. Ovviamente non descriveranno il moto del vagone allo stesso modo: per gli osservatori interni il vagone è fermo, per quello esterno si muove. L'osservatore esterno noterà che l'impulso luminoso arriva prima sulla coda che sulla testa del treno. Quindi i due eventi che sono simultanei per gli osservatori all'interno non lo sono per quello all'esterno. Ciò giustifica intuitivamente anche la contrazione relativistica delle lunghezze: poiché la coda è in anticipo rispetto alla testa, essa ha camminato un po' di più rispetto alla testa e quindi il vagone in moto è più corto.

Relatività dello scorrimento del tempo

Passiamo ora a dare una definizione operativa dell'intervallo di tempo e verificarne l'invarianza.

E' già intuibile che il tempo non è assoluto, basandoci sulle precedenti osservazioni sulla simultaneità. Supponiamo di avere un particolare orologio a "luce", costituito da uno strumento che emette un raggio di luce; questo incide su uno specchio e torna indietro, quando arriva **viene segnata un'unità di tempo** (come un "tic" in un comune orologio) e viene emesso un altro raggio, così da continuare questa serie di eventi. **Questa successione è periodica e costante**, quindi può essere utilizzata per misurare il tempo. A questo punto, ipotizziamo di essere fermi e l'orologio con noi: l'unità di tempo che l'orologio segna periodicamente dipende dal tempo che la luce impiega a compiere il suo percorso nell'orologio. Possiamo ottenere il tempo di percorrenza dividendo lo spazio per la velocità con cui lo si percorre: ammettendo di conoscere la distanza fra l'emettitore del segnale luminoso e lo specchio, che chiameremo L, la distanza da percorrere è pari a **2 volte L** (andata+ritorno), mentre la velocità è quella della luce, c. Quindi il nostro intervallo di tempo con l'orologio in quiete rispetto a noi è: $\Delta t = 2L/c$. Andiamo oltre: supponiamo ora che l'orologio si muova rispetto a noi perpendicolarmente alla direzione del raggio di luce che emette, di moto rettilineo uniforme. La sua velocità sarà conosciuta e genericamente chiamata v. Il senso comune ci dice che **l'unità di tempo segnata dall'orologio dovrebbe essere sempre la stessa**, dato che il moto dell'orologio, che è rettilineo uniforme, non può influire sul raggio al suo interno. Il raggio di luce continuerà nel suo moto periodico nell'orologio, ma noi lo vedremo muoversi anche in un'altra direzione (quella del moto dell'orologio), quindi ora **lo spazio complessivo che esso percorre non è più 2L, ma è maggiore** (si può facilmente calcolare col teorema di Pitagora: lo spazio che percorre è l'ipotenusa del triangolo rettangolo che ha per cateti lo spostamento del raggio e quello dell'orologio). Lo stesso procedimento dovrebbe avvenire non solo con gli spazi, ma anche con le velocità (il raggio ha una certa velocità, e l'orologio anche; la risultante dovrebbe essere maggiore delle due), e l'intervallo di tempo dell'orologio dovrebbe rimanere invariato: tuttavia, abbiamo precedentemente stabilito sperimentalmente che la velocità della luce è costante e non si compone con altre velocità (proprio come in questo caso). Quindi, incredibilmente, **la velocità del raggio rimarrà la stessa di prima!** Di conseguenza, visto da fuori, cioè dal nostro punto di vista, il raggio dovrà percorrere, nello stesso tempo di quando era fermo, **un tratto più lungo, ma con la stessa velocità!** Sembrerebbe un paradosso, ma possiamo spiegarlo: è la definizione che diamo al tempo quella che ci ha traditi: si pensa comunemente che il suo scorrimento sia costante e uguale per tutti, mentre questo esperimento dimostra il contrario! L'osservatore esterno vede l'orologio muoversi più lentamente, poiché il tempo si dilata.

Si giunge così alla conclusione che **un riferimento che osserva un sistema in moto rispetto ad esso, rileva uno scorrimento del tempo più lento.**

Relatività del concetto di distanza spaziale

Anche il concetto di lunghezza di un segmento va rivisto alla luce della definizione di tempo e di simultaneità.

Cos'è la lunghezza di un segmento AB se non la distanza tra i due punti misurata rilevando la posizione di A e di B contemporaneamente?

La relatività della simultaneità porta come conseguenza la relatività delle lunghezze!

Fabrizio Massicci 4D

Marco Meneghelli 4D