

## La relatività galileiana

"Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso: e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animaletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno eguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. Osservate che avrete diligentemente tutte queste cose, benché niun dubbio ci sia che mentre il vassello sta fermo non debbano succeder così, fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ché (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina o pure sta ferma: voi saltando passerete nel tavolato i medesimi spazii che prima, né, perché la nave si muova velocissimamente, farete maggior salti verso la poppa che verso la prua, benché, nel tempo che voi state in aria, il tavolato sottopostovi scorra verso la parte contraria al vostro salto; e gettando alcuna cosa al compagno, non con più forza bisognerà tirarla, per arrivarlo, se egli sarà verso la prua e voi verso poppa, che se voi fuste situati per l'opposito; le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne pur una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi; i pesci nella lor acqua non con più fatica noteranno verso la precedente che verso la susseguente parte del vaso, ma con pari agevolezza verranno al cibo posto su qualsivoglia luogo dell'orlo del vaso; e finalmente le farfalle e le mosche continueranno i lor voli indifferentemente verso tutte le parti, né mai accaderà che si riduchino verso la parete che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave, dalla quale per lungo tempo, trattenendosi per aria, saranno state separate; e se abbruciando alcuna lagrima d'incenso si farà un poco di fumo, vedrassi ascender in alto ed a guisa di nugetta trattenervisi, e indifferentemente muoversi non più verso questa che quella parte."

Galileo Galilei

dal Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo (1632), giornata seconda

E' facile comprendere la ragione per cui Galileo scrisse questo brano: per dimostrare che Copernico aveva ragione nel sostenere che sia la Terra a muoversi intorno al Sole. L'obbiezione mossa a Copernico dai dotti aristotelici suonava più o meno così: se davvero la Terra si muovesse, e per giunta a gran velocità, noi tutti

sentiremmo con chiarezza gli effetti di tale rapido moto. Ma noi non percepiamo proprio nulla! Ciò significa che la Terra è ferma, quindi Copernico ha torto. Galileo dimostra che la Terra, proprio come il gran navilio, può benissimo muoversi senza che nessun effetto si possa percepire, quindi l'obbiezione dei dotti aristotelici è del tutto infondata.

### Una verifica moderna

Ai tempi di Galileo non esistevano aeroplani, ma forse tutti voi, lettori del ventunesimo secolo, ne avete fatto esperienza. Vi siete probabilmente accorti di come, nei lunghi voli intercontinentali, gli assistenti di volo non servano pasti o bevande durante i periodi di turbolenza. La ragione è evidente: durante tali periodi di turbolenza l'aereo subisce sbalzi e scosse improvvise, proprio come un navilio che subisca un moto fluttuante in qua e in là, scosse che rendono difficile e pericoloso servire pasti e bevande. Ma, e questa è l'osservazione importante, quando la turbolenza è passata si mangia e si beve senza nessun problema, esattamente come se l'aereo fosse fermo sulla pista. Non c'è alcuna differenza tra quiete e moto, sebbene il moto avvenga alla velocità di circa mille km all'ora rispetto al terreno.

Il moto della Terra intorno al Sole, d'altra parte, avviene a una velocità assai maggiore: circa 30 km al secondo, cioè circa 100 mila km all'ora! Un moto assai veloce, dunque, ma quasi uniforme e non fluttuante in qua e in là. Nel corso di un'intera giornata il vettore velocità della Terra cambia sì direzione, ma soltanto di un grado all'incirca. Il cambiamento di velocità è così lento da risultare per noi impercettibile: la Terra si muove di un moto *quasi* uniforme. Di conseguenza tutto, sulla Terra, funziona come se la Terra fosse ferma.

### La relatività galileiana

Generalizzando le osservazioni di Galileo possiamo formulare una legge fisica universale, nella quale non si faccia più riferimento a navigli, pesci, farfalle, o recipienti che gocciolano. Il *principio di relatività galileiana* afferma che:

*Due osservatori, in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro, otterranno gli stessi risultati in ogni possibile esperimento di meccanica*

Una sua conseguenza fondamentale è la seguente:

*la velocità con cui un corpo si muove non è assoluta, ma dipende dal riferimento scelto per osservarlo*

Le leggi della meccanica, quindi, non possono prevedere con quale velocità un corpo si muoverà. Le leggi della meccanica, infatti, prevedono con quale *accelerazione* il corpo si muoverà:

- la prima legge afferma che un corpo non soggetto a forze non subisce alcuna accelerazione,
- la seconda che una corpo di massa  $m$ , sottoposto a una forza  $F$ , subisce un'accelerazione direttamente proporzionale a  $F$  e inversamente a  $m$ ,
- la terza che in un'interazione reciproca due corpi subiscono forze opposte, quindi accelerazioni il cui modulo è inversamente proporzionale alle rispettive masse.

La giusta domanda conta più della risposta giusta

Prima di Galileo ci si poneva una domanda cruciale: "qual è la causa che provoca il moto di un corpo?" Galileo comprese che si trattava di una domanda priva di senso, almeno nel caso di un moto rettilineo uniforme. Galileo capì che la domanda interessante era piuttosto un'altra: "che cosa *impedisce* a un corpo di muoversi di moto rettilineo uniforme?"

La risposta la conosciamo ormai bene: le forze, che hanno l'effetto di smuovere i corpi dallo stato di moto rettilineo uniforme, imprimendo loro un'accelerazione. Galileo comprese che un corpo sul quale non agiscono forze apparirà muoversi di moto rettilineo uniforme in *infiniti* sistemi di riferimento, ciascuno in moto rettilineo uniforme rispetto a tutti gli altri. In ciascuno di essi, naturalmente, il corpo avrà una diversa velocità. In tutti, comunque, sarà vero il principio di inerzia:

*un corpo non sottoposto a forze si muove di moto rettilineo uniforme*

Ciascuno di questi infiniti sistemi di riferimento si chiamerà perciò riferimento inerziale. Un riferimento inerziale è quindi un sistema di riferimento in cui vale la legge d'inerzia.

Le trasformazioni di Galileo

Uno stesso corpo, osservato in due diversi sistemi di riferimento inerziali, appare occupare posizioni differenti e muoversi con differenti velocità. Tuttavia entrambi gli osservatori concordano su due punti:

- ogni corpo si muove con la stessa accelerazione nei due riferimenti
- ogni fenomeno ha la stessa durata nei due riferimenti

Consideriamo un'automobile che viaggia tra due località A e B. Nel sistema di riferimento della Terra l'auto percorre una certa distanza, si muove con una

velocità che da un istante all'altro può variare da 0 a non più di 30 o 40 metri al secondo, quindi subisce accelerazioni diverse da un istante all'altro, impiega un certo tempo a completare il tragitto (► fig.1). Nel sistema di riferimento del Sole l'auto percorre una distanza molto più grande, perché la Terra si sposta rispetto al Sole molto più di quanto l'auto non faccia rispetto alla Terra. La velocità dell'auto, nel riferimento del Sole, varia intorno ad un valore medio di circa 30 km al secondo. Nel riferimento del Sole, però, l'auto subisce le stesse accelerazioni e impiega lo stesso tempo a completare il percorso.

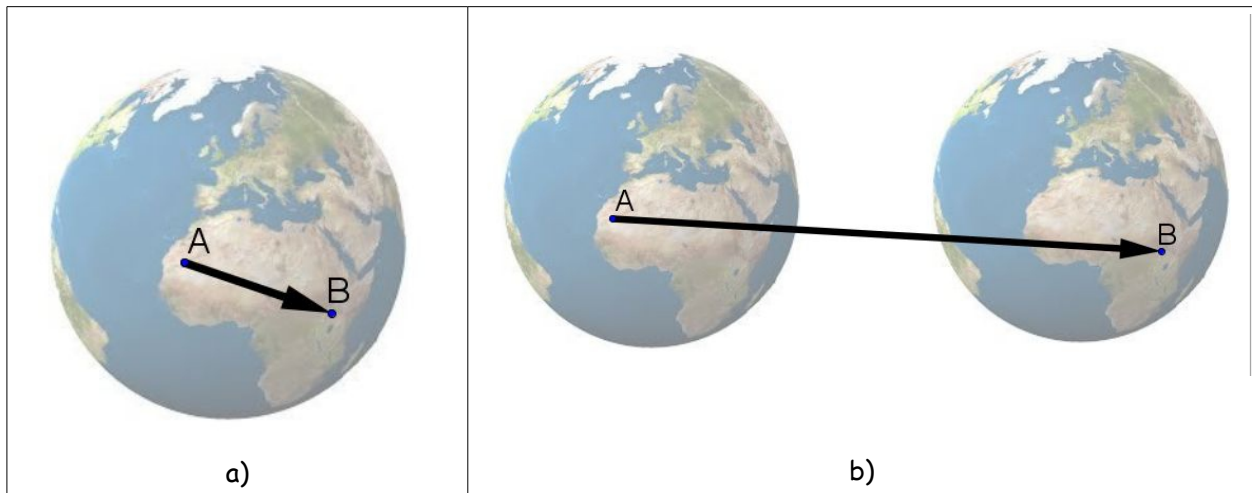


Fig.1 uno spostamento da A a B

a) nel riferimento della Terra b) nel riferimento del Sole

L'ultima affermazione merita una discussione particolarmente attenta. Accettarne la validità significa ammettere che *il tempo è assoluto*: significa, in altre parole, immaginare che due orologi identici, uno sulla Terra e uno sul sole, marcino di pari passo, attribuendo quindi la stessa durata ad uno stesso evento osservato nei due riferimenti. Per quanto la cosa sembri ovvia, dobbiamo ricordarci che nel fare scienza possiamo ritenere ovviamente vere solo le affermazioni confermate dagli esperimenti. Per il momento ammetteremo, come fece Newton, che davvero il tempo sia assoluto, almeno fino a quando qualcosa non ci costringa ad immaginare il contrario.

Consideriamo allora due sistemi di riferimento, chiamiamoli  $S$  e  $S'$ , il secondo in moto rispetto al primo con velocità  $u$  (► fig.2). Il tempo, essendo assoluto, scorre allo stesso modo nei due riferimenti: se sincronizziamo i due orologi ad un certo istante di tempo, essi saranno sincronizzati sempre, ed avremo quindi  $t = t'$ . Abbiamo indicato con  $t$  il tempo segnato dall'orologio di  $S$ , con  $t'$  il tempo segnato dall'orologio di  $S'$ .

Facciamo in modo che le origini dei due riferimenti coincidano all'istante  $t = t' = 0$ . Dopo un certo tempo  $t$  l'origine  $O'$  del riferimento  $S'$  avrà subito, rispetto all'origine  $O$  di  $S$ , uno spostamento descritto dal vettore  $u \cdot t$ .

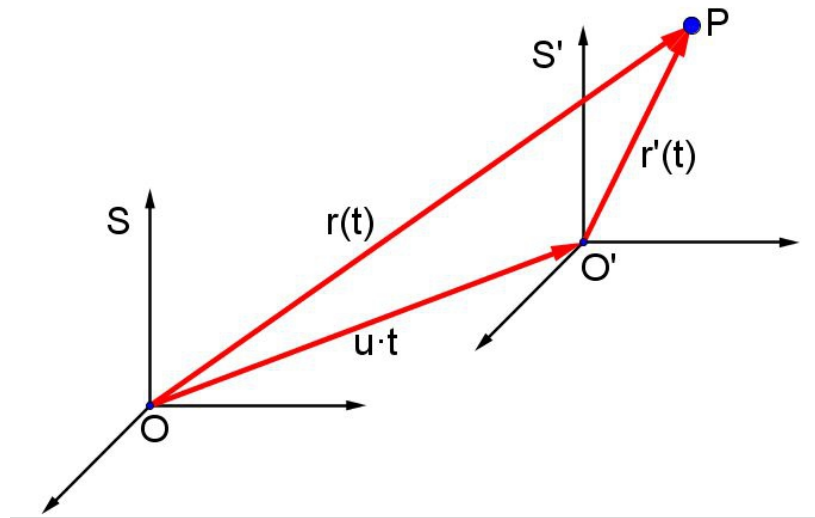


Fig.2 la posizione del punto P al tempo t, osservata in due riferimenti S e S'

Consideriamo il moto di un punto P. All'istante t la posizione di P sarà  $r(t)$  nel riferimento S,  $r'(t)$  nel riferimento S': la posizione è diversa nei due sistemi, il tempo no! L'equazione che lega le due posizioni è naturalmente:

$$r'(t) = r(t) - u \cdot t$$

Il corpo P avrà velocità diverse nei due riferimenti: diciamo velocità  $v(t)$  nel riferimento S,  $v'(t)$  nel riferimento S'. L'equazione che lega le due velocità la otteniamo derivando l'equazione precedente rispetto al tempo. Di conseguenza:

$$v'(t) = D_t(r(t) - u \cdot t) = D_t r(t) - D_t u \cdot t = v(t) - u$$

L'equazione  $v' = v - u$ , nonostante l'aria innocua, merita un nome altisonante: si chiama infatti *legge classica di addizione delle velocità*. Il suo significato profondo, paradossalmente, divenne chiaro nel 1905, quando Einstein dimostrò che la legge classica è sbagliata. Meglio: tale legge è solo un'approssimazione di una legge più generale, approssimazione valida quando le velocità in gioco sono molto piccole rispetto a quella della luce.

Quanto alle accelerazioni l'equazione si ottiene derivando di nuovo quella precedente. Il risultato è semplice:

$$a'(t) = a(t)$$

nei due riferimenti si osserveranno cioè le stesse accelerazioni, quindi le stesse forze. Le leggi della meccanica, come predetto da Galileo, saranno le stesse nei due riferimenti.

E se il riferimento non è inerziale?

Se osserviamo un corpo non soggetto a forze, mettendoci in un sistema di riferimento non inerziale, allora le cose cambiano: la legge di inerzia non è più vera, ecco perché il sistema si definisce "non inerziale".

E' un'esperienza che tutti abbiamo fatto viaggiando sopra un qualunque veicolo che subisce delle accelerazioni. Consideriamo quello che succede durante un viaggio in automobile.

Finché l'auto viaggia di moto rettilineo uniforme tutto procede come nel caso del navilio che non fluttua in qua e in là: niente scosse, niente sollecitazioni, tutto funziona come se l'auto fosse ferma. Non è strano: la Terra è un sistema inerziale, almeno con ottima approssimazione. L'auto, che si muove rispetto alla Terra di moto rettilineo uniforme, è anch'essa un sistema inerziale. Nessuna forza ci sollecita: rispetto all'auto siamo fermi, rispetto alla Terra viaggiamo di moto rettilineo uniforme. In entrambi i riferimenti, appunto, è vera la legge d'inerzia.

Se un ostacolo ci costringe però ad un'improvvisa frenata, di colpo ci sentiamo sbalzati verso il cruscotto. Qual è la forza che ci spinge in avanti? Non è una forza gravitazionale, né elettromagnetica, né nucleare, semplicemente è una forza che ... non c'è! Nulla ci spinge verso il cruscotto. Anzi: proprio perché non siamo soggetti a forze tendiamo a conservare il nostro stato di moto uniforme rispetto al riferimento inerziale della Terra. La nostra auto, che decelera rispetto alla Terra, non è un riferimento inerziale, quindi in esso non vale il principio di inerzia, quindi compaiono accelerazioni anche in assenza di forze.

La nostra fede nelle leggi della dinamica di Newton è però tanto grande da spingerci a ipotizzare l'esistenza di una forza responsabile del nostro balzo in avanti: si tratta di una forza apparente, alla quale diamo il nome di *forza d'inerzia*. Non c'è nessuna forza, naturalmente: "inerzia" è semplicemente il nome con cui chiamiamo la tendenza che i corpi hanno, se non sono sottoposti a forze, a conservare il loro stato di moto.

Oppure pensiamo alle gocce d'acqua sul fazzoletto della lezione 9, centrifugate nel cestello della lavatrice. Il cestello ruota, quindi il suo moto rispetto alla Terra è accelerato: la Terra è un sistema inerziale, il cestello no. La goccia d'acqua, nel riferimento non inerziale, sente una forza che comunemente chiamiamo *forza centrifuga*. Da quale interazione nasce questa forza: gravitazionale, elettromagnetica, nucleare? Nulla di tutto ciò: la forza centrifuga è una forza apparente, che la goccia d'acqua sperimenta per il fatto di trovarsi in un riferimento non inerziale. Nel riferimento inerziale della Terra la goccia tende a conservare il suo stato di moto: se incontra un buco esce, in direzione tangente al cestello.