

Sistemi di riferimento

Necessità di un sistema di riferimento

Qualunque fenomeno fisico deve essere studiato da un dato *sistema di riferimento* (breve: “riferimento”).

Il riferimento può essere scelto *in infiniti modi*.

Non è però detto che siano tutti equivalenti (in effetti non lo sono).

Si potrebbe anzi pensare che esista un solo riferimento “giusto” (lo “spazio assoluto” di Newton).

Non è banale che invece *il* riferimento giusto non esista: non possiamo stabilirlo a priori, su basi filosofiche.

È solo l'*esperienza* che ci può dire come stanno le cose.

Un riferimento c'è sempre...

... anche se non l'abbiamo definito in modo esplicito.

Dato che viviamo sulla Terra, che ci appare ben solida e stabile, riesce naturale usare la Terra come riferimento.

Per es. diciamo “fermo” un corpo, senza specificare, quando esso è fermo *rispetto alla Terra*.

È bene spendere del tempo a trovare esempi di fenomeni che possono essere visti da diversi riferimenti:

- auto che si scontrano
- atomo che emette un fotone
- pendolo che oscilla
- acqua che bolle
- una stella che esplode
- ...

È anche bene sottolineare che si può distinguere tra ciò che in un fenomeno ha carattere *obbiettivo*, indipendente dal riferimento, e ciò che dipende dalla sua diversa *descrizione* nei diversi riferimenti.

Definizione di riferimento

Di solito un *sistema di riferimento* viene identificato con un *sistema di coordinate* (una terna cartesiana). È però meglio dare una definizione di riferimento più fisica.

Un riferimento è un *ambiente fisico*: astrattamente, un corpo rigido, ma in concreto un *laboratorio*, al quale si riferiscono tutte le operazioni di misura.

Misure di posizioni, di tempi, ma anche tutte le altre che possano occorrere.

Il sistema di coordinate è un comodo *ausilio matematico* per individuare le posizioni e per far calcoli; ma lo si può introdurre in più modi nello stesso riferimento fisico, e non è sempre necessario.

Il principio di relatività

Galileo (*Massimi Sistemi*, 1632) enuncia per primo il principio di relatività nella famosissima pagina:

Riserratevi con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio...

In breve:

se siamo nella nave di Galileo, o più modernamente in un treno che viaggia a velocità costante su un binario rettilineo, *nessun esperimento ci permette di riconoscere se la nave (il treno) si sta muovendo oppure no.*

In linguaggio un po' più astratto:

nessun esperimento permette di distinguere due riferimenti in moto traslatorio rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro.

Il PR al biennio

Nella formulazione di Galileo, il PR può essere proposto e pienamente compreso anche in una classe di biennio.

Un esempio: qualche anno fa M. Coluccini (L.Sc. “Vallisneri” di Lucca) l'ha trattato in una seconda, e ha proposto una prova sperimentale.

Un gruppo di ragazze si sono messe in treno con una telecamera e hanno filmato diversi esperimenti simili a quelli descritti da Galileo:

- *saltare*
- *lanciare palle*
- *versare acqua da una bottiglia in un bicchiere*

mostrando che tutto andava come col treno fermo.

Forma più astratta del PR

È più comune vedere enunciato il PR come segue:

In tutti i riferimenti inerziali valgono le stesse leggi fisiche.

Il contenuto è lo stesso, ma l'enunciato è più astratto: invece di parlare di esperimenti, si parla di “leggi fisiche”.

Questa forma non è adatta all'inizio dello studio della fisica, ma solo a una fase più avanzata.

Che cosa dice Einstein?

Nella prima pagina del suo lavoro del 1905, scrive:

Esempi di questo genere [...] portano all'ipotesi che al concetto di quiete assoluta non corrisponda alcuna proprietà dei fenomeni; e ciò non solo nella meccanica, ma anche nell'elettrodinamica. Al contrario, per tutti i sistemi di coordinate [con la nostra terminologia diremmo “riferimenti”] per i quali valgono le equazioni della meccanica, valgono pure le stesse equazioni elettrodinamiche e ottiche [...]

Si vede che l'unico cambiamento rispetto a Galileo sta nell'affermazione esplicita che il PR vale anche per elettromagnetismo e ottica.

Questo non vuol dire che Galileo escludesse e.m. e ottica: semplicemente al suo tempo la distinzione della fisica in capitoli non esisteva ancora.

Gli esperimenti proposti da Galileo sono di meccanica (in senso lato), ma questo era inevitabile, perché erano i soli fattibili a quei tempi.

È solo nell'800 che si fa strada l'idea che il PR valga solo per la meccanica, in quanto nei fenomeni e.m. interviene l'*etere*.

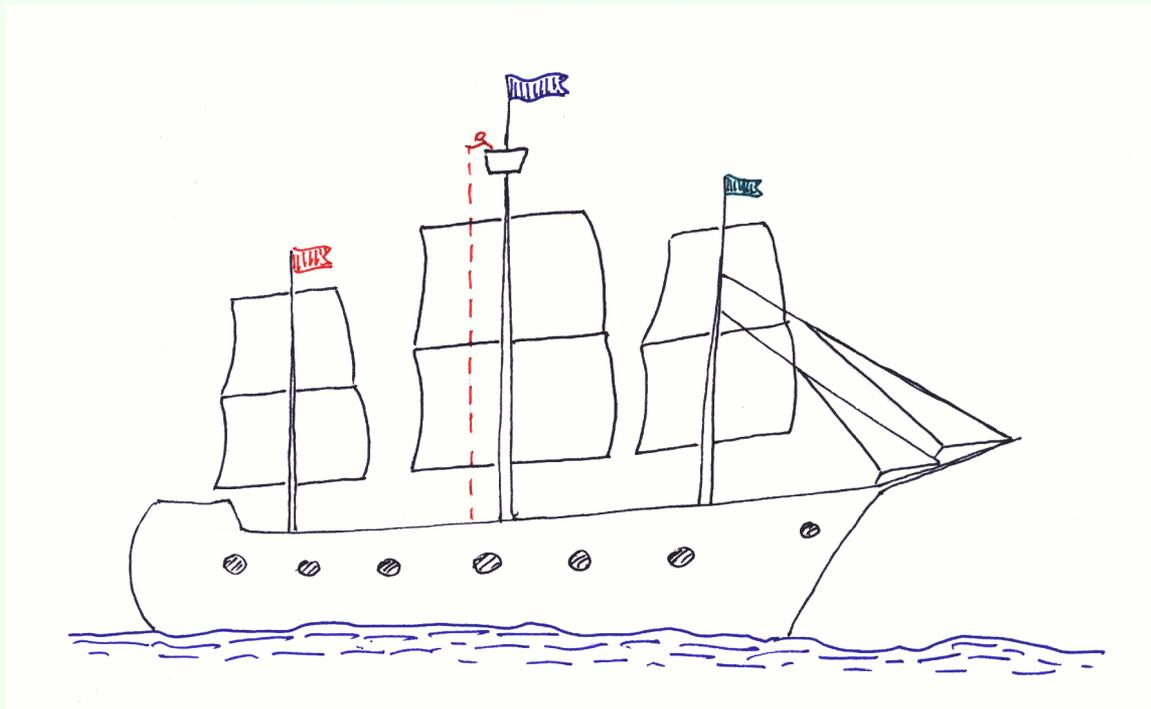
Come ci arriva Galileo?

In modo indiretto, sulla base di diversi esempi.

1. *L'esempio della nave.*

Se si lascia cadere un sasso dalla cima di un albero, mentre la nave corre sul mare, dove cadrà il sasso?

Galileo afferma che cade *al piede dell'albero*, sebbene la nave, mentre il sasso è in aria, abbia corso in avanti un buon tratto.

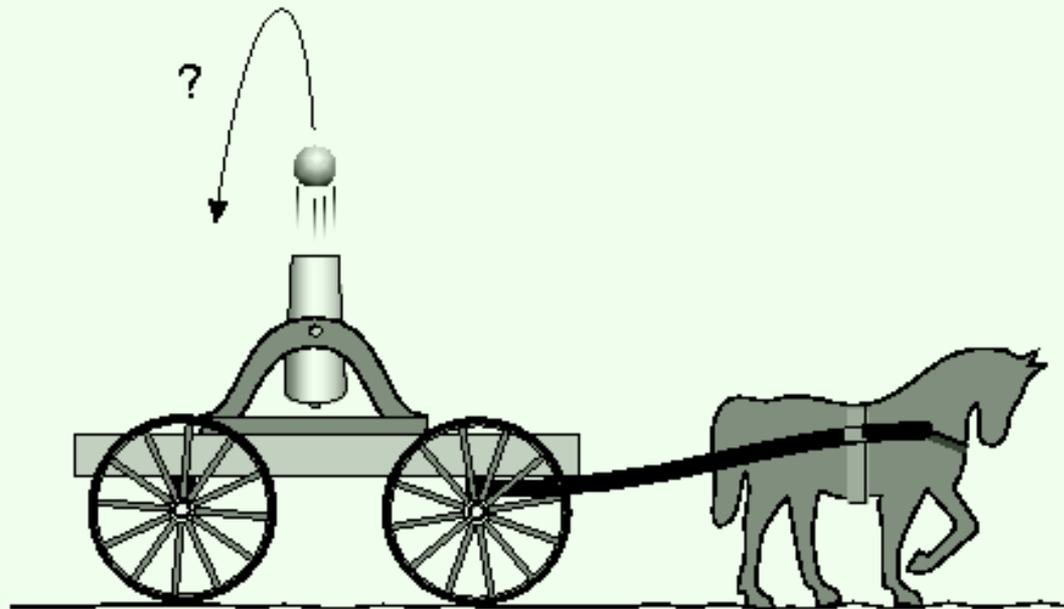


2. *L'esempio del cannone.*

Si monta un cannone su un carro, con la canna verticale.

Quando il carro è fermo, la palla sparata ricade all'incirca nella bocca del cannone.

Quando il carro corre succede lo stesso, sebbene anche in questo caso mentre la palla è in volo il carro si sia spostato di un buon tratto in avanti.



Il ragionamento di Galileo

- 1) Afferma che la velocità orizzontale si conserva anche dopo che il proiettile è stato sparato o il sasso è stato lasciato.
- 2) Prevede le modalità del fenomeno nel riferimento “in moto” (carro, nave) in base a quanto si vede dal riferimento “fermo”.
- 3) Con questo spiega perché il proiettile deve ricadere nella bocca del cannone, e il sasso cade al piede dell'albero.
- 4) Ne conclude che nel riferimento in moto il fenomeno si svolge come andrebbe nel riferimento fermo, se eseguito con le stesse condizioni iniziali.
- 5) Enuncia il PR come legge generale, nel modo che abbiamo visto:
“Riserratevi ...”

Non bisogna dimenticare lo scopo del PR nell'economia del *Dialogo*: mostrare che tutti gli argomenti portati a sostegno che la Terra è ferma, in realtà non sono conclusivi, perché tutti i fenomeni vanno allo stesso modo se la Terra è ferma, oppure se è in moto.

Qualche anno dopo, nei *Discorsi*, Galileo assume che il moto orizzontale di un proiettile e quello verticale non s'influenzano, e ne deduce matematicamente la traiettoria parabolica ecc.

Gli esperimenti dell'Accademia del Cimento

Non tutti, neppure tra gli allievi e seguaci di Galileo, erano convinti delle sue tesi...

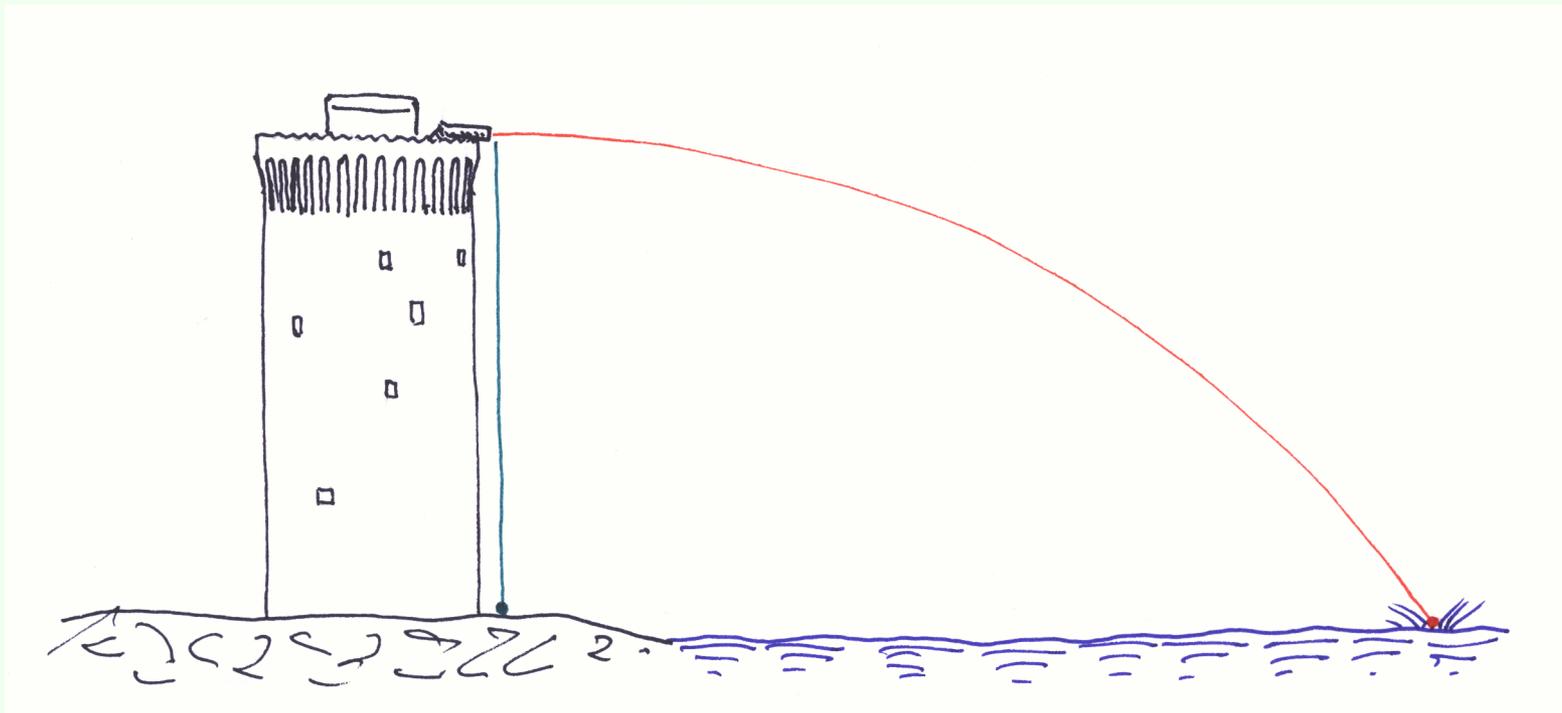
Da qui gli esperimenti condotti dagli Accademici del Cimento, quando Galileo era già morto da 16 anni (1658).

“Questa opinione avendo noi voluto mettere al cimento dell'esperienza ...”

Da una torre della Fortezza vecchia di Livorno, alta 50 braccia sul mare, lanciarono una palla in mare con una colubrina puntata orizzontale.

Con un semplice dispositivo fecero in modo che allo stesso tempo un'altra palla cadesse verticalmente ai piedi della torre.

Osservarono che la prima toccava l'acqua circa allo stesso istante in cui la seconda toccava terra, sebbene la prima avesse fatto due terzi di miglio.



In realtà la figura non è in scala; la scala giusta sarebbe questa:



Lo stesso risultato ottennero con un cannone più grosso; ma con uno ancora più grosso notarono che la palla verticale arrivava nettamente prima.

Discussero il perché. Avanzarono diverse ipotesi, ma non ne vennero a capo...

In effetti è vero che la palla verticale arriva prima: la resistenza dell'aria sulla palla sparata riduce il modulo della sua velocità, e quindi anche la componente verticale.

Dunque la palla lanciata orizzontale non solo arriva a distanza minore che se non ci fosse l'aria, ma impiega anche più tempo a cadere.

(Ma tutto questo non è affatto banale, se non si fanno i conti...)

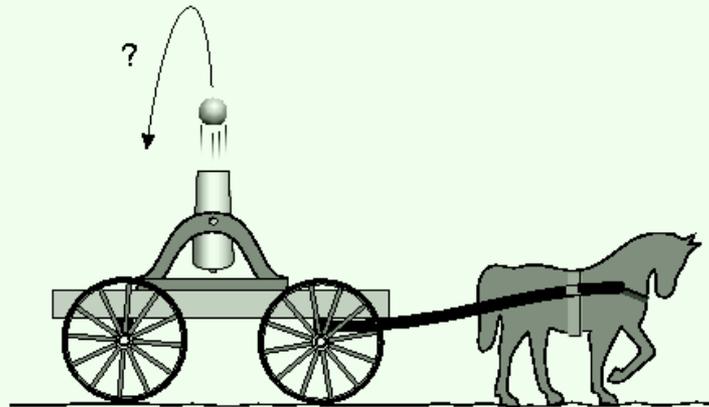
Il “saltamartino”

Montarono un cannoncino (il “saltamartino,” appunto) con la canna verticale, su un carro. A carro fermo, si assicuraronο che la palla ricadesse circa nella bocca del cannone.

Poi misero in corsa il cavallo, e spararono la palla.

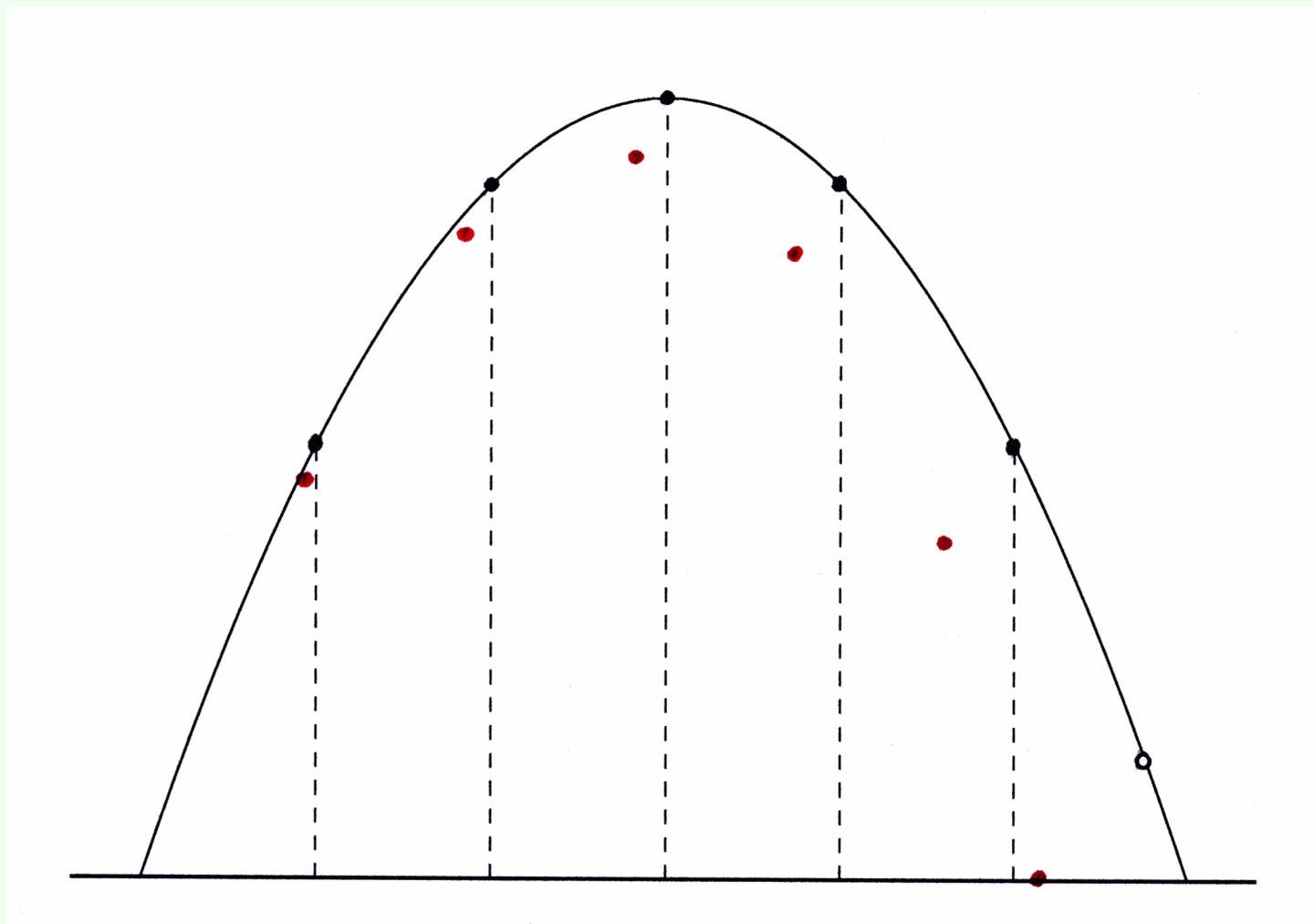
Risultato: nel tempo che la palla era in aria, il carro percorreva **64 braccia**.

La palla ricadeva circa **4 braccia** indietro, ma impiegando lo stesso tempo come col carro fermo.



È giusto che la palla ricada un po' indietro, a causa della resistenza dell'aria.

Infatti ...



Il moto dei proiettili

Lasciando ora la storia, come andrebbe trattato l'argomento oggi?

Ci sono almeno due strade, a seconda di che cosa si è fatto prima.

Supponiamo di essere agli inizi della meccanica, prima delle leggi della dinamica, in particolare prima di $F = ma$ in forma vettoriale.

Supponiamo anche di non aver discusso il PR.

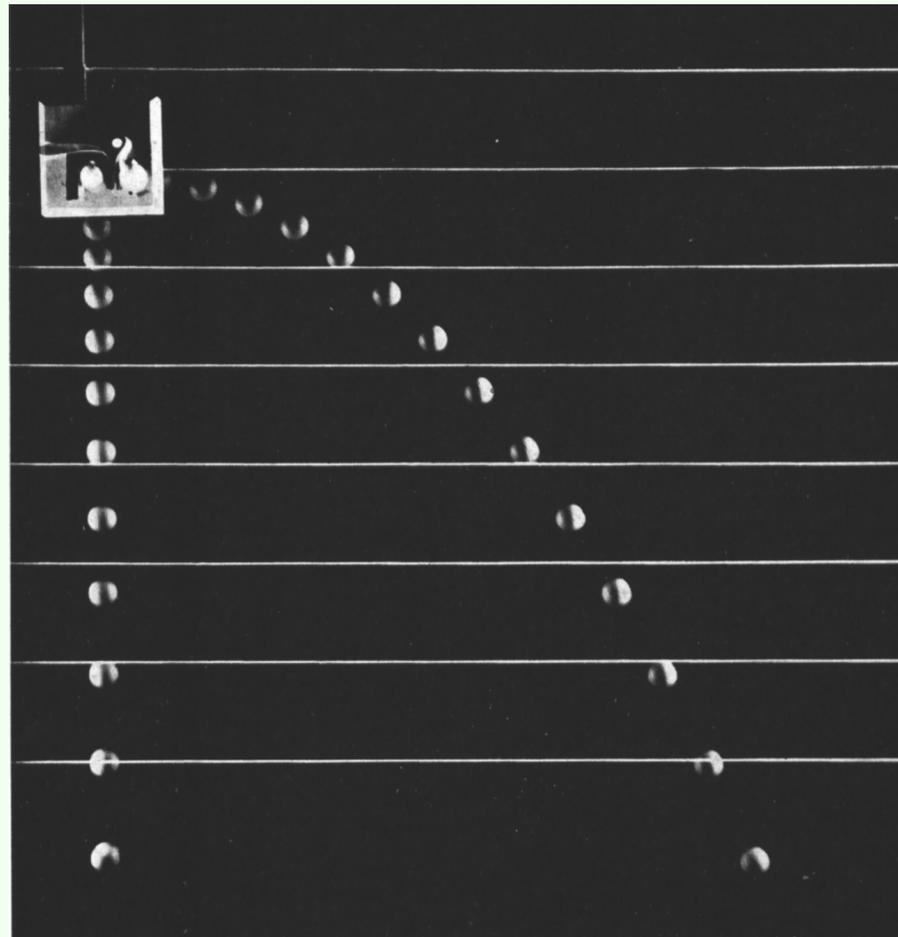
Allora non si può *dimostrare* l'indipendenza del moto orizzontale e di quello verticale: *non c'è nessuna ragione perché questa indipendenza debba valere*.

L'unica strada è quindi quella *sperimentale*, seguendo (con tecniche moderne) gli accademici del Cimento.

Si potrebbe giustificare il moto del proiettile partendo da $F = ma$ (vettoriale)?

C'è un problema: da dove si ricava la validità di $F = ma$ con F e a vettori?

A meno di non volerla asserire come assioma (approccio che sconsiglio vivamente nella scuola secondaria) occorre darne delle prove sperimentali, e il moto dei proiettili è la prima e la più semplice.

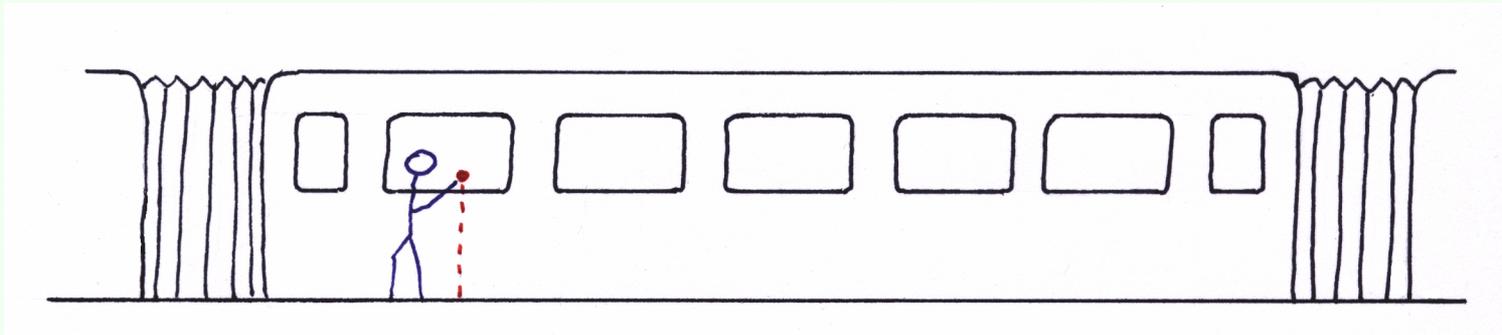


Moto dei proiettili e PR

Si può spiegare il moto dei proiettili a partire dal PR: vediamo come.

Supponiamo ovviamente di aver già introdotto il PR, per es. con gli esperimenti sul treno.

Allora possiamo eseguire sul treno il semplice esperimento di caduta verticale del sasso:



e poi descriverlo dal riferimento “fermo”.

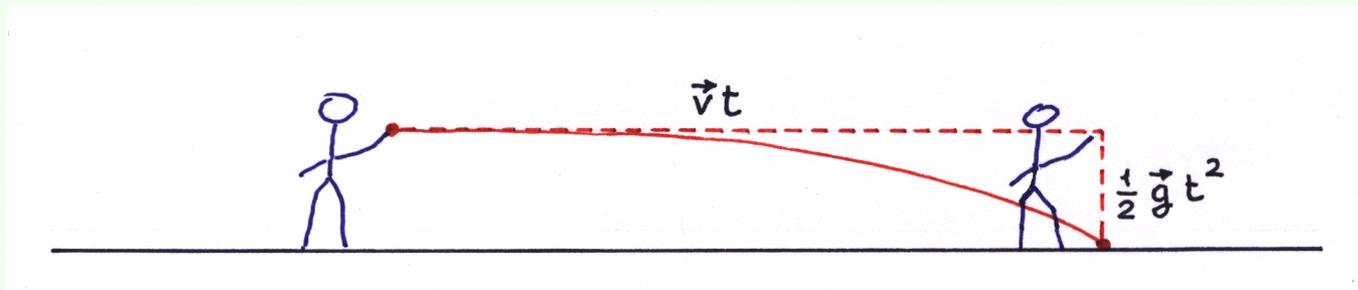
(Procedimento inverso a quello di Galileo.)

Che cosa vedremo?

In un dato tempo t , la mano che ha lasciato cadere il sasso si è spostata – insieme al treno – di un tratto $v t$.

Nello stesso tempo il sasso avrà percorso in verticale rispetto alla mano un tratto $\frac{1}{2} g t^2$.

È evidente che i due spostamenti si compongono, e ne risulta quello che volevamo.



Ma è proprio così semplice?

Leggi di trasformazione

Il titolo appare solenne, ma vuol dire una cosa semplice: se osserviamo *lo stesso fenomeno* da due diversi riferimenti **S** e **T**, in generale per le grandezze in gioco troveremo *valori diversi* in **S** e in **T**.

Pensiamo per es. alla velocità; ma è vero anche in altri casi: energia, campo magnetico ...

Ci possono essere particolari grandezze che non cambiano valore: le chiameremo *invarianti*.

Attenzione: “invariante” non vuol dire che non cambia *nel tempo*, ma che mantiene lo stesso valore *in diversi riferimenti*.

Esempi? La massa, la carica elettrica ... (ce ne sono altri, ma è meglio non divagare).

Una *legge di trasformazione* è semplicemente la *regola* con cui una certa grandezza cambia da **S** a **T**.

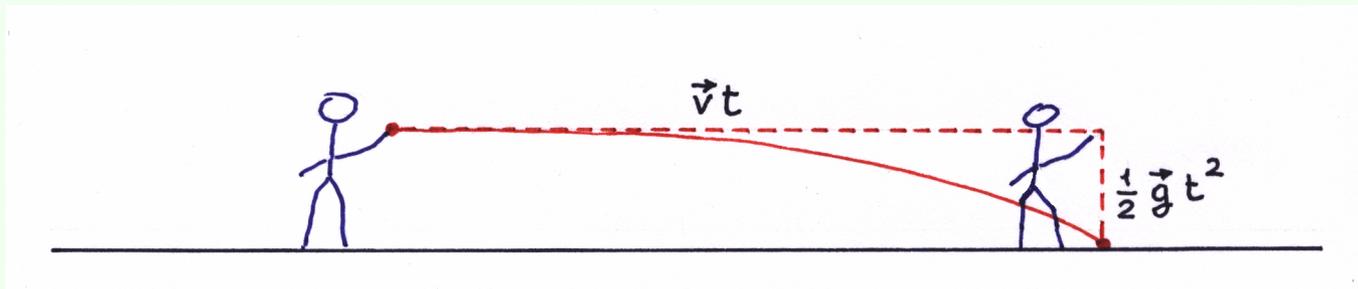
Torniamo ai proiettili ...

... e rivediamo criticamente il ragionamento che abbiamo fatto.

Abbiamo detto:

“In un dato tempo t , la mano che ha lasciato cadere il sasso si è spostata – insieme al treno – di un tratto $v t$.”

Se **S** è il riferimento fermo rispetto alla Terra (riferimento della *stazione*) e **T** è il riferimento del *treno*, l'affermazione qui sopra esprime semplicemente il fatto che il treno – e tutti i corpi fermi rispetto ad esso – si muovono rispetto a **S** con la stessa velocità costante v .



Poi abbiamo detto:

“... il sasso ha percorso in verticale rispetto alla mano un tratto $\frac{1}{2} gt^2$.”

Ora attenzione: quest'affermazione si riferisce a grandezze misurate *nel riferimento T*.

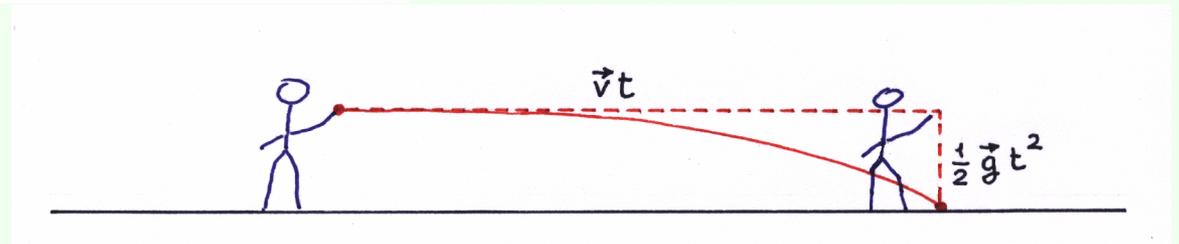
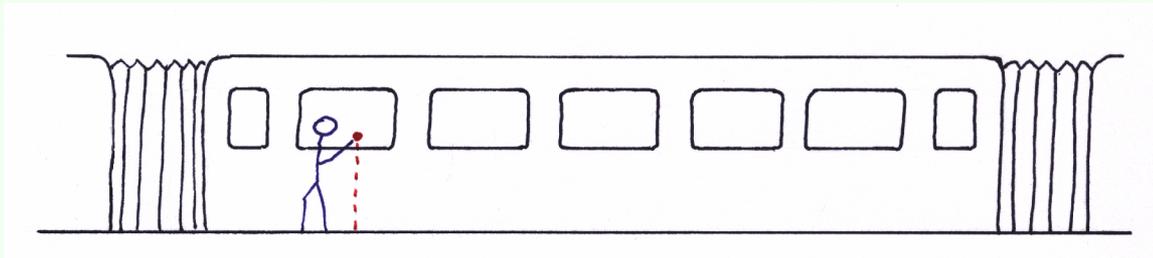
Dato che stiamo assumendo il PR, abbiamo certamente il diritto di dire che anche in **T** (come in **S**) i gravi cadono di moto uniformemente accelerato, e con la stessa accelerazione.

(Se non fosse così, misurando l'accelerazione potremmo capire se siamo in **S** o in **T**, e Galileo avrebbe torto quanto al PR.)

Però abbiamo anche detto “nello stesso tempo” e qui dobbiamo riflettere.

Se intendiamo che l'esperimento di caduta di un sasso fermo si svolge con le stesse modalità nel tempo, tanto in **S** quanto in **T**, va benissimo: questo è appunto il PR.

Ma se invece intendiamo che il tempo t che impiega il sasso a cadermi ai piedi, misurato in **T**, risulterà ancora uguale a t se misuro il fenomeno da **S**, stiamo affermando che il tempo è *invariante*.



Chi ce lo garantisce?

Il tempo è assoluto?

Parlando di tempo, di solito invece di dire “invariante” si dice “assoluto”; ma il concetto è lo stesso.

C'è voluto Einstein per capire che anche a questa domanda si può solo dare risposta su *base sperimentale*.

Ci sono buone ragioni perché non ci si era pensato prima: il fatto è che proprio su basi sperimentali non s'era mai vista nessuna differenza.

Tutte le prove sperimentali andavano in favore del tempo assoluto.

Vada dunque (provvisoriamente) per il tempo assoluto, purché sia chiaro che lo accettiamo non perché è evidente, oppure su basi *filosofiche*; ma solo perché l'*esperienza* così suggerisce.

E lo spazio?

“Nello stesso tempo il sasso ha percorso in verticale rispetto alla mano un tratto $\frac{1}{2}gt^2$.”

Abbiamo sistemato il tempo; ma qui si sottintende che anche lo *spazio* misurato in **S** sia lo stesso che in **T**.

Solita domanda: chi ci autorizza?

Ebbene, qui la risposta è diversa: si può dimostrare che *proprio il PR ce lo garantisce*, trattandosi di uno spostamento *trasversale* rispetto al moto relativo dei due riferimenti.

Ometto la dimostrazione per guadagnare tempo...

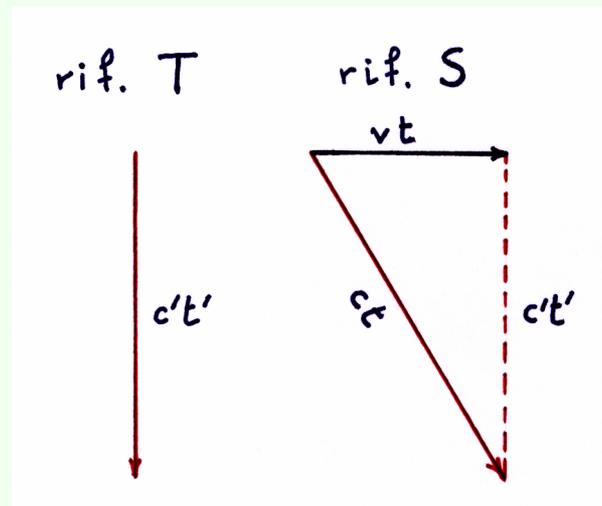
Tempo assoluto e velocità della luce

È facile vedere che *se il tempo è invariante* (assoluto) allora *non può essere invariante la velocità della luce*, e viceversa.

L'esperimento del sasso, rifacciamolo con la luce, e trascuriamo la gravità (potremmo far viaggiare la luce orizzontale, trasversalmente al treno).

Indichiamo con c , c' le due velocità della luce in **S** e in **T** (potranno essere uguali o no: vedremo).

Indichiamo anche (per prudenza) con t , t' i tempi di percorrenza misurati in **S** e in **T**.



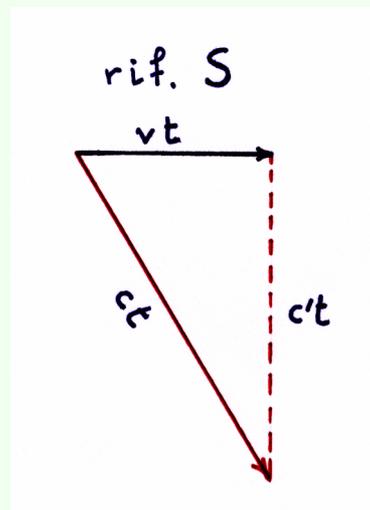
Ipotesi 1: tempo assoluto

Assumiamo il tempo assoluto: $t = t'$.

Allora nello stesso tempo t la luce ha percorso un tratto $c't$ nel riferimento **T**, e un tratto ct nel riferimento **S**.

La figura mostra che ct è più lungo di $c't$: dunque $c > c'$:

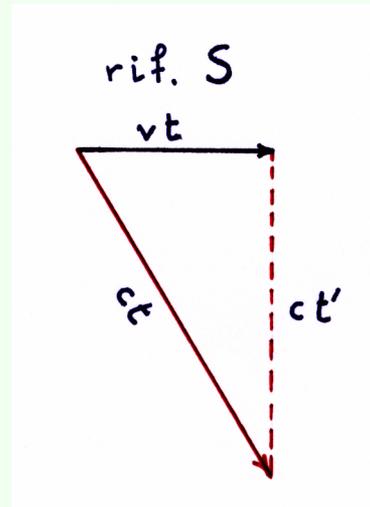
Se il tempo è assoluto, la velocità della luce non è invariante.



Ipotesi 2: velocità della luce invariante

Se $c = c'$ allora la stessa figura, essendo sempre $ct > c't'$, ci mostra che dev'essere $t > t'$:

Se la velocità della luce è invariante, il tempo non è assoluto.



La scelta di Einstein

Sappiamo che Einstein sceglie la seconda ipotesi: velocità della luce invariante, tempo non invariante.

La sua motivazione l'abbiamo già detta: ritiene che il PR debba valere anche per l'elettromagnetismo.

Oggi abbiamo motivi molto più forti, perché il campo dei fenomeni e dei sistemi fisici conosciuti si è molto allargato.

Due esempi:

– *le navicelle spaziali*

– *le stelle.*

Navicelle e stelle

Le navicelle spaziali portano a bordo complessi apparati elettromagnetici.

Questi funzionano perfettamente come sono stati progettati, e sono stati progettati (e collaudati) sulla Terra, usando le leggi fisiche dell'elettromagnetismo, valide sulla Terra.

Se non valesse il PR, quando la navicella viaggia a velocità di 10 o 20 km/s rispetto a noi, si noterebbero variazioni nel funzionamento di quegli apparati.

Discorso analogo per le stelle: oggi sappiamo spiegare quello che accade al loro interno, mettendo al lavoro tutta la fisica che abbiamo imparato a costruire e sperimentare sulla Terra.

Ma le stelle sono tutt'altro che ferme rispetto a noi: hanno velocità di decine di km/s, in qualche caso anche oltre 100 km/s.

Se non valesse il PR, non potremmo aspettarci di poter spiegare l'evoluzione delle stelle con le leggi fisiche conosciute sulla Terra.

I riferimenti inerziali

Il PR asserisce l'equivalenza di tutti i riferimenti in moto *traslatorio rettilineo uniforme* (TRU) uno rispetto all'altro.

Che cosa si può dire di due riferimenti in moto relativo *non* TRU?

In generale non sono equivalenti: può darsi che uno sia “buono” e l'altro “cattivo”?

I riferimenti buoni si chiamano “inerziali”, ma non è proprio facile definirli...

Empiricamente, in prima approssimazione è buono (inerziale) un riferimento solidale alla Terra.

Questo si capisce: se non fosse così, la meccanica di Newton non potrebbe trovare applicazioni pratiche nel nostro mondo...

Occorrono esperimenti abbastanza raffinati per scoprire che in un riferimento solidale alla Terra succede qualcosa di “strano”:

- *deviazione verso Est nella caduta dei gravi*
- *pendolo di Foucault ...*

In realtà ci sono anche effetti molto più appariscenti, per es. nella circolazione atmosferica; ma c'è voluto molto più tempo per capire come applicare la meccanica alla meteorologia e quindi scoprire che molti fenomeni dipendono dalla rotazione terrestre.

Newton e lo spazio assoluto

Newton risolve il problema di definire il riferimento buono con un “a priori”: postulando l'esistenza di uno spazio *assoluto*.

Se si fa questo, è inerziale un riferimento *fermo* rispetto allo spazio assoluto, oppure in moto TRU rispetto ad esso.

Ma se lo spazio assoluto non esiste?

Risposta: non c'è che da proseguire sulla strada indicata dalla rotazione terrestre.

La meccanica newtoniana permette di prevedere gli effetti meccanici associati ai riferimenti non inerziali: cercandoli, e ridefinendo il riferimento in modo da eliminarli, si può approssimare sempre meglio un riferimento inerziale.

Ma su questo tema non vorrei aggiungere altro...