

Insegnare relatività nel XXI secolo

*Sistemi
di
riferimento*

Necessità di un sistema di riferimento

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

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 rif. “giusto” (lo “spazio assoluto” di Newton).

Non è banale che invece il rif. 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 rif.

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

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 rif. più fisica.

Un rif. 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 occorrenze.

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 rif. fisico, e non è sempre necessario.

Riferimenti in moto relativo

Dato che un rif. è un ambiente, una stanza, un laboratorio, è anche chiaro che un rif. può essere *in moto qualsiasi*.

Secondo Newton esiste uno spazio *assoluto*, fermo, immobile; sembra allora che le leggi della meccanica newtoniana si potranno applicare solo se ci mettiamo in un rif. fermo rispetto allo spazio assoluto: in *quiete assoluta*.

Però il discorso non finisce lì: dopo aver “definito” lo spazio assoluto, Newton aggiunge che ci sono gli spazi *relativi*: quelli che noi chiamiamo *rif. in moto qualunque*.

Newton sa bene, perché prima di lui c'è stato Galileo, che *non è necessario un rif. in quiete assoluta* per fare della buona fisica: le stesse leggi fisiche valgono *anche in altri rif.*

Inoltre Newton sa che in pratica *occorre* usare rif. in moto.

Specialmente ai suoi tempi (ma per la più gran parte anche oggi) la fisica si faceva sulla Terra, che si muove; e per di più non si muove in modo semplice: gira intorno al Sole, ruota su se stessa...

Ci si accorge che *con una certa approssimazione* le leggi di Newton valgono anche sulla Terra, come se fosse ferma.

Attenzione alla differenza: prima abbiamo osservato che le leggi di Newton valgono *esattamente* in tutti i riferimenti inerziali (RI); ora sto dicendo che sulla Terra valgono, ma solo *approssimativamente*.

Questo perché, in realtà, *la Terra non è un RI*.

Esempi di riferimenti

È assolutamente necessario dare esempi concreti di diversi rif., presi dalla vita comune, da realtà scientifiche, ecc.

Quando si fanno questi discorsi bisogna mettere bene in evidenza che non si tratta di astrazioni.

Quando diciamo che esistono diversi rif., li dobbiamo indicare.

Ecco una possibile lista:

- quest'aula
- un'automobile in autostrada
- un'automobile su una strada di montagna
- un ascensore
- un satellite in orbita
- una stazione spaziale sulla Luna
- una giostra
- un “otto volante”.

Tutti questi sono ambienti in cui si possono fare delle misure, sono rif. a pieno diritto.

Alcuni sono più comodi per i fisici, altri meno; però sono tutti rif. legittimi.

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

- 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 *obbiiettivo*, indipendente dal rif., e ciò che dipende dalla sua diversa *descrizione* nei diversi rif.

L'esistenza di diversi rif. fa nascere un problema: come si trasforma la descrizione di uno stesso moto da diversi rif.?

Ci sono alcuni esempi canonici: se sto su un treno che cammina e faccio cadere una cosa, io che sono sul treno la vedo cadere in verticale.

Come la vede uno che sta fermo sulla banchina della stazione, col treno che gli passa davanti?

Non è importante arrivare subito alla risposta (una parabola).

L'importante è rendersi conto che la traiettoria, la velocità, tutte le caratteristiche che descrivono il moto di un oggetto, *cambiano a seconda del rif.*

Perciò un problema fondamentale della fisica è *indagare su questo cambiamento.*

Ci sono delle relazioni, delle leggi, delle formule precise?

Intanto rendiamoci conto che il carattere e la descrizione del moto dipendono dal rif. (sono *relativi*); poi andremo a chiarire esattamente come ne dipendono.

Dire addio agli “osservatori”

Gli esempi di rif. servono anche a sottolineare che un rif. è un *oggetto reale*: una stanza, un'automobile, un treno, una stazione spaziale.

Non è una cosa soggettiva, una cosa sognata, pensata, immaginata.

Per ragioni analoghe, in relazione con i rif. è bene non usare mai il termine “osservatore”.

Infatti quando diciamo “osservatore” siamo portati a pensare a una persona, e quindi introduciamo una connotazione soggettiva: suggeriamo che ciò che si vede dipenda da qualcuno che sta guardando.

Invece *le misure di un rif. sono dovute a strumenti.*

Ricordiamo: un rif. è un *laboratorio* dotato di strumenti: gli strumenti, in quanto tali, sono *oggettivi*.

Gli strumenti funzionano per i fatti loro: fanno misure, interagiscono con l'apparato che devo indagare e danno delle risposte che *non dipendono* da me o da chiunque li stia usando o guardando.

Il principio di relatività (PR)

Galileo (*Massimi Sistemi*, 1632) enuncia per primo il PR 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 rif. in moto traslatorio rettilineo uniforme (TRU) 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 rif. 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 però non è adatta all'inizio dello studio della fisica, ma solo a una fase più avanzata.

Invece si può anche dire fin dall'inizio che Einstein un secolo fa (1905) riafferma l'idea di Galileo, sottolineando che il principio vale per *qualsiasi esperimento*: in particolare per la luce.

Naturalmente la questione andrà ripresa, ma l'idea di base è accessibile almeno dalla terza.

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*.

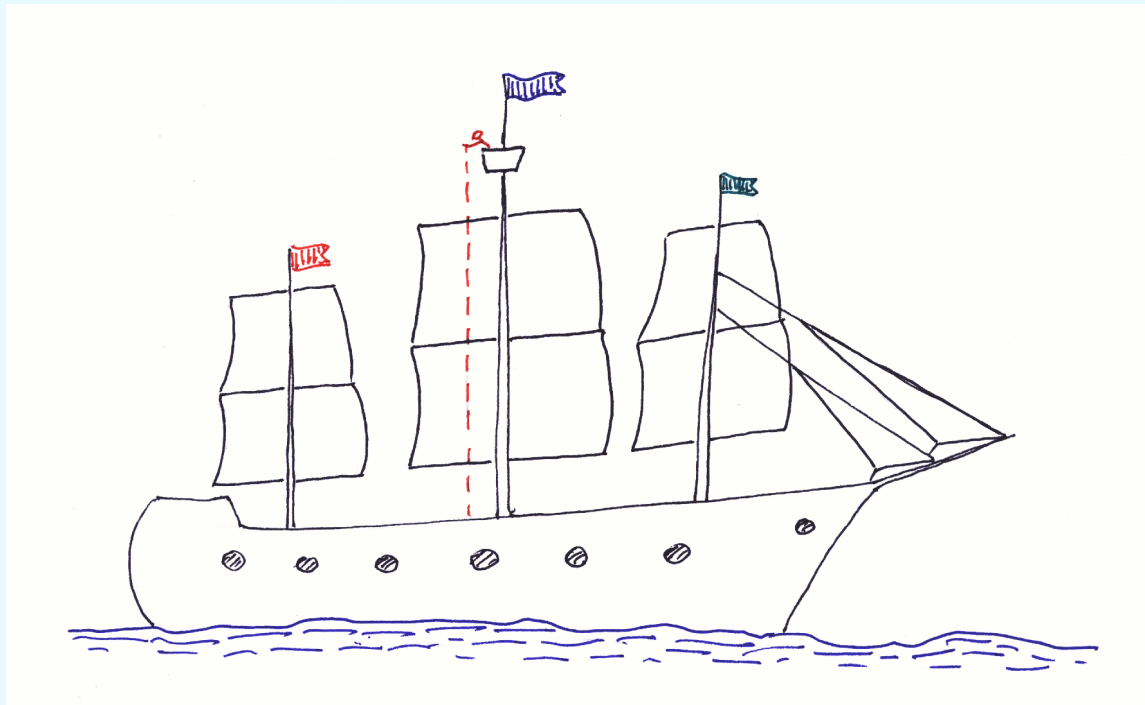
Come ci arriva Galileo?

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.

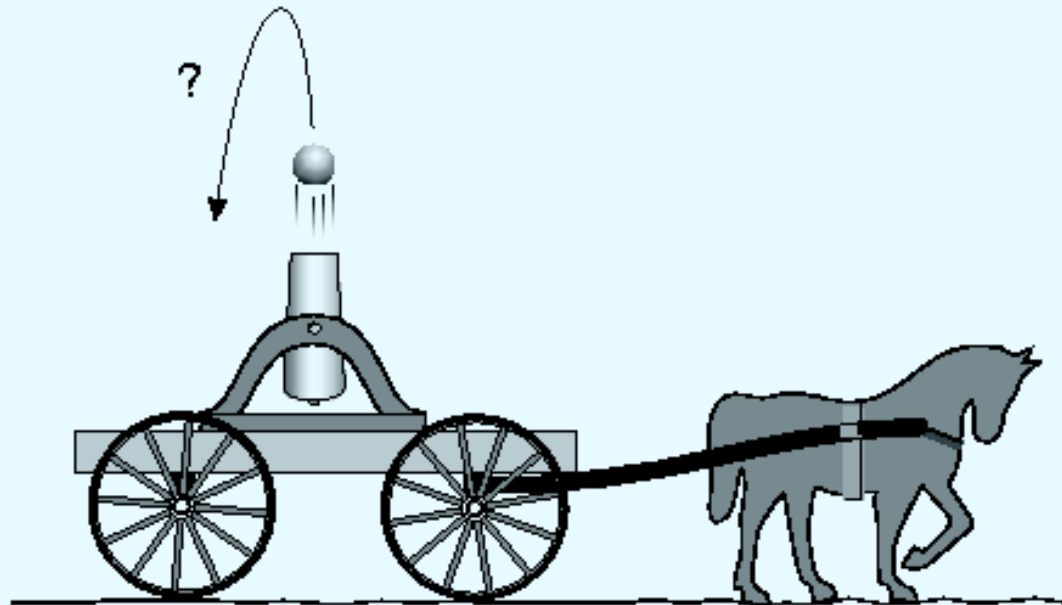


2. *L'esempio del cannone.*

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...

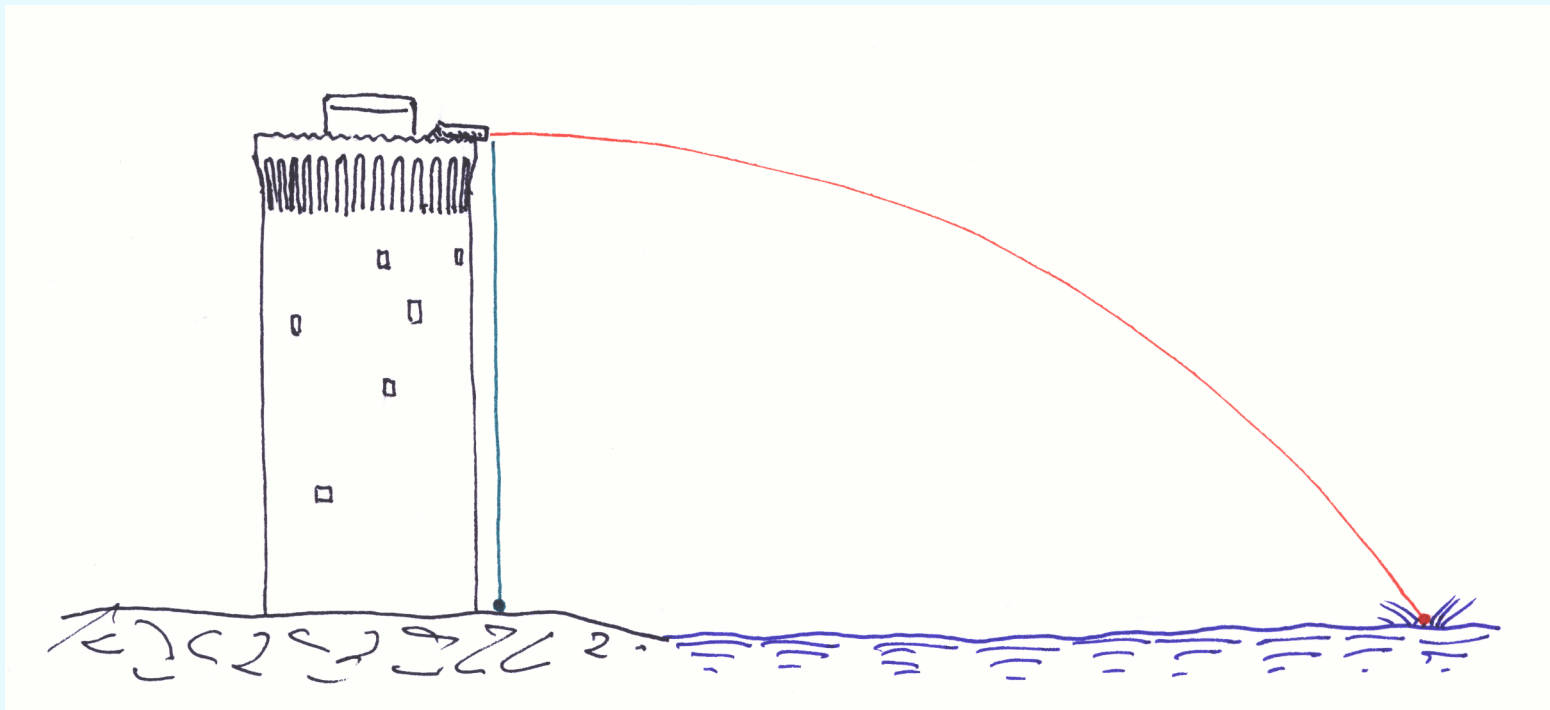
Da qui gli esperimenti condotti dagli Accademici del Cimento, quando Galileo era già morto da 16 anni (1658).

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

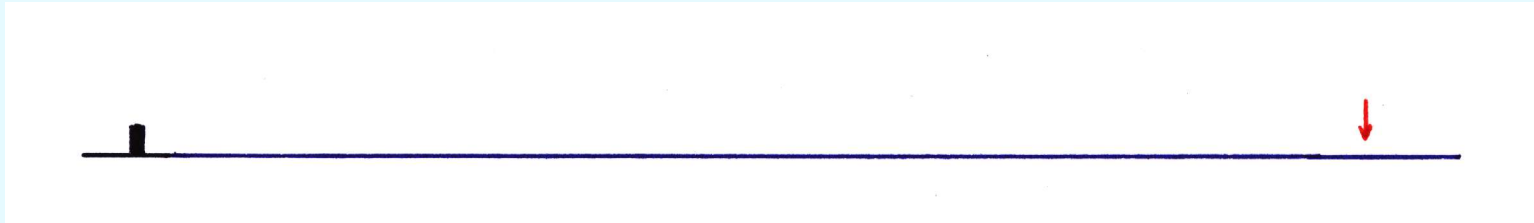
Da una torre della Fortezza vecchia di Livorno, alta 50 braccia sul mare, lanciarono una palla in mare con una colubrina puntata orizzontale.

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...)

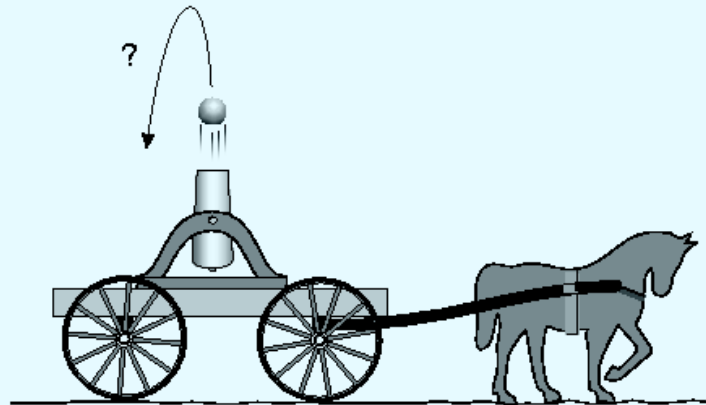
Il “saltamartino”

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.

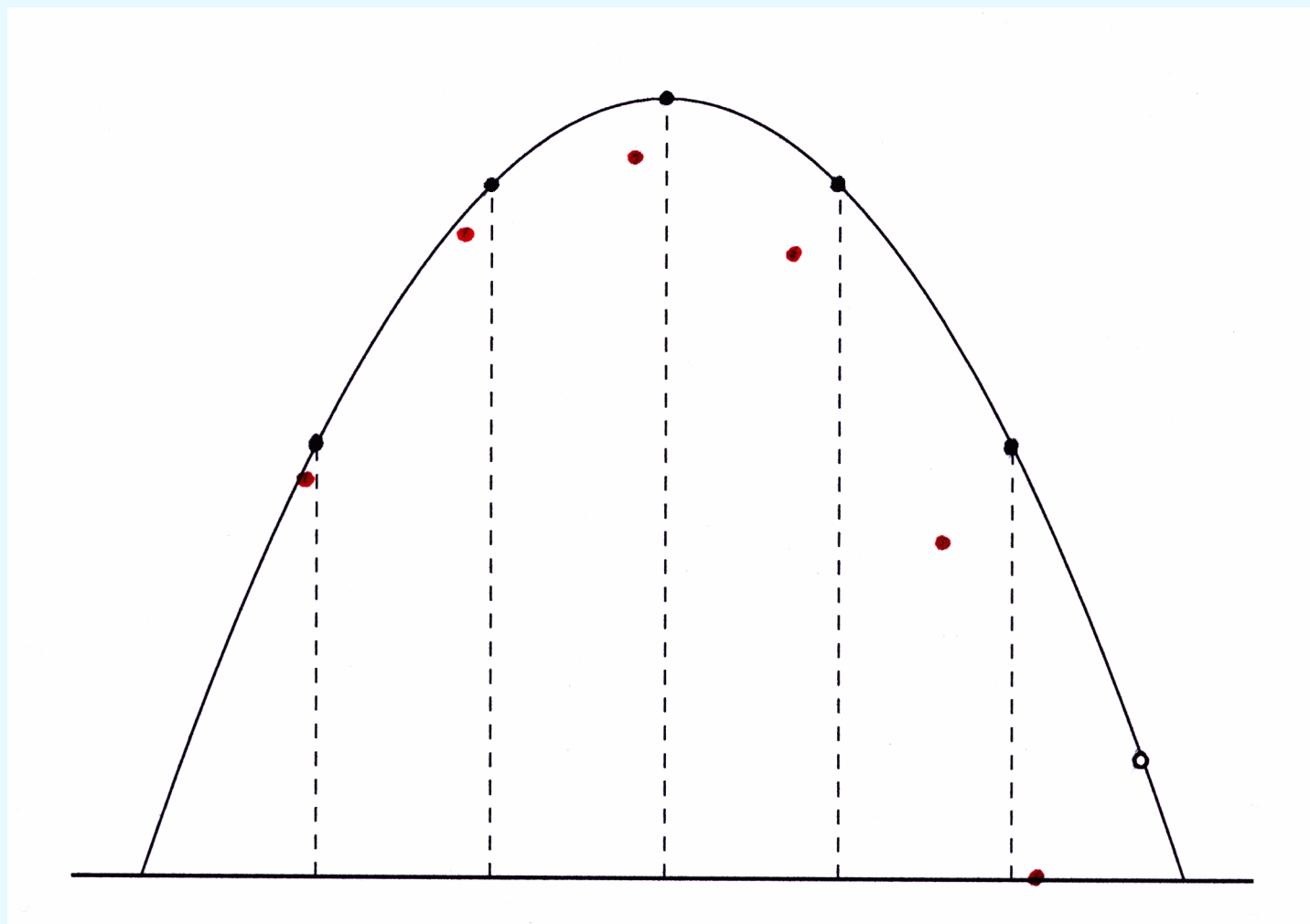
Risultato: nel tempo che la palla era in aria, il carro percorreva **64 braccia**.

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.

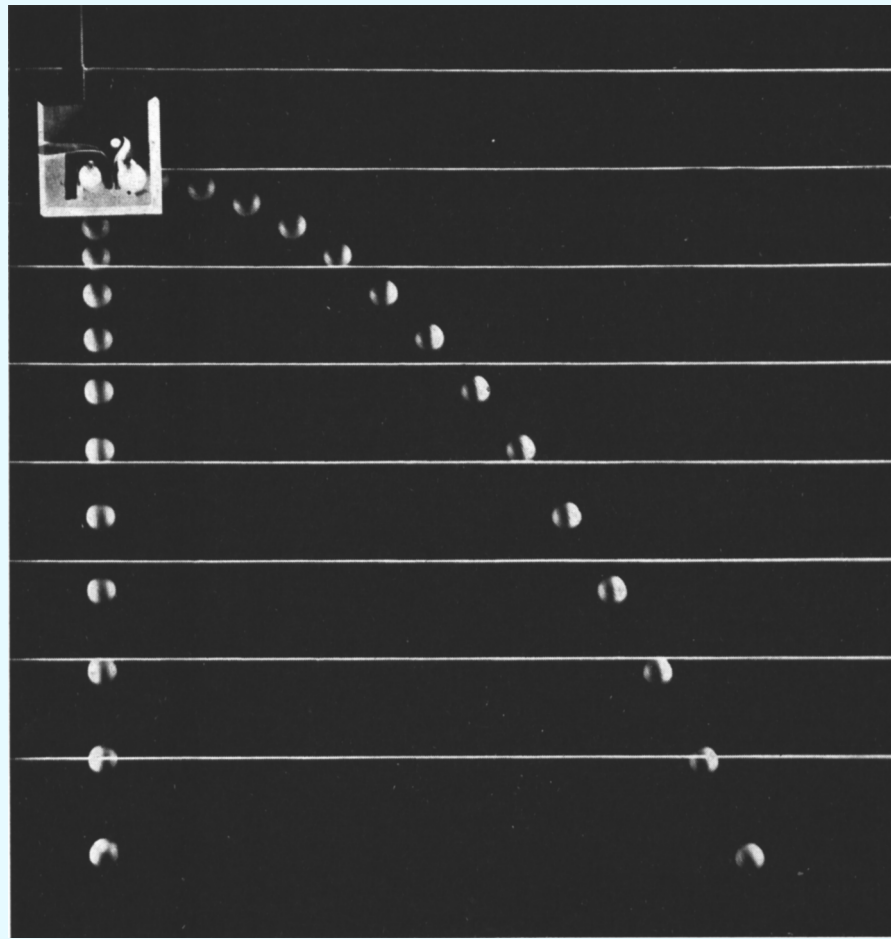
Allora non si può *dimostrare* l'indipendenza del moto orizzontale e di quello verticale: *non c'è nessuna ragione perché questa indipendenza debba valere.*

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.

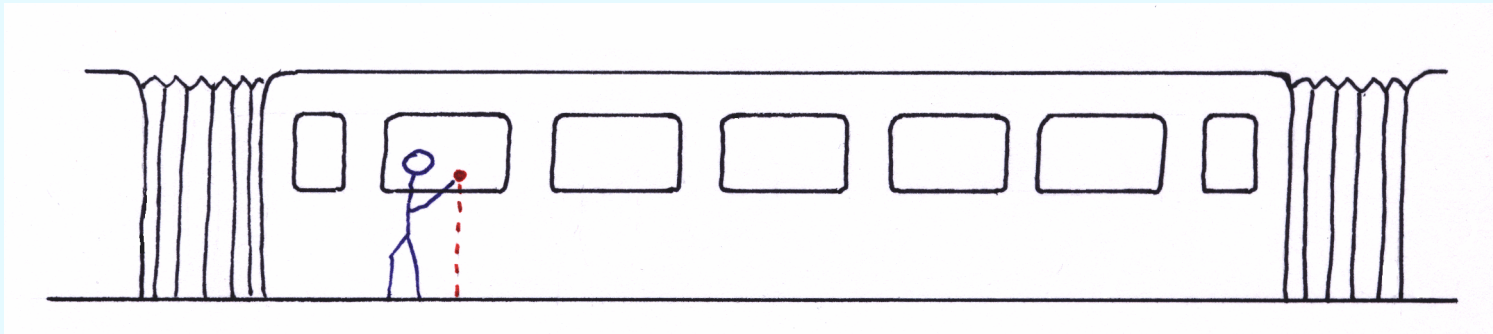


Moto dei proiettili e PR

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”.

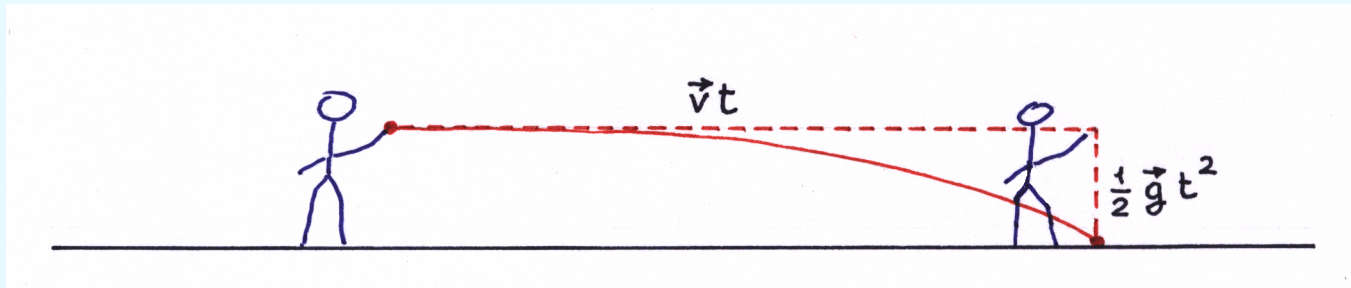
(Procedimento inverso a quello di Galileo.)

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 vt .

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

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



Ma è proprio così semplice?