

# Dinamica del Punto «materiale»

Sulla causa del moto\* dei corpi

Parole chiave

Relatività - Inerzia - Interazione - Massa

Quantità di moto - Momento - Forza

Impulso - Equazioni e leggi del moto

\* Con velocità molto minori di c

# Principio Classico di Relatività

G.G. 1632

## DIALOGO DI GALILEO GALILEI LINCEO MATEMATICO SOPRAORDINARIO DELLO STUDIO DI PISA. *E Filosofo, e Matematico primario del SERENISSIMO GR.DVCA DI TOSCANA.*

Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre  
sopra i due

MASSIMI SISTEMI DEL MONDO  
TOLEMAICO, E COPERNICANO;

*Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali  
tanto per l'una, quanto per l'altra parte.*

CON PRI



IN FIORENZA, Per Gio: Batista Landini MDCXXXII.

BIBLIOTECA dell'ISTITUTO COMPRENSIVO  
CON LICENZA DE' SUPERIORI.  
dell' UNIVERSITÀ - FIRENZE

11/29 Amico 779



# Principio Classico di Relatività

G.G. 1632

Rincorrerai con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coperta di alcun gran naufragio, e qui vi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti: sian anco un gran vaso d'acqua e dentrovi de' pescetti; sospenderai anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia rada 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 entraranno 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 lontanante saranno eguali; e saltando voi, come si dice, a più giunti, eguali spazi passerete vedo tutte le parti. Osservate che avete diligentemente tutte queste cose, benché niente dubbio ci sia mentre il vascello sta fermo non debbano succedere così: fate muovere la nave con quanta si voglia velocità; che (pur di moto uniforme e non fluctuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti; nè da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina, o pure sta ferma.

Equivalenza tra osservatori  
in movimento relativo  
rettilineo uniforme

Leggi [principi] della dinamica

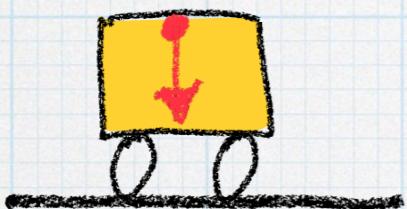
I. Newton

philosophiae naturalis principia mathematica - 1687

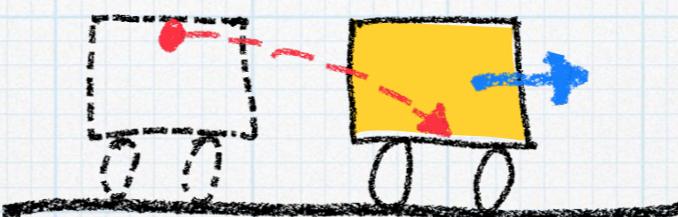
# Leggi [principi] della dinamica

- L1** Ciascun corpo persevera nel proprio stato di quiete o di moto uniforme rettilineo, eccetto che sia costretto a mutare quello stato da forze impresse
- L2** Il cambiamento di moto è proporzionale alla forza motrice impressa, e avviene lungo la linea retta secondo la quale la forza è stata impressa
- L3** A ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria: ossia, le azioni di due corpi sono sempre uguali tra loro e dirette verso parti opposte

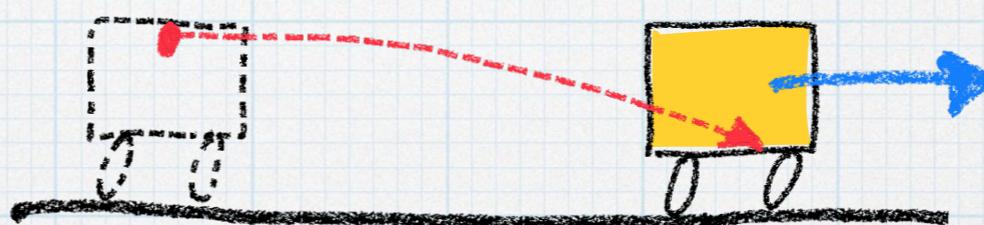
# Trasformazioni di Galilei in azione



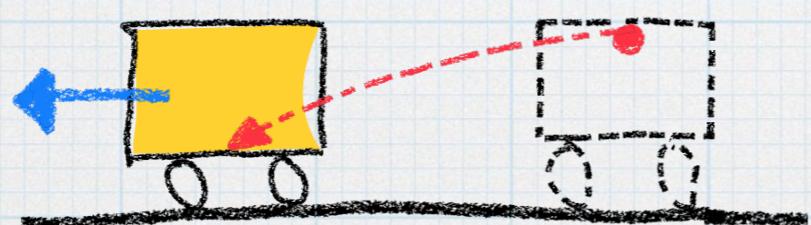
« quiete »



“ movimento ”



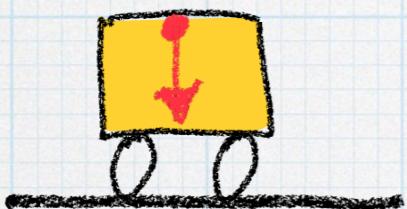
“ movimento ”



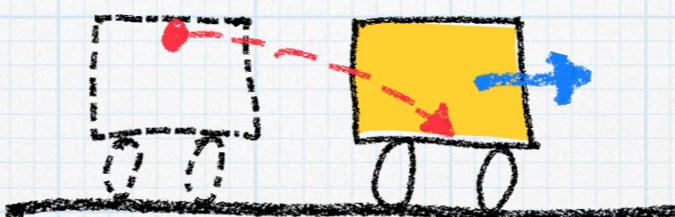
“ movimento ”

quiete e moto rettilineo uniforme  
Sono equivalenti

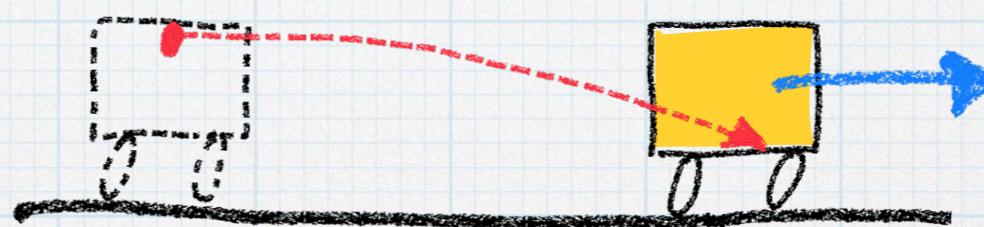
# Trasformazioni di Galilei in azione



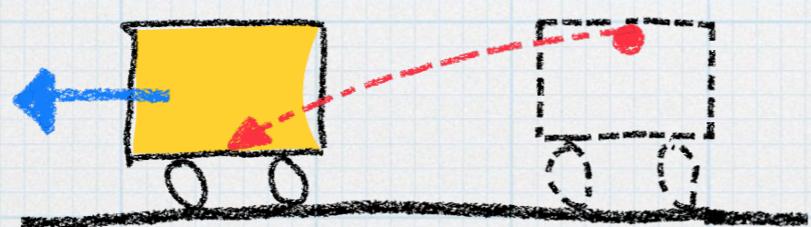
« quiete »



“memento”



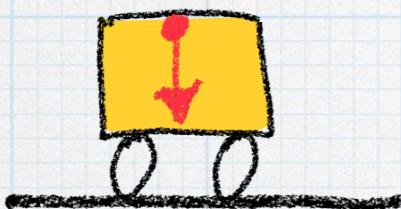
“memento”



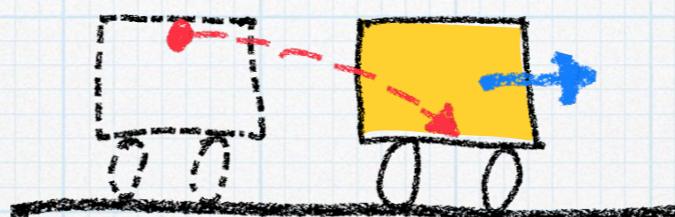
“movimento”

Il moto RELATIVO è l'unica "ASSOLUTITÀ"

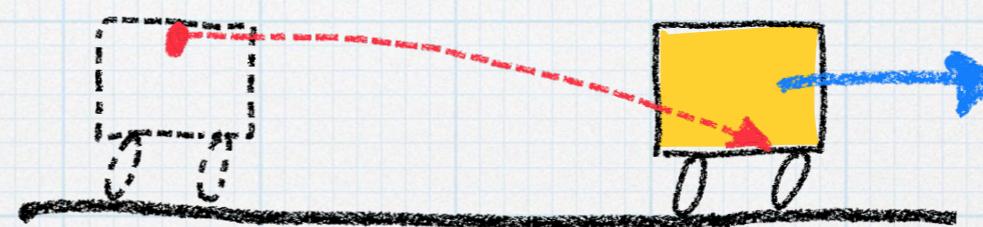
# Trasformazioni di Galilei in azione



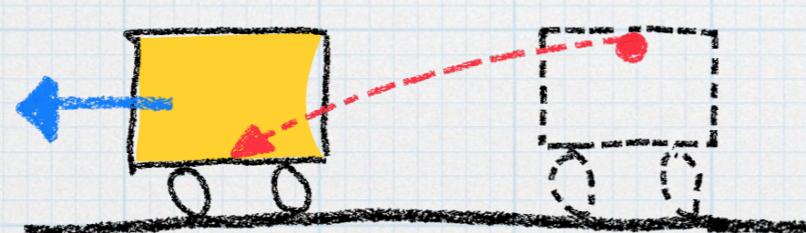
« quiete »



“memento”



“memento”



“memento”

Il moto RELATIVO è l'unica "ASSOLUTITÀ"

E non serve nessuna «forza» per questo moto!

# Principio di inerzia di Galilei

Dialoghi Sui massimi sistemi (1632)

I gravi finalmente ad alcuni movimenti  
si trovano differenti, come pur gl' istessi  
gravi al movimento orizzontale, il quale  
né naturalmente, né violentemente si  
genera, ma é di mezzo tra questi due;  
onde essendo levata ogni impedizione, un  
mobile sopra un piano orizzontale, con  
moto impresso, si moverà uniformemente  
in infinito, poiché né in giù scenderà,  
né in su salirà

# Principio di inerzia di Galilei

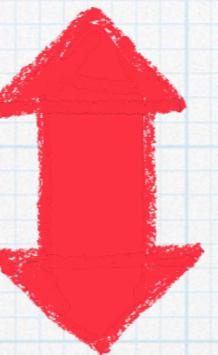
Discorsi e dimostrazioni matematiche  
intorno a due nuove scienze (1638)

Immaginate dunque una sfera sopra un piano orizzontale perfettamente liscio, che non abbia in sé alcuna inclinazione verso alcuna parte: io dico che la sfera, spinta con qualunque velocità, si muoverà sopra detto piano perpetuamente con quella stessa Velocità, se le resistenze dell'aria e le asperità del piano non la ritarderanno, le quali si escludono per ipotesi.

Onde, mancando ogni causa di rallentamento o d'arresto, non v'è ragione alcuna perché la sfera perda di moto, e per conseguenza questo suo moto sarà perpetuo.

# Princípio di INERZIA

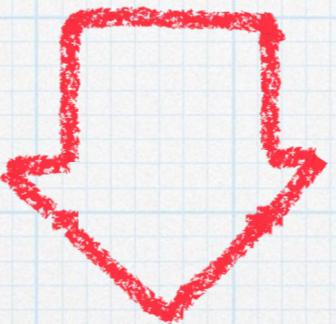
QUIETE ( = moto rettilineo uniforme)



LIBERTÀ\* da INTERAZIONI

\* L' EQUILIBRIO

Se vale il principio di inerzia  
[Libertà/equilibrio  $\leftrightarrow$  quiete]



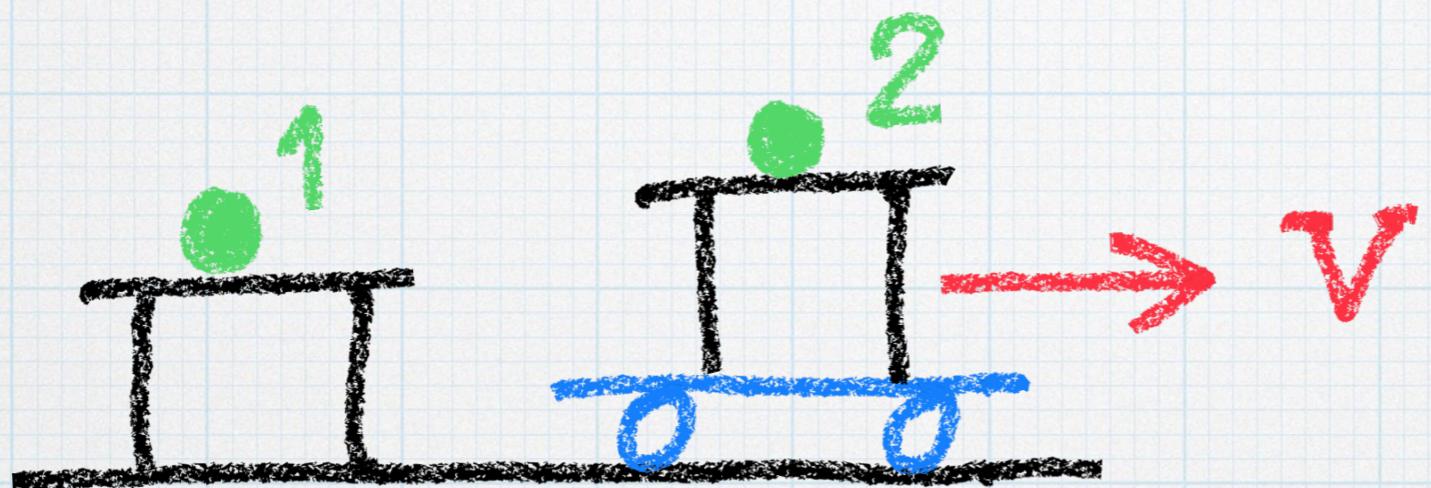
Siamo in un riferimento inerziale

Il principio di inerzia (L1)  
definisce il riferimento inerziale

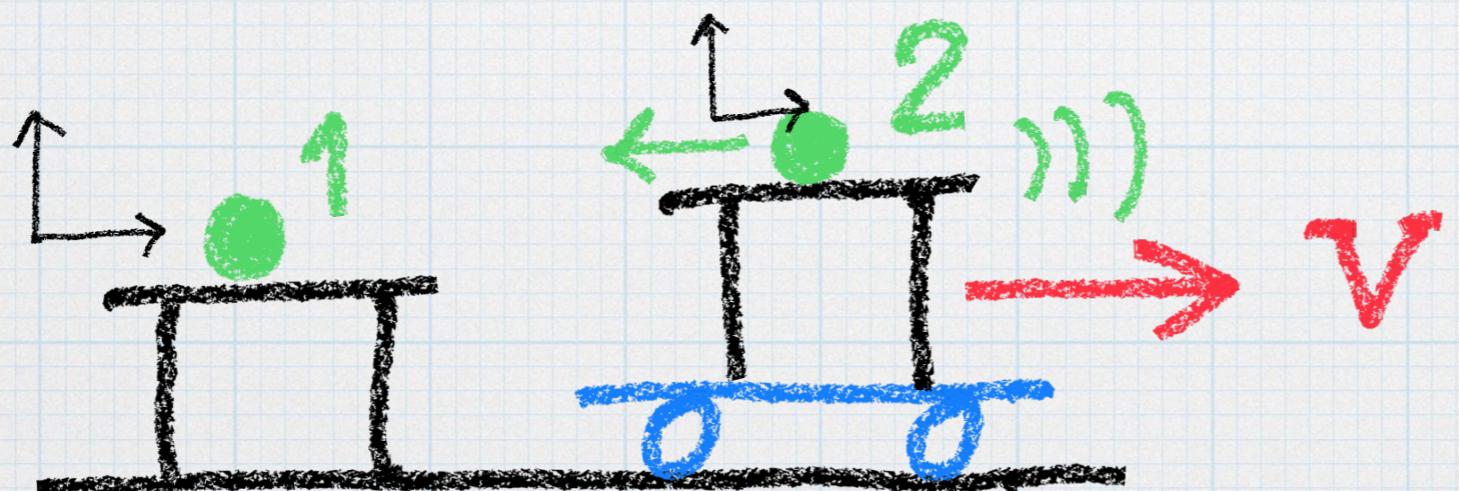
ci sono infiniti sistemi di  
riferimento inerziale tutti  
in moto relativo di traslazione  
con velocità costante

Come ci dicono  
le trasformazioni  
di Galilei (e il principio di relatività)

Il principio di inerzia  
deriva da quello di relatività



1 e 2 sono  
liberi



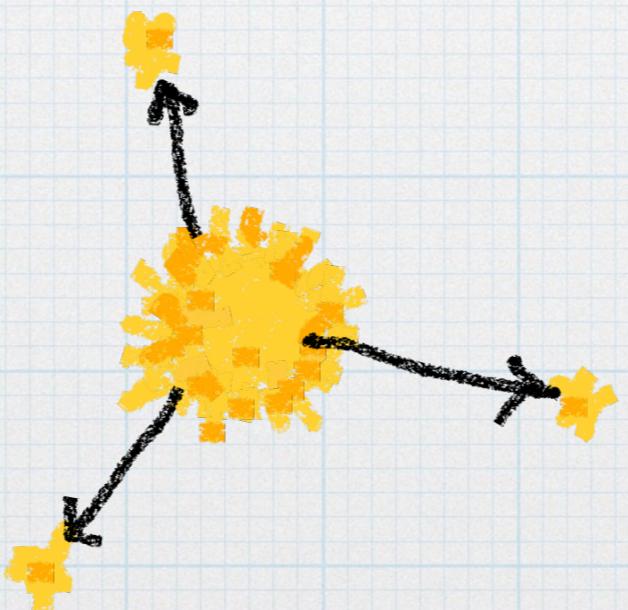
se per 1  
non vale  
il principio  
di inerzia

⇒ 1 e 2 non sono equivalenti  
⇒ non vale il principio di relatività

"Esistono" VERI riferimenti  
inerziali?

Buona domanda ...

... ci si deve accontentare.



Quindi:

La relatività di Galilei

prevede che

la fisica con le sue leggi

sia la stessa

in tutti i sistemi

di riferimento inerziali

O, meglio:

Le leggi della natura  
che descrivono i  
cambiamento di stato  
dei sistemi fisici  
non dipendono  
dai riferimenti inerziali  
a cui si riferiscono  
questi cambiamenti



In presenza  
di moto  
relativo  
accelerato  
fra osservatori  
non c'è  
equivalenza  
fra sistemi  
di  
riferimento

Cosa succede in un riferimento inerziale  
a un punto materiale  
che non è libero / in equilibrio ?

« Ovviamente » accelera ma ...

- Come descrivere la "non-libertà" ?
- Come collegare causa ed effetto ?

## Dinamica del punto materiale : introduzione

▶ Perché le cose si muovono? La questione delle cause del moto.

Vengono affrontati e discorsi argomenti che fanno riferimento a queste parole chiave / concetti :

- relatività
- inertie
- massa
- quantità di moto
- interazione / forza
- equazione del moto
- azione e reazione
- impulso

qui ci si interessa di situazioni nelle quali le velocità in gioco sono molto più piccole di quelle della luce ,  $v \ll c$

e si parla di approssimazione non-relativistica .

Si parte con il PRINCIPIO CLASSICO di RELATIVITÀ secondo G. Galilei come riportato nella II giornata dei Dialoghi sui Massimi Sistemi del Mondo [1632]

Rincorrerai con qualche amico nella maggior stanza che sia sotto coperta di alcun gran movimento, e qui fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti: siasi anco un gran vaso d'acqua e dentrovi de' pescetti;

Sospenderai anco in alto qualche secchietto, che a goccia a goccia rada 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'arcano alcuna cosa non più gagliardamente la dovete gettare verso quella parte che verso questa, quando le distanze saranno eguali;

e saltando voi, come si dice, a più giunti, eguali spazi passante vedo tutte le parti.

Osservate che avete diligentemente tutte queste cose, benché nium dubbio ci sia mentre il vascello sta fermo non debbano succedere così: fate muovere la nave con questa si voglia velocità; che (pur di moto uniforme e non fluctuante in qua e in là) voi non riconoscete una minima mutazione in tutti li nominati effetti; né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina, o pure sta ferma.

▶ In sostanza, "laboratori" (sistemi di riferimento) in moto relativo rettilineo uniforme sono indistinguibili per quanto riguarda l'esito di qualsiasi sperimentazione fisica: le leggi che governano a questi fenomeni NON MUTANO passando fra osservatori di questo tipo. Ciò implica la relatività del moto uniforme e rettilineo.

- → Questo implica anche l'equivalenza del moto rettilineo uniforme e della quiete (sono moti che differiscono per trasformazioni fra osservatori ancora in moto relativo rettilineo uniforme)
- → Esegua di definire propriamente questa classe di osservatori, ovvero i laboratori di Galilei collegati da moti rettilinei uniformi.

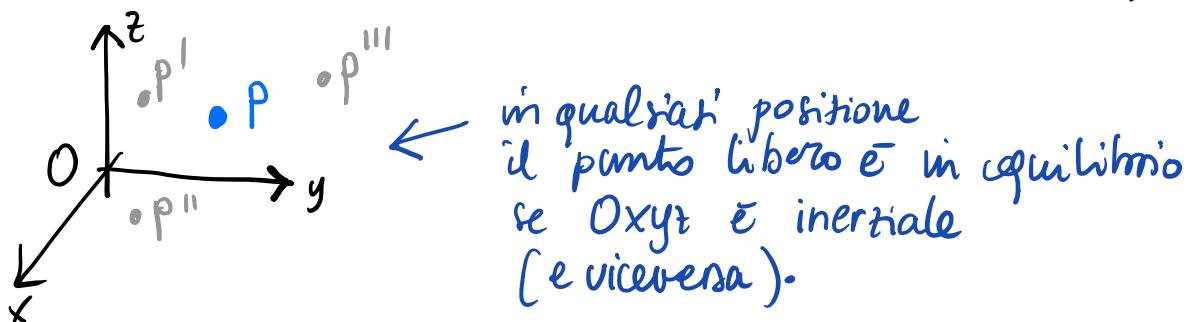
### RIFERIMENTI "INERTIALI"

Si considera un corpo (punto materiale) « libero » (da "interazioni", "forze") e lo si lascia immobile (o in moto rettilineo uniforme).

Se in un dato sistema di riferimento questo corpo « libero » mantiene il suo stato di moto (quiete o moto rettilineo uniforme)

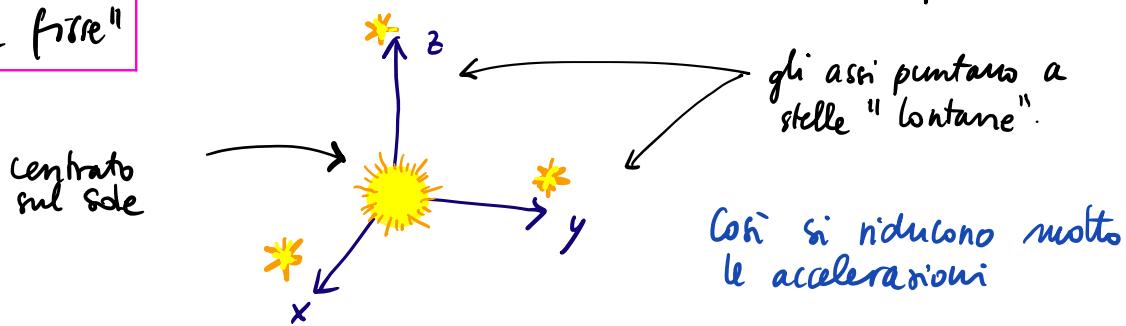
⇒ il riferimento è detto **inertiale**.

- → Si può anche dire che tutte le posizioni occupate da un punto materiale **libero** in un riferimento **inertiale** sono di **EQUILIBRIO** per il corpo (equilibrio intesa come condizione di libertà del punto).



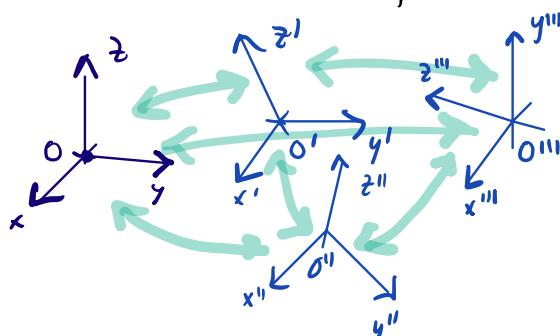
- → "Difficile" trovare in giro riferimenti inertiali perché è "difficile" assicurarsi con generalità la libertà (assenza di "interazioni") del punto materiale.

Un buon sistema di riferimento "pressoché inerziale" è quello delle "stelle fisse"



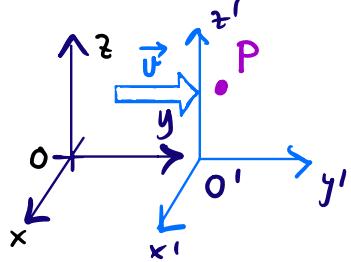
→ Dato un riferimento inerziale, se ne generano infiniti altri semplicemente tramite trasformazione di Galilei

Oxyz è inerziale



⇒ sono tutti inerziali se in moto relativo rettilineo uniforme.

È conseguenza del principio di relatività:



se Oxyz è inerziale  $\Rightarrow$  P è in equilibrio se è libero

$\Rightarrow$  dev'essere anche in O'x'y'z' perché i due riferimenti sono in moto relativo uniforme  
 $\Rightarrow$  anche O'x'y'z' è inerziale.

In concreto: il terreno di gioco d'ora in avanti è l'insieme degli (infiniti) sistemi di riferimento inerziali che si possono adottare per raccontare e spiegare cosa succede se NON ci sono le condizioni per l'equilibrio, ovvero la libertà meccanica (assenza di interazioni).

→ Assenza di interazioni su un punto in un riferimento inerziale  
 moto rettilineo uniforme (quieta)

Presenza di interazioni su un punto in un riferimento inerziale  $\rightarrow ???$

## Principio di Inerzia - I legge della dinamica

Il principio di inerzia sancisce l'universalità della natura rettilinea e uniforme del moto di un corpo libero, non soggetto a vincoli / interazioni / influenze, in un qualsiasi riferimento inerziale

► un punto materiale libero lasciato in quiete in un riferimento inerziale rimane indefinitivamente in questa condizione.

Se è in moto rettilineo uniforme vi rimane

NB questa legge è una conseguenza del principio di relatività!

NB Galilei pensava che il moto (rettilineo uniforme) avesse bisogno di «qualcosa» per essere mantenuto. (Ma non quello circolare «perfetto»)

• ➔ Il I principio è centrale per definire il corretto ambito di studio per quanto riguarda l'ASSSENZA di interazioni e DUNQUE anche la PRESENZA di INTERAZIONI, ovvero

CIO' CHE RIMUOVE IN UN RIFERIMENTO INERZIALE IL PUNTO MATERIALE DALLA CONDIZIONE DI EQUILIBRIO.

NB: in riferimenti NON INERZIALI, ACCELERATI, il moto risulta a sua volta accelerato, per un punto LIBERO, ovvero non c'è necessaria un'interazione per avere un moto non uniforme.

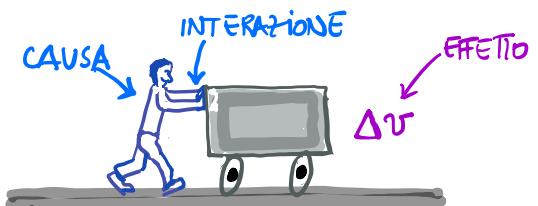
MOLTO IMPORTANTE!

Ci interessa ora descrivere quantitativamente e formalmente una possibile relazione fra

CAUSA: un'interazione

EFFETTO: variazione dello stato di moto

SEMPRE ed ESCLUSIVAMENTE in un RIFERIMENTO INERZIALE.

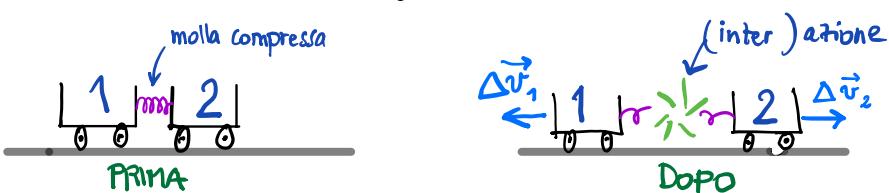


# Interazione, inerzia e stato di movimento

- Si può seguire un'idea ingenua (ma corretta) di collegamento fra azione esterna a un corpo e sua risposta a questa influenza.
- L'idea ingenua è quella che prevede una maggiore (minore) risposta a una data sollecitazione quanto minore (maggiore) è una certa misura di «pigrizia dinamica» o «INERIA» alla innescione in moto.

Dare un calcio a una pallina da ping-pong o a una boccia da bowling non produce gli stessi effetti (a "parità di calcio")

Approccio sperimentale (e storico) con i carrelli di C. Huygens



NB  
l'azione è  
sempre una  
INTER-azione!

effetto: VARIAZIONE di VELOCITÀ,  $\Delta \vec{v}_1$  e  $\Delta \vec{v}_2$ ,  
a partire dalla quiete iniziale.

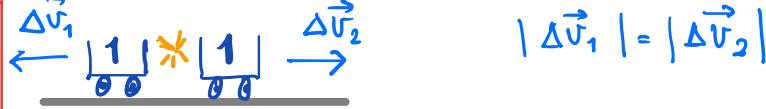
Osservazioni sperimentali:  $\Delta \vec{v}_1$  e  $\Delta \vec{v}_2$  sono SEMPRE orientati in senso opposto su un'unica direzione;

il rapporto  $\frac{|\Delta \vec{v}_1|}{|\Delta \vec{v}_2|}$  dipende solo dai due carrelli e non dalla molla

- Un possibile percorso per l'esperimento sistematico.

Si parte da due carrelli uguali d'inferimento e, come "ci si può aspettare", l'interazione è simmetrica, ovvero i due carrelli acquistano la stessa velocità (in direzioni opposte)

NB  
se all'inizio i  
carrelli sono fermi  
le  $\Delta \vec{v}$  sono le velocità  
finali.



$$|\Delta \vec{v}_1| = |\Delta \vec{v}_2|$$

NB  $|\Delta \vec{v}_1|$  e  $|\Delta \vec{v}_2|$  sono uguali ma il loro valore (comune) dipende dalla molla e da "com'è" il carrello.

Per sì procede aggiungendo / togliendo carrelli  
sempre dello stesso tipo "1" e controllando

$$|\Delta \vec{v}_1| / |\Delta \vec{v}_2|$$

•  $\rightarrow \Delta \vec{v}_1 \leftarrow \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\Delta \vec{v}_2} \rightarrow \Delta \vec{v}_2$

$$\left| \frac{\Delta \vec{v}_1}{\Delta \vec{v}_2} \right| = 2$$

$\Delta \vec{v}_1 \leftarrow \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\Delta \vec{v}_2} \rightarrow \Delta \vec{v}_2$

$$\left| \frac{\Delta \vec{v}_1}{\Delta \vec{v}_2} \right| = 3$$

$\Delta \vec{v}_1 \leftarrow \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}}_{\Delta \vec{v}_2} \rightarrow \Delta \vec{v}_2$

$$\left| \frac{\Delta \vec{v}_1}{\Delta \vec{v}_2} \right| = \frac{3}{2}$$

eccetera ...

► Si introduce l'UNITÀ di INERZIA ("pigrizia all'immissione in movimento") partendo dal «carrello unitario» e la si chiama

(unità di) MASSA INERZIALE (m).

Nel caso unitario  $m = 1 \text{ kg}$  ← grandezza fondamentale del SI

Con "n" carrelli unitari è  $m = n \text{ kg}$  per cui l'esperimento di Huygens può essere dimensionato come

$$\Delta \vec{v}_1 \leftarrow \underbrace{\begin{bmatrix} n_1 \text{ carrelli} \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} n_2 \text{ carrelli} \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\Delta \vec{v}_2} \rightarrow \Delta \vec{v}_2 \quad \left| \frac{\Delta \vec{v}_1}{\Delta \vec{v}_2} \right| = \frac{n_2}{n_1} = \frac{m_2}{m_1}$$

massa di  $n$  carrelli unitari

Pensando alle grandezze vettoriali :

$$m_1 \Delta \vec{v}_1 = -m_2 \Delta \vec{v}_2$$

ovvero l'interazione modifica le velocità (provoca accelerazioni) con efficacia inversamente proporzionale all'inertia (massa inerziale)

Si introduce la grandezza vettoriale

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

QUANTITÀ di MOTO

( $[\vec{p}] = [MLT^{-1}]$ , si misura in  $\text{kg} \cdot \text{m/s}$  nel SI)

•  $\rightarrow$  L'esperimento di Huygens e, in generale, l'effetto della interazione si può quindi ricondurre a uno

SCAMBIO di QUANTITÀ di MOTO

in quanto se  $\vec{p} = m \vec{v}$  e  $\Delta \vec{p} = m \Delta \vec{v}$

per cui la  $m_1 \Delta \vec{v}_1 = -m_2 \Delta \vec{v}_2$  diventa

$$\Delta \vec{p}_1 = -\Delta \vec{p}_2 :$$

uno dei partner dell'interazione acquista (perde) la stessa quantità di moto che perde (acquista) l'altro.

Ovvero

$$\Delta \vec{p}_1 + \Delta \vec{p}_2 = \vec{0}$$

che corrisponde ad affermare che nell'interazione

la quantità di moto totale dei partner è conservata (non cambia):

se  $\vec{p}_{\text{TOTALE}} = \vec{p}_1 + \vec{p}_2 = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2$  questa somma vettoriale è sempre eguale a se stessa.

- $\rightarrow$  Nella sostanza l'interazione fa cambiare (o scambiare) la quantità di moto.

Quindi

$$\text{INTERAZIONE} \leftrightarrow \Delta \vec{p}$$