

# FISICA

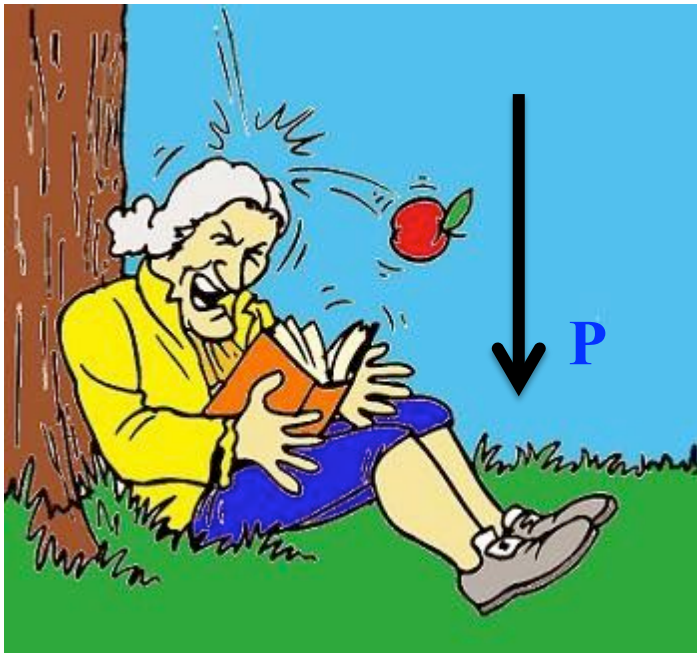
## La Dinamica: i principi

*Autore: prof. Pappalardo Vincenzo  
docente di Matematica e Fisica*



La dinamica è la parte della fisica che studia il movimento dei corpi, prendendo in considerazione le cause che lo producono, ossia le forze.

L'effetto di una forza è quello di far cambiare velocità ad un corpo, ossia di accelerarlo. La dinamica studia, quindi, il legame tra causa (effetto) ed effetto (accelerazione).



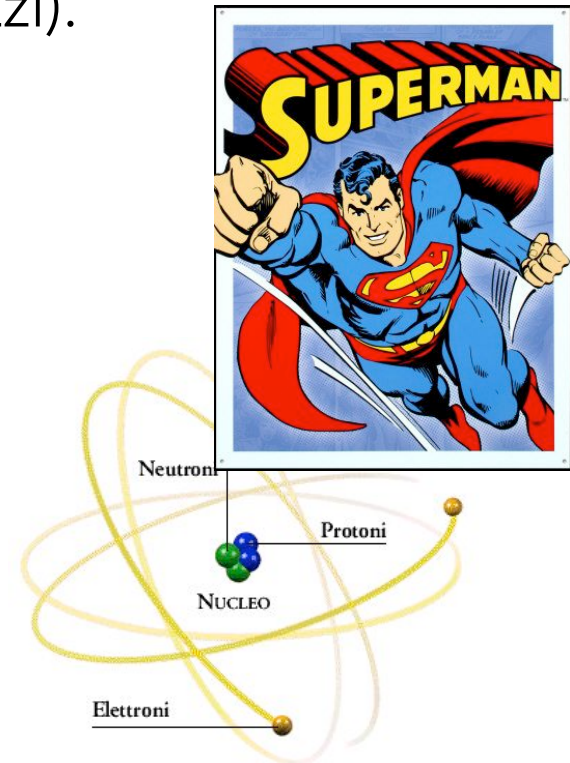
Lo sviluppo della dinamica è dovuto principalmente a **Isaac Newton (1643 -1727)**.

La dinamica è fondata su tre principi:

1. Il primo principio, o *principio d'inerzia*
2. Il secondo principio, o *legge fondamentale della dinamica*
3. Il terzo principio, o *principio di azione e reazione*

Grazie a questi principi siamo in grado di prevedere le traiettorie di molti corpi macroscopici (comete, aerei, satelliti), e di progettarli (biciclette, aerei, macchine, razzi).

I principi della dinamica non valgono per descrivere il comportamento di corpi microscopici (atomi e particelle). Per questi valgono le leggi della Meccanica Quantistica. E quello di oggetti che viaggiano a velocità molto alte, comparabili con quella della luce. In questo caso valgono le leggi della Teoria della Relatività.



## PRIMO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

Se un corpo si muove, la causa è sempre una forza applicata che lo spinge?

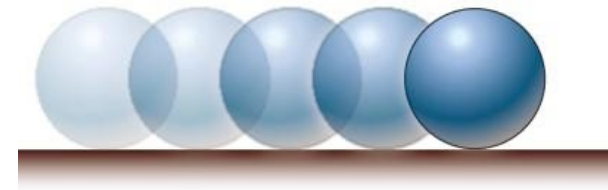
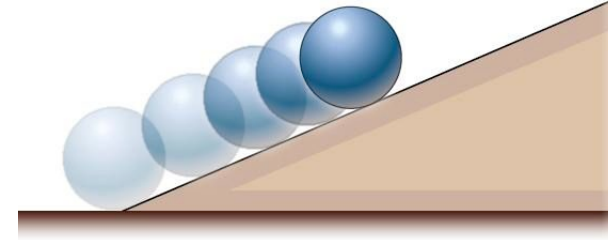
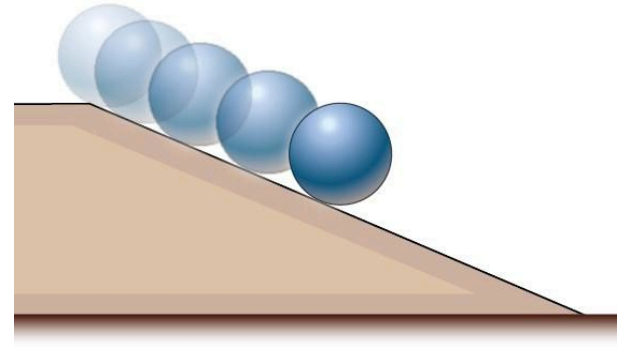
Ne era convinto il filosofo greco **Aristotele** (384 a.C.; 322 a.C.), che affermava: *"Ciò che è mosso cessa di muoversi nel momento stesso in cui il motore che agisce su di esso smette di muoverlo"* (che significa, in linguaggio scientifico moderno, *"un corpo in moto si ferma quando la forza che lo spinge smette di agire"*).

Nel 1600, **Galileo Galilei** (1564-1642), arriva ad una conclusione opposta:

**Un corpo permane nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, fino a quando non interviene una causa esterna (forza) a modificare tale stato.**

E ci arriva attraverso il seguente ragionamento contenuto nella sua opera *Dialogo sopra i due massimi sistemi*:

- se si lascia cadere un corpo (per esempio una sfera) lungo un piano inclinato, questo aumenta di continuo la propria velocità.
- se invece si lancia lo stesso corpo su un piano inclinato in salita, si vede che il corpo diminuisce la propria velocità fino a fermarsi.
- ma se il piano è orizzontale, la sfera non ha alcuna ragione per accelerare né per rallentare, quindi deve mantenere costantemente la stessa velocità (moto rettilineo uniforme).



Però nella vita di tutti i giorni non vediamo oggetti che si muovono a velocità costante per tempi indeterminati. Come mai? La risposta la fornisce ancora una volta Galileo, quando fa notare "[...] *sí rimuovano tutti gl'impedimenti accidentarii ed esterni* [...]". Gli impedimenti esterni di cui parla Galileo sono per esempio le forze di attrito, sempre presenti nell'esperienza quotidiana. Sono questi che provocano il rallentamento della sfera sul piano orizzontale; *se li potessimo eliminare, la sfera si muoverebbe a velocità costante per sempre.*

La sorprendente scoperta di Galileo è espressa nel:

### PRIMO PRINCIPIO DELLA DINAMICA (O PRINCIPIO D'INERZIA)

- ✓ Se la forza totale applicata a un punto materiale è uguale a zero, esso si muove di moto rettilineo uniforme:

$$\Sigma \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{v} = \text{cost}$$

- ✓ Se un punto materiale si muove di moto rettilineo uniforme, la forza totale che subisce è uguale a zero:

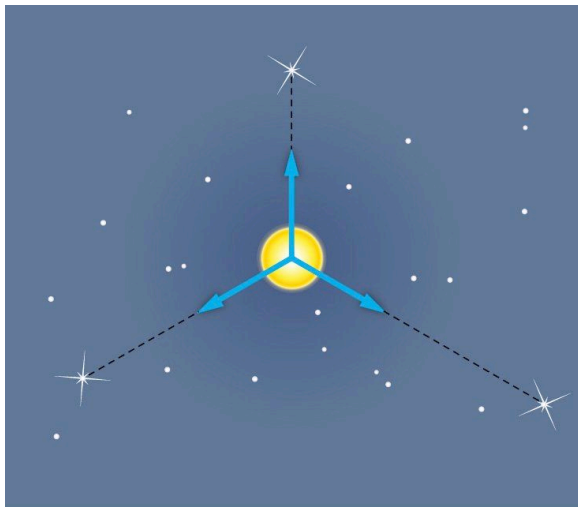
$$\vec{v} = \text{cost} \Rightarrow \Sigma \vec{F} = 0$$

Se un corpo si muove, c'è sempre una forza che lo sta spingendo? No: il corpo, per inerzia (naturalmente) si muove a velocità costante, senza bisogno di spinte. Questo movimento "naturale" (moto rettilineo uniforme) viene modificato solo dalla presenza di cause esterne, come la forza di attrito.

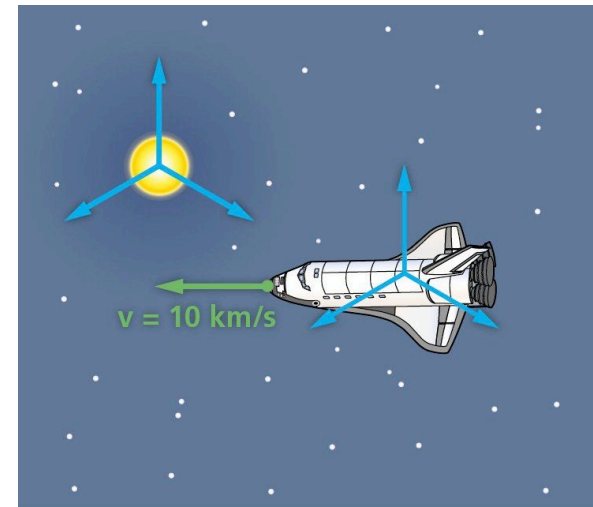
# I SISTEMI DI RIFERIMENTO INERZIALI

Ma in quale sistema di riferimento vale il principio d'inerzia?

Un sistema di riferimento in cui vale il primo principio della dinamica si chiama sistema di riferimento inerziale.

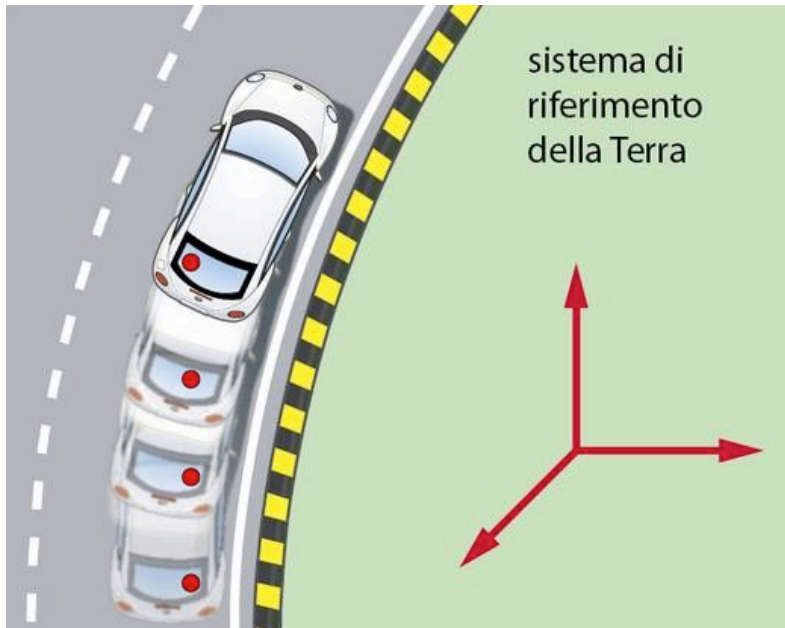


E' un sistema di riferimento inerziale che ha l'origine nel centro del Sole e i tre assi che puntano verso tre stelle molto lontane.

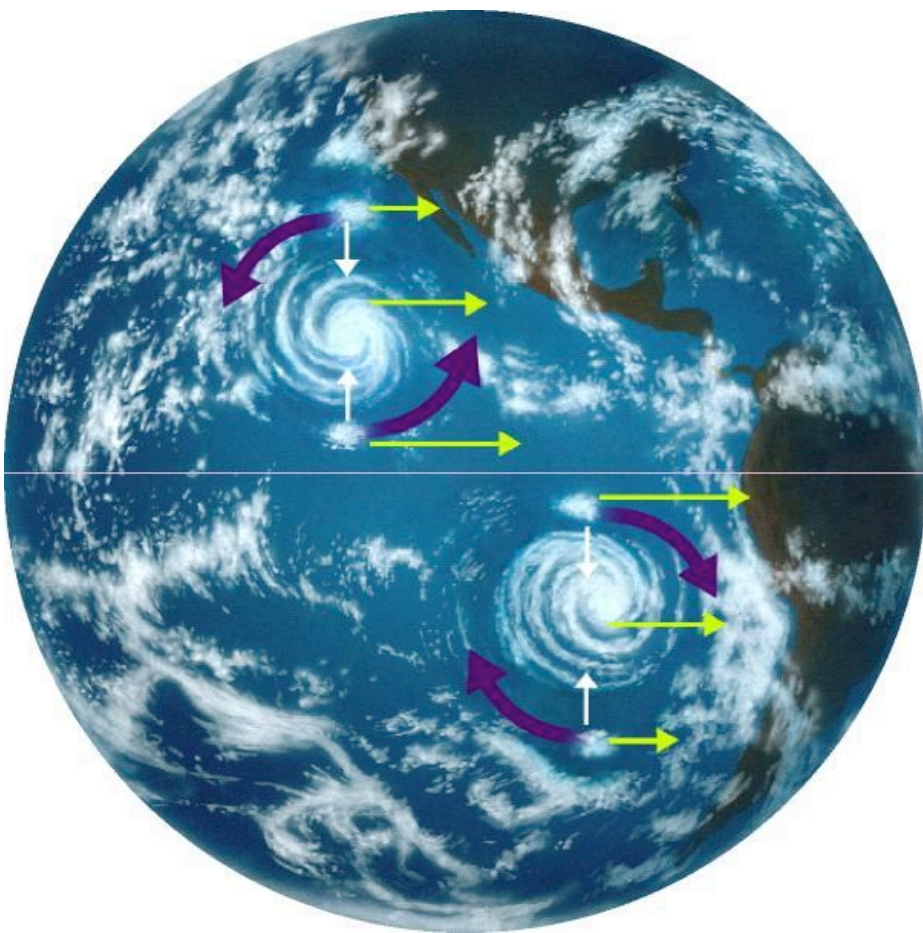


Sono inerziali tutti i sistemi di riferimento che si muovono con velocità costante rispetto al sistema del Sole.

La Terra, in linea di principio, non è un sistema di riferimento inerziale, in quanto compie moti accelerati (moto di rotazione e di rivoluzione).



Tuttavia le due accelerazioni sono troppo piccole per essere avvertite nei fenomeni quotidiani che durano poco, come lo studio del moto di un'auto o l'oscillazione di un pendolo. Per analizzare fenomeni di questo tipo possiamo utilizzare, con buona approssimazione, la Terra come sistema di riferimento inerziale.

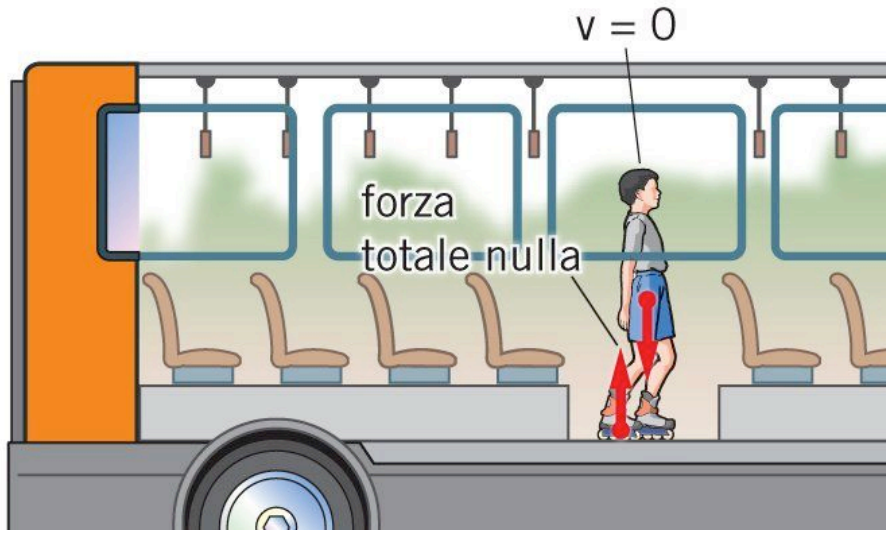


Per lo studio di fenomeni che durano a lungo e che spaziano su ampie zone della superficie terrestre, gli effetti delle accelerazioni della Terra diventano rilevanti.

Infatti, i cicloni hanno una rotazione in senso antiorario nell'emisfero Nord della Terra e in senso orario nell'emisfero Sud.

Questo effetto è dovuto al fatto che la Terra è un sistema di riferimento non inerziale.

Osserviamo le seguenti situazioni:



Quando l'autobus va a 50 km/h, il ragazzo è fermo rispetto all'autobus. La forza totale sul ragazzo (peso+reazione del pavimento) è nulla.



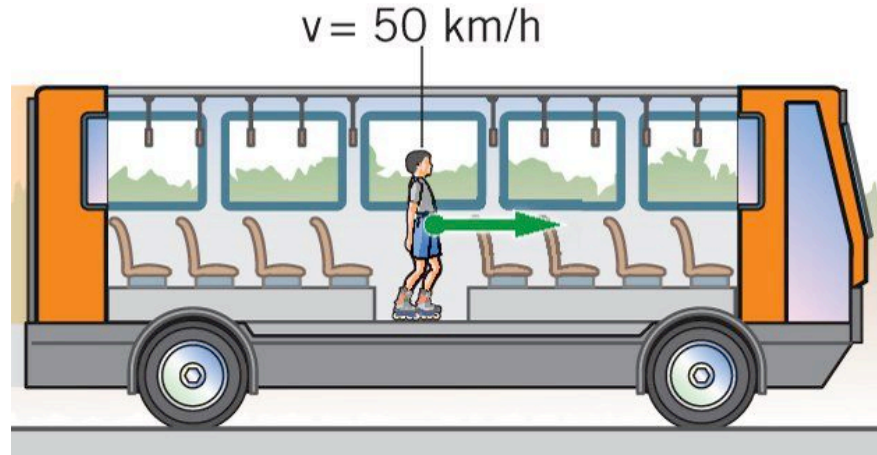
Quando l'autobus frena (sistema di riferimento accelerato), il ragazzo si sente spinto in avanti.



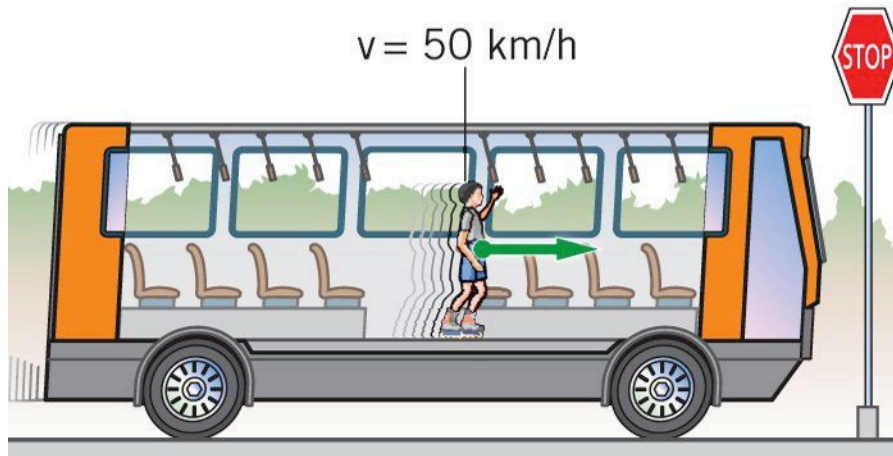
Il principio d'inerzia non vale  
nei sistemi accelerati

Nel sistema accelerato (l'autobus che frena), durante la frenata il ragazzo non resta fermo, come richiederebbe il principio d'inerzia, ma si muove in avanti rispetto al sistema di riferimento accelerato (autobus), come se fosse stato spinto (eppure la forza totale che agisce è nulla).

Osserviamo la stessa situazione dal marciapiEDE (Terra), che, con buona approssimazione, è un sistema di riferimento inerziale:



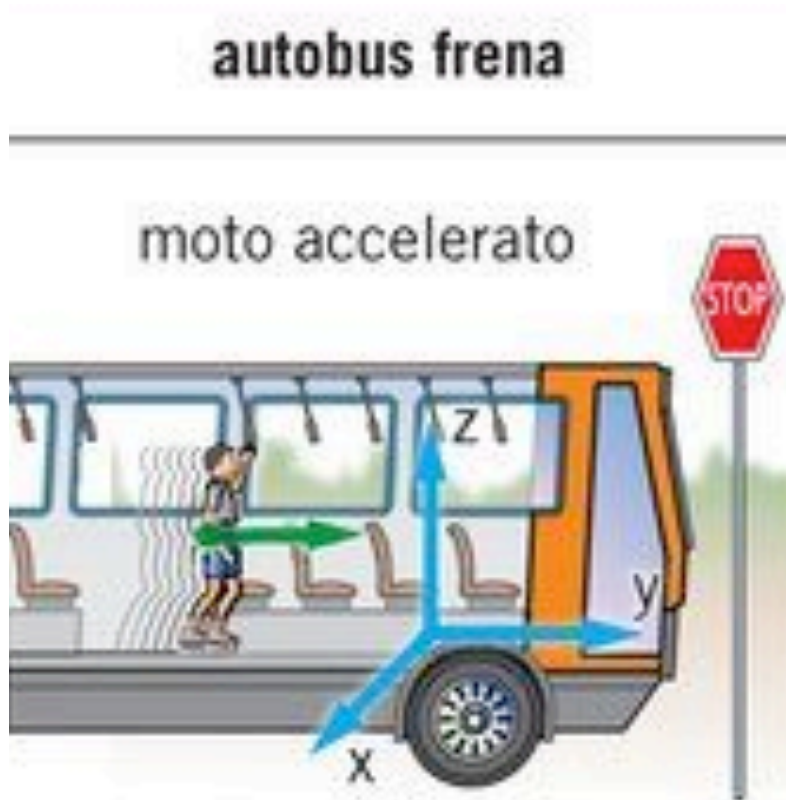
Quando l'autobus viaggia a  $50 \text{ km/h}$ , il ragazzo si muove (rispetto alla Terra) di moto uniforme a  $50 \text{ km/h}$ .



Quando l'autobus frena, il ragazzo continua per inerzia a muoversi (rispetto alla Terra) di moto uniforme a  $50 \text{ km/h}$ .

Nel sistema di riferimento inerziale Terra, il principio d'inerzia è valido.

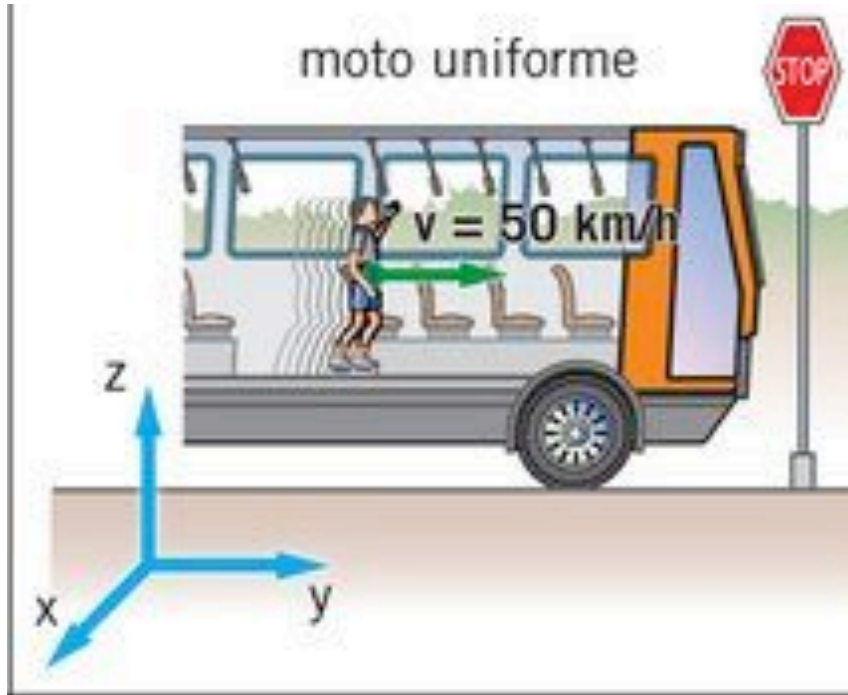
Conclusione:



La forza che il ragazzo sente è una **forza apparente** (una forza non vera nel concetto classico del termine), che viene introdotta per spiegare il moto in avanti e tener conto del fatto che l'autobus in frenata **non è un sistema di riferimento inerziale**. L'uso delle forze apparenti si rende necessario se vogliamo applicare i principi della dinamica anche nei sistemi di riferimento non inerziali.

autobus frena

moto uniforme



L'autobus in frenata si muove a velocità inferiore a  $50 \text{ km/h}$ , e il ragazzo, che continua a muoversi a  $50 \text{ km/h}$ , si avvicina al parabrezza anteriore. Non serve nessuna forza esterna per spiegare perché ciò accade, in quanto [il sistema di riferimento Terra è inerziale](#).

## IL PRINCIPIO DI RELATIVITA' GALILEIANO

Nella Seconda Giornata del *Dialogo sopra i Due Massimi Sistemi (1624-1630)*, Galileo Galilei descrive un esperimento da compiere all'interno di una nave.

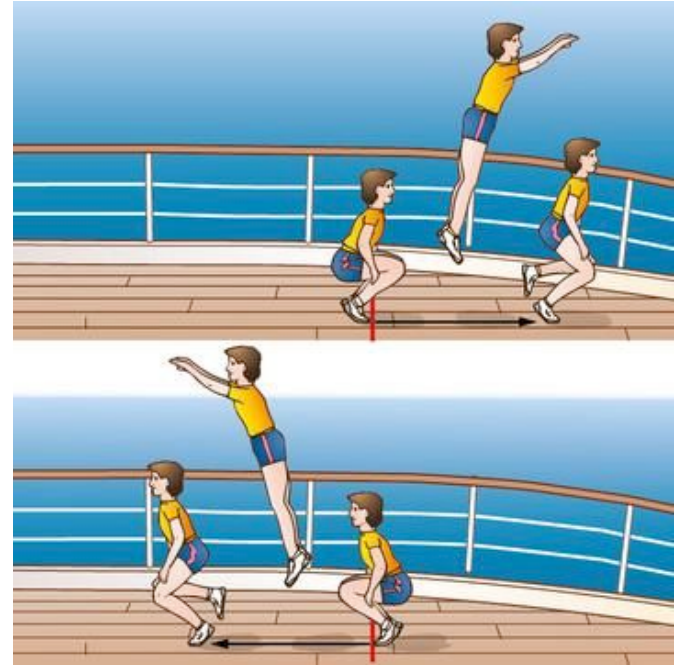
*Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti ...fate muover la nave con quanta si voglia velocità; ch  (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in l ) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, n  da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina o pure sta ferma.*

Cosa significa?

Quando la nave è ferma è un sistema di riferimento inerziale, quindi:



L'acqua che scende goccia a goccia da un secchiello entra nel collo di una bottiglia.



Saltando verso prua o verso poppa a piedi pari con la stessa forza, si supera la stessa distanza.

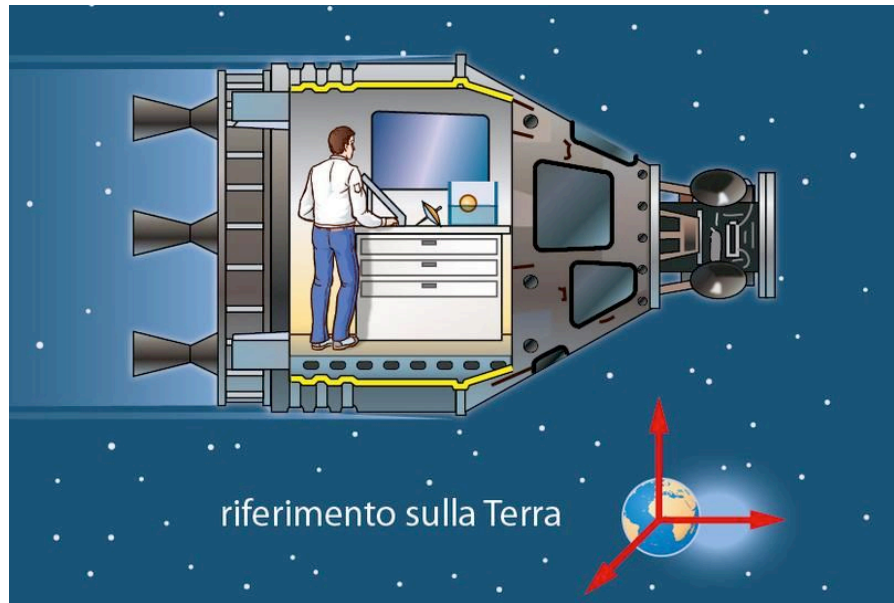
Cosa succede se la nave è in moto rettilineo uniforme (sistema di riferimento inerziale)? Ebbene, i fenomeni prima descritti avvengono nella stessa maniera.

Questa scoperta, dovuta a Galileo, è nota come:

### PRINCIPIO DI RELATIVITA' GALILEIANA

Le leggi della meccanica sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali, qualunque sia la velocità (costante) con cui essi si muovono gli uni rispetto agli altri.

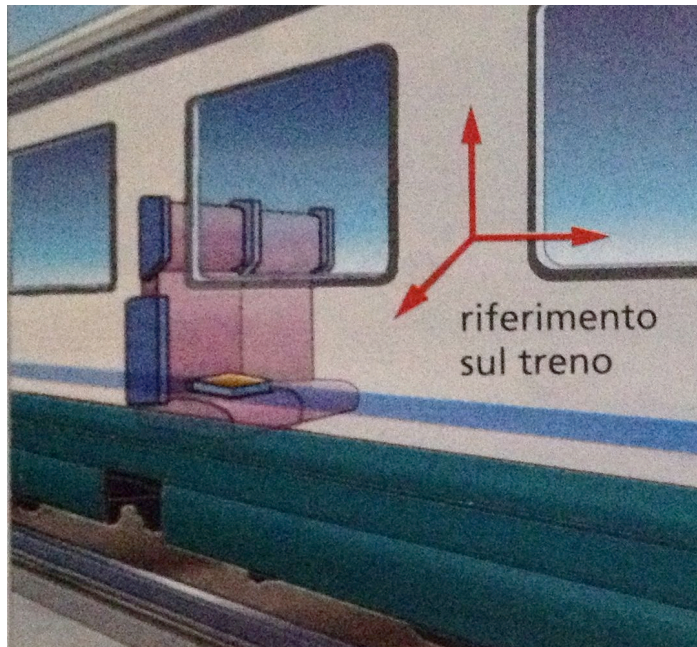
esempio



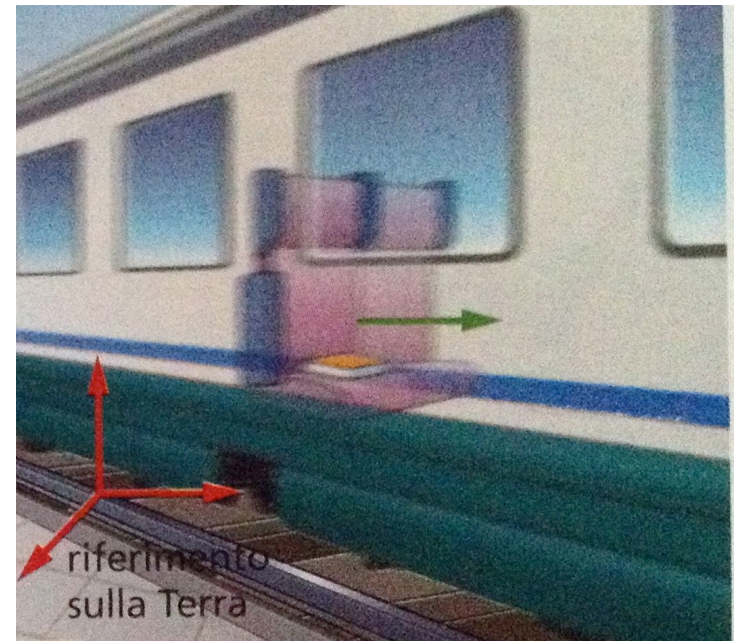
L'astronave è ferma o si muove a velocità costante?

In base al principio di relatività galileiana, nessun esperimento di meccanica compiuto al chiuso (cioè senza guardare fuori dal finestrino) ci può permettere di capire se siamo fermi in un sistema di riferimento inerziale, per esempio la Terra oppure se, rispetto a esso, ci stiamo muovendo a velocità costante.

Anche in tutti i sistemi di riferimento inerziali valgono le stesse leggi della meccanica, la descrizione del moto può essere diversa. Per esempio:

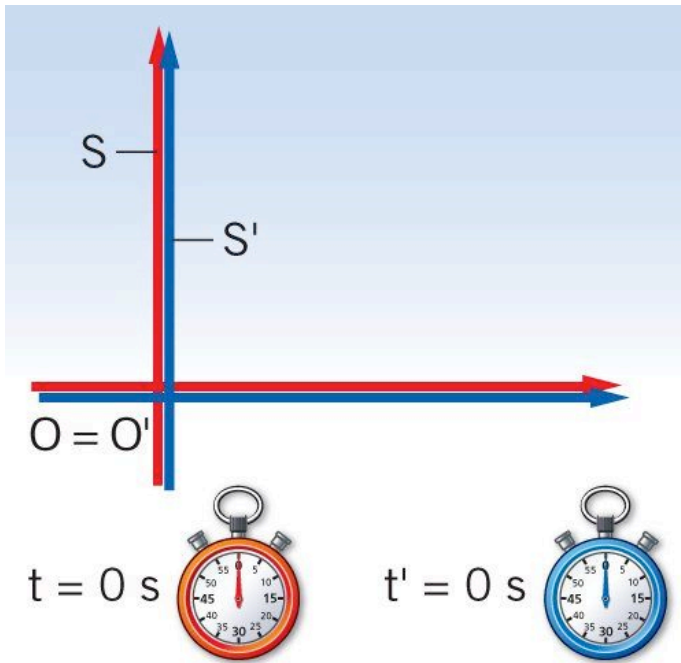


Nel sistema di riferimento inerziale del treno che si muove a velocità costante, il libro è fermo.



Nel sistema di riferimento inerziale dei binari, il libro si muove di moto rettilineo uniforme.

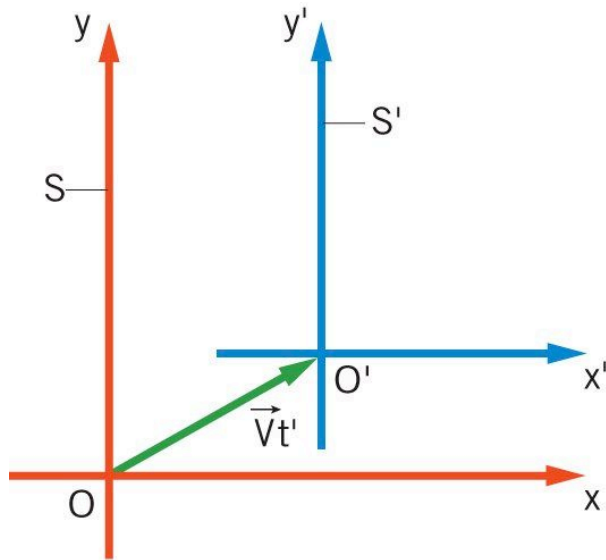
Vogliamo trovare delle leggi che permettano di descrivere quantitativamente il moto in un certo sistema di riferimento inerziale  $S'$ , se conosciamo le caratteristiche dello stesso moto in un altro sistema inerziale  $S$ .



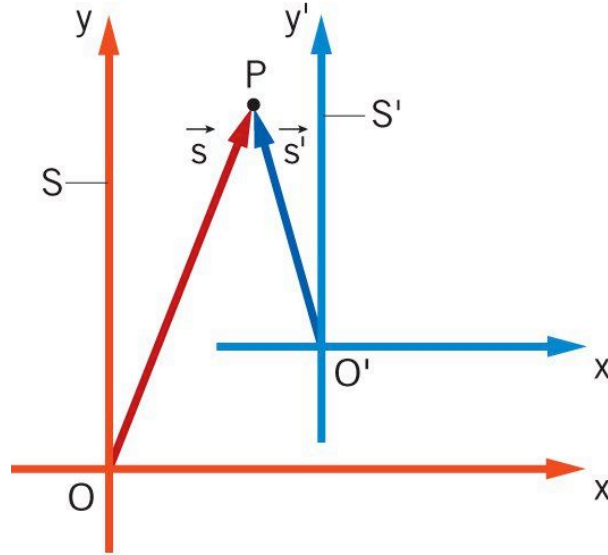
Per semplificare la trattazione, introduciamo due convenzioni:

1. i cronometri nei due sistemi di riferimento partono insieme; così gli istanti  $t=0\text{s}$  e  $t'=0\text{s}$  coincidono e tutti i valori successivi segnati dai due orologi sono identici:  $t=t'$ ;
2. all'istante  $t=t'=0\text{s}$  i due sistemi di riferimento  $S$  e  $S'$  coincidono e, in particolare, le loro origini  $O$  e  $O'$  occupano lo stesso punto.

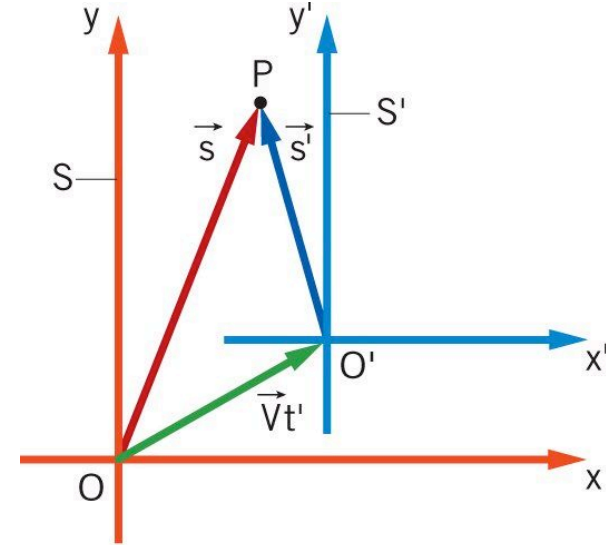
Il sistema di riferimento  $S'$  si muove con velocità costante  $\mathbf{V}$  rispetto a  $S$ .



All'istante  $t$ , la distanza tra l'origine  $O$  e l'altra origine  $O'$  è data dal vettore  $\mathbf{V}t = \mathbf{V}t'$ .

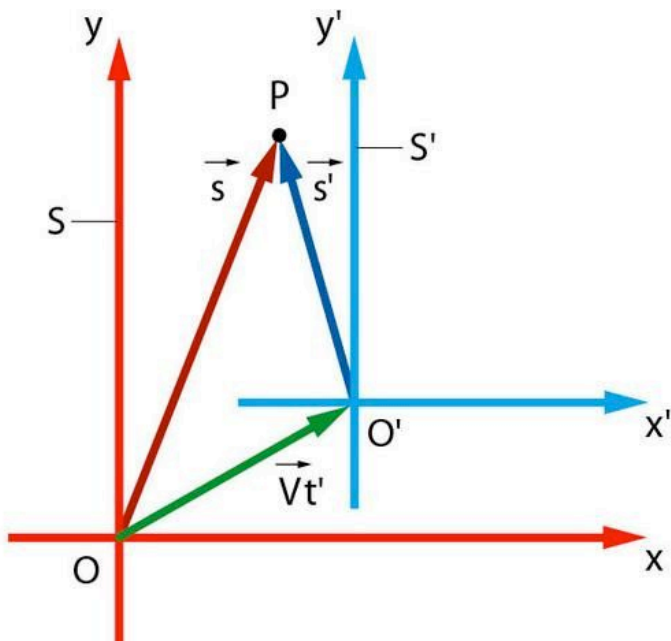


I vettori  $\mathbf{s}$  e  $\mathbf{s}'$  indicano la posizione del punto  $P$  nei sistemi di riferimento  $S$  e  $S'$ .



Si vede dal disegno che vale la relazione  $\mathbf{s} = \mathbf{s}' + \mathbf{V}t'$ .

Conoscendo le grandezze misurate in  $S'$  è possibile calcolare le corrispondenti grandezze di  $S$ , e viceversa, attraverso le seguenti relazioni:



### TRASFORMAZIONI DI GALILEO

$$\begin{cases} \vec{s} = \vec{s}' + \vec{V}t' \\ t = t' \end{cases} \quad \begin{cases} \vec{s}' = \vec{s} - \vec{V}t \\ t' = t \end{cases}$$

La relazione tra la velocità  $\mathbf{v}$  di un punto materiale misurata in  $S$  e la velocità  $\mathbf{v}'$  dello stesso oggetto misurata in  $S'$ , è:

### TRASFORMAZIONI DELLE VELOCITA'

La velocità  $\mathbf{v}$  di un oggetto rispetto ad  $S$  è data dalla velocità  $\mathbf{v}'$  dello stesso oggetto rispetto a  $S'$ , sommata con la velocità  $\mathbf{V}$  di  $S'$  rispetto a  $S$ :

$$\vec{\mathbf{v}} = \vec{\mathbf{v}}' + \vec{\mathbf{V}} \qquad \vec{\mathbf{v}}' = \vec{\mathbf{v}} - \vec{\mathbf{V}}$$

Relazione per le accelerazioni:

### TRASFORMAZIONI DELLE ACCELERAZIONI

Osservatori in diversi sistemi di riferimento inerziali, in moto relativo costante, misureranno la stessa accelerazione per il punto materiale in movimento:

$$\vec{\mathbf{a}} = \vec{\mathbf{a}}'$$

La relatività galileiana e le trasformazioni di Galileo costituiscono un modello fisico che ha un ambito di validità limitato a velocità abbastanza piccole rispetto a quella della luce nel vuoto.

Quando le velocità in gioco sono confrontabili con la velocità  $c$  della luce nel vuoto, il modello costituito dalla relatività galileiana e dalle trasformazioni di Galileo non è più in accordo con gli esperimenti e deve essere sostituito da un nuovo modello, dato dalla relatività ristretta di Einstein e dalle trasformazioni di Lorentz (che si studieranno al quinto anno).

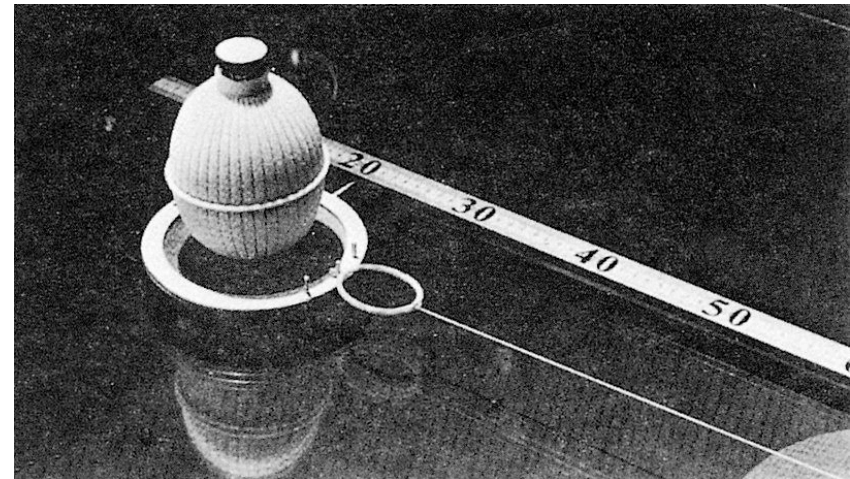
La fisica di Galileo e Newton ci consente di andare sulla Luna, ma serve Einstein per descrivere il comportamento delle particelle che si muovono a velocità prossime a quella della luce nei grandi acceleratori, per esempio al CERN di Ginevra.

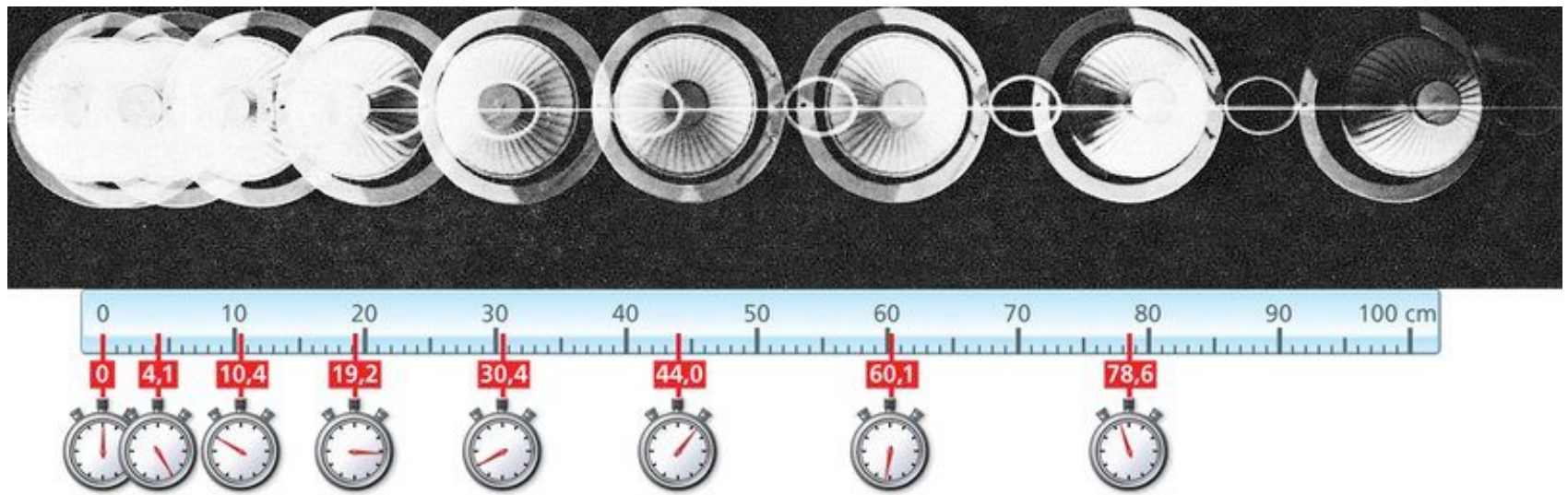
## IL SECONDO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

In un sistema inerziale una forza provoca una variazione di velocità e, quindi, un'accelerazione.

Vogliamo studiare la relazione quantitativa che lega forza e accelerazione.

**ESPERIMENTO** - Trasciniamo, per mezzo di un cordicella, collegata ad un dinamometro, un disco a ghiaccio secco (per ridurre l'attrito con la superficie). Faremo in modo che il dinamometro segni sempre lo stesso valore, ossia una forza costante con la quale il disco viene tirato.





Mentre trasciniamo il disco, fotografiamo la sua posizione a intervalli di tempo costanti, per esempio ogni  $0,42\text{s}$ . Dalla figura si osserva che, al trascorrere del tempo, il disco è sempre più veloce, in quanto percorre distanze maggiori in uguali intervalli di tempo.

Usando le definizioni di velocità e accelerazione, e leggendo sulle foto istantanee le posizioni occupate dal disco, otteniamo la seguente tabella:

## CINEMATICA DEL DISCO

|                        |   |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|
| t(s)                   | 0 | 0,42 | 0,84 | 1,26 | 1,68 | 2,10 | 2,52 | 2,94 |
| s(cm)                  | 0 | 4,1  | 10,4 | 19,2 | 30,4 | 44,0 | 60,1 | 78,6 |
| v (cm/s)               |   | 9,8  | 15   | 21   | 27   | 32   | 38   | 44   |
| a (cm/s <sup>2</sup> ) |   | 12   | 14   | 14   | 12   | 14   | 14   |      |

Nell'ultima riga si vede che, durante il moto del disco, la sua accelerazione si è mantenuta costante (a parte gli errori sperimentali). Ciò significa che il disco si è mosso di moto uniformemente accelerato. Abbiamo così ottenuto un primo risultato:

Un corpo su cui agisce una forza costante si muove  
con accelerazione costante

Cosa succede se al disco applichiamo una forza costante doppia di quella precedente?

Il disco si muoverà ancora con un moto uniformemente accelerato, e la nuova accelerazione risulterà essere esattamente il doppio di quella che abbiamo misurato prima. In modo analogo, se la forza fosse triplicata anche l'accelerazione risulterebbe tre volte più grande.

Conclusione:

L'accelerazione di un corpo è  
direttamente proporzionale alla forza  
che agisce su di esso

Ma come dipende l'accelerazione dalla massa del corpo?

Ripetendo l'esperimento con una massa doppia (due dischi), si osserva che l'accelerazione si riduce della metà.

Conclusione:

L'accelerazione è inversamente  
proporzionale alla massa del corpo su cui  
agisce la forza

Tutto ciò che abbiamo visto finora sulla relazione tra accelerazione, forza e massa può essere riassunto nel seguente:

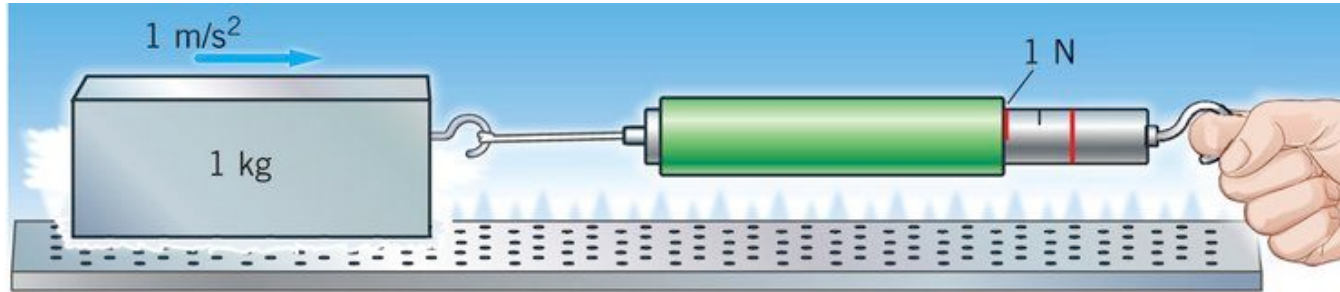
## SECONDO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

Forza ed accelerazione sono direttamente proporzionali:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

- Osservazione importante: La **F** nella formula del secondo principio rappresenta la forza totale che agisce sul corpo. **F** si ottiene come somma vettoriale delle diverse forze che agiscono contemporaneamente sullo stesso oggetto.
- Osservazione importante: Il secondo principio vale solo nei sistemi di riferimento inerziali e contiene come caso particolare il principio di inerzia. Infatti se la forza totale è zero (**F**=0), l'accelerazione è zero (**a**=0). Questo significa che in assenza di forze l'oggetto si muove a velocità costante: se è fermo, resta fermo, se si muove, il suo moto è rettilineo uniforme.

Nel Sistema Internazionale (S I), l'unità di misura della forza è il newton (N), così definito:



1 newton è il valore di una forza che,  
applicata a una massa di 1 kg, le imprime  
un'accelerazione pari a  $1 \text{ m/s}^2$ :

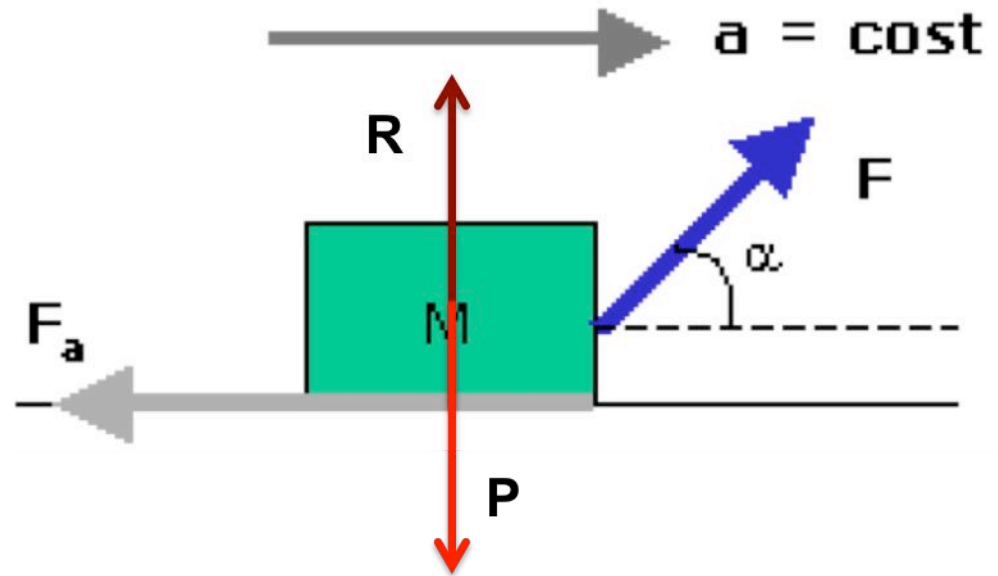
$$1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$$

## COME APPLICARE IL SECONDO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

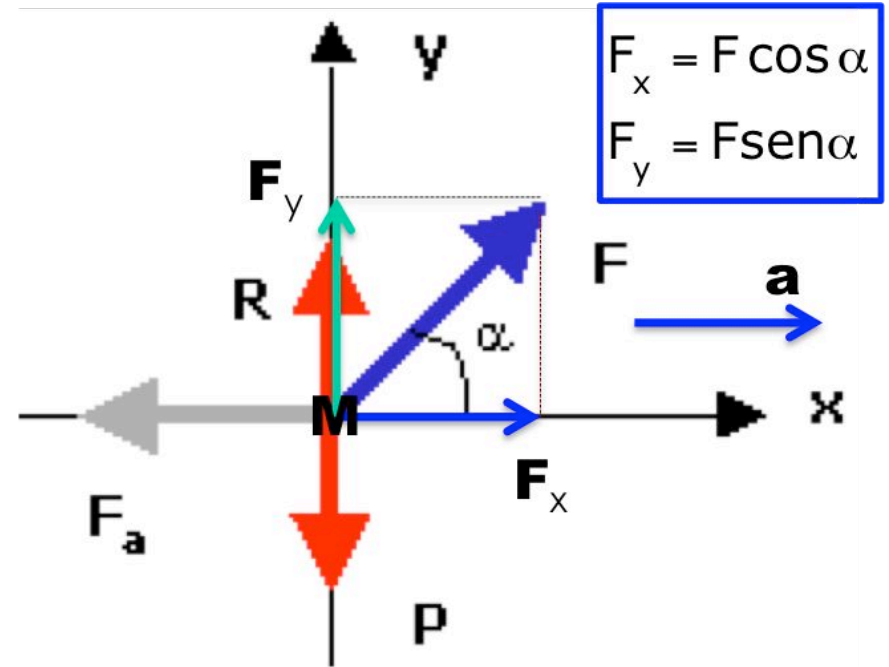
### ESEMPIO

Il coefficiente di attrito tra un corpo di massa  $M=20$  kg ed il pavimento è  $\mu=0,2$ . Calcolare l'accelerazione impressa al corpo da una forza di 100 N inclinata di  $60^\circ$  rispetto all'orizzontale, e la reazione vincolare.

1. **Rappresentazione del problema:** disegnare il corpo con tutte le forze che agiscono su di esso.



2. Costruire il diagramma delle forze: fissare un sistema di riferimento (sceglierlo il più semplice possibile), centrato nella massa e riportare su di esso le forze in gioco e le loro componenti.



3. Applicare il 2° principio della dinamica

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Poiché è in forma vettoriale, diventa:

$$\sum \vec{F} = M \cdot \vec{a} \Rightarrow \begin{cases} \sum \vec{F}_x = M\vec{a}_x \\ \sum \vec{F}_y = M\vec{a}_y \end{cases} \xrightarrow{\text{c'è accelerazione solo lungo x}} \begin{cases} F_x - F_a = Ma \\ R + F_y - P = 0 \end{cases}$$

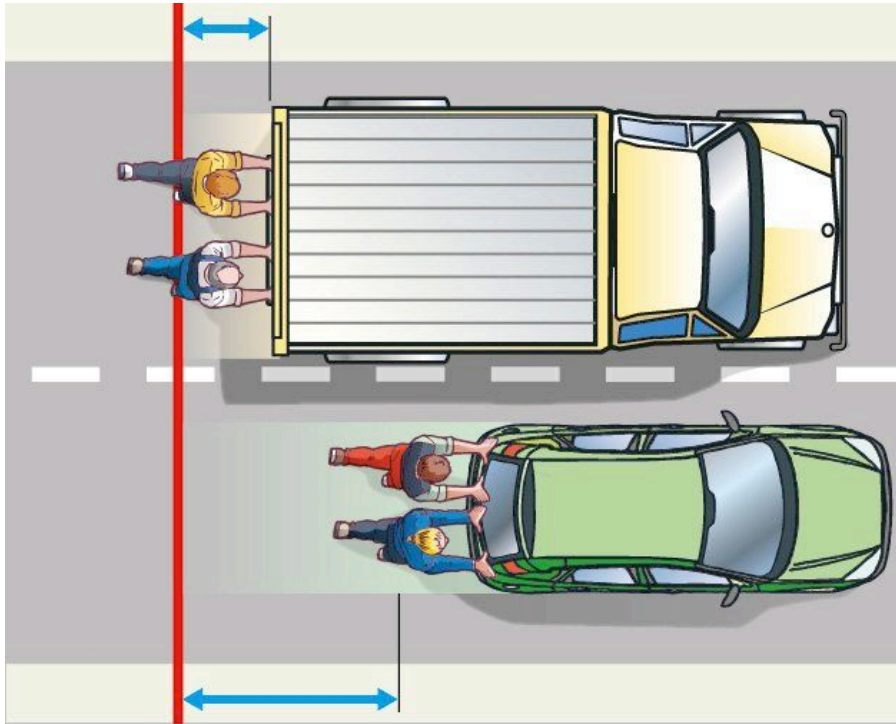
Il sistema così ottenuto contiene le due incognite del problema, l'accelerazione  $a$  e la reazione vincolare  $R$ . Risolto dà le seguenti soluzioni:

$$\begin{cases} F_x - F_a = Ma \\ R + F_y - P = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{soluzione}}$$

$$\begin{cases} a = \frac{F_x - F_a}{M} = \frac{F \cdot \cos \alpha - \mu \cdot R}{M} = \frac{100 \cdot \cos 60^\circ - 0,2 \cdot 109}{20} = 1,5 m / s^2 \\ R = P - F_y = Mg - F \cdot \sin \alpha = 20 \cdot 9,8 - 100 \cdot \sin 60^\circ = 109 N \end{cases}$$

A questo punto non ci resta che approfondire il concetto di massa.

Qualitativamente, la massa di un corpo è la quantità di materia di cui un corpo è fatto. **Ma cosa è precisamente la massa?**



Applichiamo una stessa forza su due oggetti con masse diverse (un'automobile e un camion). Cosa osserviamo? Che il camion si muove con un'accelerazione più piccola di quella dell'automobile in quanto ha una massa maggiore ( $m=F/a$ ).

Più grande è la massa, più un corpo resiste (cioè si oppone) a essere accelerato, cioè tanto maggiore è la forza che occorre applicargli per metterlo in moto con una data accelerazione.

Conclusione:

### definizione di massa inerziale

La massa di un oggetto misura la resistenza che esso oppone al tentativo di accelerarlo

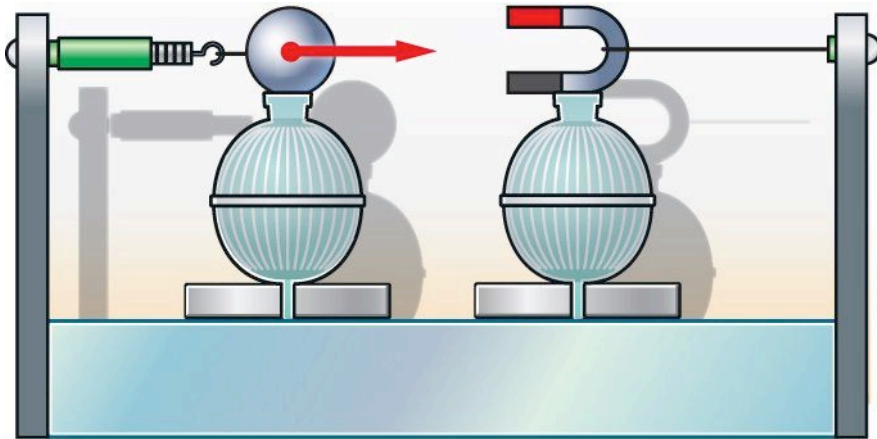
In sostanza la massa di un oggetto misura quanto è grande la sua inerzia, cioè la tendenza del corpo a muoversi sempre con la stessa velocità. È per questo che la denominazione completa di questa grandezza è **massa inerziale**.

## IL TERZO PRINCIPIO DELLA DINAMICA

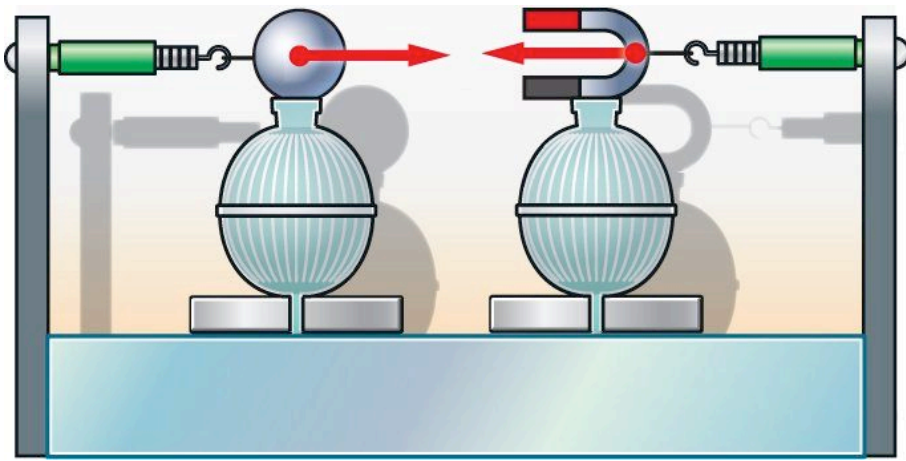
Ogni volta che un corpo subisce una forza c'è un altro corpo che sta esercitando tale forza. Quindi una forza non esiste mai da sola:

**Tutte le volte che un corpo A esercita una forza su un corpo B, anche il corpo B esercita una forza sul corpo A.**

Verifichiamo questa affermazione con un esperimento.



La calamita attira verso di sé la pallina di ferro; possiamo misurare la forza di attrazione che agisce sulla pallina mediante un dinamometro.



Però anche la pallina attira verso di sé la calamita. Un altro dinamometro permette di misurare questa seconda forza di attrazione.

Risultato: 1) il secondo dinamometro segna lo stesso valore che è indicato dal primo; 2) si dispone nella stessa direzione in cui si trova il primo; 3) ha verso opposto a quello del primo dinamometro.

Questo esperimento illustra una legge generale, la cosiddetta **legge di azione e reazione**:

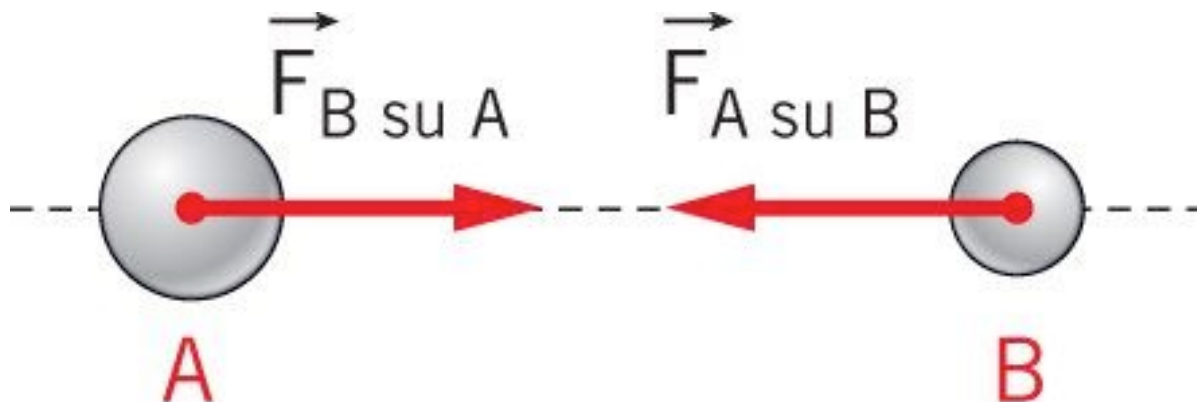
## TERZO PRINCIPIO DELLA DINAMICA O PRINCIPIO DI AZIONE E REAZIONE

Quando un oggetto A esercita una forza su un oggetto B, anche B esercita una forza su A; le due forze hanno la stessa direzione e lo stesso modulo, ma versi opposti.

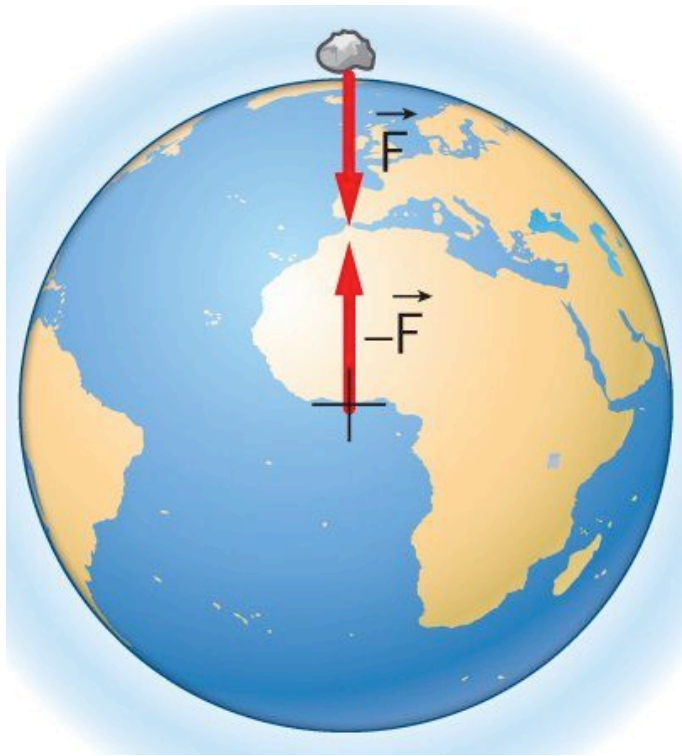
$$\vec{F}_{A \rightarrow B} = -\vec{F}_{B \rightarrow A}$$

forza di A su B (N) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ forza di B su A (N)

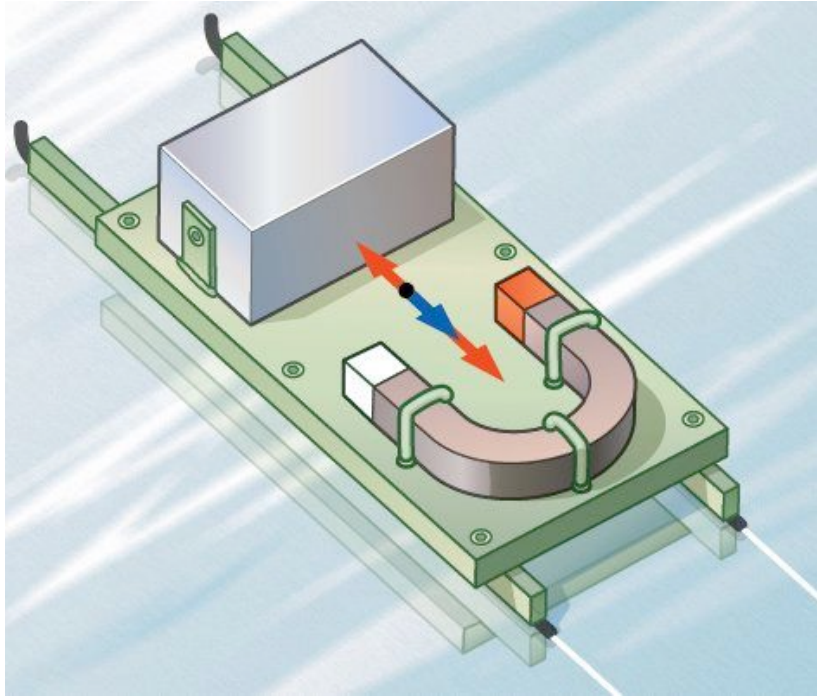


Le forze di azione e reazione, pur essendo uguali in direzione e modulo e opposte in verso, non si eliminano a vicenda perché sono applicate sempre su oggetti diversi.



Osservare bene: la Terra esercita sul sasso una forza di attrazione gravitazionale verso il basso (azione), mentre il sasso esercita sulla Terra una forza dello stesso valore verso l'alto (reazione).

Pertanto: è il sasso a cadere e subire l'accelerazione  $g$  in quanto (per il 2° principio) ha massa minore.



Fissiamo su una slitta un blocco di ferro ed una calamita. Se il terzo principio fosse falso, la calamita potrebbe attrarre il blocco con una forza maggiore di quella con cui il blocco attrae la calamita. Come risultato, sulla slitta agirebbe una forza risultante diversa da zero, capace di farla muovere senza consumare carburante.

Invece sulla slitta, per il terzo principio, agiscono due forze uguali ed opposte che si annullano, e quindi il corpo rimane fermo.

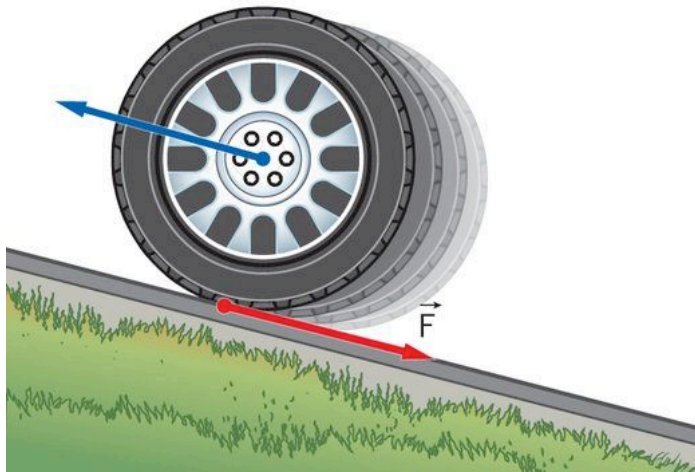
Vediamo alcuni esempi in cui entra in gioco il terzo principio:



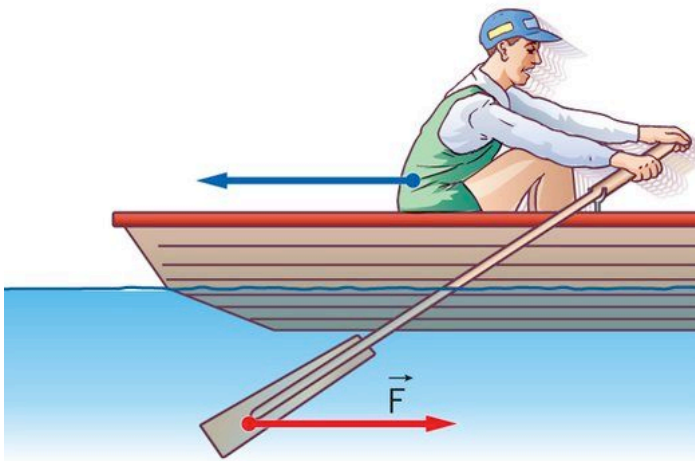
Quando camminiamo  
spingiamo indietro il  
terreno.



Il suolo ci spinge in  
avanti con una forza,  
uguale e opposta.

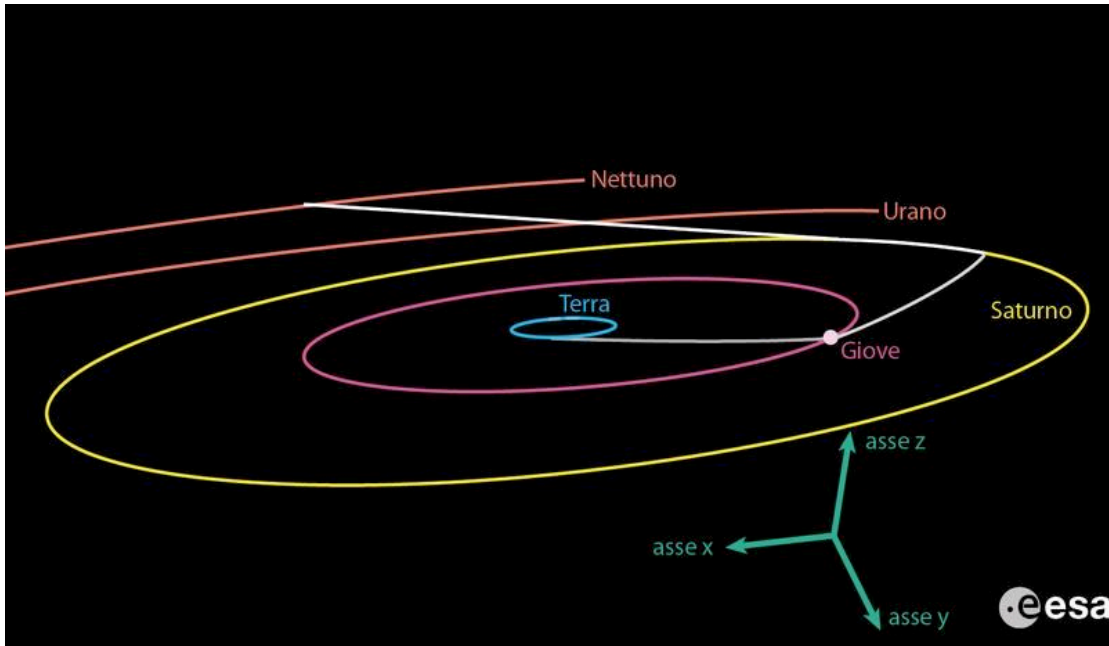


La ruota dell'automobile spinge indietro il terreno per essere spinta in avanti



Con i remi spingiamo indietro l'acqua per spingere in avanti la barca.

# VERIFICA SPERIMENTALE DEI PRINCIPI DELLA DINAMICA



La sonda Voyager 2 fu lanciata da Cape Canaveral sabato 20 agosto 1977. Il suo scopo era quello di studiare i pianeti esterni del Sistema Solare.

- Il 9 luglio 1979 raggiunse la minima distanza da Giove.
- Il 26 agosto 1981 giunse alla minima distanza da Saturno
- Il 24 gennaio 1986 giunse alla minima distanza da Urano
- Il 25 agosto 1989 giunse alla minima distanza da Nettuno

L'enorme successo della sonda Voyager 2 è dovuto al grande accordo tra le previsioni degli scienziati e la traiettoria seguita dalla sonda. I principi della dinamica sono stati utilizzati per prevedere le orbite dei pianeti e dei loro satelliti e per controllare il comportamento della sonda.

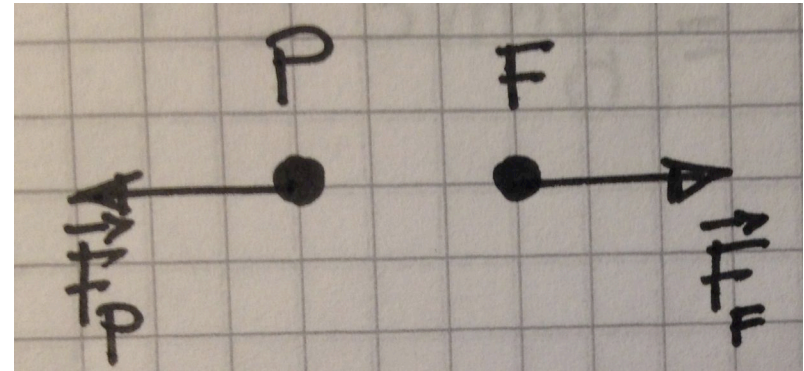
Le spinte del razzo di partenza e quelle dei piccoli razzi di navigazione (la sonda ne ha sedici) sono stati calibrati in modo che le accelerazioni subite dalla sonda fossero esattamente quelle che servivano per mantenerla sulla traiettoria calcolata.

Lo stesso è vero per tutte le sonde analoghe (Voyager 1 lanciata il 5 settembre 1977, la sonda Cassini lanciata il 15 ottobre 1997, la sonda New Horizons lanciata il 19 gennaio 2006, ecc.).

**ESEMPIO**

Un padre  $m_1=71$  kg e il figlio  $m_2=19$  kg si spingono a vicenda.  
Sapendo che l'accelerazione di  $m_2$  è  $2,6 \text{ m/s}^2$ , determinare quella di  $m_1$ .

TERZO PRINCIPIO DELLA DINAMICA: il modulo della forza che agisce sul bambino è uguale a quello della forza che agisce sul padre; il verso delle due forze è opposto.



SECONDO PRINCIPIO DELLA DINAMICA: l'accelerazione del bambino è maggiore, essendo la sua massa minore di quella del padre:

$$F_P = F_F \Rightarrow m_P a_P = m_F a_F \rightarrow a_P = \frac{m_F}{m_P} \cdot a_F = \frac{19}{71} \cdot 2,6 = 0,70 \text{ m/s}^2$$