

# LA MECCANICA CLASSICA



## Cinematica

Studia il movimento dei corpi

(cioè *come* essi si muovono)

- Cinematica 1D: moto di caduta libera
- Cinematica 2D: vettori e moto di un proiettile
- Cinematica del moto circolare uniforme

## Dinamica

Studia le cause del movimento dei corpi (cioè *perchè* essi si muovono)

## Statica

Si occupa delle condizioni di equilibrio dei corpi (è un caso particolare della Dinamica)

# Dalla Cinematica alla Dinamica...



Già **Aristotele**, intorno al 350 a.C., osservando i fenomeni del mondo intorno a lui, si era reso conto che per **mettere in moto** un oggetto a riposo, ossia per **accelerarlo** da velocità zero a velocità non nulla, occorreva applicare un qualche tipo di forza. E tale forza sembrava necessaria anche per **mantenere l'oggetto in moto** a velocità costante, oltre che per fargli cambiare velocità, in modulo, direzione o verso.

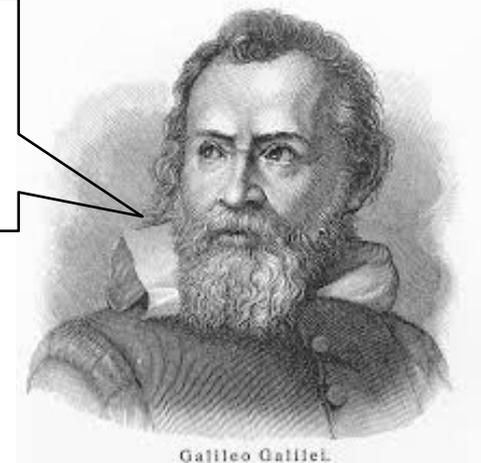
Da queste osservazioni il buon Aristotele si era dunque legittimamente convinto che:

- (1) *Lo stato naturale di un corpo è la quiete;*
- (2) *Serve una forza per mantenere in moto il corpo;*
- (3) *Più grande è la forza esercitata sul corpo, maggiore sarà la sua velocità.*



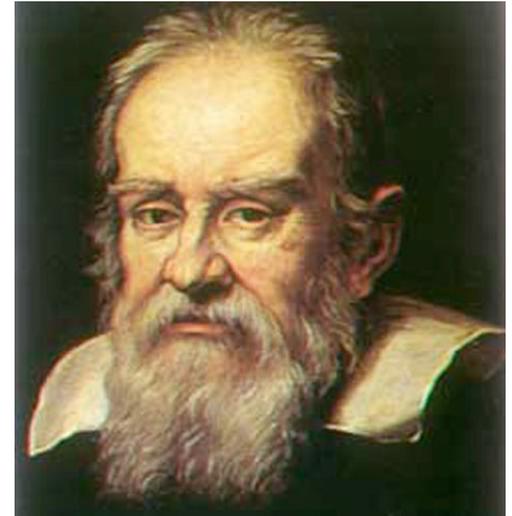
**Belin!  
Ma perché?  
Cosa c'è di  
sbagliato in  
queste  
affermazioni?**

**Tutto!**



Ben 2000 anni dopo Aristotele, **Galileo** mise in discussione le intuizioni del grande filosofo greco affermando, innanzitutto, che, **per un corpo, trovarsi in moto rettilineo con velocità costante è altrettanto naturale quanto essere fermo!**

Galileo arrivò a questa conclusione assolutamente **controintuitiva** applicando il metodo scientifico da lui introdotto e osservando il **moto di oggetti lungo un piano orizzontale**, ad esempio un libro che viene spinto sulla superficie ruvida di un tavolo. Ovviamente per mantenere in moto il libro occorre applicare una certa **forza**, ma è chiaro che l'entità della forza applicata dipende dal grado di ruvidità del tavolo, cioè dalla **forza di attrito** che si oppone al moto.



**Galileo Galilei**  
(1564-1642)



Immaginando di **ridurre progressivamente l'attrito**, è chiaro che sarà necessaria una forza sempre minore per mantenere in moto l'oggetto. A un certo punto, e questa fu **l'intuizione fondamentale di Galileo**, quando avremo idealmente annullato l'attrito ed eliminato così ogni resistenza al moto, **l'oggetto si muoverà lungo il tavolo seguendo una traiettoria rettilinea e mantenendo la sua velocità costante, senza bisogno che ad esso sia applicata alcuna forza!**

# Il Principio di Inerzia

E' questo è appunto quanto afferma l'enunciato del celebre *Principio di Inerzia* galileiano: **ogni corpo tende a mantenere il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme finchè non intervenga una qualche forza esterna a modificare tale stato.**

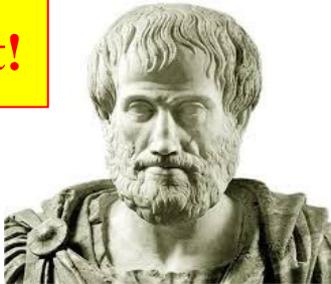


Immaginando di **ridurre progressivamente l'attrito**, è chiaro che sarà necessaria una forza sempre minore per mantenere in moto l'oggetto. A un certo punto, e questa fu **l'intuizione fondamentale di Galileo**, quando avremo idealmente annullato l'attrito ed eliminato così ogni resistenza al moto, **l'oggetto si muoverà lungo il tavolo seguendo una traiettoria rettilinea e mantenendo la sua velocità costante, senza bisogno che ad esso sia applicata alcuna forza!**

# Il Principio di Inerzia

E' questo è appunto quanto afferma l'enunciato del celebre *Principio di Inerzia* galileiano: **ogni corpo tende a mantenere il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme finchè non intervenga una qualche forza esterna a modificare tale stato.**

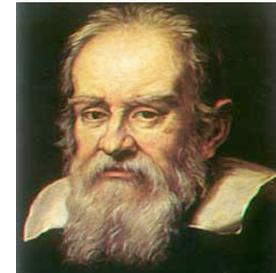
**Ipse dixit!**



Aristotele

VS

Galileo



**Metodo scientifico**

1) «Per mettere in moto un oggetto a riposo, ossia per accelerarlo da velocità zero a velocità non nulla, occorre applicare una forza»

2) «L'applicazione di una forza è necessaria anche per mantenere l'oggetto in moto rettilineo a velocità costante»

3) «Maggiore è la forza esercitata su un corpo, maggiore sarà la sua velocità»

1) «VERO: per mettere in moto un oggetto a riposo, ossia per accelerarlo, occorre applicare una forza»

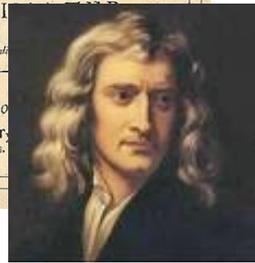
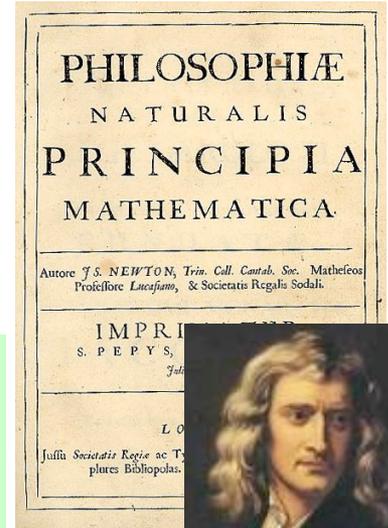
2) «FALSO: non serve una forza per mantenere un oggetto in moto a velocità costante; il moto rettilineo uniforme tende a mantenersi per inerzia»

3) «FALSO: vedremo che maggiore è la forza esercitata su un corpo, maggiore sarà la sua accelerazione»

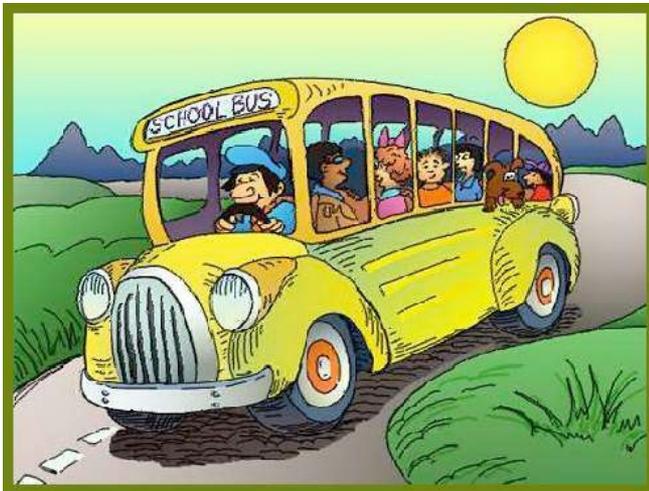
# La Prima Legge della Dinamica

Isaac Newton riconobbe subito l'importanza del concetto di **inerzia**, cioè della *tendenza di un corpo a mantenere il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme*, tanto che nei suoi famosi “**Principia Mathematica**” (1687), opera che per trecento anni costituì la base della Meccanica classica, promosse il principio di inerzia a **Prima Legge della Dinamica**.

L'enunciato originale della prima legge di Newton (o *Principio di Inerzia*) è quindi: ***Ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme fino a quando non agisca su di esso una forza risultante diversa da zero.***



**Isaac Newton**  
(1642-1727)



## Esempio concettuale

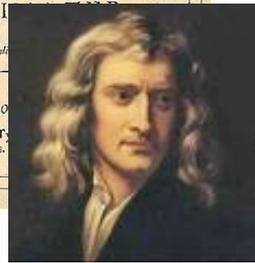
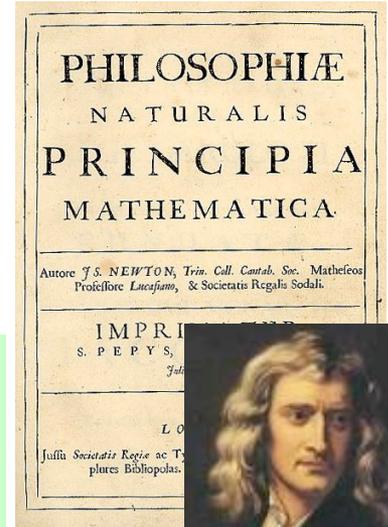
Uno scuolabus fa una brusca frenata e tutti gli zaini appoggiati sul pavimento scivolano in avanti. Quale forza produce questo movimento?

Nessuna! Non è una forza a causare lo slittamento ma **l'inerzia degli zaini**, che tendono a mantenere la velocità (vettoriale, quindi direzione compresa) che avevano prima della frenata!

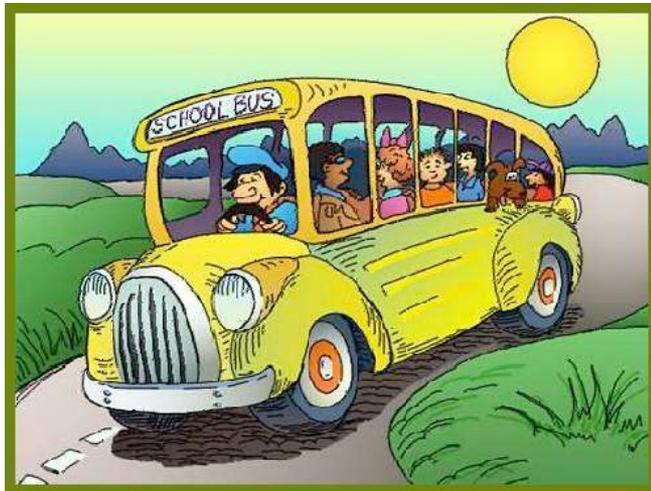
# La Prima Legge della Dinamica

Isaac Newton riconobbe subito l'importanza del concetto di **inerzia**, cioè della *tendenza di un corpo a mantenere il suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme*, tanto che nei suoi famosi “**Principia Mathematica**” (1687), opera che per trecento anni costituì la base della Meccanica classica, promosse il principio di inerzia a **Prima Legge della Dinamica**.

L'enunciato originale della prima legge di Newton (o *Principio di Inerzia*) è quindi: ***Ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme fino a quando non agisca su di esso una forza risultante diversa da zero.***



Isaac Newton  
(1642-1727)



## Esempio concettuale

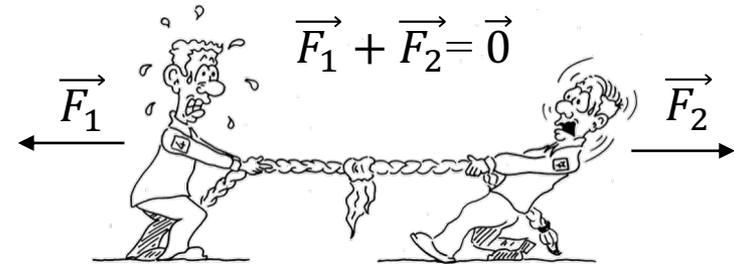
Uno scuolabus fa una brusca frenata e tutti gli zaini appoggiati sul pavimento scivolano in avanti. Quale forza produce questo movimento?

Nessuna! Non è una forza a causare lo slittamento ma l'**inerzia degli zaini**, che tendono a mantenere la velocità (vettoriale, quindi direzione compresa) che avevano prima della frenata!

# La Prima Legge della Dinamica

Dall'enunciato della prima legge di Newton si deduce che **la forza è una grandezza vettoriale**, quindi le forze si sommano tra loro con le regole della **somma vettoriale** (metodo coda-punta o del parallelogramma, metodo delle componenti). Dunque, per sapere quale sia la forza effettiva che agisce su un corpo, cioè la cosiddetta **forza netta**, occorre calcolare la **risultante** vettoriale di tutte le forze in gioco (**principio di sovrapposizione delle forze**): 
$$\vec{F}_{net} = \sum_i \vec{F}_i$$

La prima legge della dinamica si può quindi enunciare anche così: **Quando la forza netta agente su un corpo è nulla, la velocità del corpo non può cambiare, ossia il corpo non può accelerare.**



Nell'**esempio** del libro che viene spinto lungo un tavolo ruvido, se esso si muove a **velocità costante**, evidentemente la **somma** del vettore della forza applicata al libro (diretto verso sinistra) e del vettore della forza d'attrito (diretto verso destra e anch'esso applicato al libro) **deve essere zero**: se infatti le due forze avessero un **vettore risultante** diverso da zero (cioè se i due vettori non fossero uguali ed opposti e dunque la forza netta fosse non nulla), il libro subirebbe necessariamente un'**accelerazione**! Dunque, se il libro si muove di moto rettilineo uniforme, la forza applicata non serve a far muovere il libro ma solo ad annullare la forza di attrito. **Ma allora chi fa muovere il libro? Nessuno: diciamo che si muove «per inerzia»!**

# **Il principio d'inerzia**

# Sistemi di riferimento inerziali

I sistemi di riferimento in **moto rettilineo uniforme** gli uni rispetto agli altri si chiamano **sistemi di riferimento inerziali**: in essi è valida la prima legge di Newton, cioè appunto il principio di inerzia, e *non è possibile effettuare esperimenti in grado di rivelare il loro stato di quiete o di moto.*



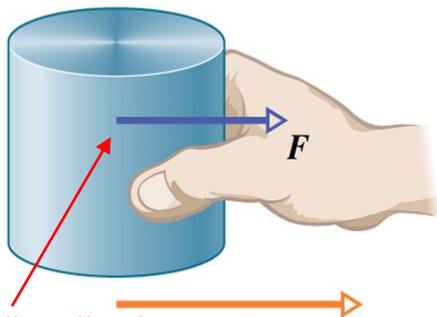
Viceversa, i sistemi di riferimento in cui il principio di inerzia non è valido sono detti “**non inerziali**”, e sono ad esempio sistemi di riferimento in **moto accelerato** o in **rotazione**. Questi sistemi, come vedremo, sono caratterizzati dalla presenza, al loro interno, di **forze apparenti** dovute proprio alla loro «non inerzialità».

Spesso, per scopi pratici, si suppone che un sistema di riferimento solidale alla **Terra** sia un **sistema di riferimento inerziale**: ovviamente questo non è rigorosamente vero perchè la Terra è in rotazione, ma costituisce comunque una approssimazione abbastanza buona nella maggior parte delle applicazioni...



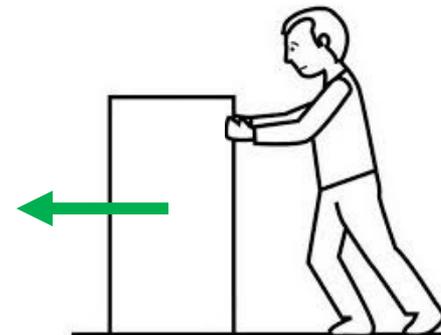
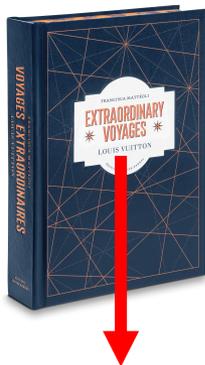
# Forza e accelerazione

Riassumendo, dalla prima legge della dinamica abbiamo dunque appreso che **la forza non è la causa del movimento**, come si potrebbe intuitivamente pensare e come in effetti l'umanità intera ha pensato per migliaia di anni influenzata dal pensiero di Aristotele. Come si deduce dal principio di inerzia galileiano, e come vedremo meglio tra poco con la seconda legge della dinamica, **la forza causa invece una VARIAZIONE del movimento**. In altre parole, *una forza che agisce su un corpo deve necessariamente modificare la sua velocità*, in modulo, direzione o verso, cioè deve necessariamente **produrre un'accelerazione**.



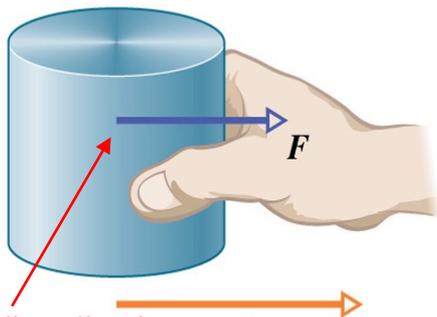
Abbiamo poi anche capito che, proprio come l'accelerazione, anche **la forza è una grandezza vettoriale**, dotata di modulo, direzione e verso, e possiamo quindi rappresentarla con una freccia la cui direzione e verso saranno quelle della spinta o della trazione esercitata e la cui lunghezza sarà proporzionale al modulo della forza stessa.

**Per le forze è molto importante anche il punto di applicazione (coda del vettore) che, se non diversamente specificato, coincide col baricentro del corpo a cui la forza è applicata.**



# Forza e accelerazione

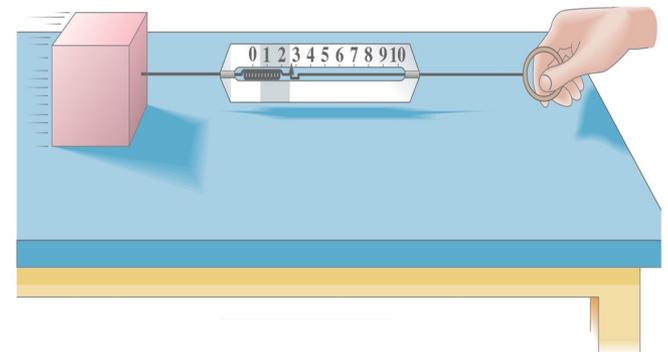
Riassumendo, dalla prima legge della dinamica abbiamo dunque appreso che **la forza non è la causa del movimento**, come si potrebbe intuitivamente pensare e come in effetti l'umanità intera ha pensato per migliaia di anni influenzata dal pensiero di Aristotele. Come si deduce dal principio di inerzia galileiano, e come vedremo meglio tra poco con la seconda legge della dinamica, **la forza causa invece una VARIAZIONE del movimento**. In altre parole, *una forza che agisce su un corpo deve necessariamente modificare la sua velocità*, in modulo, direzione o verso, cioè deve necessariamente **produrre un'accelerazione**.



Abbiamo poi anche capito che, proprio come l'accelerazione, anche **la forza è una grandezza vettoriale**, dotata di modulo, direzione e verso, e possiamo quindi rappresentarla con una freccia la cui direzione e verso saranno quelle della spinta o della trazione esercitata e la cui lunghezza sarà proporzionale al modulo della forza stessa.

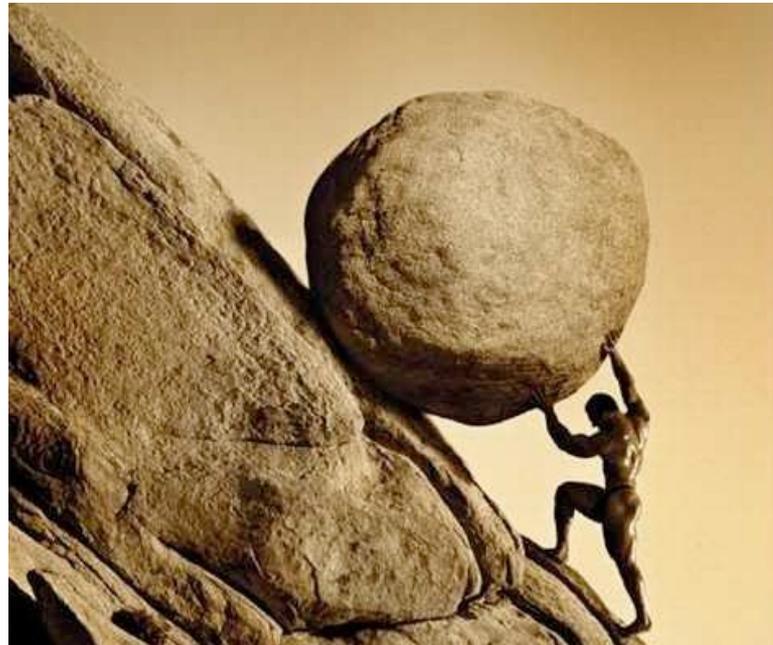
**Per le forze è molto importante anche il punto di applicazione (coda del vettore) che, se non diversamente specificato, coincide col baricentro del corpo a cui la forza è applicata.**

Un modo per misurare il **modulo** (o l'intensità) di una forza è, ad esempio, quello di utilizzare un **dinamometro**: si tratta di un oggetto dotato di una molla e di una scala graduata che, una volta calibrato, è in grado di quantificare la trazione esercitata su un dato oggetto oppure, **se si tratta della forza di gravità, di misurare il peso dell'oggetto stesso...**



# Massa e Inerzia

Per comprendere qual è la relazione precisa tra forza e accelerazione ci serve a questo punto introdurre una nuova grandezza fisica fondamentale, già abbondantemente evocata: **la massa**. Già sappiamo che **l'unità di misura della massa nel SI è il Kg**. Di solito il termine “massa” viene usato come sinonimo di “quantità di materia”, ma quest'ultima – come sappiamo – è una grandezza fisica che ha come unità di misura nel SI la Mole. Quindi è più corretto **definire la massa di un corpo come una misura della sua inerzia**, cioè una misura della **resistenza** che il corpo oppone al tentativo di modificarne il moto: *maggiore è la massa di un corpo, maggiore sarà la sua inerzia, e minore sarà la variazione di velocità (accelerazione) prodotta da una forza applicata a quel corpo*. Questo, come vedremo tra un attimo, è uno dei modi di descrivere la **seconda legge della dinamica** che, appunto, esprime la relazione matematica tra forza, massa e accelerazione...



# La Seconda Legge della Dinamica

La forza netta agente su un corpo è uguale al prodotto della sua massa  $m$  per l'accelerazione  $\vec{a}$  assunta dal corpo:

$$\vec{F}_{net} = \sum_i \vec{F}_i = m\vec{a} \quad (1)$$

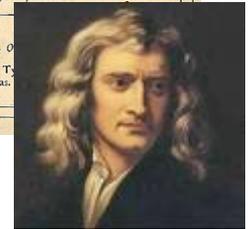
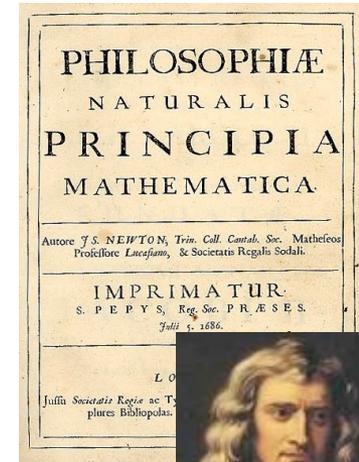
## Osservazioni:

1) L'equazione della **seconda legge della dinamica di Newton** può essere utilmente riscritta in modo da mettere in evidenza la **relazione di causa-effetto** tra la forza netta applicata ad un corpo di massa  $m$  e l'accelerazione prodotta, sottolineando nel contempo anche il ruolo della massa come misura dell'inerzia (per questo si parla anche di «**massa inerziale**»)

Infatti possiamo enunciare la seconda legge anche dicendo che:

**L'accelerazione prodotta dall'azione di una forza netta diversa da zero applicata ad un dato corpo è sempre direttamente proporzionale alla forza e inversamente proporzionale alla massa (inerziale) del corpo:**

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m}$$



## **La massa inerziale**

# Unità di misura della forza

Dall'**analisi dimensionale** della seconda legge della dinamica ricaviamo che la forza è una grandezza derivata e che l'unità di misura della sua intensità, nel SI (detto anche **MKS**), deve essere:

$$[F] = [m][a] = kg \cdot m / s^2$$

Data però l'importanza della forza come grandezza fisica, la sua unità di misura è stata battezzata con un nome proprio: il **Newton (N)**.

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

Un **Newton** corrisponde quindi alla forza richiesta per imprimere alla massa di 1kg un'accelerazione di 1 m/s<sup>2</sup>.

Nel **Sistema CGS**, un sistema alternativo al sistema internazionale e così chiamato perchè al posto di *metri, kilogrammi e secondi* si utilizzano (come unità di misura principali per spazio, massa e tempo) *centimetri, grammi e secondi*, l'unità di misura della forza è la **dyna**, definita come la forza necessaria ad imprimere ad una massa di 1g una accelerazione di 1cm/s<sup>2</sup>:

$$1dyna = 1g \cdot 1cm / s^2$$

Ovviamente nei problemi occorre **scegliere un unico sistema di unità di misura in cui lavorare**, convertendo eventualmente le unità di misura le une nelle altre. Ad esempio, se sappiamo che una forza di 2.0N è applicata lungo l'asse *x* a un oggetto di massa 500g, avremo:

$$a_x = \frac{2.0N}{0.50kg} = \frac{2.0kg \cdot m / s^2}{0.50kg} = 4.0m / s^2 \quad \text{Componente } x \text{ del vettore accelerazione}$$

# La Seconda Legge della Dinamica

La forza netta agente su un corpo è uguale al prodotto della sua massa  $m$  per l'accelerazione  $\vec{a}$  assunta dal corpo:

$$\vec{F}_{net} = \sum_i \vec{F}_i = m\vec{a} \quad (1)$$

**Osservazioni:**

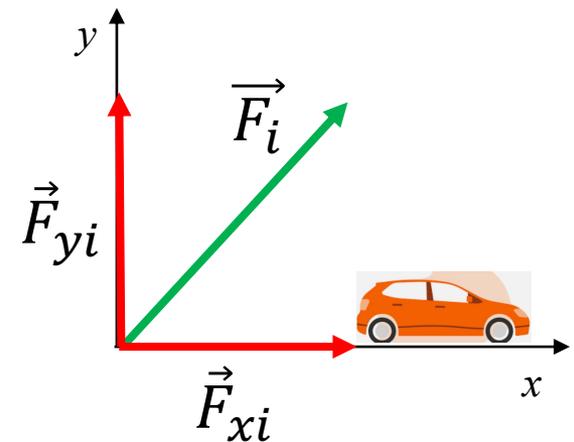
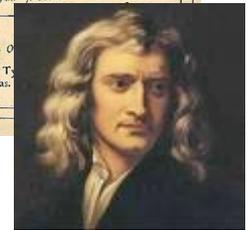
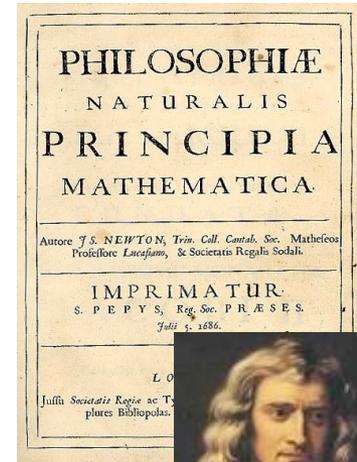
2) Come abbiamo già detto, l'equazione (1) è **un'equazione vettoriale**. Se ad esempio lavoriamo in un sistema di riferimento bidimensionale, essa può essere scomposta in **due equazioni scalari**, una per ogni componente in coordinate cartesiane:

**Somme delle componenti  $x$  delle forze applicate**

$$\sum_i F_{xi} = ma_x \longrightarrow a_x = \frac{\sum_i F_{xi}}{m}$$

**Somme delle componenti  $y$  delle forze applicate**

$$\sum_i F_{yi} = ma_y \longrightarrow a_y = \frac{\sum_i F_{yi}}{m}$$





### Esercizio

Quale è la forza netta (evidentemente fornita dai freni) necessaria per fermare, su una distanza di 55m, un'automobile di massa 1500kg che viaggia ad una velocità di 100km/h?

### Suggerimento

Utilizzare l'equazione (1), notando che in questo caso essa si riduce ad una sola *equazione scalare*, essendo il moto unidimensionale lungo l'asse  $x$ .

$$\vec{F}_{net} = \sum_i \vec{F}_i = m\vec{a} \quad (1) \quad \rightarrow \quad F_x = ma_x$$

...ma ci manca l'accelerazione  $a_x$



### Esercizio

Quale è la forza netta (evidentemente fornita dai freni) necessaria per fermare, su una distanza di 55m, un'automobile di massa 1500kg che viaggia ad una velocità di 100km/h?

### Suggerimento

Utilizzare l'equazione (1), notando che in questo caso essa si riduce ad una sola *equazione scalare*, essendo il moto unidimensionale lungo l'asse  $x$ .

Per usare la **seconda legge della dinamica** dobbiamo prima calcolare la decelerazione dell'automobile, di cui conosciamo solo la massa  $m$ . Supponendo che tale accelerazione sia costante possiamo utilizzare una delle *equazioni cinematiche del moto unidimensionale uniformemente accelerato* (più precisamente la terza), sapendo che la velocità iniziale è  $v_0 = 100 \text{ km/h} = 28 \text{ m/s}$ , che quella finale è  $v = 0$  e che la distanza percorsa è  $x - x_0 = 55 \text{ m}$  :

$$v^2 = v_0^2 + 2a_x(x - x_0) \rightarrow a_x = \frac{v^2 - v_0^2}{2(x - x_0)} = \frac{0 - (28 \text{ m/s})^2}{2(55 \text{ m})} = -7.1 \text{ m/s}^2$$

da cui la forza netta risultante sarà:

$$\vec{F}_{net} = m\vec{a} \rightarrow F_x = ma_x = (1500 \text{ kg})(-7.1 \text{ m/s}^2) = -1.1 \cdot 10^4 \text{ N}$$

dove il segno meno indica che la forza deve essere esercitata (come è evidente) in *direzione opposta* a quella della velocità iniziale.