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, oltre che per fargli cambiare velocità, anche per **mantenere l'oggetto in moto** a velocità costante, perché in assenza di tale forza esso inevitabilmente si fermava.

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

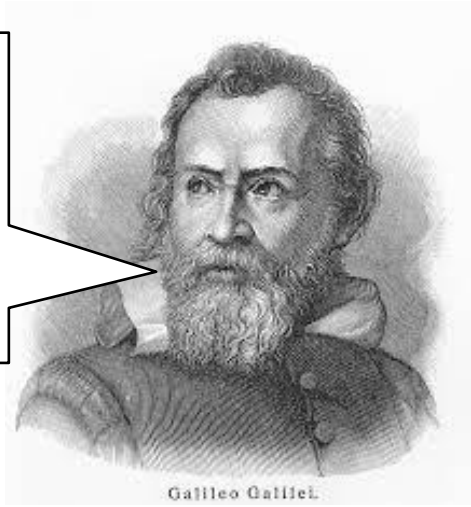
*(1) **Lo stato naturale di un corpo è la quiete**;*
*(2) **Serve una forza per mantenere in moto il corpo;***
*(3) **Più grande è la forza esercitata sul corpo, maggiore sarà la sua velocità**.*



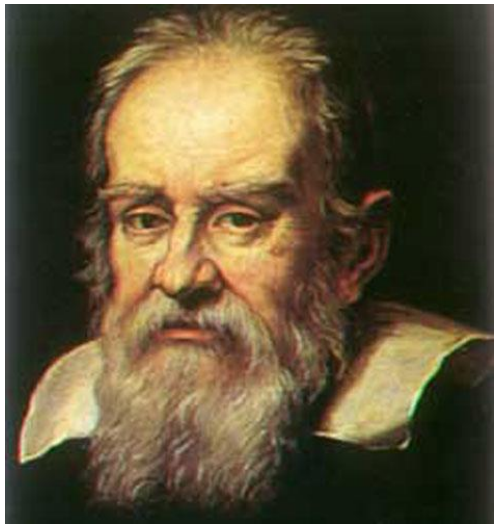
Ma... perché? Cosa c'è di sbagliato in queste affermazioni?

Tutto!

(o quasi...)

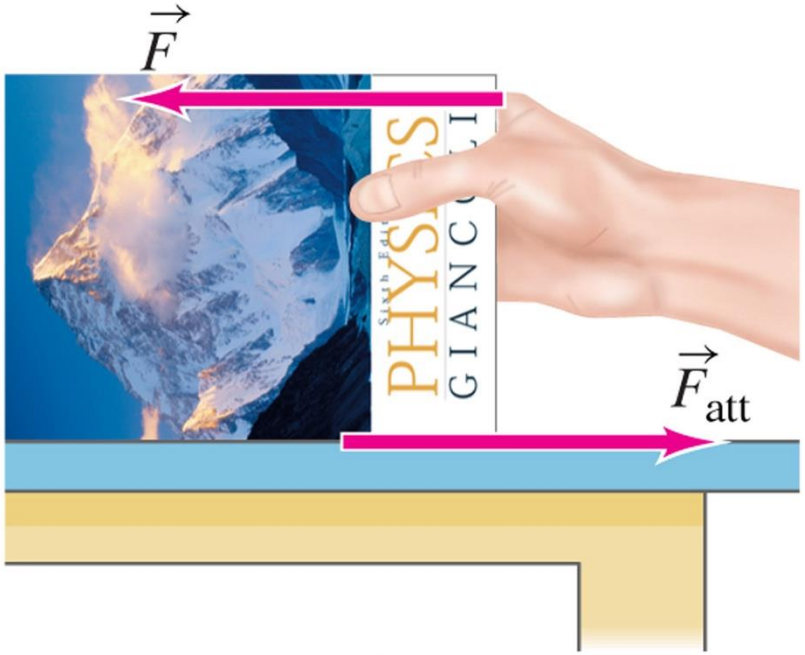


Ben 2000 anni dopo Aristotele, **Galileo** mise in discussione le intuizioni del grande filosofo greco affermando, innanzitutto, che, **per un corpo, trovarsi in moto rettilineo con velocità costante è altrettanto naturale quanto essere fermo!**



Galileo Galilei (1564-1642)

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.

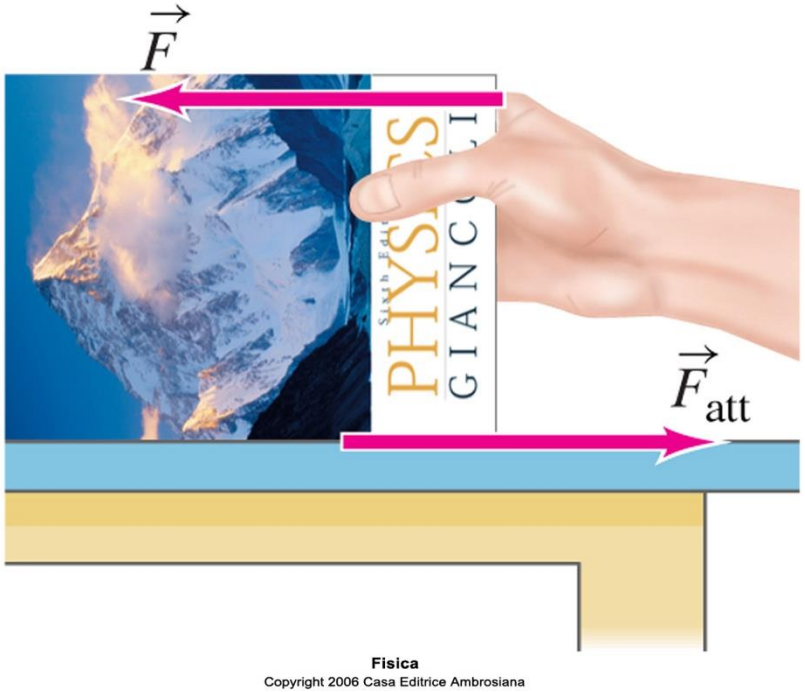


Fisica
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

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.**

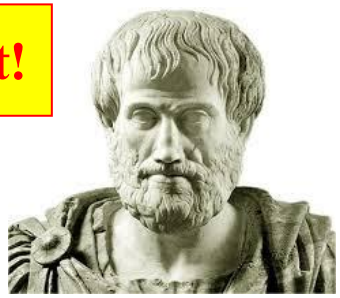


Immaginando di **ridurre progressivamente l'attrito**, è chiaro che sarà necessaria una forza sempre minore per mantenere in moto l'oggetto. A un certo punto, e questa fu **l'intuizione fondamentale di Galileo**, quando avremo idealmente annullato l'attrito ed eliminato così ogni resistenza al moto, **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!***

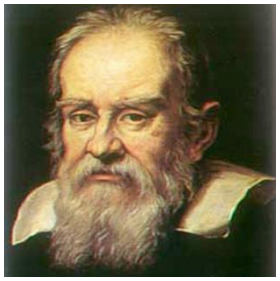
Il Principio di Inerzia

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»

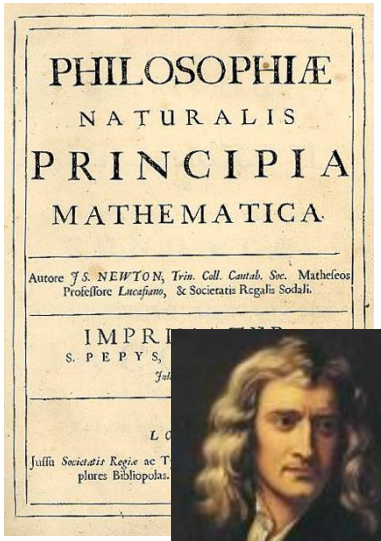
1) «VERO: per mettere in moto un oggetto a riposo, ossia per accelerarlo, occorre applicare una forza»

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 e quindi la sua *variazione* di velocità»

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 oltre trecento anni costituì la base della Meccanica classica, promosse il principio di inerzia a **Prima Legge della Dinamica**.



Isaac Newton
(1642-1727)

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.***

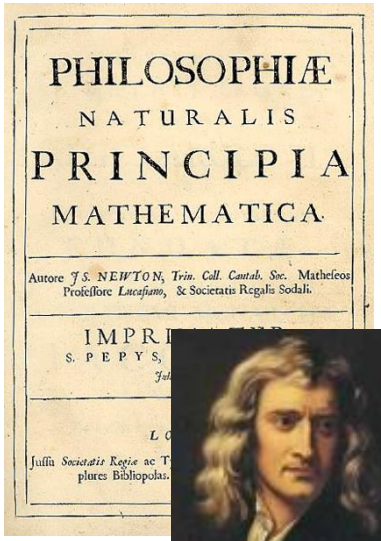


Esempio concettuale
Uno scuolabus fa una brusca frenata e tutti gli zaini appoggiati sul pavimento scivolano in avanti. Quale forza produce questo movimento?

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 oltre trecento anni costituì la base della Meccanica classica, promosse il principio di inerzia a **Prima Legge della Dinamica**.

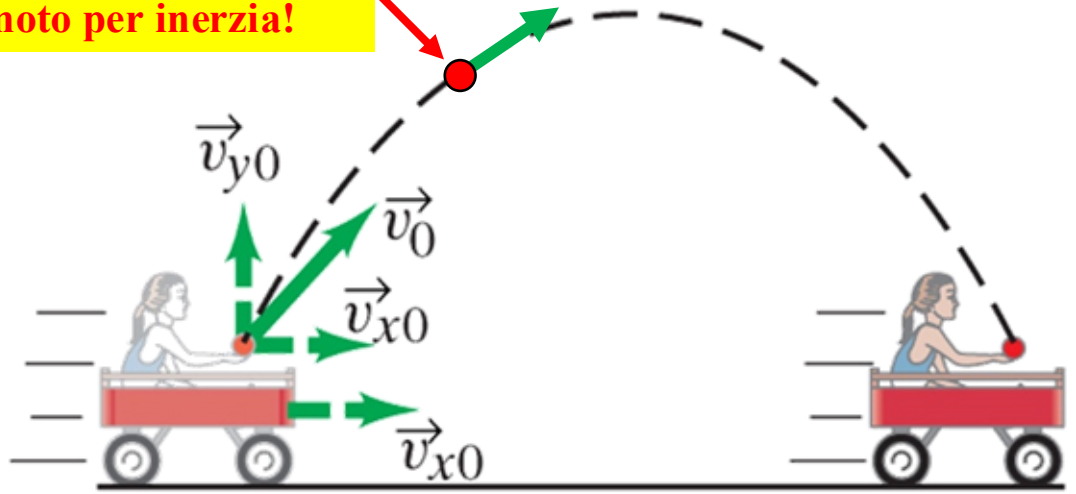


Isaac Newton
(1642-1727)

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.***

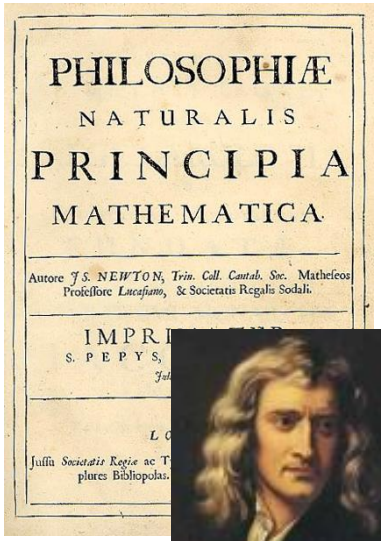


Proseguono nel loro moto per inerzia!



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 oltre trecento anni costituì la base della Meccanica classica, promosse il principio di inerzia a **Prima Legge della Dinamica**.

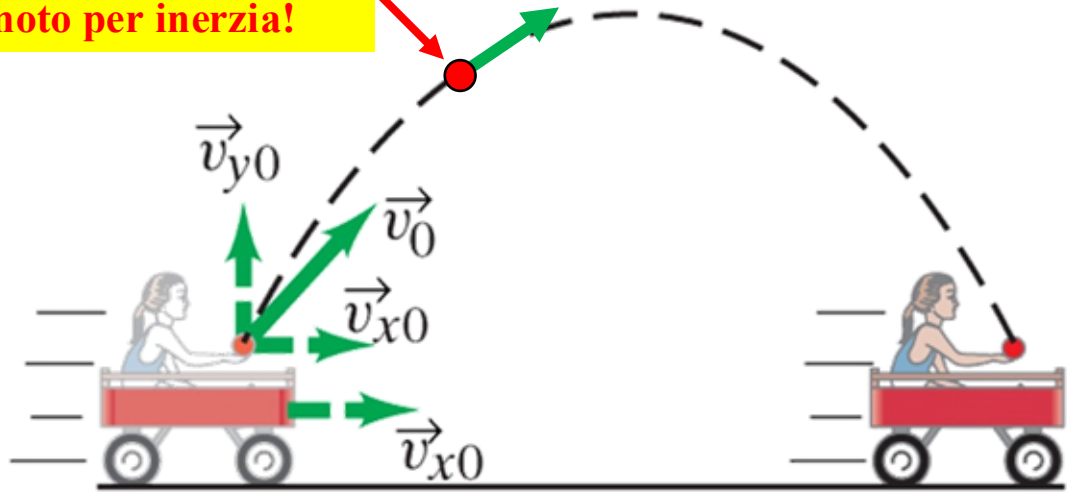


Isaac Newton
(1642-1727)

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.***



Proseguono nel loro moto per inerzia!

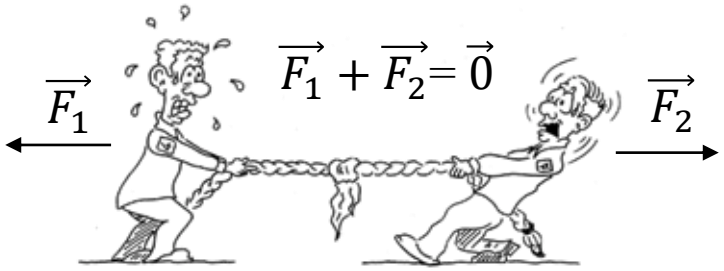


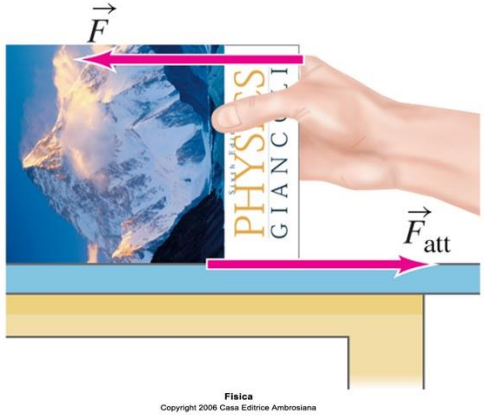
La Prima Legge della Dinamica

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**):

$$\vec{F}_{net} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \cdots + \vec{F}_n$$

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»!**

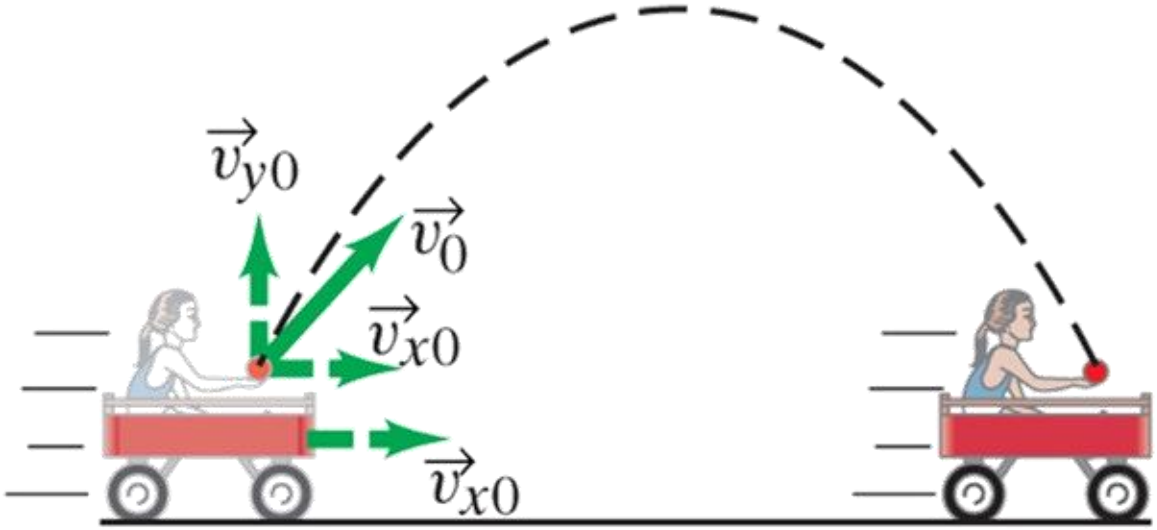
YouTube IT https://www.youtube.com/watch?v=DgKzeUwPMiE



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.*



Il carrello in movimento a velocità costante dell'esempio già visto, e la bambina in esso seduta, costituiscono un sistema di riferimento inerziale: per questo, dal punto di vista della bambina che lancia la mela verso l'alto, la mela si comporta esattamente come se il carrello su cui si trova fosse fermo!

Sistemi di riferimento inerziali

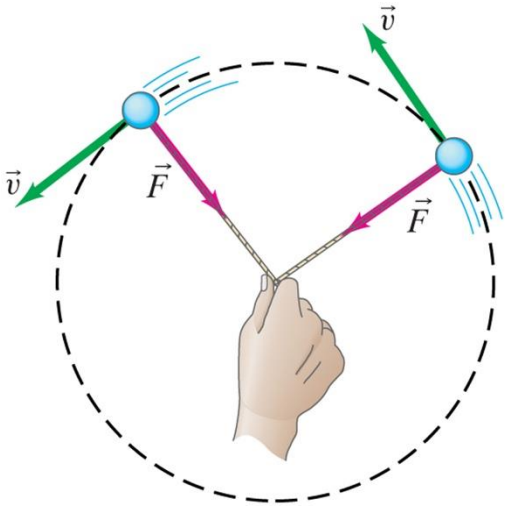
I sistemi di riferimento in **moto rettilineo uniforme** gli uni rispetto agli altri si chiamano **sistemi di riferimento inerziali:** in essi è valida la prima legge di Newton, cioè appunto il principio di inerzia, e *non è possibile effettuare esperimenti in grado di rivelare il loro stato di quiete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

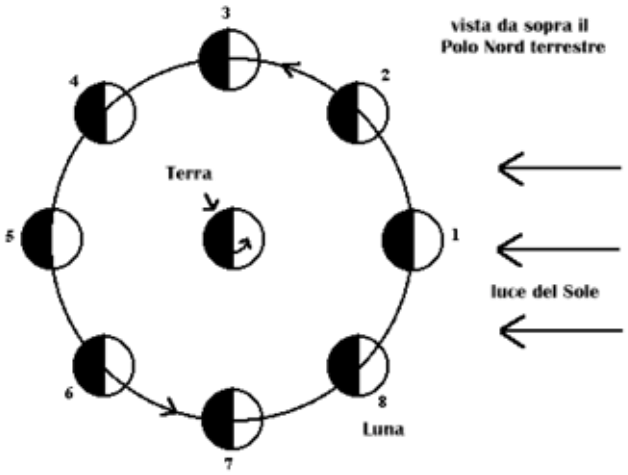






Viceversa, i sistemi di riferimento in cui il principio di inerzia non è valido sono detti "**non inerziali**", e sono ad esempio sistemi di riferimento in **moto accelerato** o in **rotazione**. Questi sistemi, come vedremo, sono caratterizzati dalla presenza, al loro interno, di **forze apparenti**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





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.*





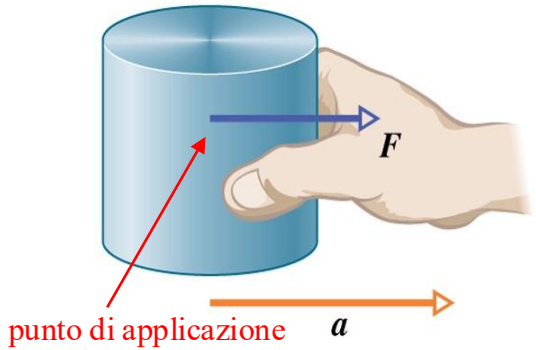
Viceversa, i sistemi di riferimento in cui il principio di inerzia non è valido sono detti "**non inerziali**", e sono ad esempio sistemi di riferimento in **moto accelerato** o in **rotazione**. Questi sistemi, come vedremo, sono caratterizzati dalla presenza, al loro interno, di **forze apparenti** 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…



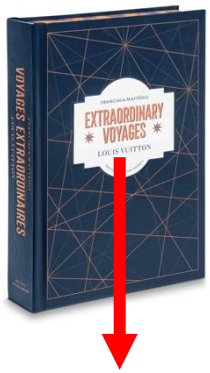
Forza e accelerazione

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**.

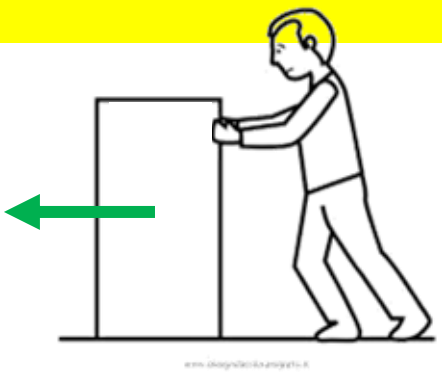


Abbiamo poi anche capito che, proprio come l'accelerazione, anche **la forza è una grandezza vettoriale**, dotata di modulo, direzione e verso, e possiamo quindi rappresentarla con una freccia la cui direzione e verso saranno quelle della spinta o della trazione esercitata e la cui lunghezza sarà proporzionale 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 con il centro geometrico del corpo a cui la forza è applicata (di questo ne riparleremo...)

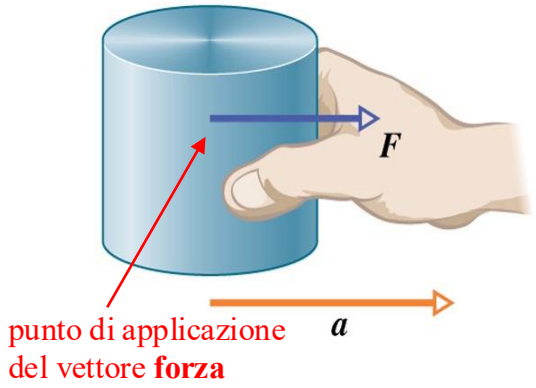






Forza e accelerazione

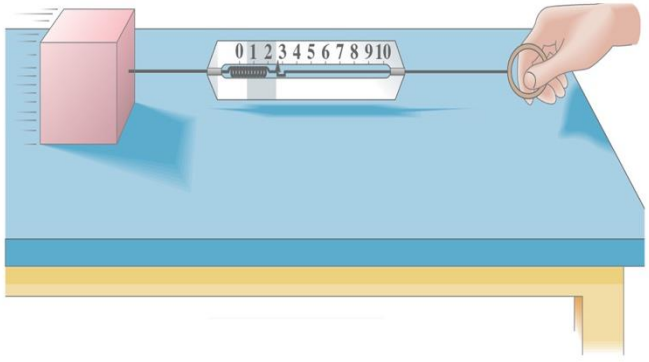
Riassumendo, dalla prima legge della dinamica abbiamo dunque appreso che **la forza non è la causa del movimento**, come si potrebbe intuitivamente pensare e come in effetti l'umanità intera ha pensato per migliaia di anni influenzata dal pensiero di Aristotele. Come si deduce dal principio di inerzia 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.

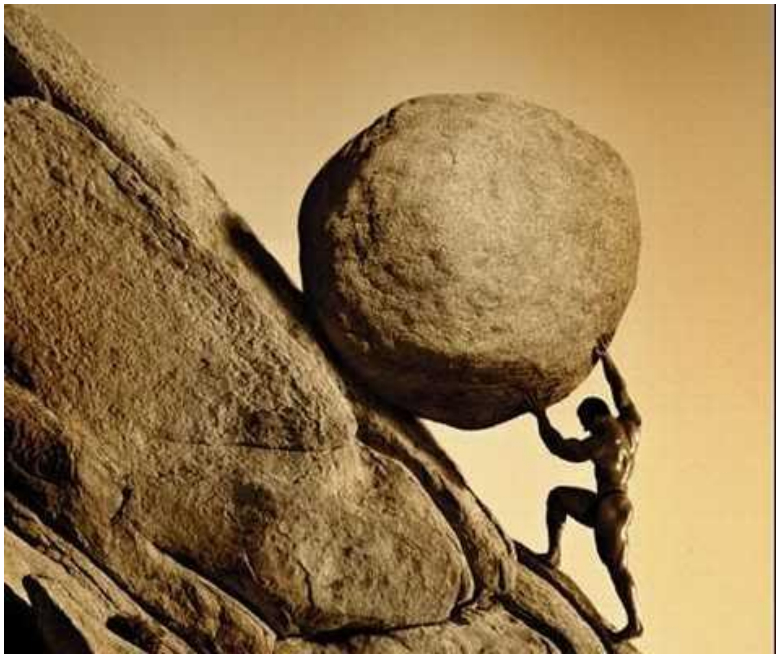
Per le forze è molto importante anche il punto di applicazione (coda del vettore) che, se non diversamente specificato, coincide con il centro geometrico del corpo a cui la forza è applicata (di questo ne riparleremo...)

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

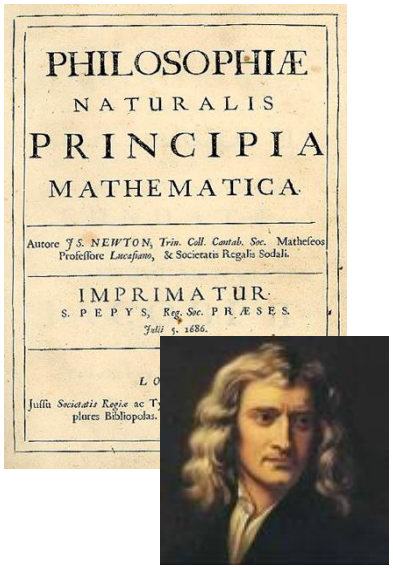
Per comprendere qual è la relazione precisa tra forza e accelerazione ci serve a questo punto introdurre una nuova grandezza fisica fondamentale, già abbondantemente evocata: **la massa**. Già sappiamo che **l'unità di misura della massa nel SI è il Kg.** Di solito il termine "massa" viene usato come 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:

$$\vec{F}_{net} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = m\vec{a} \qquad (1)$$



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**» del corpo.

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:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{net}}{m} \qquad (2)$$

YouTube IT https://www.youtube.com/watch?v=OOsjLyOHils



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:

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

Metri Kilogrammi Secondi

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^2.

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) i *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^2:

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

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:

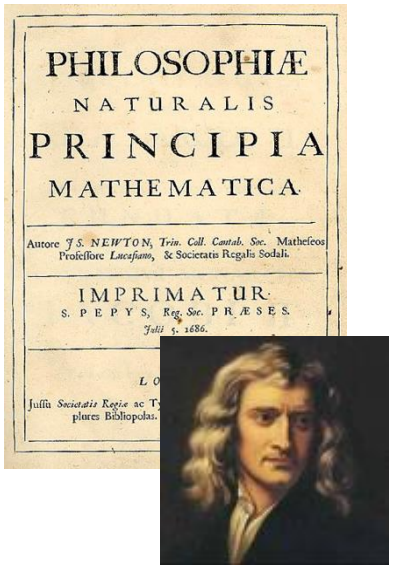
$$a_x = \frac{2.0N}{500g} = \frac{2.0kg \cdot m/s^2}{0.50kg} = 4.0m/s^2$$

Componente *x* 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:

$$\vec{F}_{net} = \sum_{i=1}^{n} \vec{F}_i = m\vec{a} \quad (1)$$



Osservazioni:

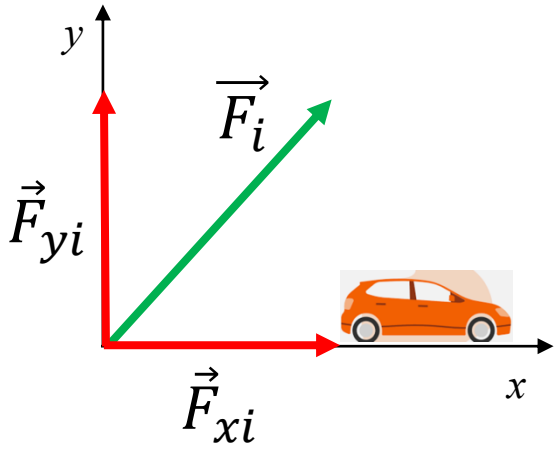
2) Come abbiamo già detto, l'equazione (1) è **un'equazione vettoriale**. Se ad esempio lavoriamo in un sistema di riferimento bidimensionale, essa può essere scomposta in **due equazioni scalari**, una per ogni componente in coordinate cartesiane:

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=100km/h =28m/s, che quella finale è $v = 0$ e che la distanza percorsa è $x - x_0 = 55$m :

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

da cui la forza netta risultante sarà:

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

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