Principi della Dinamica o Leggi di Newton

« Una intelligenza che ad un dato istante conoscesse tutte le forze da cui è animata la natura e la situazione rispettiva degli esseri che la compongono, se fosse inoltre abbastanza vasta da sottoporre questi dati all'analisi, abbraccerebbe nella stessa formula i moti dei più grandi corpi dell'universo e quelli dell'atomo più leggero: nulla sarebbe incerto per essa, e il futuro, come il passato, sarebbe presente ai suoi occhi »

Pierre Simon de Laplace, *Essai philosophique des probabilités*.

Prima Legge di Newton o Primo principio della Dinamica

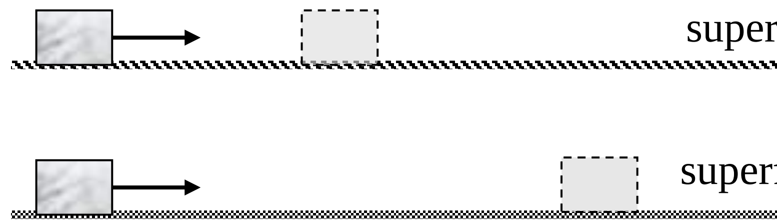
Legge di inerzia

In assenza di forze applicate, un corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto uniforme

ovvero se la forza totale è nulla
forza: interazione con altri corpi

$\vec{v}$ costante, perciò
moto rettilineo

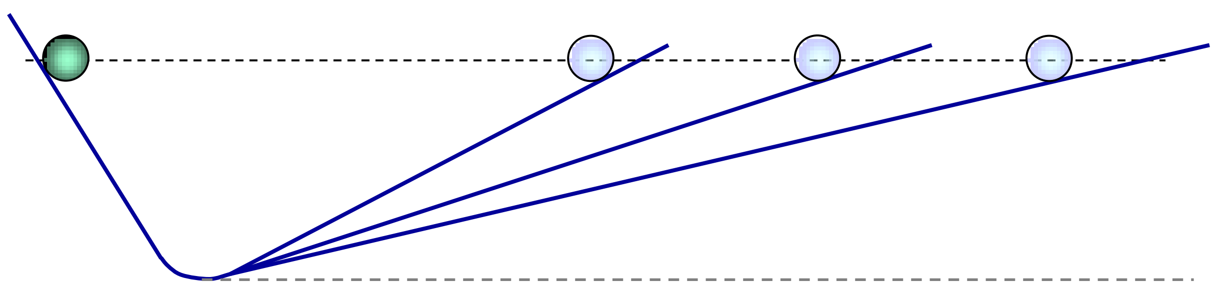
Sperimentalmente bisogna astrarre dagli attriti. E' una estrapolazione



superficie scabra

superficie più levigata

L'argomento di Galileo:



Corollari

serve una forza per modificare un moto (cioè una velocità)

in un moto accelerato (ad es. lungo una curva) devono agire delle forze

Prima Legge di Newton - considerazioni

I moti sono relativi ! In quale sistema di riferimento è valida la 1ª Legge di Newton?

si definisce Sistema di riferimento inerziale un sistema in cui vale la 1ª legge di Newton

Ma come essere certi che su un corpo non agiscono forze? Per evitare una definizione «circolare» dobbiamo indicare un sistema di riferimento inerziale, dopo di che

tutti i sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme rispetto ad esso sono inerziali.

- Si ritiene inerziale un sistema solidale con la distribuzione di massa "media" dell'universo («stelle fisse») $v_S = 369 \pm 2\ km/s$

  In pratica si utilizza la <u>radiazione cosmica di fondo</u>.

- <u>In molti casi</u> perfino la Terra può andar bene, purché i moti siano limitati nel tempo e nello spazio (e le misure non siano molto sensibili)

Seconda Legge di Newton – per un «punto materiale»

Legge fondamentale della meccanica

massa: proprietà (inerzia) del corpo

forza: interazione del corpo con l'ambiente

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

L'interazione di un corpo con gli altri oggetti (forza) determina la sua variazione di velocità (accelerazione). La «costante di proporzionalità» è una proprietà del corpo, detta massa

A parità di forza applicata $\dfrac{a_1}{a_2} = \dfrac{m_2}{m_1}$

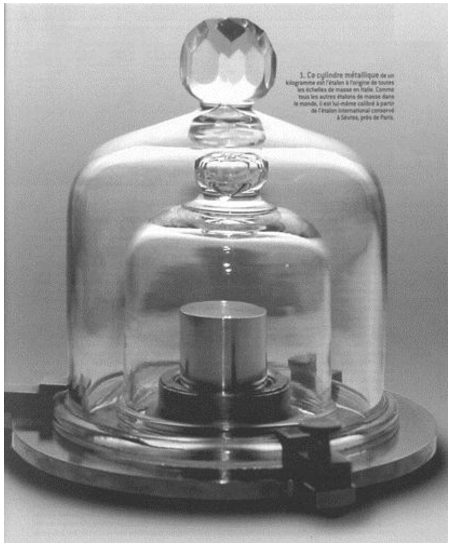
posto che un oggetto abbia massa 1kg

- la massa degli altri corpi si ricava per confronto
- la legge di Newton permette di ricavare la forza

$[m] = \mathrm{kg}$ unità fondamentale

$[F] = kg\dfrac{m}{s^2} = \mathrm{N}$ «Newton»

kilogrammo campione

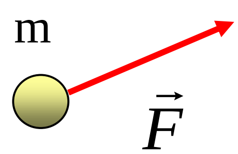


Seconda Legge di Newton - considerazioni

1 - La massa è un grandezza scalare positiva

forza e accelerazione hanno stessa direzione e verso

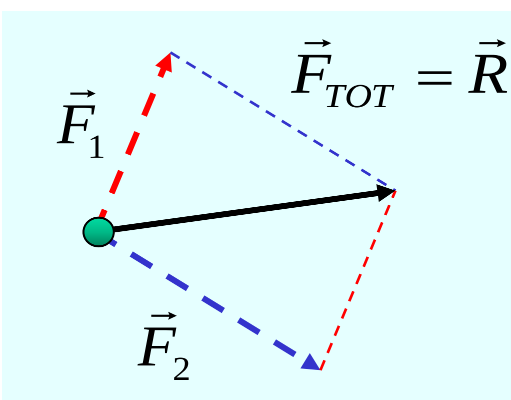
2 - Legge vettoriale



$$\begin{cases} F_X = ma_X \\ F_Y = ma_Y \\ F_Z = ma_Z \end{cases}$$

3 - F è la forza totale o risultante delle forze

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



un punto materiale soggetto ad un insieme di forze si muove come se su di esso agisse l'unica forza risultante

$$\vec{R} = \sum_{k=1}^{N} \vec{F}_k$$

2ª Legge di Newton

4. Equazione del moto

$$\vec{F} = m\frac{d\vec{v}}{dt} \qquad \vec{F} = m\frac{d^2\vec{r}}{dt^2}$$

Nota la forza **F** (e le condizioni iniziali)
si può ricavare **v**(t) o **r**(t)

è solo un problema matematico

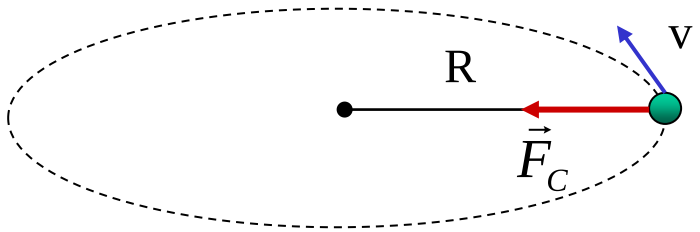
E' il problema generale della dinamica.

Strategia per la risoluzione dei problemi:
individuare le forze agenti e applicare la 2ª legge

5. Misura dinamica della forza

Nota l'accelerazione ***a***
di un corpo di massa m

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



Esempio: in un moto circolare uniforme la forza risultante è diretta verso il centro: «centripeta»

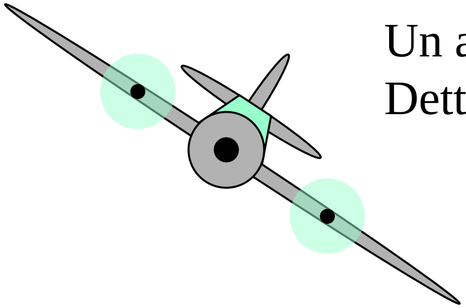
$$F_C = ma_C = m\frac{v^2}{R}$$

Esempi di misura dinamica della forza

Un aereo di massa *m* sta decollando con velocità costante. Determinare la forza totale agente

$$\vec{v} = \text{cost} \Rightarrow \vec{a} = 0$$

$$\vec{F}_{TOT} = m\vec{a} = 0$$



Un aereo in moto circolare uniforme su una circonferenza di raggio R. Detta v la velocità in modulo, determinare la risultante delle forze.

$$\boxed{\vec{a} = \vec{a}_T + \vec{a}_N} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\vec{F}_{TOT} = \vec{F}_C = m\,\vec{a}_N}$$

$$a_N = \frac{v^2}{R} = \omega^2 R$$

$$a_T = 0$$

$$F_{TOT} = m\frac{v^2}{R}$$

Diverse formulazioni della Seconda legge di Newton

se m è costante

$$\vec{F} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}$$

$$\boxed{\vec{F} = \frac{d\,\vec{p}}{dt}}$$

valida anche se la massa è variabile

essendo $\boxed{\vec{p} = m\vec{v}}$ la quantità di moto $[p] = kg\frac{m}{s}$

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \Rightarrow \vec{F}dt = d\vec{p} \Rightarrow \int_{t1}^{t2}\vec{F}dt = \int_{t1}^{t2} m\,d\vec{v}$$

$$\boxed{\vec{J} = \int_{t1}^{t2}\vec{F}dt}$$

$[I] = Ns = kg\frac{m}{s}$ Impulso della forza

$$\boxed{\vec{J} = m\Delta\vec{v} = \Delta\vec{p}}$$

Teorema dell'impulso

è la formulazione integrale della seconda legge di Newton

Limitazioni della 2ª Legge della dinamica.

Legge valida solo in un sistema inerziale. Si può estendere ad un sistema non inerziale a patto di aggiungere «forze apparenti»

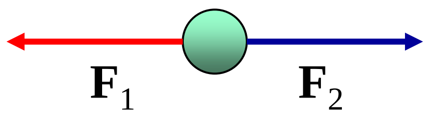
Vale solo per velocità «non relativistiche» anche se, ridefinito $\vec{p} = \dfrac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$

la 2ª Legge nella formulazione $\vec{F} = \dfrac{d\vec{p}}{dt}$ resta valida

Al livello fondamentale, la dinamica di atomi, molecole, particelle, si descrive mediante la Meccanica quantistica.

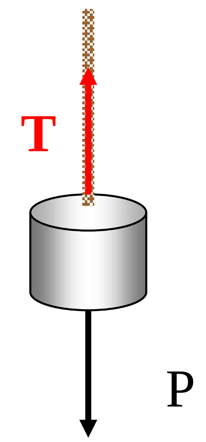
Equilibrio di un punto materiale

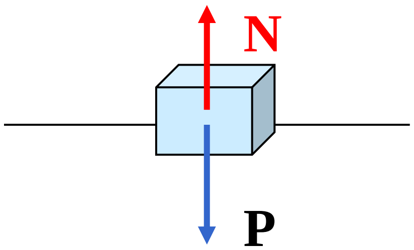
Equilibrio di 2 forze:



$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$$

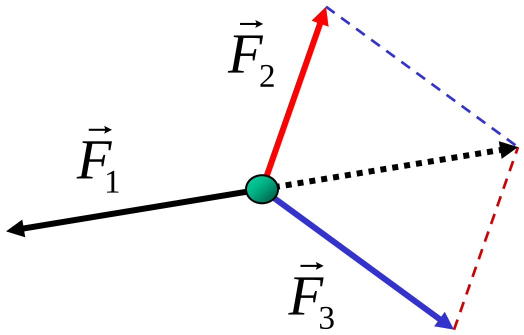
$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1$$





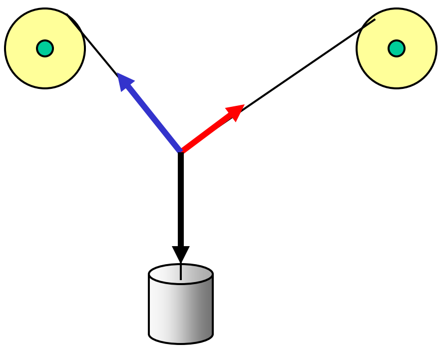
le forze giacciono sulla stessa retta

Equilibrio di 3 forze:



$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 = 0$$

$$\begin{cases} F_{1X} + F_{2X} + F_{3X} = 0 \\ F_{1Y} + F_{2Y} + F_{3Y} = 0 \\ F_{1Z} + F_{2Z} + F_{3Z} = 0 \end{cases}$$



Forze sullo stesso piano $\quad \vec{F}_1 = -\left(\vec{F}_2 + \vec{F}_3\right)$

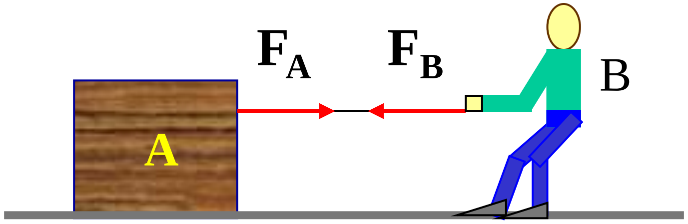
Terza Legge di Newton – di azione e reazione

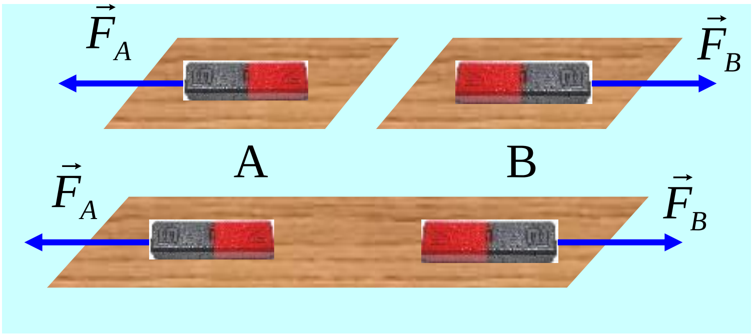
Le forze sono dovute a interazione mutua fra oggetti fisici. Esistono sempre in coppia.

Le forze di una coppia sono

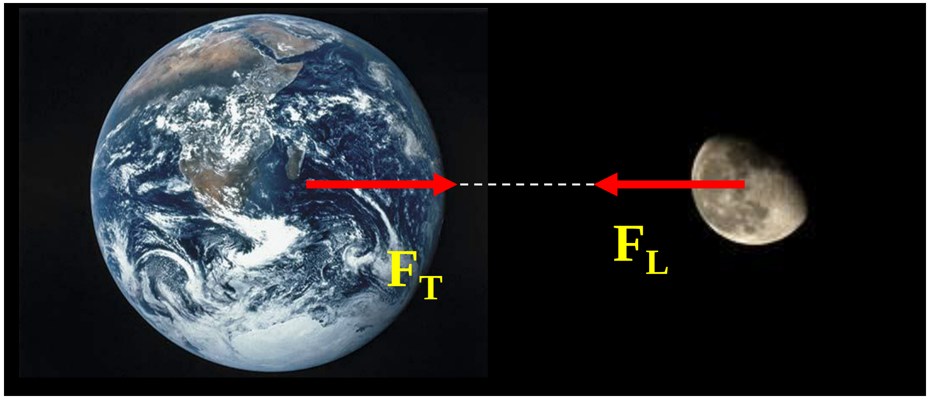
- opposte l'una all'altra
- dirette lungo la congiungente

$$\vec{F}_A = -\vec{F}_B$$





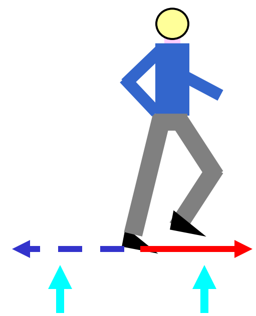
Esperimento di Newton



Nota: il fatto che $\mathbf{F}_A+\mathbf{F}_B=0$ non significa che niente si muove, anzi!:. $\mathbf{F}_A$ ed $\mathbf{F}_B$ agiscono su corpi diversi

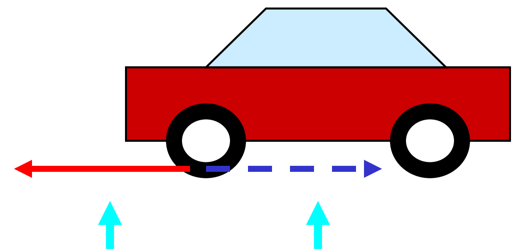
Terza Legge di Newton e locomozione

Locomozione
terrestre



forza esercitata
sul pavimento

forza agente
sulla persona



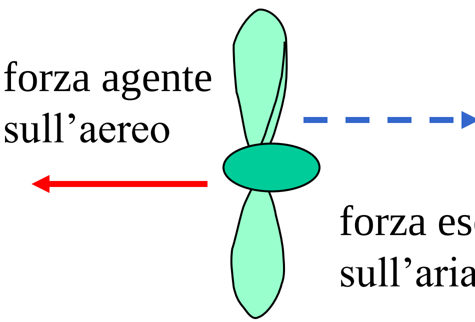
forza agente
sull'auto

forza esercitata
sul fondo stradale

Locomozione
in un fluido

aereo o nave ad elica

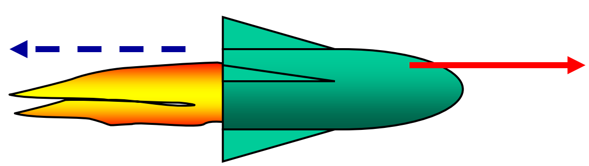
forza agente
sull'aereo

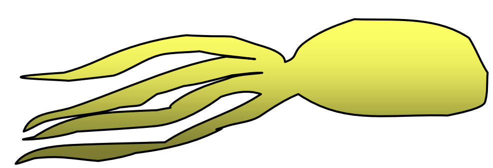


forza esercitata
sull'aria

elica

Moto a reazione





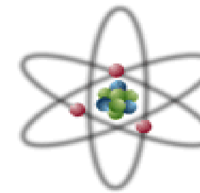
in questo caso non è necessario un mezzo esterno

Interazioni fondamentali

Tutte le forze sono riconducibili a 4 interazioni fondamentali

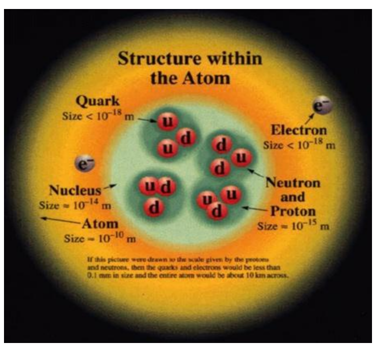
Gravitazionali interazione fra masse

Attrattiva, raggio d'azione infinito
Domina la dinamica celeste. Forza peso ecc.



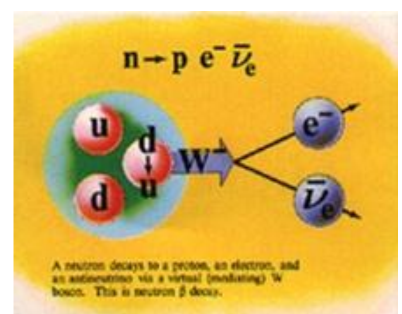
Elettromagnetiche

Interazioni fra cariche elettriche.
Attrattiva o repulsiva, raggio infinito.
Domina interazioni atomiche/molecolari



Forti

Interazione fra quark. Molto complessa. Corto raggio ($<10^{-15}$ m)
Domina struttura e interazioni nucleari, dinamica stellare, primi istanti dell'universo



Deboli

Interazione fra 'cariche deboli'.
Decadimento beta. Importante nell'evoluzione stellare.

Tutte le forze nell'esperienza comune hanno natura gravitazionale o elettromagnetica.

Classificazione “pratica” delle forze trattate nel corso

Forza gravitazionale

Forza elettrostatica
Forza di Lorentz

Forza elettromagnetica

Forze a distanza

Forza elastica
Attrito viscoso/ resistenza del mezzo
Forza muscolare, ...

Reazione normale
Tensione di una fune/filo
Attrito statico
Attrito dinamico

Reazioni vincolari

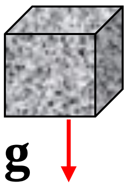
Forze di “contatto”

Nota: le reazioni vincolari sono le forze più difficili da trattare: bisogna analizzare il sistema fisico caso per caso.

Forza gravitazionale o Forza peso

Tutti i corpi, in un medesimo luogo, cadono con la stessa accelerazione (nel vuoto) indipendentemente dalla forma, composizione ecc.

$$a = g = 9.80665\, m/s^2$$ valore medio sulla superficie terrestre



g

L'indipendenza di ***g*** dalla natura dei corpi è verificata con alta precisione (già da Newton) e vale per ogni forma di materia (inclusa l'antimateria).

Questa osservazione, di fondamentale importanza, è detta «Universalità della caduta libera»

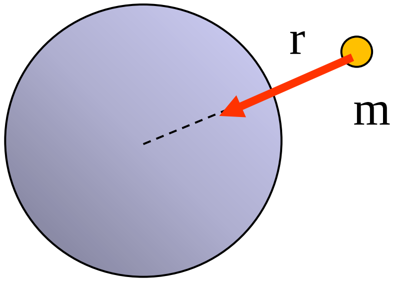
quindi deve agire una Forza proporzionale alla massa: $\vec{F} = m\vec{a} = m\vec{g}$

più correttamente $\vec{F} = m_{in}\vec{a} = m_{grav}\vec{g}$

e l'universalità della caduta libera implica $m_{in} = m_{grav}$

Forza gravitazionale o Forza peso

La forza esercitata da un corpo sferico di massa M, su un corpo «puntiforme» di massa m a distanza r dal centro è diretta verso il centro e vale:



$$F = G\frac{Mm}{r^2}$$

Se la regione del moto è abbastanza piccola la forza è praticamente costante in modulo, ed anche in direzione. Si parla allora in genere di forza peso o peso.

forza proporzionale alla massa: la massa di un corpo si può misurare dal suo peso (bilancia)

$\vec{g}$

- modulo varia leggermente con la latitudine (**9.789** m/s^2 all'equatore, **9.832**m/s^2 ai poli)
- e con l'altezza (a 10km diminuisce del 0.3%, -10% a 345km)
- in molti casi pratici si può considerare uniforme (devia di 0.54′ alla distanza di 1 km)
- altre deviazioni locali dovute alla non sfericità della terra

$\vec{g}$ è detta anche «campo gravitazionale». Può essere molto diversa su altri pianeti o corpi celesti

Moto di un corpo soggetto alla sola forza peso (costante)

se il moto è limitato nel tempo e nello spazio si può ritenere che la forza peso sia costante

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

$$\vec{a} = \vec{g}$$ costante

$$v(t) = \vec{v}_0 + \vec{g}t$$

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{g}}{2}t^2$$

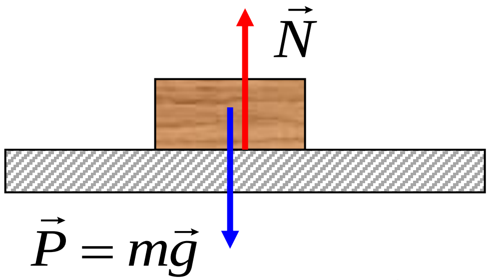
Scegliendo:
l'asse Y verticale, orientato in su
l'asse X orizzontale, in modo che il vettore $\mathbf{v_0}$ si trovi nel piano XY

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_{0X}t \\ y(t) = y_0 + v_{0Y}t - \frac{g}{2}t^2 \\ z(t) = 0 \end{cases}$$

il moto parabolico di un "proiettile" è dunque il moto più generale in un campo gravitazionale omogeneo

un corpo soggetto alla sola forza gravitazionale si dice «in caduta libera»

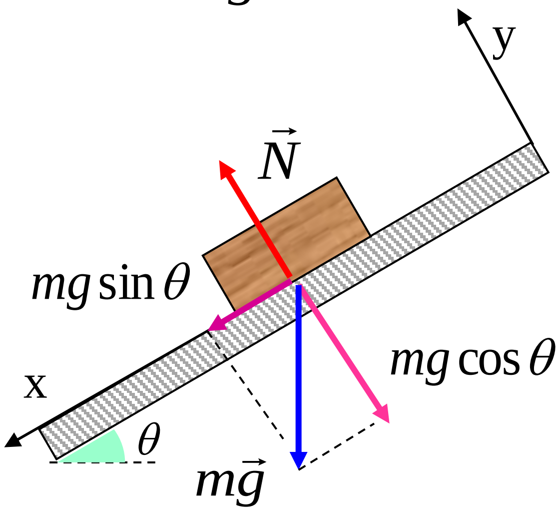
Reazione Normale



Forza di contatto. Reazione vincolare.

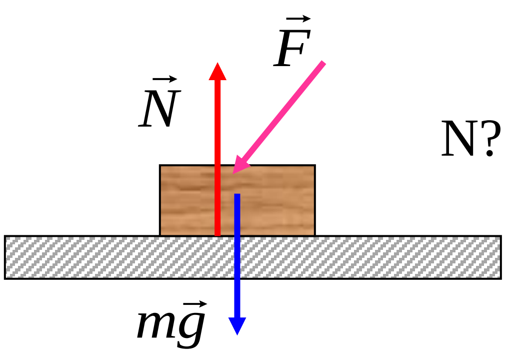
Piano orizzontale. $\vec{N} + m\vec{g} = 0$

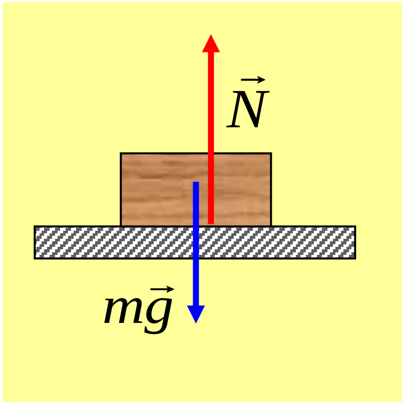
In questo caso: $N = P = mg$



Piano inclinato liscio (cioè senza attrito: per definizione un piano "che esercita solo forze normali alla superficie")

$$\begin{cases} mg\sin\theta = ma_x \\ N - mg\cos\theta = ma_y = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a_x = g\sin\theta \\ N = mg\cos\theta \end{cases}$$



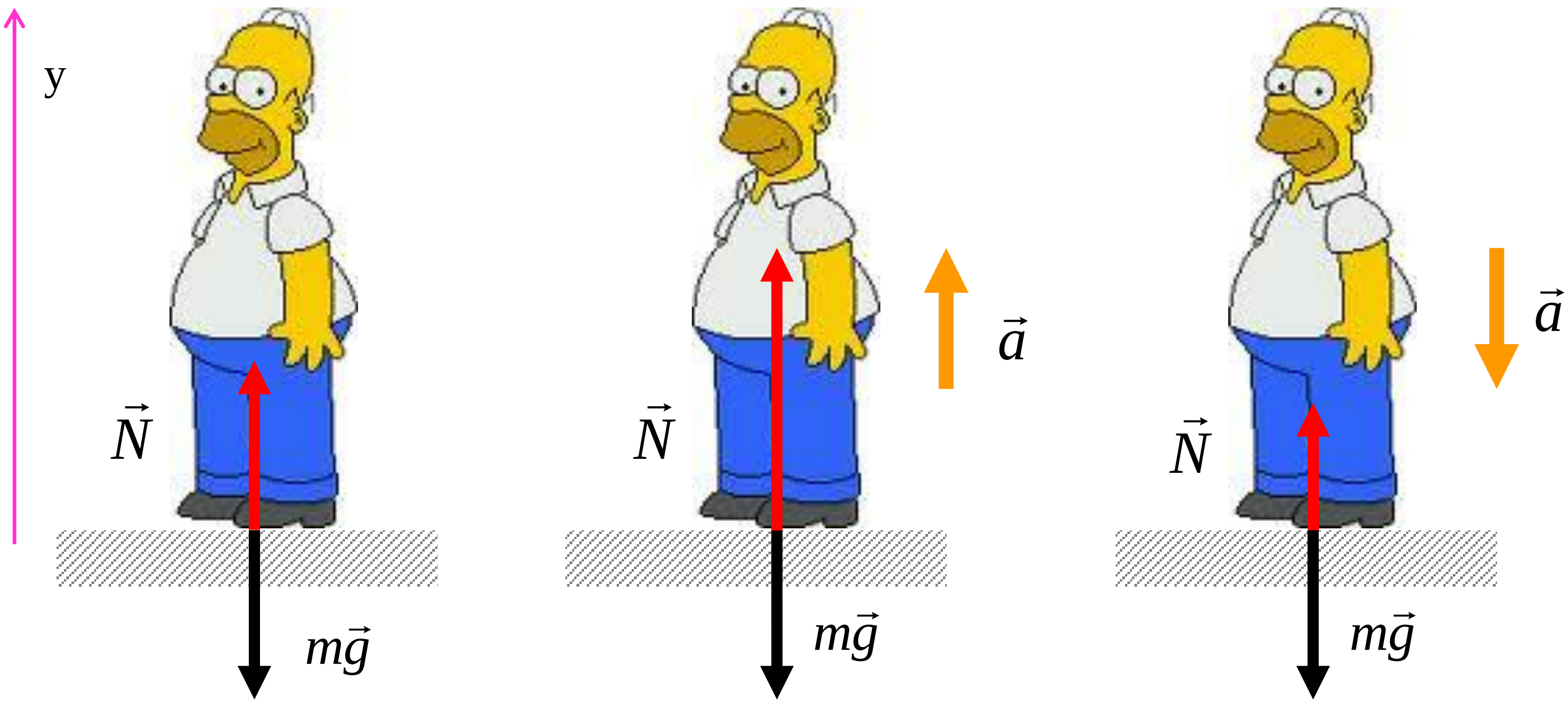


Sensazione di peso.

Misura di una bilancia.

che succede in un sistema in moto accelerato?

Sensazione di peso



ascensore fermo o in moto uniforme

ascensore accelera verso l'alto

ascensore accelera verso il basso

$$F_{TOT} = N - mg = ma$$

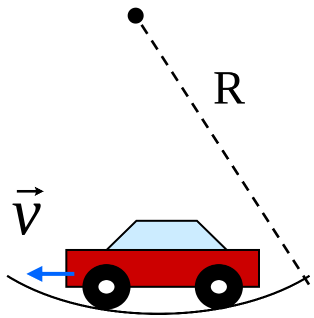
$$N = mg + ma = m(g + a)$$

Se $a = -g$ (caduta libera)
la sensazione di peso scompare

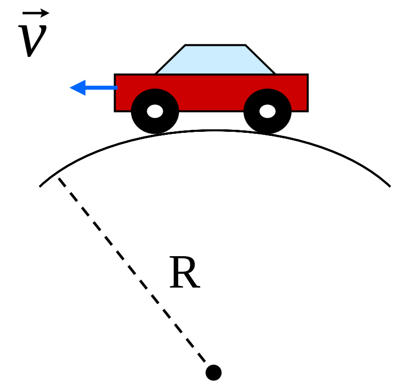
Se $a < -g$ si ha distacco

che cosa misura la bilancia?

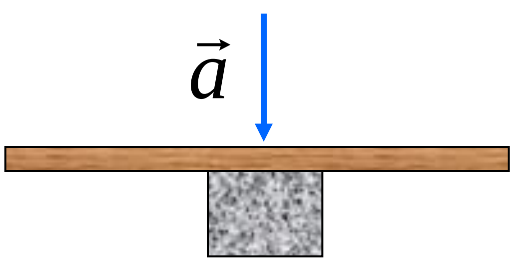
Reazione Normale



cunetta



dosso

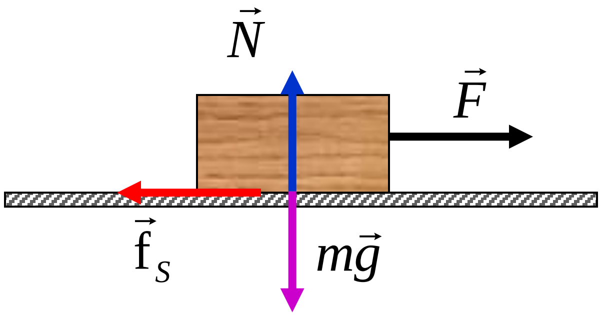


piastra accelerata in giù ($a > g$)
blocco appoggiato di sotto

condizioni di distacco?

Forze di Attrito radente. Attrito statico.

Forza di contatto. Reazione vincolare.



se il blocco non scivola, dalla 2ª L.Newton:

$$\vec{f}_S = -\vec{F}$$

(in generale, F va intesa come risultante delle forze tangenti al piano d'appoggio)

Sperimentalmente si osserva che

$\left|\vec{F}\right| \le F_{\max}$ il corpo non scivola

$\left|\vec{F}\right| > F_{\max}$ il corpo scivola

inoltre $F_{\max} = \mu_S N$

coefficiente di attrito statico, adimensionale. Dipende dalla natura delle superfici a contatto.

Quindi $\left|\vec{f}_S\right| \le F_{\max}$ $\boxed{\left|\vec{f}_S\right| \le \mu_S N}$ condizione di non slittamento

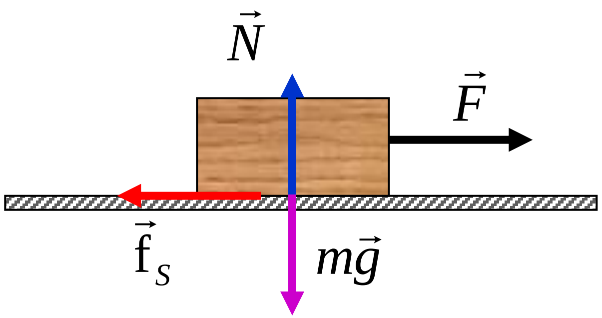
Forze di Attrito radente. Attrito statico.

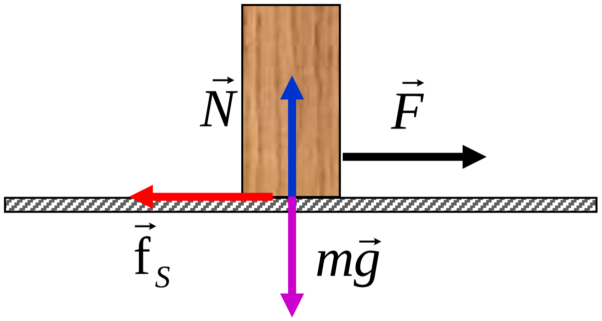
Forza di contatto. Reazione vincolare.

Attenzione: Non è $\cancel{f_S = \mu_S N}$

tranne casi particolari

nè tantomeno $\cancel{f_S = \mu_S mg}$



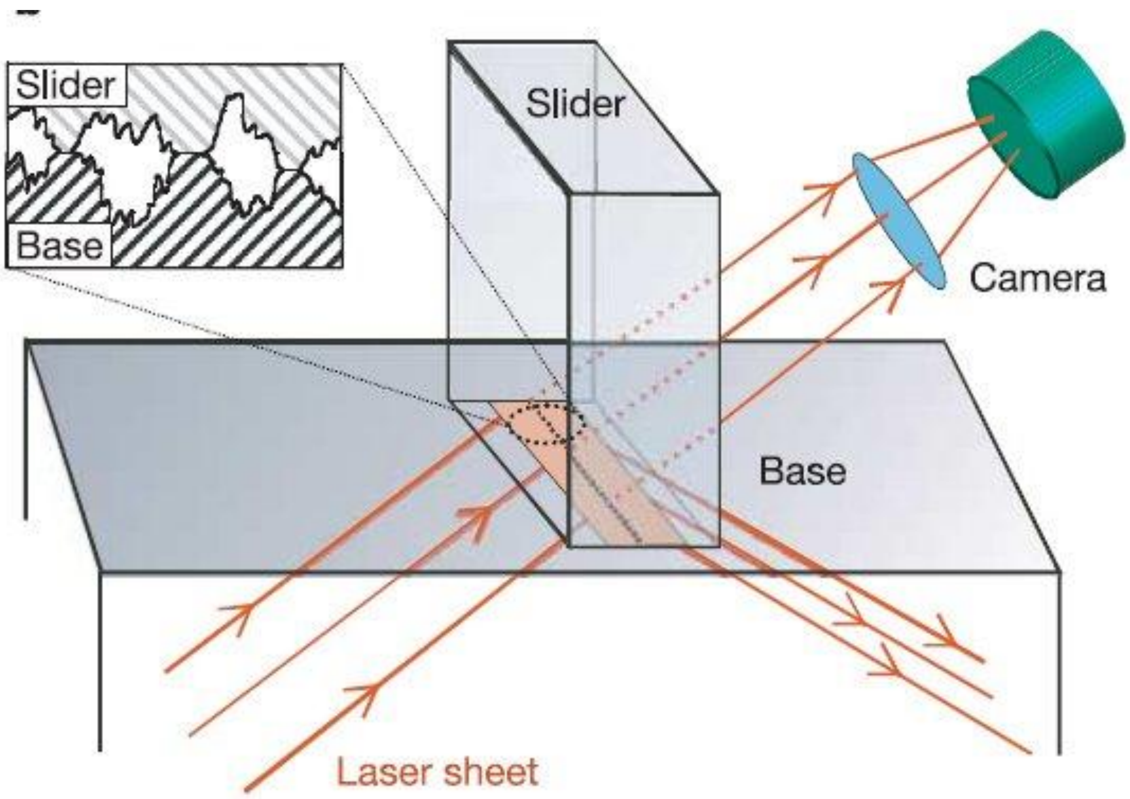


il coefficiente di attrito statico (e dinamico) non dipende dalla superficie di appoggio

Forze di Attrito radente. Attrito statico.

Com'è possibile che la forza di attrito non dipenda dalla superficie di contatto?
Il fatto è che la superficie di contatto vera rimane costante.

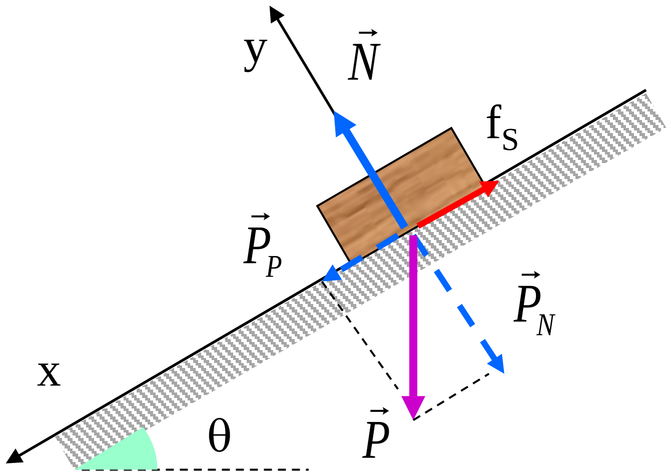
Una dimostrazione sperimentale:

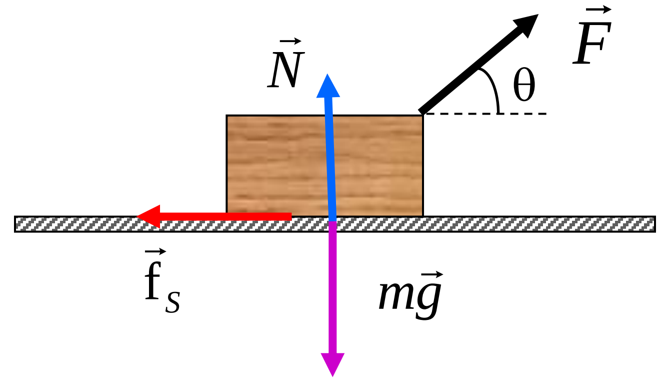


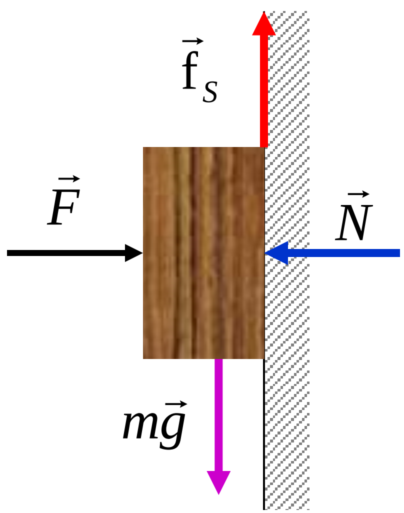
Nature 430, 2004, p. 1005

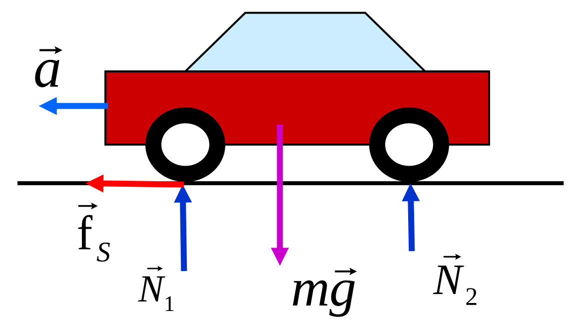
Forze di Attrito radente. Attrito statico.

Se le figure rappresentano situazioni di non slittamento, quanto vale $\mathbf{f_S}$ nei diversi casi?



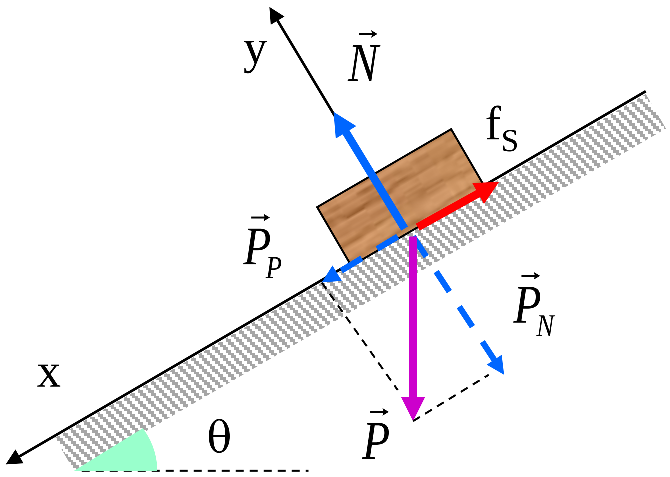






Forze di Attrito radente. Attrito statico.

Piano inclinato con attrito.



Il blocco, inizialmente fermo, rimane in equilibrio?
In caso affermativo calcolare la forza di attrito statico

La strategia è la seguente:

- si suppone equilibrio
- si calcola il valore di f_S necessario per l'equilibrio
- si verifica se è soddisfatta la condizione di equilibrio
  - se sì, il problema è risolto
  - se no, il corpo scivola [usare attrito dinamico (v.)]

componente x
componente y

$$\begin{cases} mg\sin\theta - f_S = ma_x = 0 \\ N - mg\cos\theta = ma_y = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} f_S = mg\sin\theta \\ N = mg\cos\theta \end{cases}$$

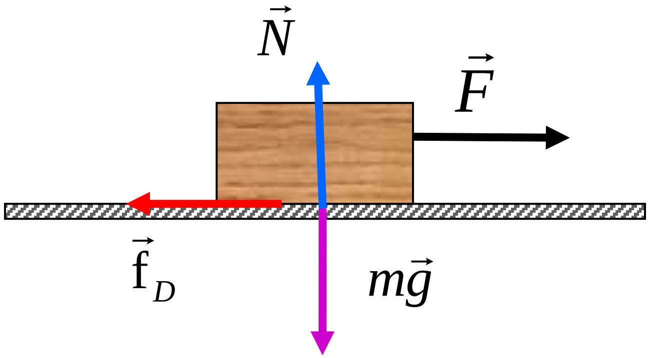
possibile purché $f_S \le \mu_S N \Rightarrow \tan\theta \le \mu_S$

Condizione di equilibrio

Forze di attrito radente. Attrito dinamico.

Forza di contatto. Reazione vincolare

Anche quando l'oggetto slitta (ad es. se **F** è sufficientemente grande) si esercita una forza tangente fra il corpo e la superficie di contatto



Attrito dinamico.

$$f_D = \mu_D N$$

direzione e verso: opposto al "moto" cioè alla velocità *)

$$\vec{f}_D = -\mu_D N \vec{u}_v$$

*) velocità relativa, rispetto al piano di contatto

Note:

- l'attrito dinamico ha modulo proporzionale ad N
- $\mu_D \leq \mu_S$ in genere ma non sempre

Fisicamente, l'attrito radente è un fenomeno complesso: interazioni a livello microscopico (es. nanosaldature al contatto). Le formule date rappresentano una schematizzazione del problema.

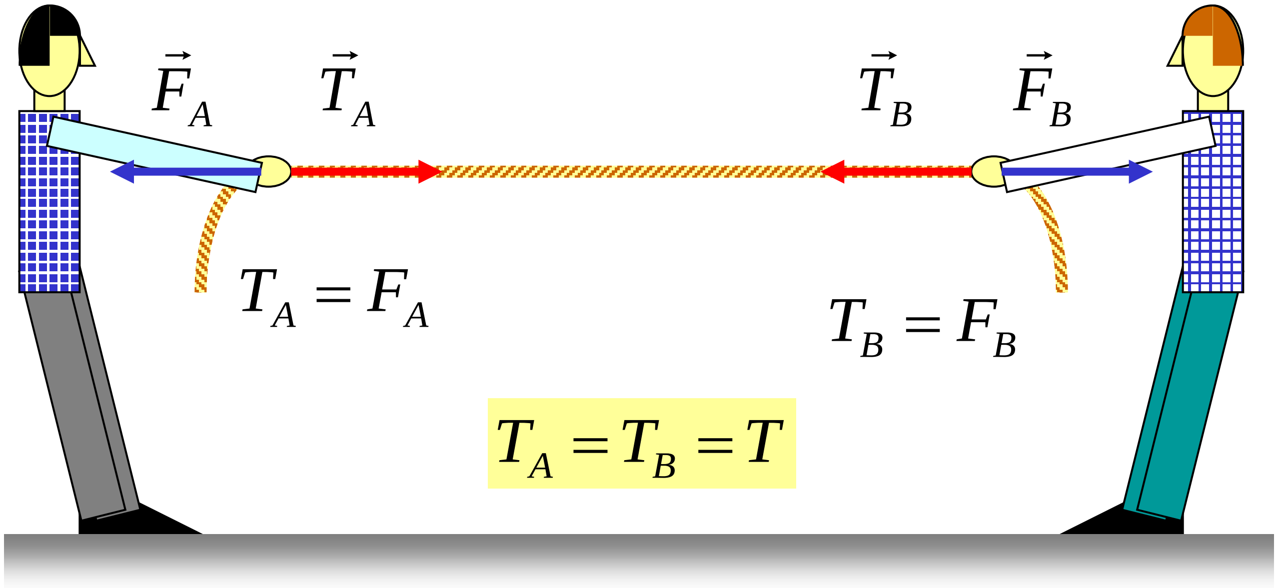
Tensione di un filo o fune ideale

Forza di contatto. Reazione vincolare.

consideriamo una fune

- perfettamente flessibile — solo forze lungo il filo (in trazione)
- inestensibile — stessa **v**, ***a*** degli estremi (se il filo trasla parallelo a sè stesso ...)
- di massa trascurabile — stessa tensione (in modulo) in ogni punto del filo

In equilibrio:

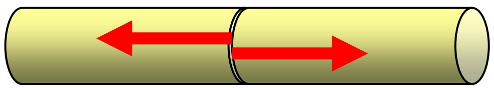


$$T_A = T_B = T$$

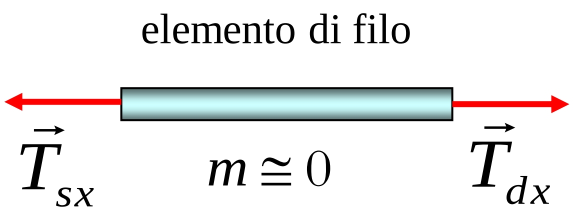
in mancanza di equilibrio il risultato è lo stesso, purché la fune abbia massa trascurabile.

Tensione di un filo o fune ideale

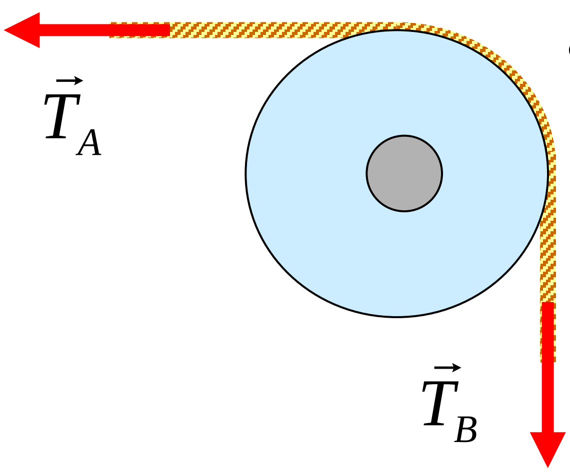
In pratica, su ogni sezione della fune agiscono forze opposte



se il filo non è in equilibrio, ma la sua massa è trascurabile



$$\left(\vec{T}_{dx} + \vec{T}_{sx}\right) = m\vec{a} \cong 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{T_{dx} = T_{sx} = T}$$



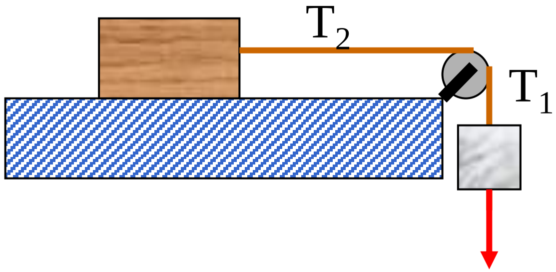
anche cambiando direzione, il modulo della tensione non cambia

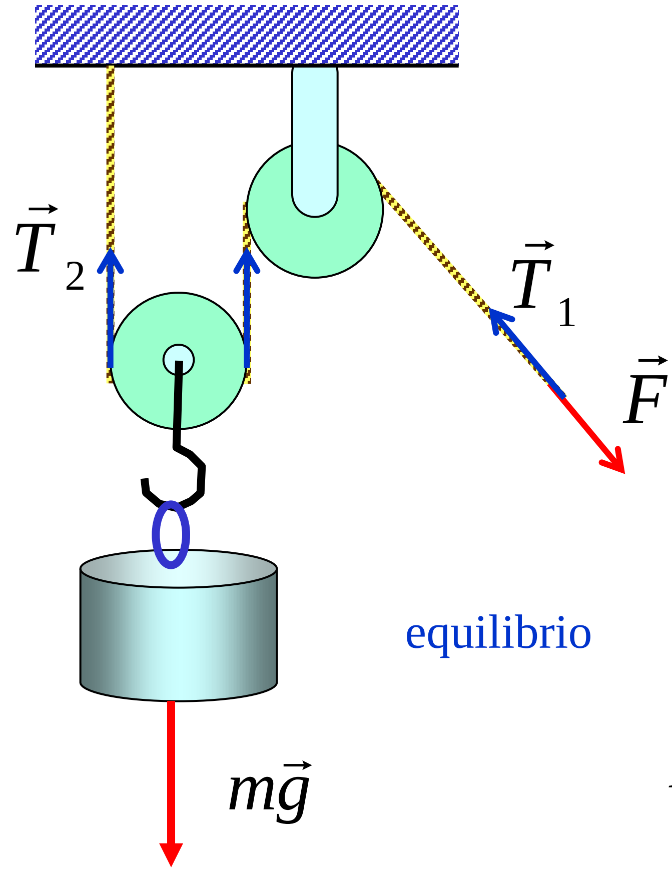
$$\boxed{T_A = T_B}$$

purché la puleggia sia

- senza attrito o
- di massa trascurabile

Tensione di un filo o fune ideale





Se la puleggia è senza attrito
o ha massa trascurabile

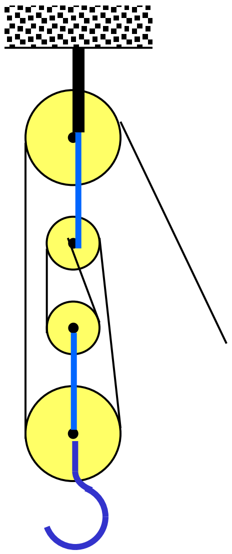
$$\left|\vec{T}_1\right| = \left|\vec{T}_2\right|$$

equilibrio

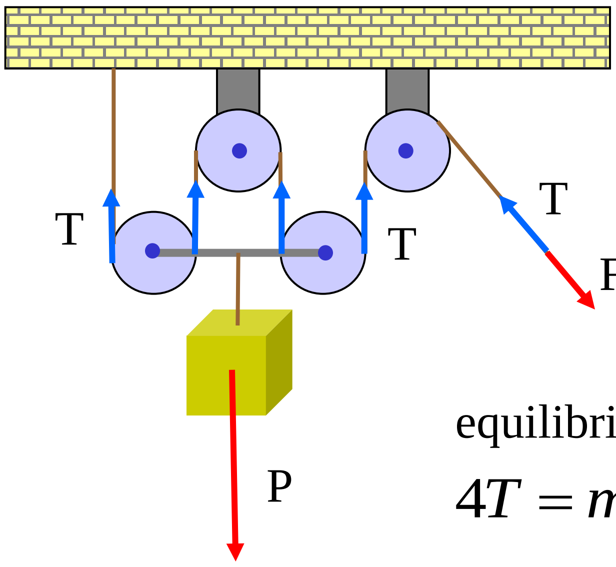
$$2T = mg$$

$$F = \frac{mg}{2}$$

Tensione di un filo o fune ideale



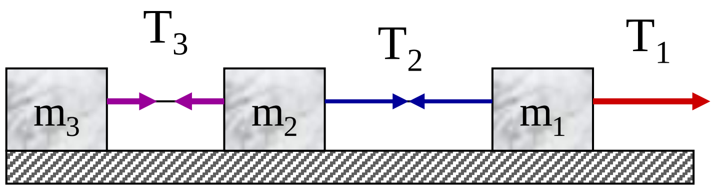
Senza attrito, T ha lo stesso modulo in ogni tratto di fune.



equilibrio:

$$4T = mg$$

Tratti di filo distinti. Qui le tensioni differiscono. Nell'esempio:



se il piano è **liscio**

$$\begin{cases} T_3 = m_3 a \\ T_2 - T_3 = m_2 a \\ T_1 - T_2 = m_1 a \end{cases} \qquad \begin{cases} T_3 = m_3 a \\ T_2 = (m_2 + m_3) a \\ T_1 = (m_1 + m_2 + m_3) a \end{cases}$$

Forza elastica

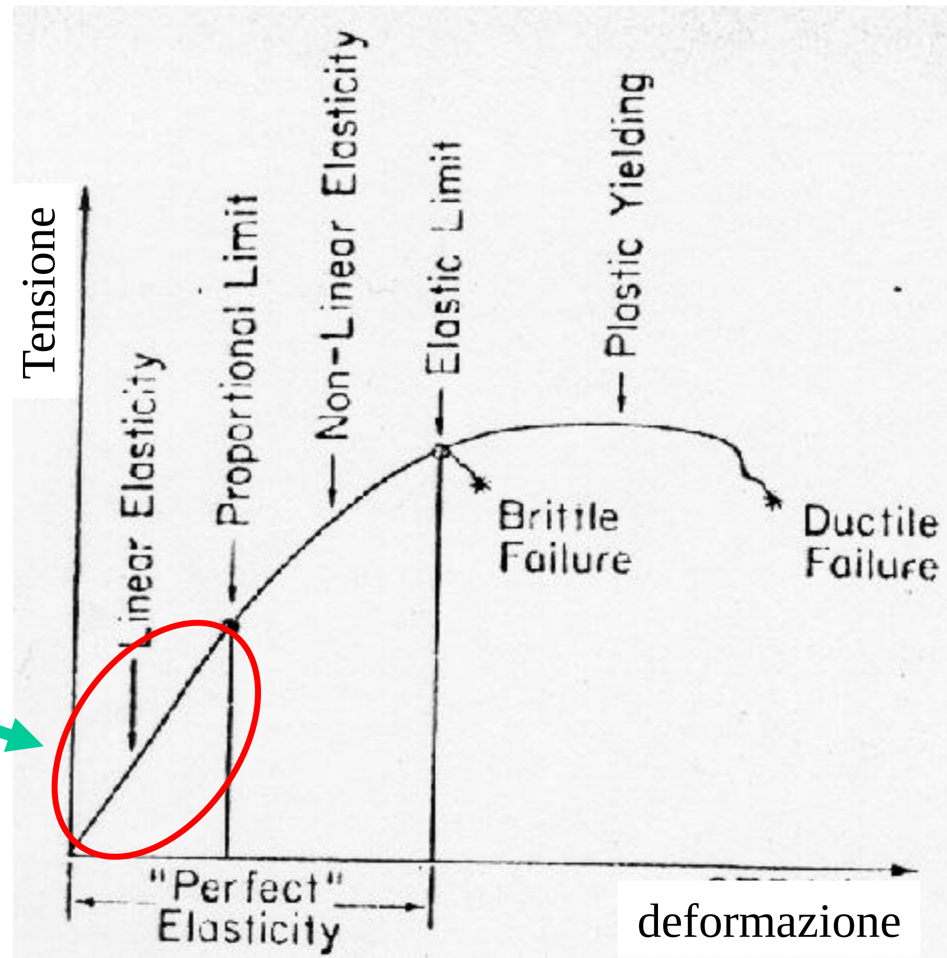
Forza proporzionale alla deformazione (compressione o allungamento)

in modulo $$|F| = k|\Delta x|$$

costante elastica della molla $[k]=N/m$

E' la forza esercitata da un corpo deformato, per deformazioni piccole e reversibili. **Deformazione elastica**.

la proporzionalità vale solo qui



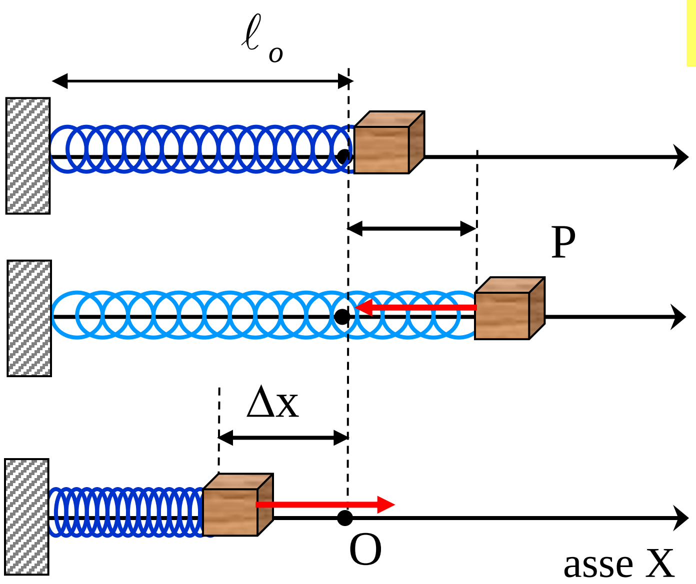
Forza elastica

Vettorialmente: $$\vec{F} = -k\Delta\vec{x}$$ forza di richiamo

Si consideri una molla con un estremo fisso.

- scelto l'asse X parallelo alla molla
- con l'origine nell'estremo libero (a riposo)

$$F = -k\Delta x = -kx$$ (legge di Hooke)



in questo caso $\Delta x = \ell - \ell_o$

Tratteremo solo molle ideali:

- per cui vale sempre F= -kx
- di massa trascurabile

Moto di un corpo soggetto alla sola forza elastica. Moto armonico

Equazione del moto armonico

$$\begin{cases} F = -k\Delta x = -kx \\ m\dfrac{d^2x}{dt^2} = -kx \end{cases}$$

posto $\omega = \sqrt{\dfrac{k}{m}}$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\left(\frac{k}{m}\right)x = -\omega^2 x$$

la soluzione generale si può scrivere $x(t) = A\cos(\omega t + \varphi)$

Le costanti si determinano dalle condizioni iniziali. Ad es.

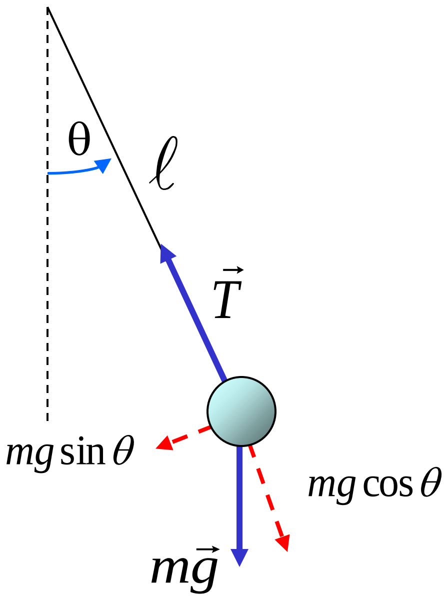
$$\begin{cases} x(0) = x_0 \\ v(0) = 0 \end{cases} \Rightarrow x(t) = x_0 \cos\omega t$$

$$\begin{cases} x(0) = 0 \\ v(0) = v_0 \end{cases} \Rightarrow x(t) = \frac{v_0}{\omega}\sin\omega t$$

Nota: il moto resta armonico anche in presenza di un'altra forza costante (es. peso) cambia solo il centro di oscillazione

il moto armonico è il moto caratteristico delle piccole oscillazioni intorno alla posizione di equilibrio.

Esempio di piccole oscillazioni intorno all'equilibrio. Pendolo semplice.



$$ma_T = F_T$$

componenti tangenti

$$m\ell\frac{d^2\theta}{dt^2} = -mg\sin\theta$$

se $\theta << 1\text{rad}$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = -\left(\frac{g}{\ell}\right)\sin\theta \cong -\omega^2\theta$$

posto $\omega = \sqrt{\dfrac{g}{\ell}}$ $\qquad \tau = 2\pi\sqrt{\dfrac{\ell}{g}}$

in questa approssimazione il periodo non dipende dall'ampiezza delle oscillazioni.

componenti radiali

$$T - mg\cos\theta = ma_N = m\frac{v^2}{\ell}$$

$$T = mg\cos\theta + m\frac{v^2}{\ell}$$

la tensione dipende dalla velocità

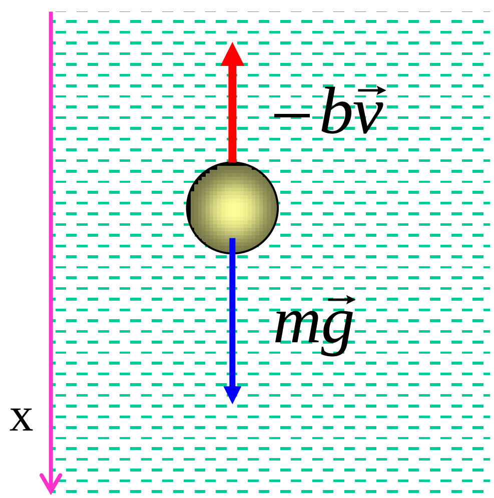
Attrito viscoso

la forza di attrito viscoso è caratterizzata da

- modulo proporzionale alla velocità *)
- direzione della velocità ma verso opposto (come l'attrito dinamico)

$$\vec{F}_V = -b\vec{v}$$

E' la forza che agisce tipicamente su corpi "piccoli" e "lenti" immersi in un fluido



$$m\vec{g} - b\vec{v} = m\vec{a} \qquad \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{g} - k\vec{v} \qquad \left(k = \frac{b}{m}\right)$$

se $v(0)=v_0$

$$v(t) = v_0 + \frac{g}{k}\left(1 - e^{-kt}\right)$$

come si vede, è sempre $\lim_{t\to\infty} v(t) = \frac{g}{k}$ velocità limite o di deriva

*) velocità relativa, cioè rispetto al fluido.

Attrito viscoso

la velocità limite si calcola facilmente, imponendo che $\mathbf{F}_{TOT}=0$

Resistenza del mezzo

Nei casi macroscopici, la resistenza del mezzo non è viscosa ma si può descrivere piuttosto con la formula

$$F_R = \frac{1}{2} c \rho S v^2$$

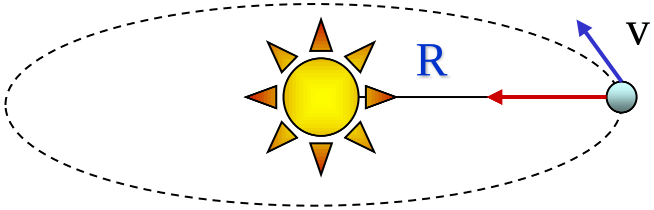
dove:

- c è il "coefficiente di resistenza" (o "di penetrazione"), in genere ricavato empiricamente
- ρ è la densità del fluido (*)
- S è la sezione frontale del corpo
- v è la velocità del corpo (rispetto al fluido)

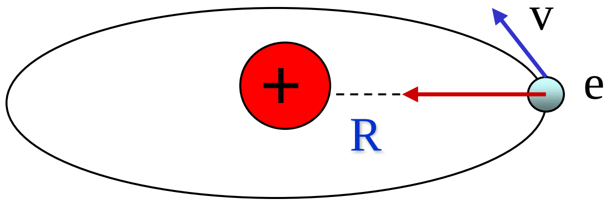
(*) la densità (di massa) è la massa per unità di volume e si misura in kg/m^3

per l'aria: $$1.2\ kg/m^3 \leq \rho \leq 1.3\ kg/m^3$$ (dipende dalla temperatura)

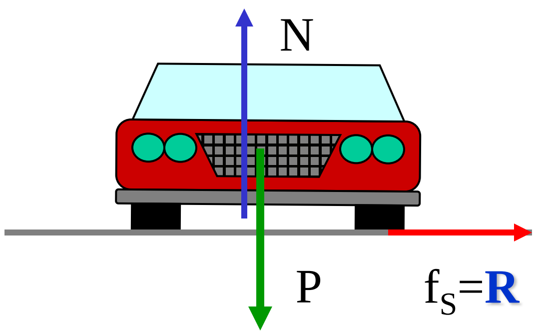
Esempi di moto circolare



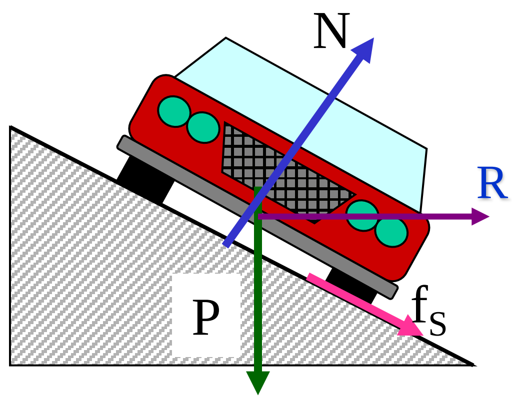
Moto planetario: forza gravitazionale



Atomo di idrogeno: forza elettrostatica



Curva piana: attrito statico



Curva inclinata: attrito statico e reazione normale

curva sopraelevata

Pendolo conico: tensione del filo