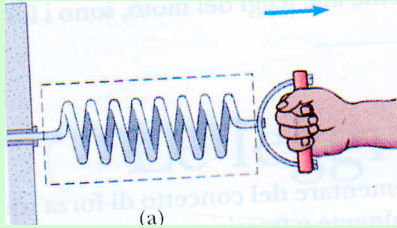
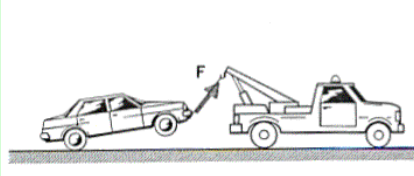


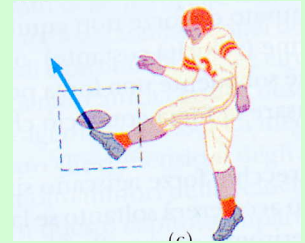
Dinamica

[studio delle cause del moto: **forze**]

Il termine **forza** nel senso comune indica una **trazione** o una **spinta**



(a)



(c)

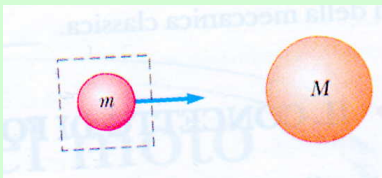
La forza è una grandezza **vettoriale**:

una trazione o spinta ha sempre

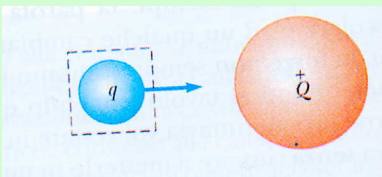
- ✗ una intensità (il modulo)
- ✗ una direzione
- ✗ un verso

forze di **contatto**: esprimono risultato di **contatto fisico** tra corpi

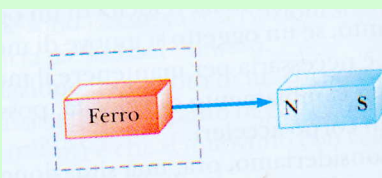
forze a **distanza**: agiscono attraverso lo **spazio vuoto**
[campi di forze]



forza **gravitazionale**



forza **elettrica**



forza **magnetica**

Forze in natura

In natura esistono **4 forze fondamentali** con cui è possibile descrivere tutti i fenomeni naturali noti:

✗ gravitazionale

... è responsabile di tutti i fenomeni astronomici
è la forza che percepiamo nel modo più immediato

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$

[... legge di **gravitazione universale** di Newton]

✗ elettromagnetica

... lega gli elettroni al nucleo
è responsabile dei fenomeni elettrici e magnetici

[... **equazioni di Maxwell**]

✗ nucleare forte

... lega i mattoni elementari della materia
mantiene unite le particelle
impedisce ai nuclei di disintegrarsi per repulsione fra protoni

[... la forma esplicita completa è tuttora ignota]

✗ nucleare debole

... assicura produzione di luce e calore per fusione nucleare
è responsabile dei decadimenti radioattivi.

[... La forma esplicita non è completamente nota]

Qualsiasi altra forza deriva da queste quattro

Forza peso $\vec{F} = -mg \hat{j}$ $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

Forza di attrito $\vec{F} = k\vec{N}$

Forza viscosa $\vec{F} = -k_0 \vec{v}$

Forza elettrostatica $\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r}$

Forza di Lorentz $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$

se la forza è una **quantità reale** deve essere **misurabile**
⇒ deve indurre **effetti** che possono essere **quantificati**

1600 Newton: esperimenti concettuali
(oggetto in moto su superficie senza attrito)



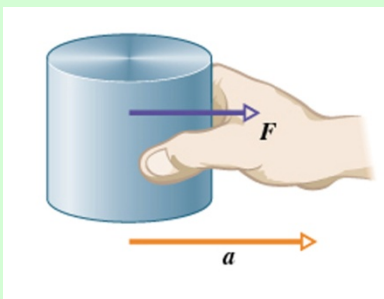
*non è nella natura di un oggetto fermarsi
una volta che sia posto in moto*

Prima legge di Newton [legge di inerzia]

*Un corpo rimane nel suo stato di **quiete** o nel suo stato di **moto rettilineo a velocità costante** se una forza risultante non nulla non lo costringe a variare il suo stato di moto*

✗ **assenza di forze** implica assenza di variazione di moto,
cioè assenza di accelerazione

$$\Sigma \vec{F} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{a} = 0$$



una forza F applicata ad un corpo
gli imprime una accelerazione

✗ un corpo senza accelerazione si dice in **equilibrio**

principio di relatività galileiana



perché quando si
viaggia in aereo
sembra di **muoversi**
lentamente?

aereo di linea:

velocità di crociera 800 km/h

atterraggio 200 km/h

è conseguenza del **principio di relatività galileiana**:

*non esistono differenze fisiche avvertibili
tra un **corpo in quiete** (perfettamente fermo)
e un **corpo che si muove**, anche a elevate velocità, con moto
rettilineo uniforme (cioè a velocità e direzione costanti)*

In altre parole:

se durante un volo aereo venissero **chiusi** tutti i finestrini e si riuscisse a **isolare** la cabina dal rumore dei motori e dalle vibrazioni, non si avrebbe alcuna possibilità di capire se si è fermi o in movimento.

*Le leggi della fisica hanno la stessa forma
in tutti i sistemi di riferimento inerziali,
cioè in moto tra loro di moto rettilineo uniforme !!!*

Sistemi di riferimento inerziali

La prima legge di Newton
non vale in tutti i sistemi di riferimento

*un sistema di riferimento è **inerziale**
se in esso vale la prima legge di Newton*

*qualunque sistema di riferimento in **moto** con **velocità costante** rispetto ad un riferimento inerziale e anch'esso **inerziale***

→ Sistemi di riferimento **accelerati NON** sono inerziali ←

esempio:

Uno scuola-bus fa una brusca frenata e gli zaini appoggiati sul pavimento scivolano in avanti. Come mai?

Gli zaini **continuano**
il loro stato di moto:

mantengono velocità che avevano
prima della frenata, anche quando
l'autobus frena.



Il loro moto **NON** è causato da forze $\Rightarrow$ non vale legge di inerzia

la **Terra NON** è un sistema inerziale

$$a_c = 4.4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

accelerazione **centripeta**
verso il Sole [moto attorno al sole]

$$a_c = 3.37 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

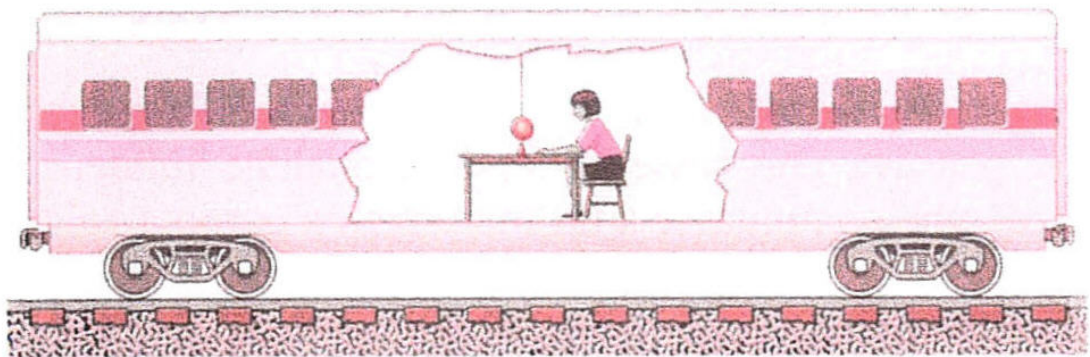
accelerazione **centripeta**
verso il centro della terra
[moto attorno all'asse terrestre]

sono **accelerazioni piccole** rispetto a $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

⇒ si suppone che un sistema di riferimento **vicino** alla superficie terrestre sia un riferimento inerziale

esempio:

prove su un vagone per verificare se è un sistema inerziale



La massa inerziale

Osservazione: una forza produce accelerazioni di intensità diversa su corpi diversi

esempio:

stesso calcio a

palla da baseball → **grande** accelerazione

palla da bowling → **piccola** accelerazione

la differenza di accelerazione è dovuta alla **differenza di massa**

corpi **meno** massicci ricevono
una accelerazione **maggiore**

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$$

massa

- proprietà **intrinseca** di un corpo
- indipendente da ciò che lo **circonda**
- indipendente dal **metodo** di misura
- grandezza **scalare**
- obbedisce alle regole di **aritmetica**

massa $\neq$ peso

massa: mette in relazione

forza applicata al corpo e accelerazione subita

peso: modulo della forza esercitata dalla terra sul corpo
(varia con la posizione)

esempio: Terra – Luna

$$m_{luna} = m_{terra}$$
$$peso_{luna} < peso_{terra}$$

Seconda legge di Newton

L'accelerazione di un oggetto è

✗ *direttamente* proporzionale alla **forza** risultante su di esso

✗ *inversamente* proporzionale alla sua **massa**

$$\vec{F}_{net} = \Sigma \vec{F} = m \vec{a} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Sigma F_x = m a_x \\ \Sigma F_y = m a_y \\ \Sigma F_z = m a_z \end{array} \right.$$

[N.B. si considerano solo le forze che **agiscono sul corpo**
NON tutte le forze presenti nel problema!!]

*un corpo è in **equilibrio** quando
la somma di tutte le forze agenti è nulla
[cioè forza netta o forza risultante nulla]*

$$\vec{F}_{net} = 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \Sigma F_x = 0 \\ \Sigma F_y = 0 \\ \Sigma F_z = 0 \end{array} \right.$$

Dimensioni e Unità di misura

$$[Forza] = [M] \cdot [a] \Rightarrow kg \cdot \frac{m}{s^2} = N = \text{Newton}$$

Unità di misura nella seconda legge di Newton

Sistema	Forza	Massa	Accelerazione
SI	newton (N)	kilogrammo (kg)	m/s ²
CGS ^a	dyne	grammo (g)	cm/s ²
Inglese ^b	libbra (lb)	slug	ft/s ²

^a 1 dyne = 1 g · cm/s².

^b 1 lb = 1 slug · ft/s².

Terza legge di Newton

[principio di azione e reazione]

Se due corpi interagiscono le forze esercitate da un corpo sull'altro sono

✗ *uguali in modulo e direzione*

✗ *opposte in verso*

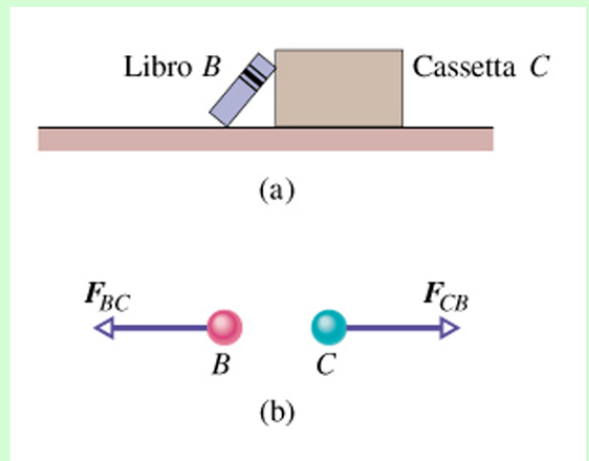
$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

esempio:

libro B appoggiato
su cassetta C

F_{CB} = forza esercitata
da libro su cassetta

F_{BC} = forza esercitata
da cassetta su libro



le forze di azione e reazione agiscono sempre su **corpi diversi:**

✗ non si combinano in una forza risultante;

✗ non si elidono a vicenda.

Esempi di forze azione-reazione

1. Lancio di un razzo:

- ▶ motore spinge gas verso il basso
- ▶ gas spinge razzo verso l'alto

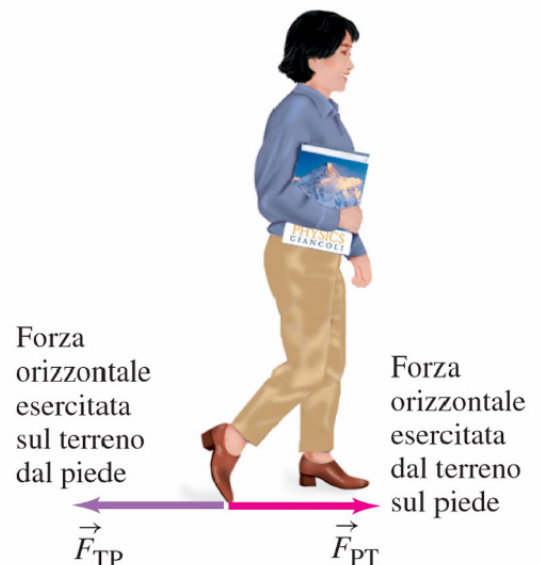
sono forze uguali e contrarie !!



2. Come camminiamo:

- ▶ la persona preme il piede spingendo **indietro** il terreno
- ▶ il terreno spinge il piede **in avanti**

sono forze uguali e contrarie !!



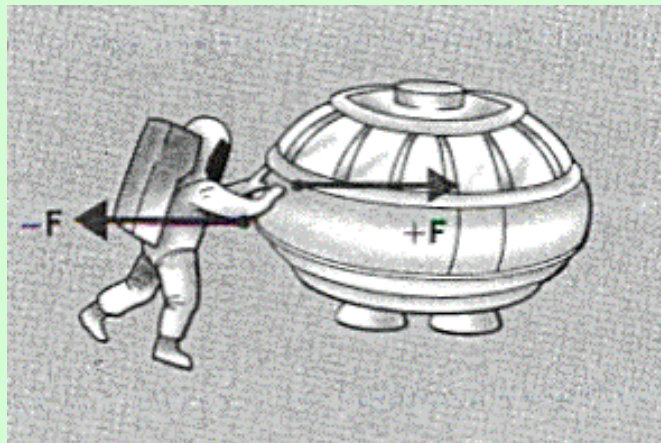
effetto indotto dalle forze di azione e reazione
può essere sensibilmente differente

esempio:

$$F = 36 \text{ N}$$

$$m_{\text{astronave}} = 11000 \text{ kg}$$

$$m_{\text{uomo}} = 92 \text{ kg}$$



$$a_{\text{astronave}} = \frac{36}{11000} = 0.0033 \text{ m/s}^2$$

$$a_{\text{uomo}} = \frac{-36}{92} = -0.39 \text{ m/s}^2$$

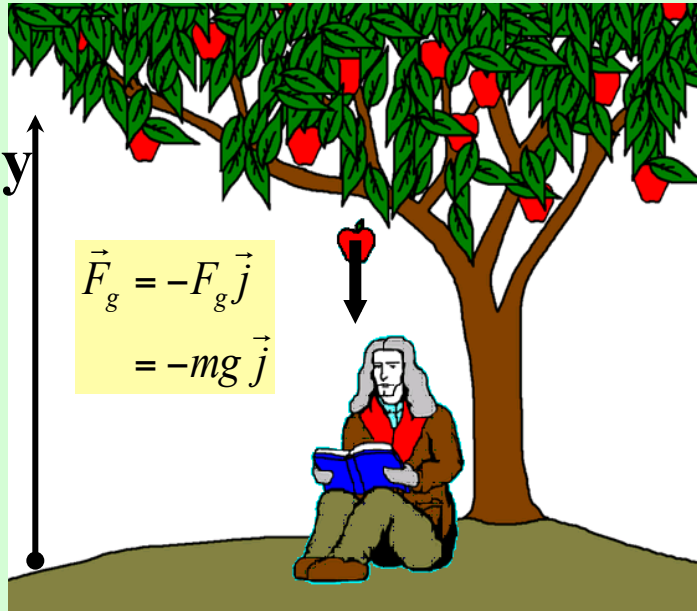
Alcune Forze Particolari

Forza gravitazionale

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$$

forza di **attrazione** di un corpo verso un altro corpo



se il secondo corpo è la **terra**:

$\vec{F}_g$ diretta verso il centro della terra

ogni corpo in **caduta libera** subisce accelerazione **g** diretta verso il centro della terra

✗ **g** varia con la posizione geografica

✗ diminuisce all'aumentare dell'altezza

$$g = G \frac{M_{terra}}{r^2}$$

N.B. se $r = R_T = 6370 \text{ km} \Rightarrow g = G \frac{M_{terra}}{r^2} = 9.8 \text{ m/s}^2$

Altitudine (km)	g (m/s ²)	
0	9.83	superficie media terrestre
8.8	9.80	Everest
36.6	9.71	max quota pallone con equipaggio
400	8.70	navette spaziali
35700	0.225	satellite geostazionario telecomunicazioni

Forza peso

- ✗ *modulo* della forza netta richiesta per evitare che il corpo cada
- ✗ *modulo* della forza gravitazionale

$$P = mg$$

$$\vec{P} = -mg \vec{j} = m\vec{g}$$

peso dipende da **g** $\Rightarrow$ varia con la posizione geografica
massa NON dipende da **g** $\Rightarrow$ proprietà intrinseca

esempio:

$$g_{terra} = 9.8 \text{ m/s}^2 \Rightarrow p_{terra} > p_{luna}$$

$$g_{luna} = 1.62 \text{ m/s}^2 \quad m_{terra} = m_{luna}$$

$$g = G \frac{M}{r^2}$$



$$\begin{aligned} R_T &= 6370 \text{ km}, & M_T &= 5.976 \times 10^{24} \text{ kg} \\ R_L &= 1737 \text{ km}, & M_L &= 7.349 \times 10^{22} \text{ kg} \end{aligned}$$

N.B. NON è corretto esprimere il peso in kg !!!!

Il peso è il modulo di una forza e si esprime in Newton [N].

Il peso di una massa di 1 kg è uguale a 9.81 N.

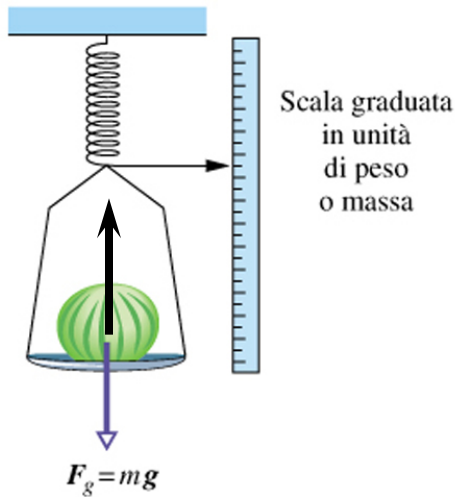
Si definisce *chilogrammo peso*, $kg_w \equiv 1 \text{ kg} \cdot g$, da cui la confusione.

$$1 \text{ kg}_w = 9.81 \text{ [N]} = 9.81 \text{ [kg m s}^{-2}] \neq 1 \text{ kg [kg]}$$

anche se hanno lo stesso valore

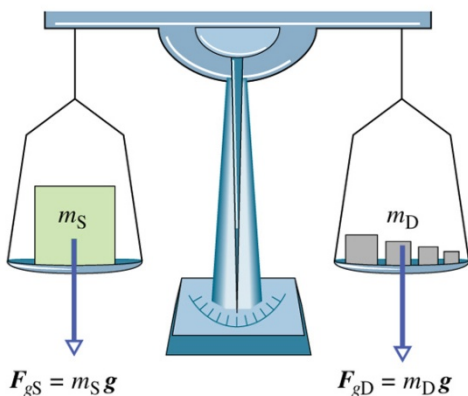
Misure di peso

Bilancia a molla [dinamometro]:



peso del corpo **allunga** molla tarata in unità di massa o peso, muovendo un indice su scala graduata

Bilancia a confronto:



si misura il peso di un oggetto **confrontandolo** con dei pesi noti. Quando la bilancia è in equilibrio i due pesi sono uguali

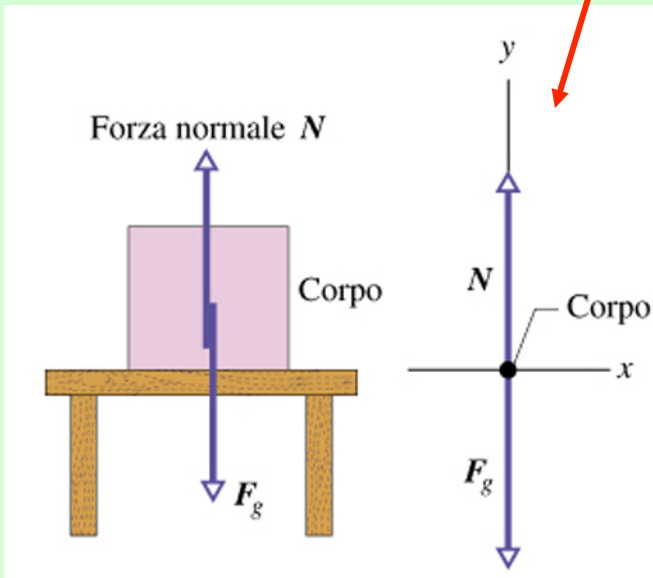
Forza normale

Se un corpo *preme* su una superficie:

- ✗ la superficie si deforma (anche se apparentemente rigida)
- ✗ spinge il corpo con forza normale N
- ✗ N è sempre perpendicolare alla superficie stessa

esempio:

diagramma
del corpo libero



$$\Sigma F_y = N - F_g = m a_y$$

$$N - mg = m a_y$$

$$N = mg + m a_y = m(g + a_y)$$

$$a_y = 0 \Rightarrow N = mg$$

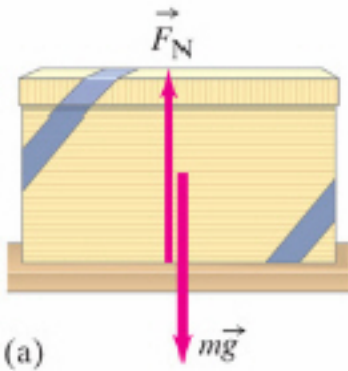
la forza normale **bilancia** il peso e determina l'equilibrio

che **differenza** c'è tra forza **normale** e forza **peso** ?
sono sempre **uguali** ?

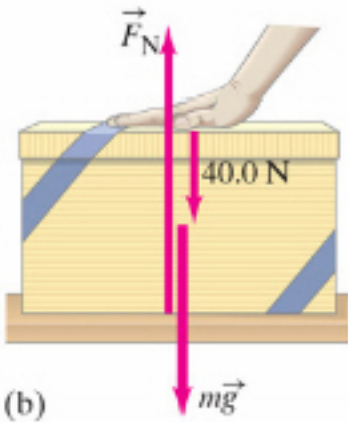
La **forza normale NON** è necessariamente uguale al **peso** !



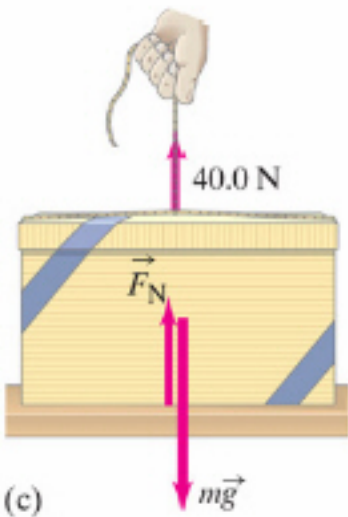
esempio: scatola a riposo su tavolo: $\sum F_y = 0$



$$\sum F_y = N - mg = 0$$
$$N = mg$$

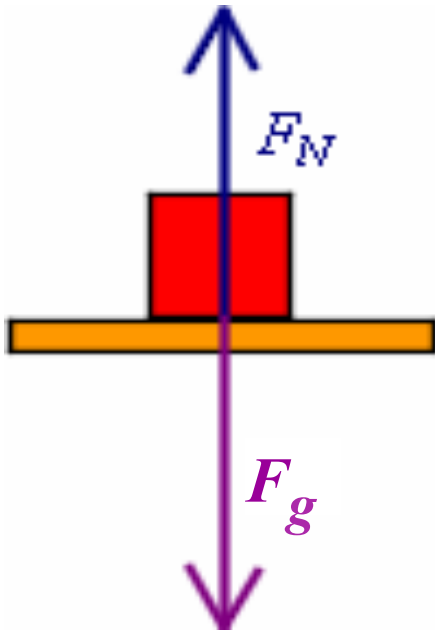


$$\sum F_y = N - mg - 40\text{ N} = 0$$
$$N = mg + 40\text{ N}$$



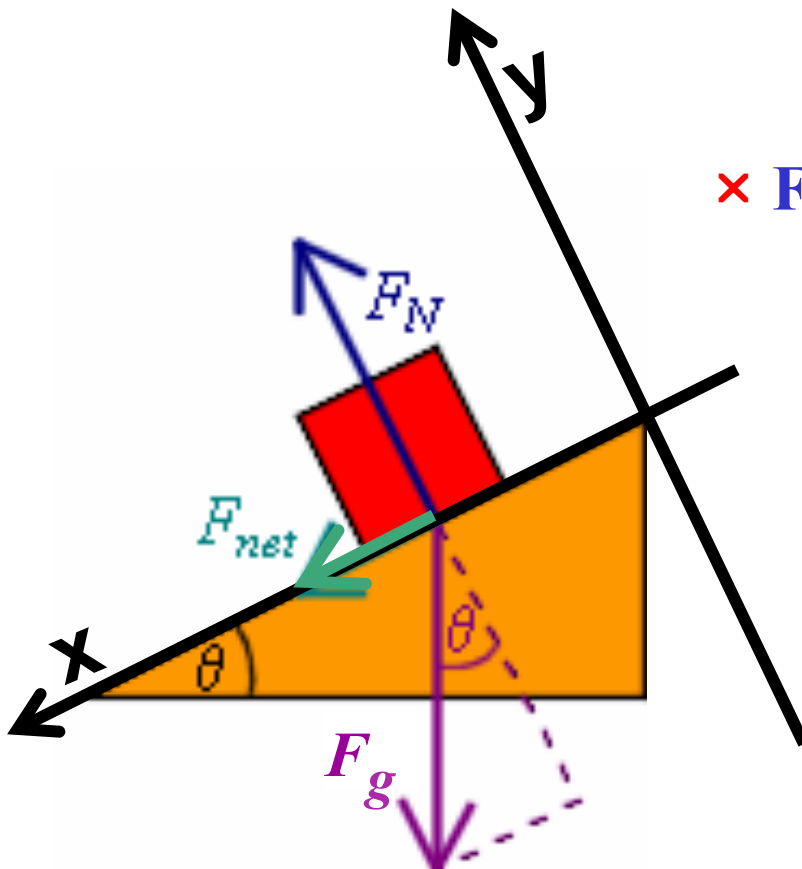
$$\sum F_y = N - mg + 40\text{ N} = 0$$
$$N = mg - 40\text{ N}$$

La **forza normale** **NON** è necessariamente **verticale** !



× F_N è sempre **perpendicolare** alla superficie di **appoggio**

× F_g è sempre **perpendicolare** alla superficie della **terra**



× F_N **non** sempre bilancia F_g

$$\sum F_x = F_g \sin \theta = ma_x \neq 0$$

$$\sum F_y = F_N - F_g \cos \theta = 0$$

F_N bilancia **SOLO** componente di F_g normale al piano di appoggio

Tensione

filo fissato ad un corpo soggetto ad una forza

✗ *il filo è sotto tensione*

✗ *il filo esercita sul corpo una forza di trazione T*

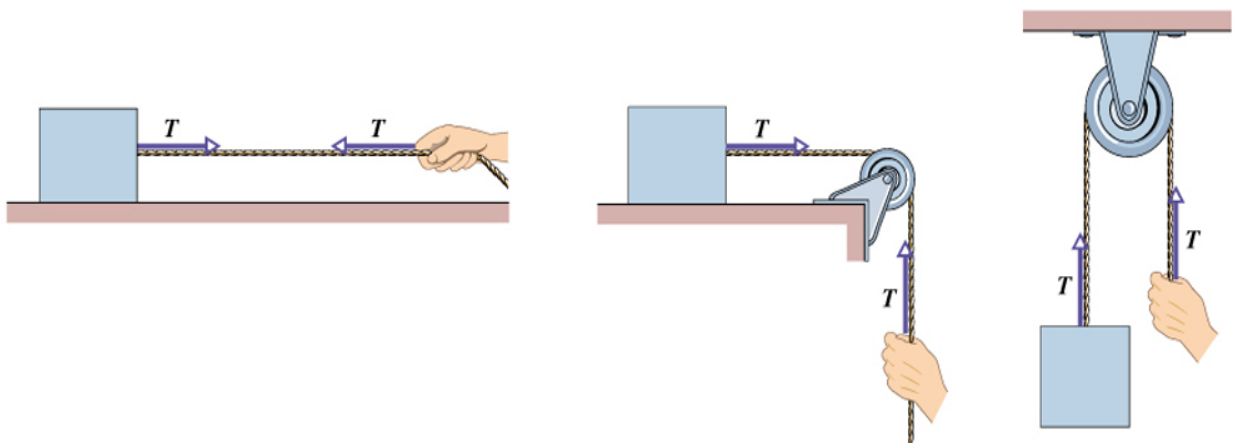
*diretta **lungo** il filo nel verso di **allontanamento** dal corpo con modulo*

tensione nella corda = modulo T
della forza agente sul corpo

N.B. se la corda ha **massa trascurabile**
forza esercitata ad un capo è **trasmessa** per tutta la corda
fino al capo opposto, infatti:

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = 0 \quad \text{sempre, dato che } m=0$$

⇒ forze ai capi della corda sono uguali ed opposte!



applicazione: utilità di una carrucola

Un facchino impiega una fune passante attorno a **due carrucole** per sollevare un pianoforte del peso di 2000 N.

Quale forza deve esercitare sulla fune?

N.B.

Per fune di massa trascurabile
il modulo della forza **tensione**
è lo stesso in ogni punto della fune

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = \vec{T} + \vec{T} + \vec{F}_g$$

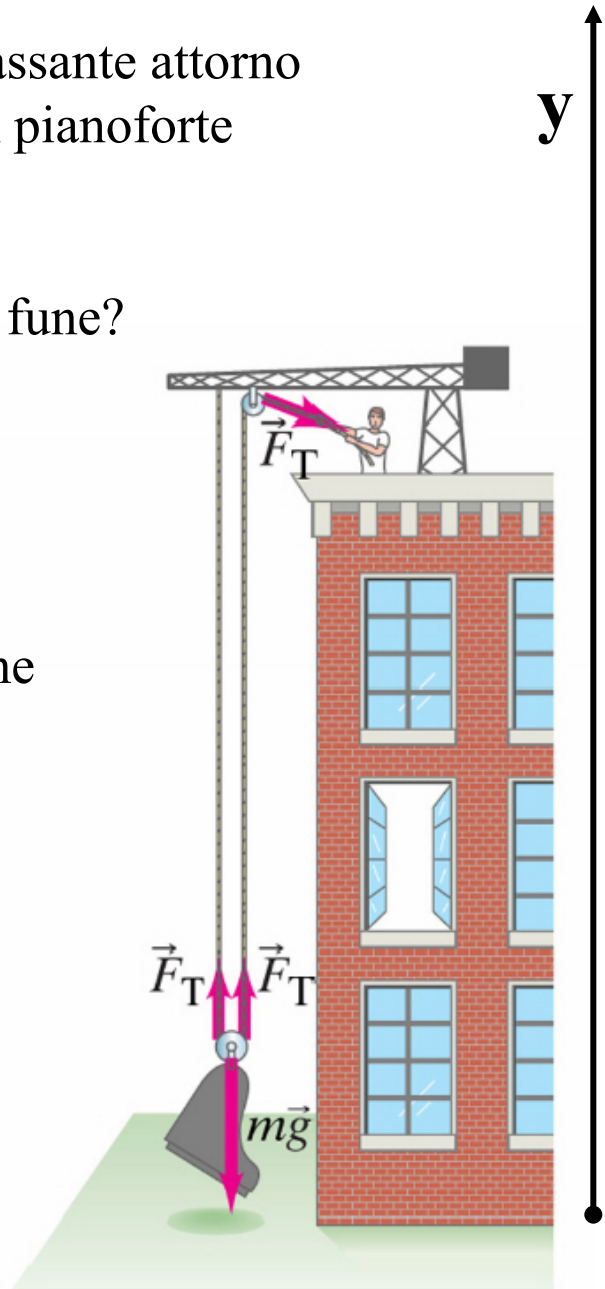
$$ma = 2T - mg$$

Per far muovere il pianoforte
con velocità costante:

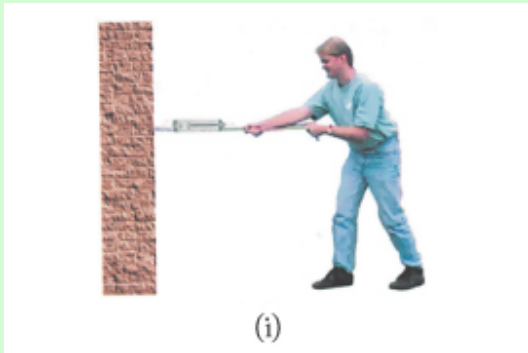
$$ma = 2T - mg = 0$$

$$T = mg / 2$$

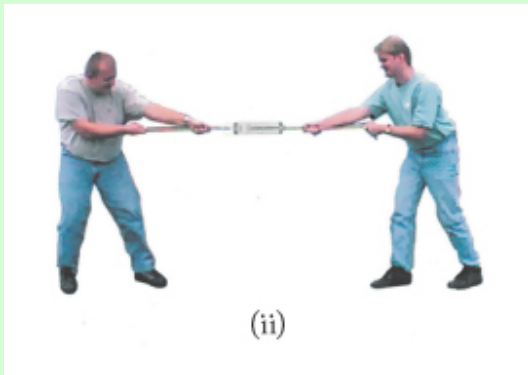
- ▶ la carrucola fornisce un **vantaggio meccanico** pari a **2**
- ▶ senza la carrucola $T = mg$



esempio: tiro alla fune



un individuo tira con forza **F**
una fune attaccata alla **parete**
non c'è accelerazione



due individui tirano con forza **F**
in **versi opposti** una fune
non c'è accelerazione

cosa segna il dinamometro al centro della fune?

il dinamometro è in equilibrio in entrambi i casi

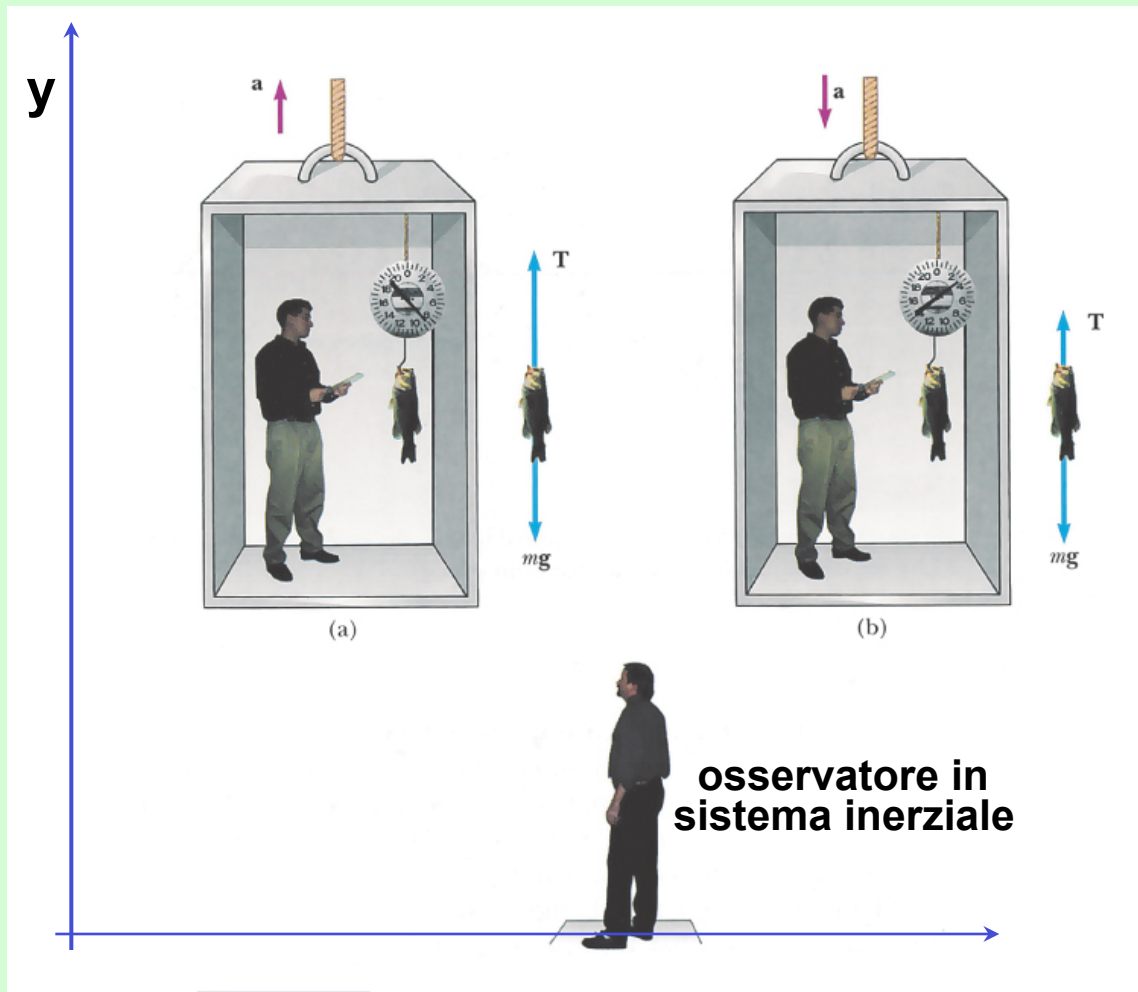
$$\Rightarrow \vec{F}_{net} = \vec{F} + \vec{T} = 0$$

ciascun individuo è in equilibrio

il dinamometro segna **F** in entrambi i casi !!!

applicazione: **peso di un oggetto** in ascensore

ascensore accelerato **NON** è
sistema di riferimento inerziale



$$\Sigma F_y = T - mg = m a_y$$
$$T = mg + m a_y > mg$$

$$\Sigma F_y = T - mg = -m a_y$$
$$T = mg - m a_y < mg$$

se ascensore è **fermo**
in moto con **velocità costante**
il sistema di riferimento è **inerziale**

$$a_y = 0$$

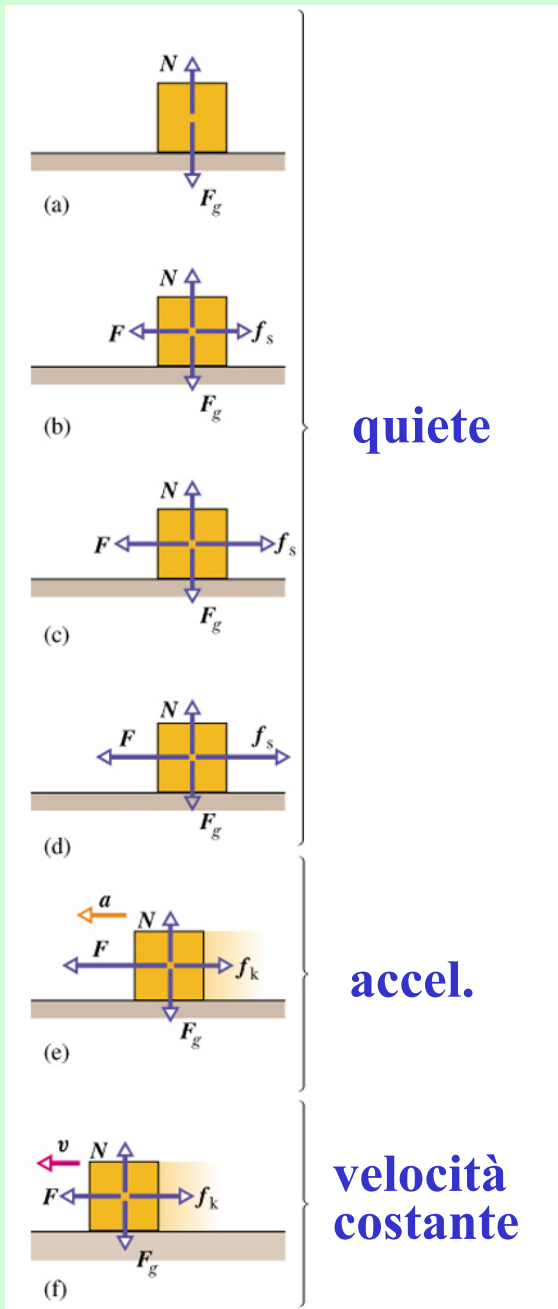
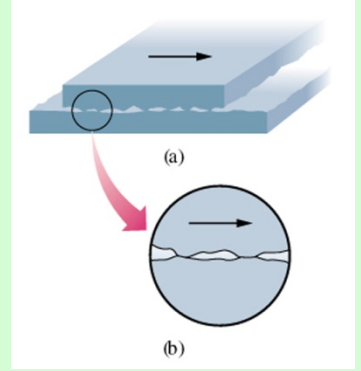
$$\Sigma F_y = T - mg = 0$$

esercizi dinamica

Forza di Attrito Statico

forza necessaria per *mettere in moto*
un corpo di massa M su una superficie k

proviene dalla **scabrosità** delle superfici
[coinvolge anche forze elettrostatiche]



quiete

accel.

**velocità
costante**

corpo in quiete
non applico nessuna forza.

applico forza $F < f_s$
il corpo rimane fermo

aumento F ma sempre $F < f_s$
il corpo rimane fermo

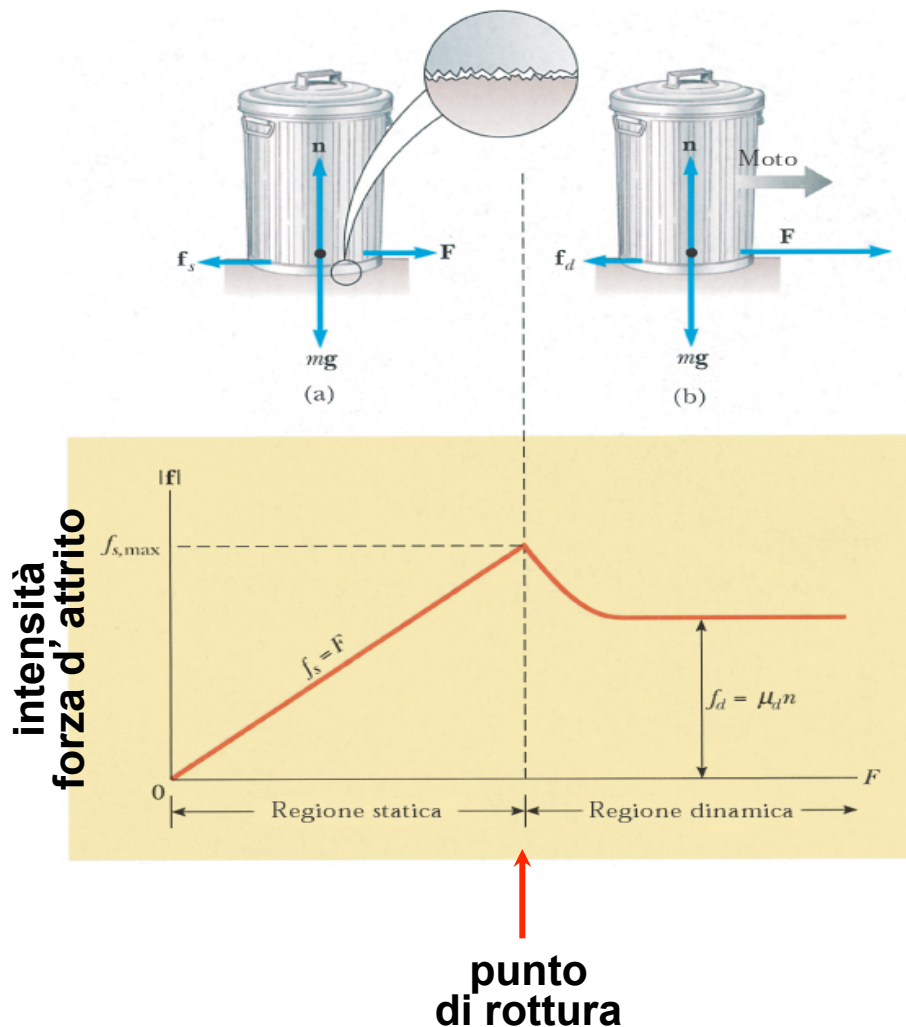
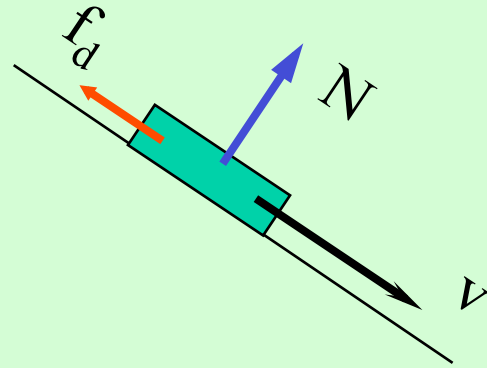
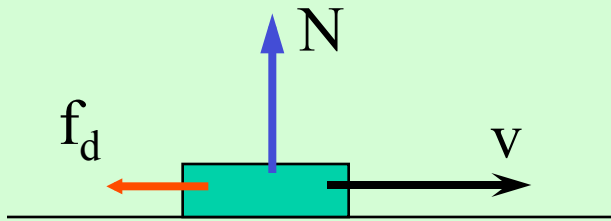
$F = f_s$
il corpo rimane fermo

se $F > f_k$
il corpo acquista accelerazione **a**

per mantenere **v** costante riduco F :
 $F < F_{\max}$

Forza di Attrito Dinamico

*forza che si oppone a qualsiasi moto di un corpo che **striscia** su un materiale*



proprietà attrito

$$f_s \leq \mu_s N$$

μ_s **coefficiente** attrito **statico**

$$f_d = \mu_d N$$

μ_d **coefficiente** attrito **dinamico**

- ✗ μ_s, μ_d dipendono dai **materiali** a contatto [$0.05 < \mu < 1.5$]
- ✗ $\mu_d < \mu_s$
- ✗ μ_s, μ_d **non** dipendono dall'**area** di contatto
- ✗ $\vec{f}_s, \vec{f}_d$ **parallele** alla superficie e **opposte** al moto

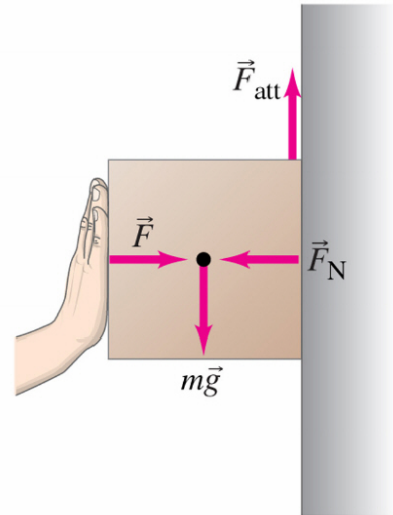
coefficienti di attrito

Materiale	Statico	Dinamico o Radente
Acciaio su acciaio	0.74	0.57
Acciaio su acciaio lubrificato	0.11	0.05
Alluminio su acciaio	0.61	0.47
Rame su acciaio	0.53	0.36
Ottone su acciaio	0.51	0.44
Vetro su vetro	0.94	0.40
Rame su vetro	0.68	0.53
Teflon su teflon	0.04	0.04
Teflon su acciaio	0.04	0.04
Acciaio su aria	0.001	0.001
Acciaio su ghiaccio	0.027	0.014
Legno su pietra	0.7	0.3
Gomma su cemento asciutto	0.65	0.5
Gomma su cemento bagnato	0.4	0.35
Gomma su ghiaccio asciutto	0.2	0.15
Gomma su ghiaccio bagnato	0.1	0.08
Grafite su grafite	0.1	
Gomma su asfalto		0.97

esempio 1: scatola contro un muro

come può una **forza orizzontale** impedire ad un oggetto di **muoversi verticalmente**?

1. ho bisogno di attrito
2. devo premere abbastanza



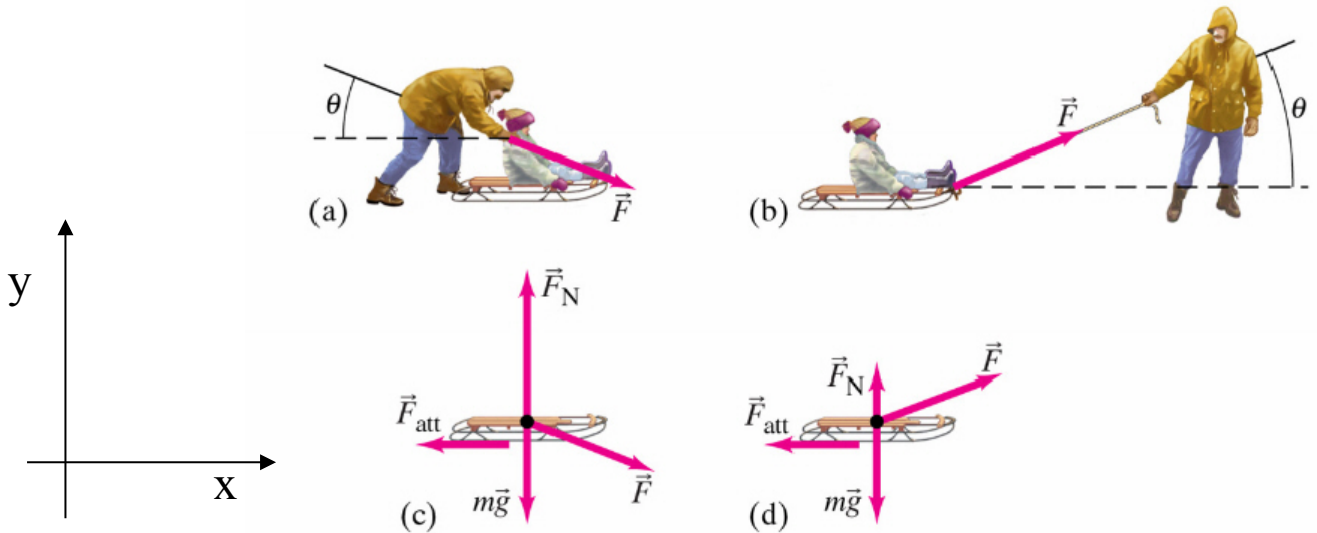
$\vec{F}$ contrasta $\vec{N}$

$F_s = \mu_s N$ contrasta $\vec{F}_g = m\vec{g}$

$mg < \mu_s N$ scatola resta ferma

$mg > \mu_s N$ scatola scivola

esempio 2: serve più forza per spingere o tirare ?



$$\vec{F}_{net} = m\vec{a} = \vec{F} + \vec{N} + \vec{F}_g + \vec{F}_{att}$$

se **spingo**:

$$\text{asse } y: -F \sin \theta + N - mg = 0$$

$$N = mg + F \sin \theta > mg$$

se **tiro**:

$$\text{asse } y: +F \sin \theta + N - mg = 0$$

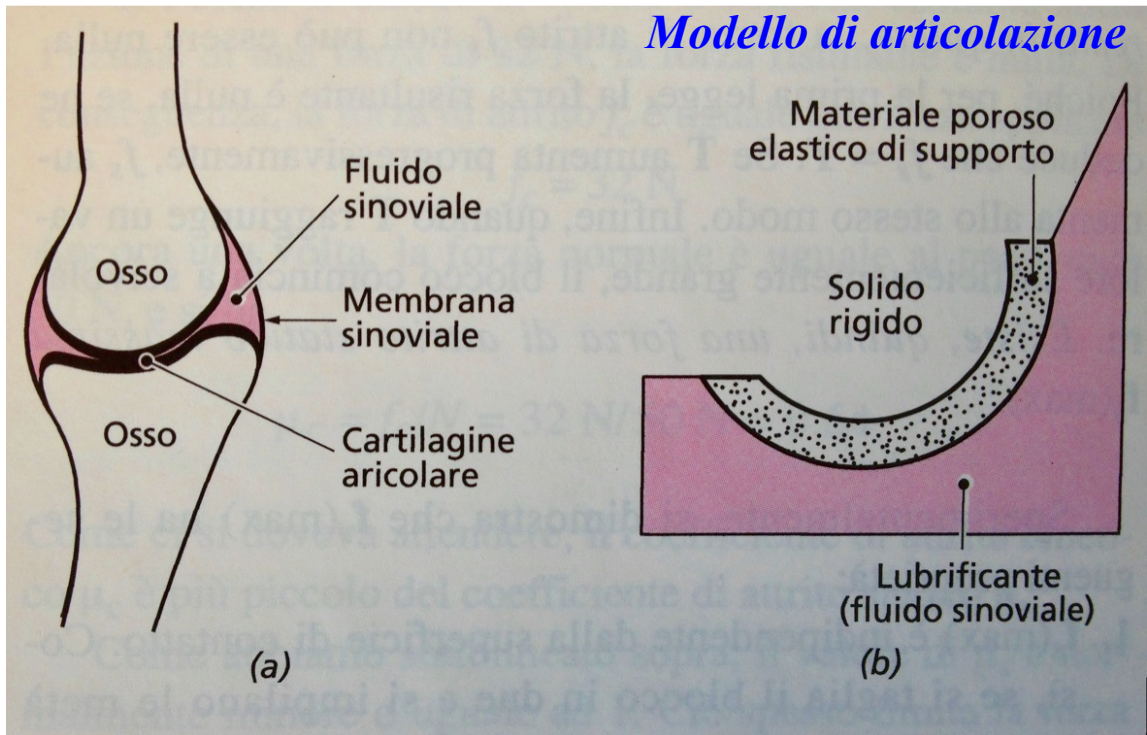
$$N = mg - F \sin \theta < mg$$

$\Rightarrow F_{att} = \mu_D N$ è minore quando si tira !!!

esempio 3: ingegneria biologica impiegata dalla natura

Camminando o correndo **NON** siamo coscienti delle forze di attrito che si esercitano sulle ginocchia e sulle articolazioni.

Le articolazioni sono lubrificate dal fluido sinoviale



Durante il movimento il fluido scorre attraverso la cartilagine che riveste le articolazioni, sotto l'effetto della pressione che vi agisce.

Quando l'articolazione è in quiete viene riassorbito.

ATTENZIONE: esistono ALTRE forze di attrito NON Costanti e dipendenti dalla velocità

Forze di resistenza o ritardanti

[dipendenti dalla velocità]

studio **interazione** tra corpo e mezzo nel quale si muove:

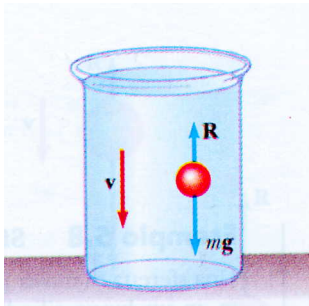
*il mezzo (liquido o gas) esercita una **forza ritardante** R sul corpo che si muove attraverso di esso*

- ✗ **modulo** di R : funzione complessa di velocità $\mathbf{v}$
- ✗ **direzione** e **verso**: opposti al moto

Caso 1.

$$R \propto v$$

[**esempio**: oggetti che cadono in fluidi con *bassa velocità*;
oggetti piccoli in aria (polvere)]



$$\vec{R} = -b \vec{v}$$

b = coeff. dipendente da proprietà
oggetto [forma, dimensioni]

Caso 2.

$$R \propto v^2$$

[**esempio**: oggetti grandi
che cadono in aria a *velocità elevate*
(aerei, paracadutisti ...)]

$$R = \frac{1}{2} D \rho A v^2$$

ρ = densità **aria**

A = area sezione **oggetto**

D = coeff. di **resistenza**
(coeff. aerodinamico)

[≈ 0.5 sfera, ...

≈ 2 oggetto irregolare]

esempio 1: legge di caduta dei gravi e resistenza dell'aria

Il campo gravitazionale terrestre applica ad ogni corpo la stessa accelerazione $g = \text{cost}$, a prescindere dalla sua massa e dalla sua forma.

Il fatto che una piuma e un sasso NON presentino la stessa legge del moto se fatti cadere dalla stessa quota è solo una conseguenza della *resistenza dell'aria* (che dipende da: A , v e D)



tubo pieno d'aria
(a)



tubo da cui è stata
estratta l'aria
(b)

esempio 2: aerodinamica ...



posizione a uovo:

- ▶ rende minima l' area efficace della sezione trasversale
- ▶ riduce resistenza dell' aria



auto aereodinamica:

- ▶ fasce laterali riducono resistenza dell' aria



posizione ad aquila ali distese:

- ▶ rende massima la resistenza dell' aria

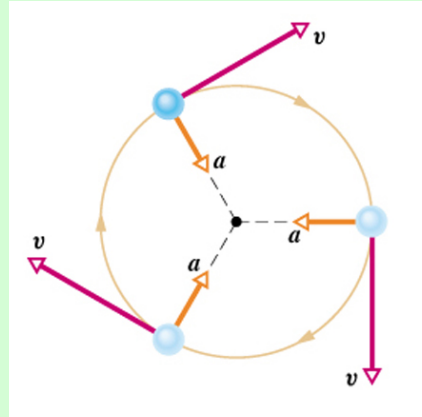
esercizi attrito

Forza centripeta [moto circolare uniforme]

corpo con:

- ✗ velocità **v** costante in modulo
- ✗ lungo **traiettoria circolare**

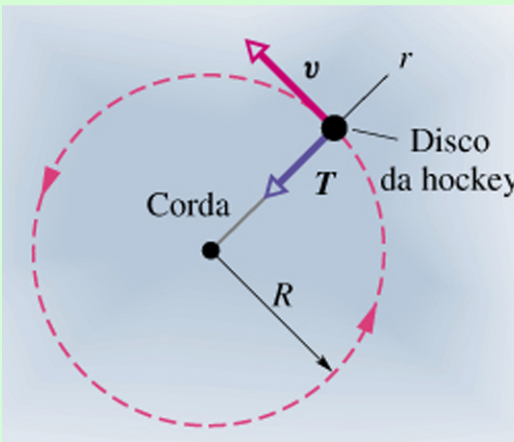
subisce accelerazione centripeta:



$$a_r = \frac{v^2}{r}$$

- ✗ diretta verso il **centro** circonferenza
- ✗ sempre **perpendicolare** a **v**

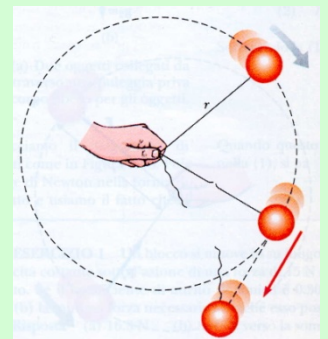
esempio: disco su traiettoria **circolare**



inerzia del disco: moto su linea retta
tensione del filo: mantiene
traiettoria circolare

$$T = F_r = ma_r = m \frac{v^2}{r}$$

se **rompo** il filo il disco si muove
lungo **linea retta** tangente alla circonferenza
[**v** è infatti **costante**]



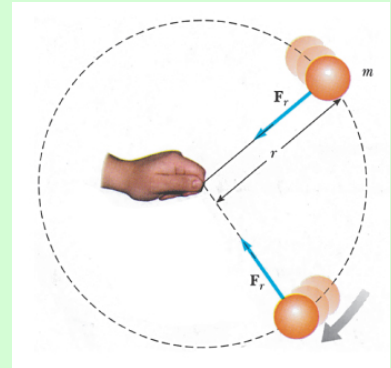
Attenzione:

- ▶ la **forza centripeta** **NON** è un **nuovo tipo** di forza
- ▶ è una **qualunque forza** che causa una **accelerazione centripeta**

esempi:

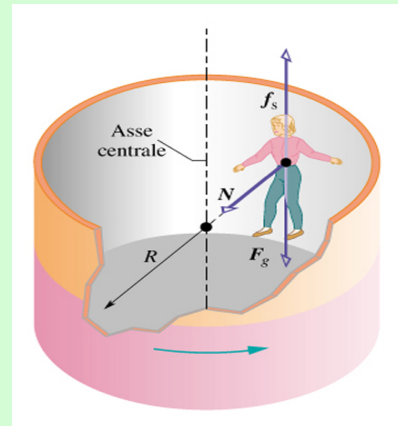
palla trattenuta da un filo

$$\rightarrow \vec{F}_r = \vec{T}$$



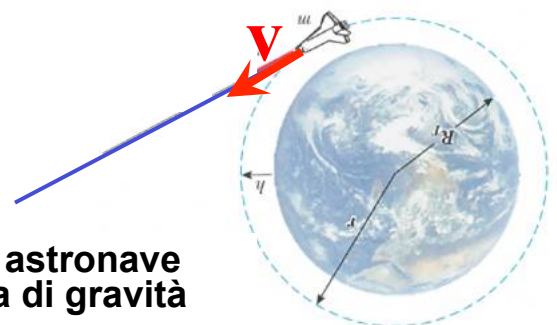
rotore del parco dei divertimenti

$$\rightarrow \vec{F}_r = \vec{N}$$



satellite attorno alla terra

$$\begin{aligned} \rightarrow \vec{F}_r &= m\vec{g} \\ &= m \frac{GM_T}{(R_T + h)^2} \hat{r} \end{aligned}$$



traiettoria astronave
in assenza di gravità

applicazione: **centrifuga/ultracentrifuga** **di laboratorio**

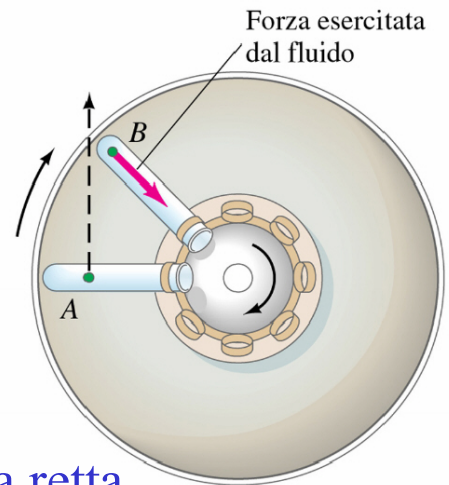
dispositivo utilizzato per
sedimentare rapidamente
o **separare materiali**
con caratteristiche diverse

posizione A:

la particella tende a proseguire in linea retta

forza **centripeta** $\Rightarrow$ **resistenza del fluido**

visione dall'alto



*a **velocità elevate** la resistenza del fluido **NON** riesce a
mantenere le particelle sulla **traiettoria circolare***

$\Rightarrow$ **particelle raggiungono velocemente
il fondo della provetta**

si provoca una **gravità artificiale**
(fino a **10^6 g !!**)

a causa dell'alta velocità di rotazione

$\Rightarrow$ rapida sedimentazione,
più che in presenza di gravità normale

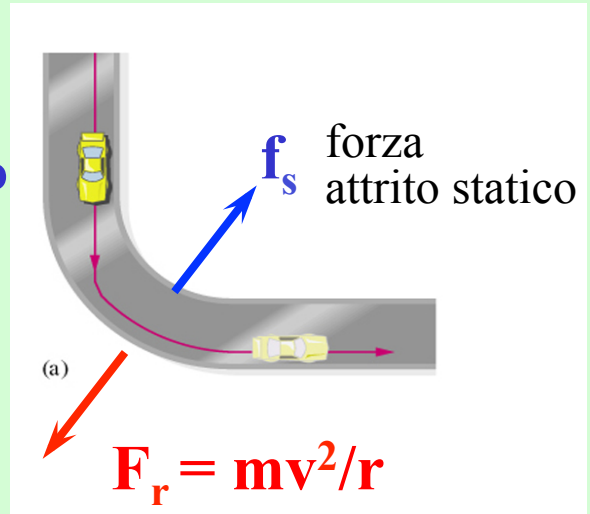
esercizi forza centripeta

Forza centrifuga [forza apparente]

esempio 1:

autista dell'automobile sente una forza che lo porta verso l'**esterno**

questa forza è detta forza **centrifuga**



forza centrifuga: forza **apparente**,
viene sentita **solo** se l'osservatore
non è fermo o in moto rettilineo uniforme
[ossia in **sistemi non inerziali**]

N.B. per un osservatore in moto con l'auto
(sistema **non inerziale**):

- ▶ auto **non** è soggetta ad accelerazione
- ▶ introduce forza centrifuga **fittizia**
per equilibrare forza centripeta

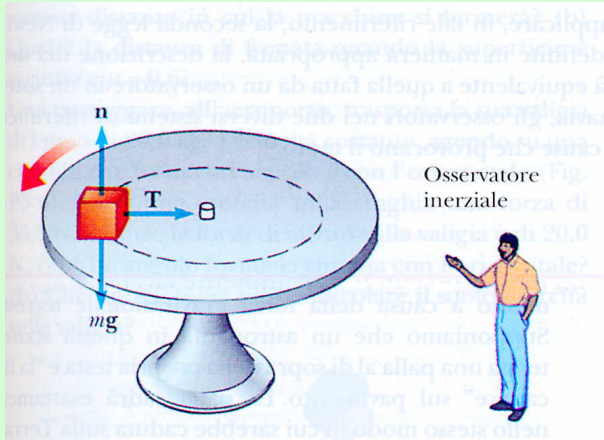
$$F_r = m \frac{v^2}{r}$$

Fuori Programma

esempio 2:

Fuori Programma

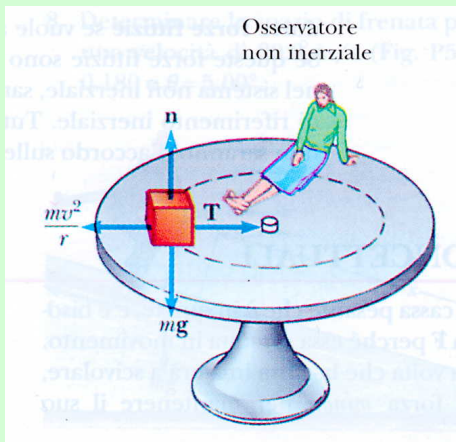
blocco di massa **m** fissato ad una fune su piattaforma rotante



osservatore **inerziale**:

vede il corpo che si muove lungo traiettoria circolare

$$T = F_r = m \frac{v^2}{r}$$



osservatore **NON** inerziale:

vede il blocco in quiete

⇒ introduce una forza

[detta centrifuga]

che equilibra la tensione del filo

$$T - m \frac{v^2}{r} = 0$$

- ✗ le forze fittizie sono usate **solo** in sistemi accelerati
- ✗ **non** rappresentano forze **reali**

Nota su Forza centrifuga

La forza centrifuga **è una forza “apparente”** che percepiamo quando ci troviamo in un sistema di riferimento **NON inerziale** (cioè che subisce un'accelerazione)

esempio:

Se siamo su una ***moto in curva***, noi e la moto, per curvare, avremo applicata una forza centripeta, che sarà in equilibrio (3° principio) con la reazione vincolare, della strada e del sellino. Poiché noi siamo sulla moto e siamo collegati, in ogni istante, al sistema che genera la reazione vincolare, quello che percepiamo non è la forza centripeta ma la reazione vincolare ad essa, cioè la forza centrifuga.

La forza centrifuga (apparente perché non esiste nel sistema inerziale in cui descriviamo il moto) è, come ogni reazione vincolare, uguale ed opposta alla forza (centripeta) che la genera.

Forze Variabili

- 1. Forza gravitazionale**
- 2. Forza Elettrostatica**

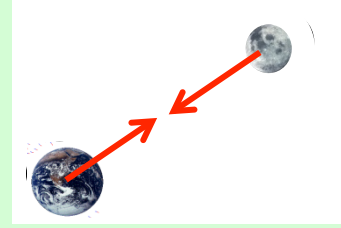
- 3. Forza Elastica**

Forza Gravitazionale

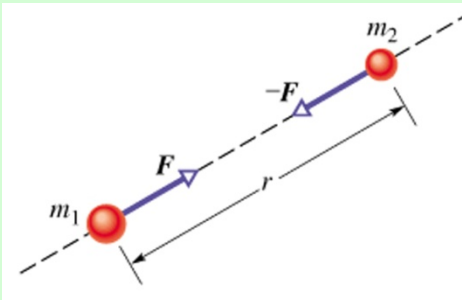
forza di **attrazione reciproca** fra **due corpi** qualsiasi nell'universo



Terra attira mela
mela attira Terra



Terra attira Luna
Luna attira Terra



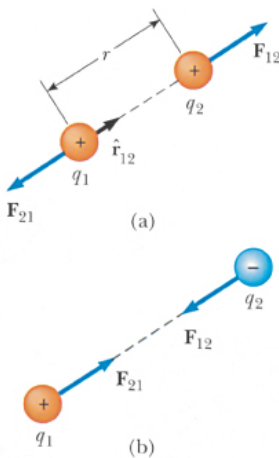
$$|\vec{F}_g| = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$$

- × esempio di **azione** e **reazione**
- × **intensa** fra corpi **macroscopici**
- × la **più debole** fra le forze

Forza Elettrostatica

forza di **attrazione/repulsione reciproca** fra **due cariche puntiformi**



$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{r}_{12}$$

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad \text{azione e reazione}$$

$$\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ C}^2 / \text{N} \cdot \text{m}^2$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$$

esempio: sistema **protone-elettrone**

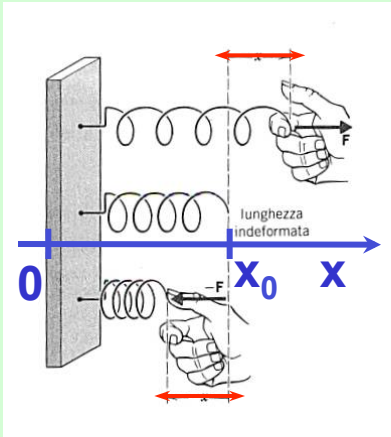
$$F_g \text{ (p-e)} \sim 10^{-47} \text{ N}$$

$$F_{\text{em}} \text{ (p-e)} \sim 10^{-7} \text{ N}$$

Forza elastica

materiale **elastico**: materiale che ha capacità di riacquistare la forma iniziale dopo essere stato compresso o deformato

esempio: molla

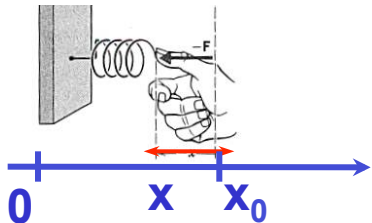


$$F = k(x - x_0)$$

forza necessaria per allungare o accorciare una molla:

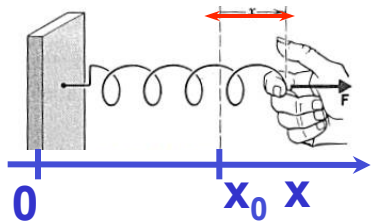
- ✗ linearmente **proporzionale** all' allungamento
- ✗ k = costante **elastica**
- ✗ x_0 = **estensione** molla **NON** soggetta a forze
- ✗ x = attuale posizione della molla

✗ se **comprimo** la molla la forza che esercito è **negativa**



$$x < x_0 \quad F = k(x - x_0) < 0$$

✗ se **estendo** la molla la forza che esercito è **positiva**



$$x > x_0 \quad F = k(x - x_0) > 0$$

Principio di azione e reazione:

la forza esercitata **dalla molla** ha modulo e direzione uguali verso opposto:

[N.B. nella maggior parte dei casi si considera $x_0 = 0$]

legge di Hooke

$$F = -k(x - x_0)$$

equazione di moto forza elastica

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

$$F_x = m a_x$$

$$-kx = m \frac{dv}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + kx = 0$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2 x = 0$$

con

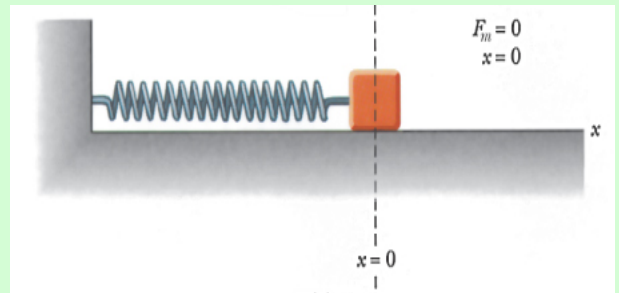
$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

pulsazione

con

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

periodo



dimensioni: $[\omega] = [F/L]^{1/2} [M]^{-1/2} = [M L/T^2 1/L]^{1/2} [M]^{-1/2} = [1/T]$
unità di misura: s^{-1}

soluzione generale equazione differenziale:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0) \quad \text{con } A \text{ e } \varphi_0 \text{ **costanti** arbitrarie}$$

[dipendono dalle condizioni iniziali del problema]

moto armonico: posizione del corpo varia sinusoidalmente
A = ampiezza di oscillazione, T = periodo

N.B. verifico la soluzione **sostituendola** nell' equazione differenziale

$$\frac{dx}{dt} = \frac{d[A \sin(\omega t + \varphi_0)]}{dt} = A \omega \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{d[A \omega \cos(\omega t + \varphi_0)]}{dt} = -A \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 x(t)$$