

Lezione 6

Fisica I – Ingegneria Automazione e Informatica
Università di Napoli "Federico II"
prof. Nicola R. Napolitano

Riepilogo della lezione precedente

- 1) abbiamo introdotto i tre principi della meccanica Newtoniana
- 2) abbiamo introdotto i sistemi di riferimento inerziali
- 3) abbiamo introdotto il concetto di massa
- 4) abbiamo cominciato a vedere gli effetti delle forze in conseguenza del principio di azione e reazione
- 5) Nel fare alcuni esempi abbiamo anche cominciato a parlare di alcune esempi di forze (forza gravitazionale e forza peso, forza di attrito)...oggi andiamo più nel dettaglio di queste forze.

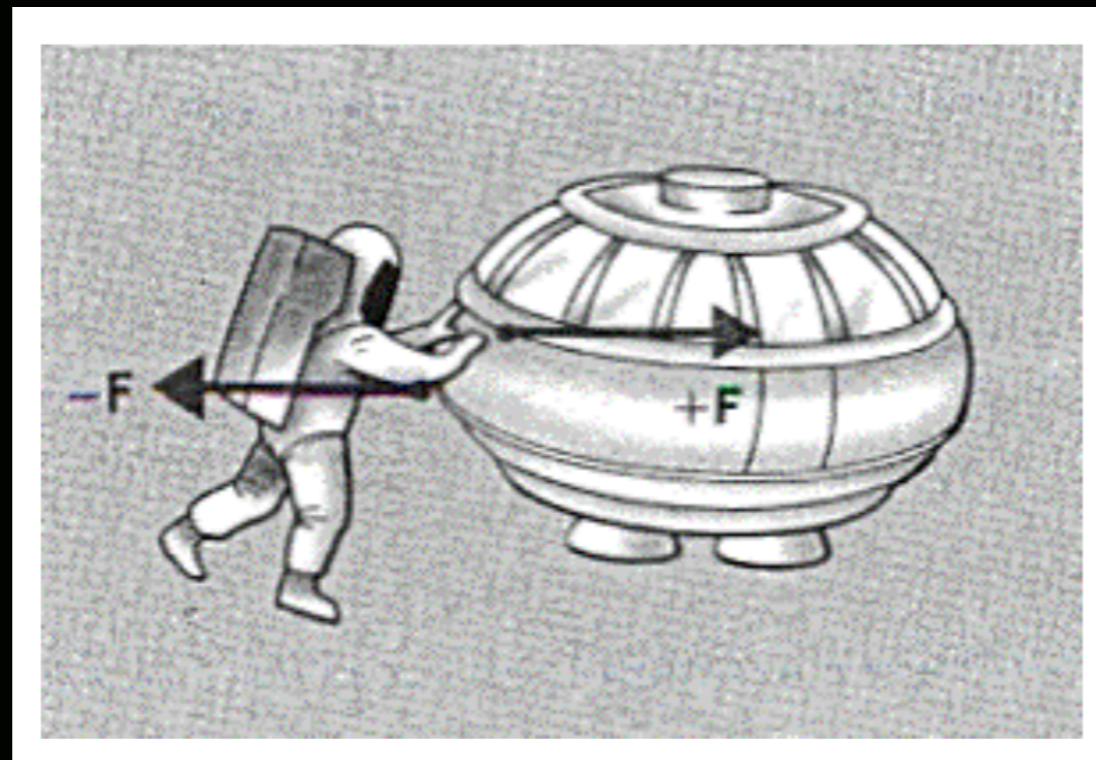
effetto indotto dalle forze di azione e reazione può essere sensibilmente differente

esempio:

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

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

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



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

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

Per il principio di azione e reazione l'astronauta e l'astronave si scambiano forze identiche in modulo ma in direzione opposta. Se l'astronauta esercita una forza $|F| = 36\text{N}$, abbiamo che

$$F = m_{\text{astronave}} a_{\text{astronave}} \text{ da cui ottengo che l'accelerazione dell'astronave e' } a_{\text{astronave}} = \frac{36}{11000} = 0.0033 \text{ m/s}^2$$

tuttavia la navicella “reagisce” con una forza $F_{\text{reaz}} = -F$ che quindi ha modulo uguale ma verso opposto a F . Questa forza pure e’ soggetta alla 2a legge di Newton per cui

$$-F = m_{\text{uomo}} a_{\text{uomo}} \text{ da cui ottengo che l'accelerazione dell'astronauta e' } a_{\text{uomo}} = \frac{-36}{92} = -0.39 \text{ m/s}^2$$

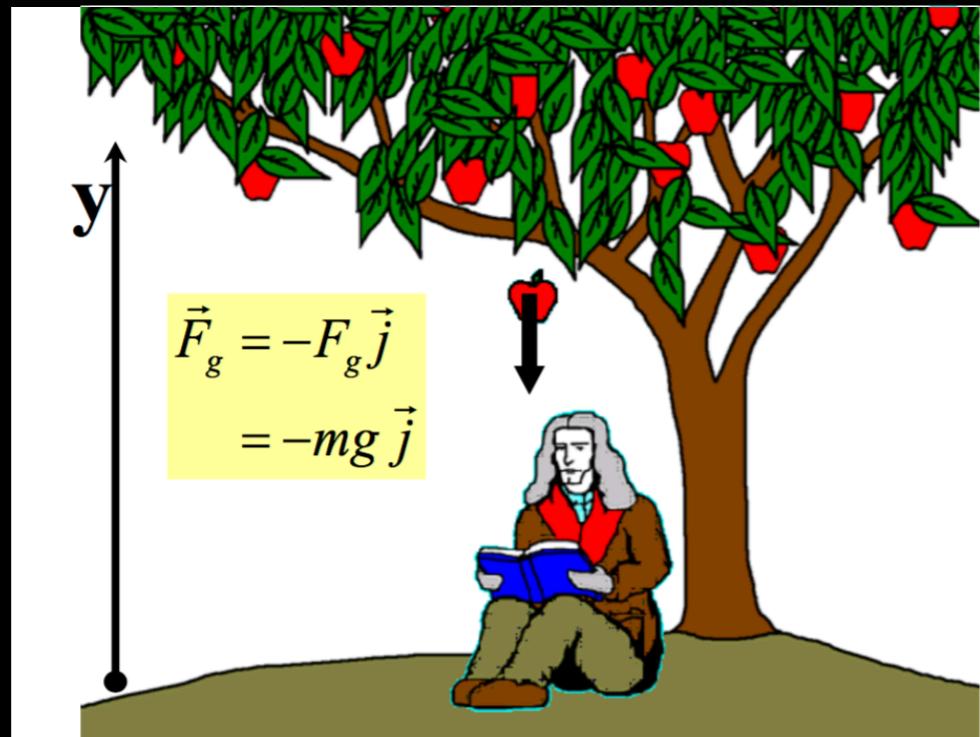
Alcune Forze Particolari

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



$$\vec{F}_g = -F_g \vec{j} \\ = -mg \vec{j}$$

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

NB: la forza gravitazionale e' scritta per due corpi che possono essere considerati puntiformi perche' la loro distanza r e' in natura maggiore delle loro dimensioni intrinseche.

Paradossalmente questa formula e' piu' corretta per i pianeti nel sistema solare che se applicata in laboratorio sulla terra.

Forza peso

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

$$P = mg$$

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

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

esempio:

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

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

$$g = G \frac{M_{terra}}{r^2} \Rightarrow R_T = 6370 \text{ km}, \quad M_T = 5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$$
$$R_L = 1737 \text{ km}, \quad M_L = 7.349 \times 10^{22} \text{ kg}$$

Che ipotesi c'e' dietro a questa formula?

Forza peso

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

$$P = mg$$

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

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

esempio:

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

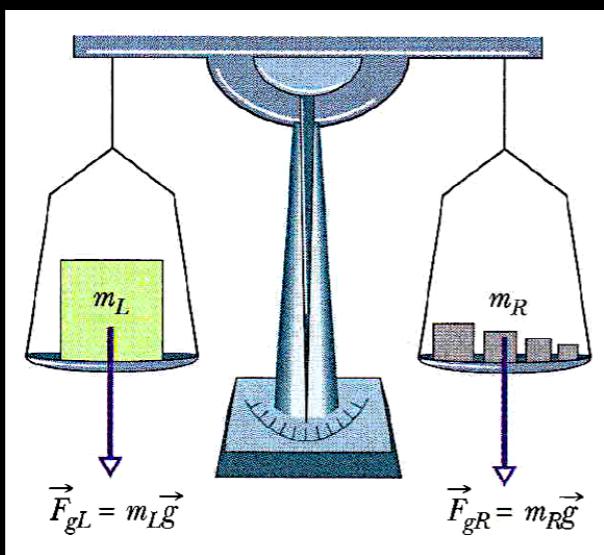
$$g_{luna} = 1.62 \text{ m/s}^2$$

$$g = G \frac{M_{terra}}{r^2} \Rightarrow R_T = 6370 \text{ km}, \quad M_T = 5.976 \times 10^{24} \text{ kg}$$
$$R_L = 1737 \text{ km}, \quad M_L = 7.349 \times 10^{22} \text{ kg}$$

Che ipotesi c'e' dietro a questa formula?

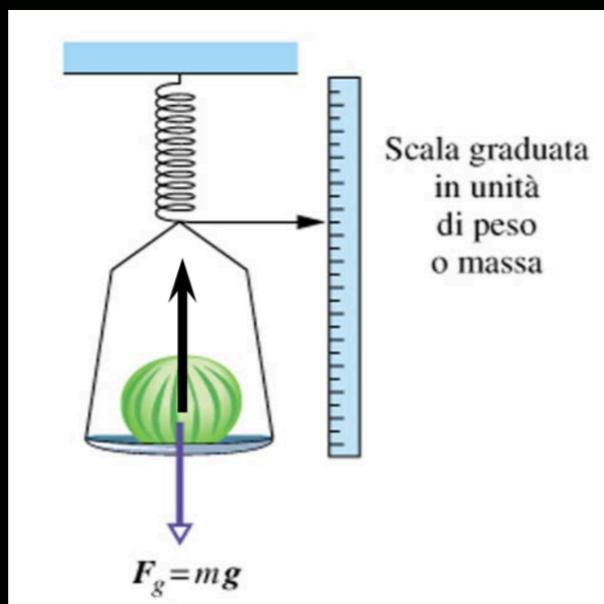
Abbiamo scritto la legge di gravita' per due corpi puntiformi...

Bilancia a bracci uguali



La massa di una corpo viene determinata bilanciando il peso con una massa campione nota. Essendo l'accelerazione di gravita' identica per i due bracci, si misura la massa

Bilancia a molla [dinamometro]:



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

In pratica, la scala graduata puo' tenere conto del valore di g per restituire una misura di massa (in Kg).

La bilancia a molla e' basata su un'ipotesi. Quale? Voi quale bilancia usereste?

- ✗ g varia con la posizione geografica
- ✗ diminuisce all'aumentare dell'altezza

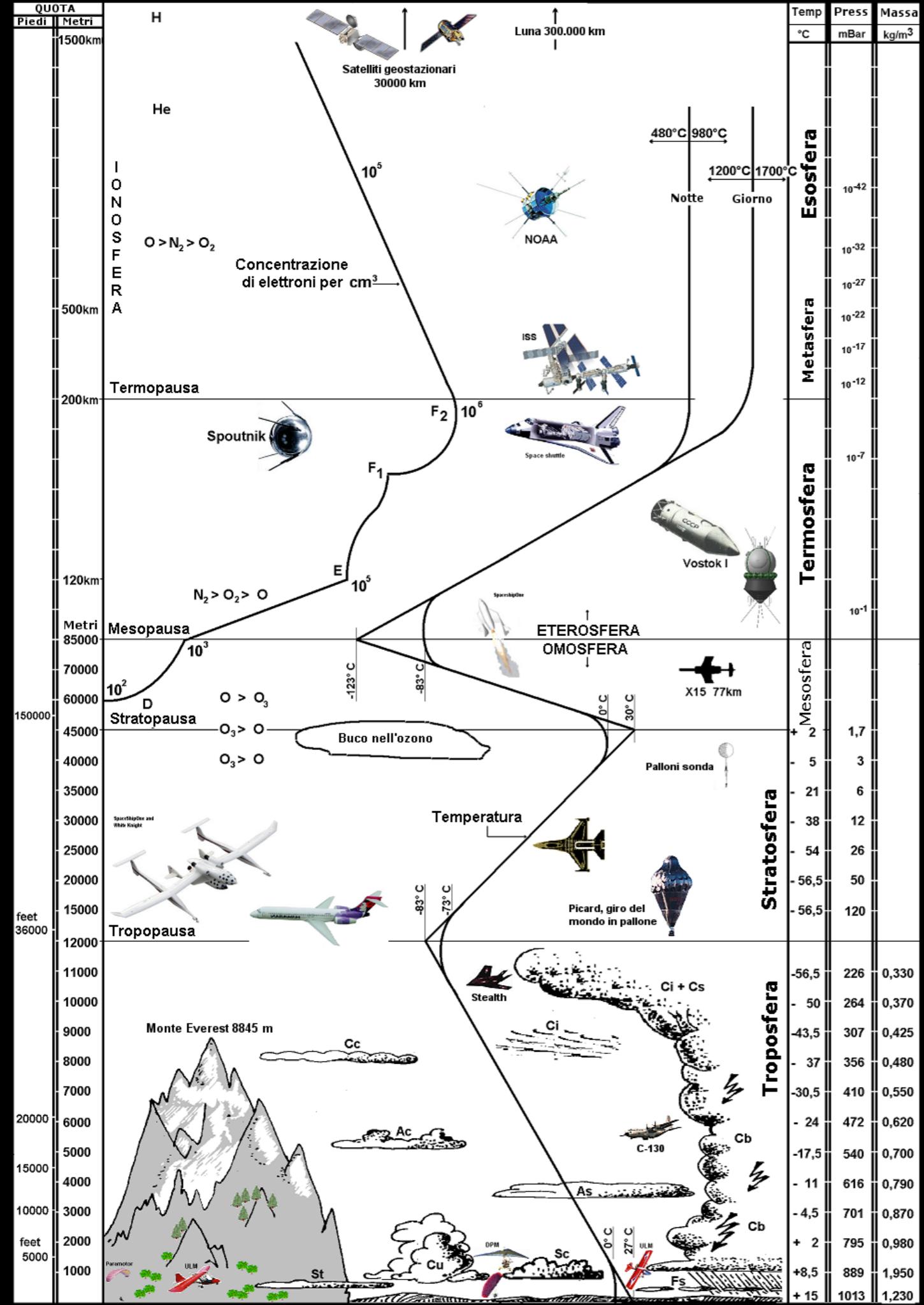
$$g = G \frac{M_{\text{terra}}}{r^2}$$

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

Altitudine (km)	$\text{g (m/s}^2)$	
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

Quanto pesereste se vi trovaste su un satellite geostazionario?

A che altezza credete che si trovi la stazione spaziale?



Com'e' possibile che a queste altezze gli astronauti fluttuano in assenza di peso?

Forza normale

Se un corpo **preme** su una superficie:

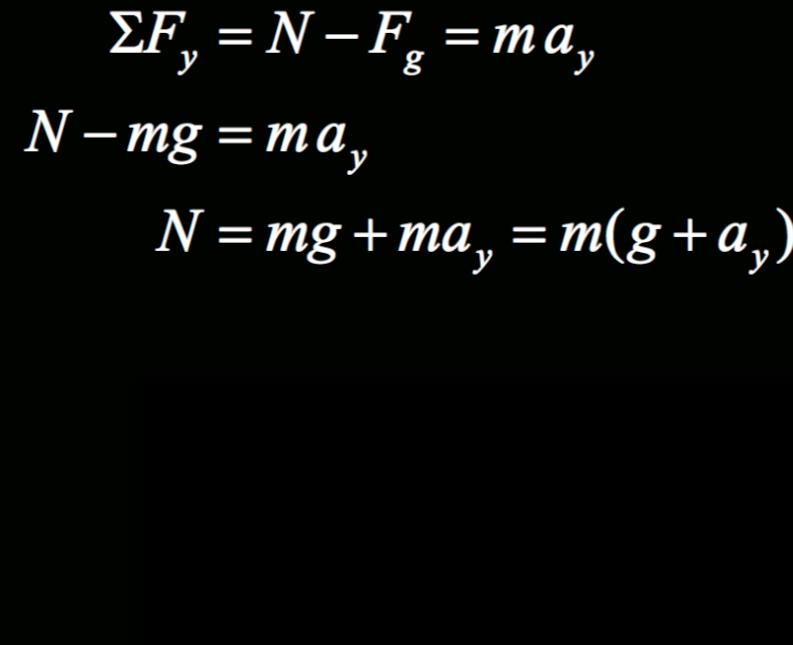
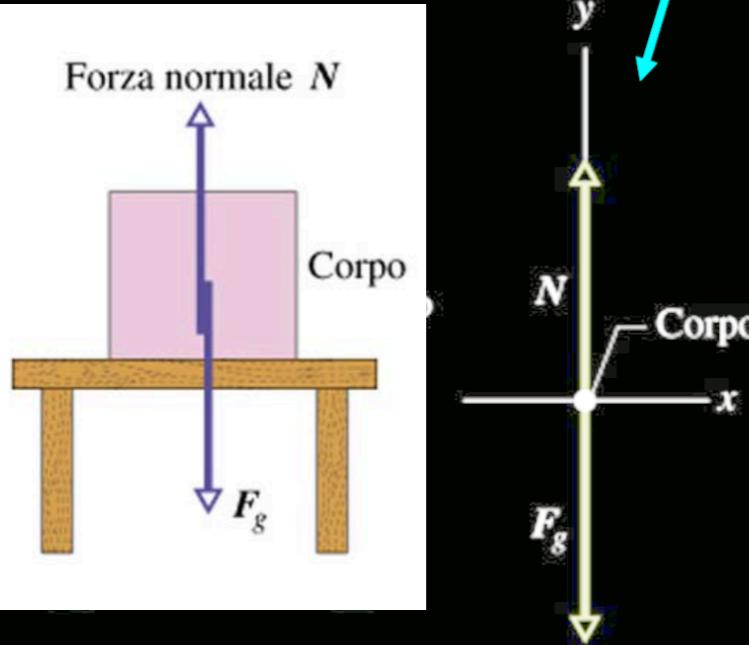
- ✖ la superficie si deforma (anche se apparentemente rigida)
- ✖ spinge il corpo con forza normale N
- ✖ N è sempre perpendicolare alla superficie stessa

La forza normale bilancia il peso e determina l'equilibrio

Che differenza c'è fra forza normale e peso? sono uguali? diverse? quando?

esempio:

diagramma
del corpo libero



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

$$N - mg = m a_y$$

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

Diagramma delle Forze (o diagramma del corpo libero): rappresentazione grafica che mostra tutte le forze che agiscono su un oggetto isolato. Le forze sono rappresentate come vettori.

Forza normale

Se un corpo **preme** su una superficie:

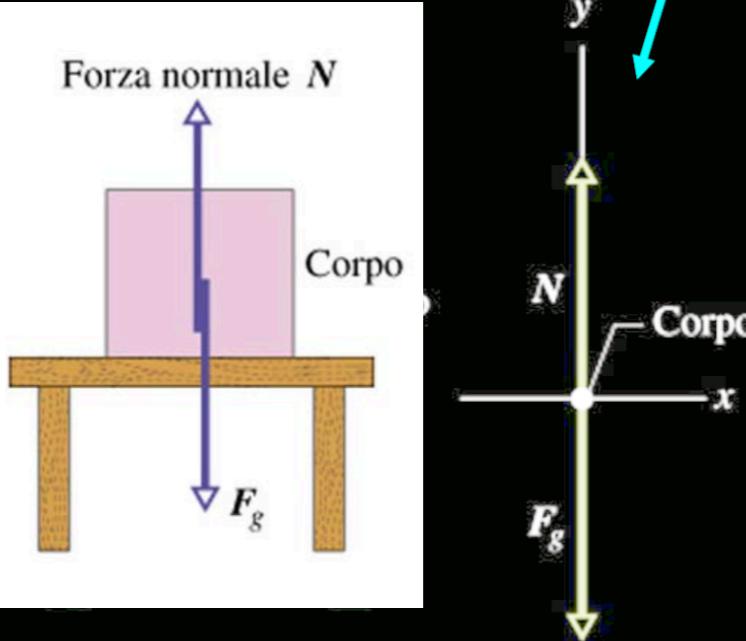
- ✖ la superficie si deforma (anche se apparentemente rigida)
- ✖ spinge il corpo con forza normale N
- ✖ N è sempre perpendicolare alla superficie stessa

La forza normale bilancia il peso e determina l'equilibrio

Che differenza c'è fra forza normale e peso? sono uguali? diverse? quando?

esempio:

diagramma
del corpo libero



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

$$N - mg = m a_y$$

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

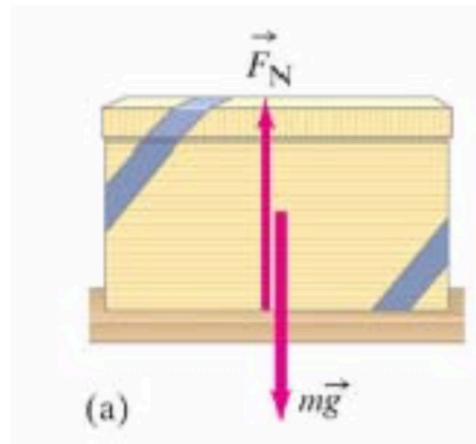
$$a_y = 0 \Rightarrow N = mg$$

$$a_y \neq 0 \quad N > mg \text{ oppure } N < mg$$

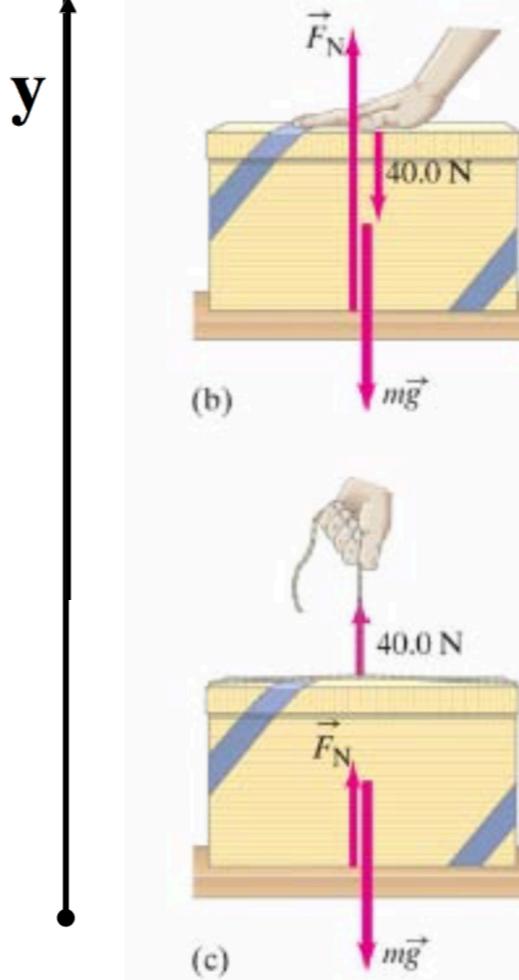
Diagramma delle Forze (o diagramma del corpo libero): rappresentazione grafica che mostra tutte le forze che agiscono su un oggetto isolato. Le forze sono rappresentate come vettori.

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

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



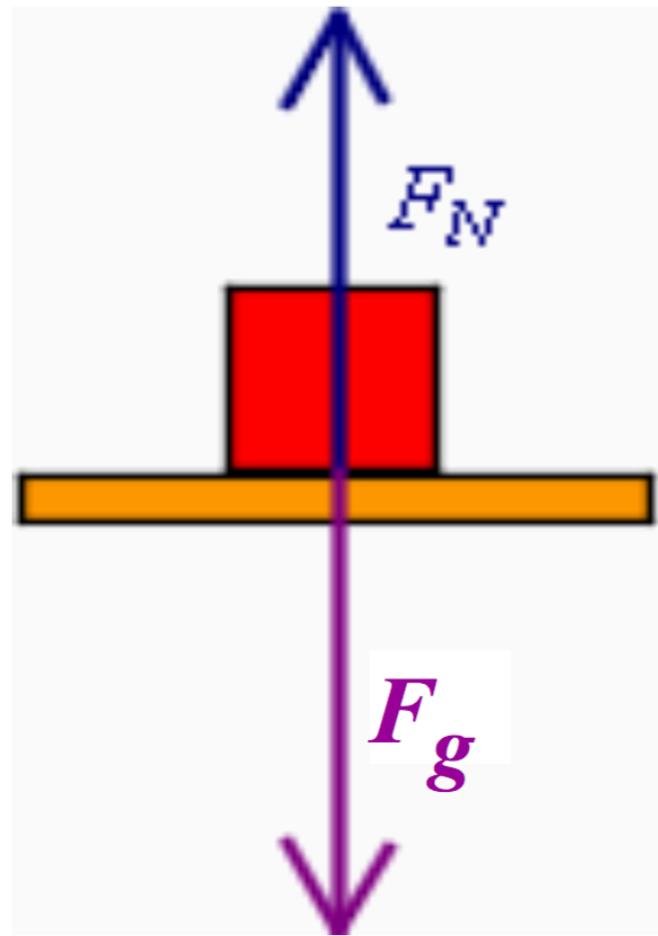
$$\sum F_y = N - mg = 0$$
$$N = mg$$



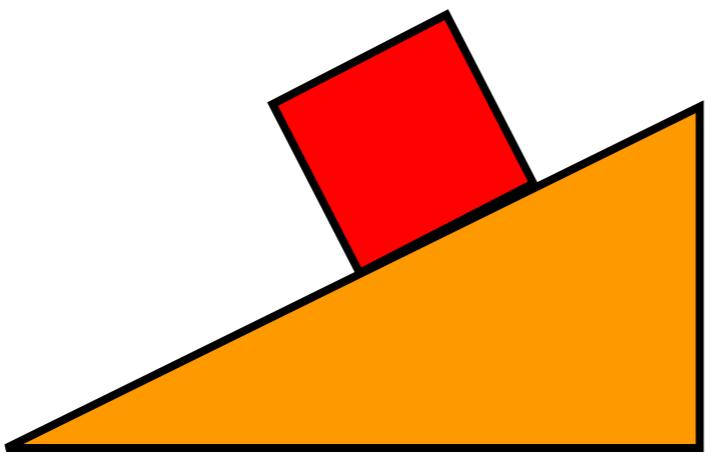
$$\sum F_y = N - mg - 40N = 0$$
$$N = mg + 40N$$

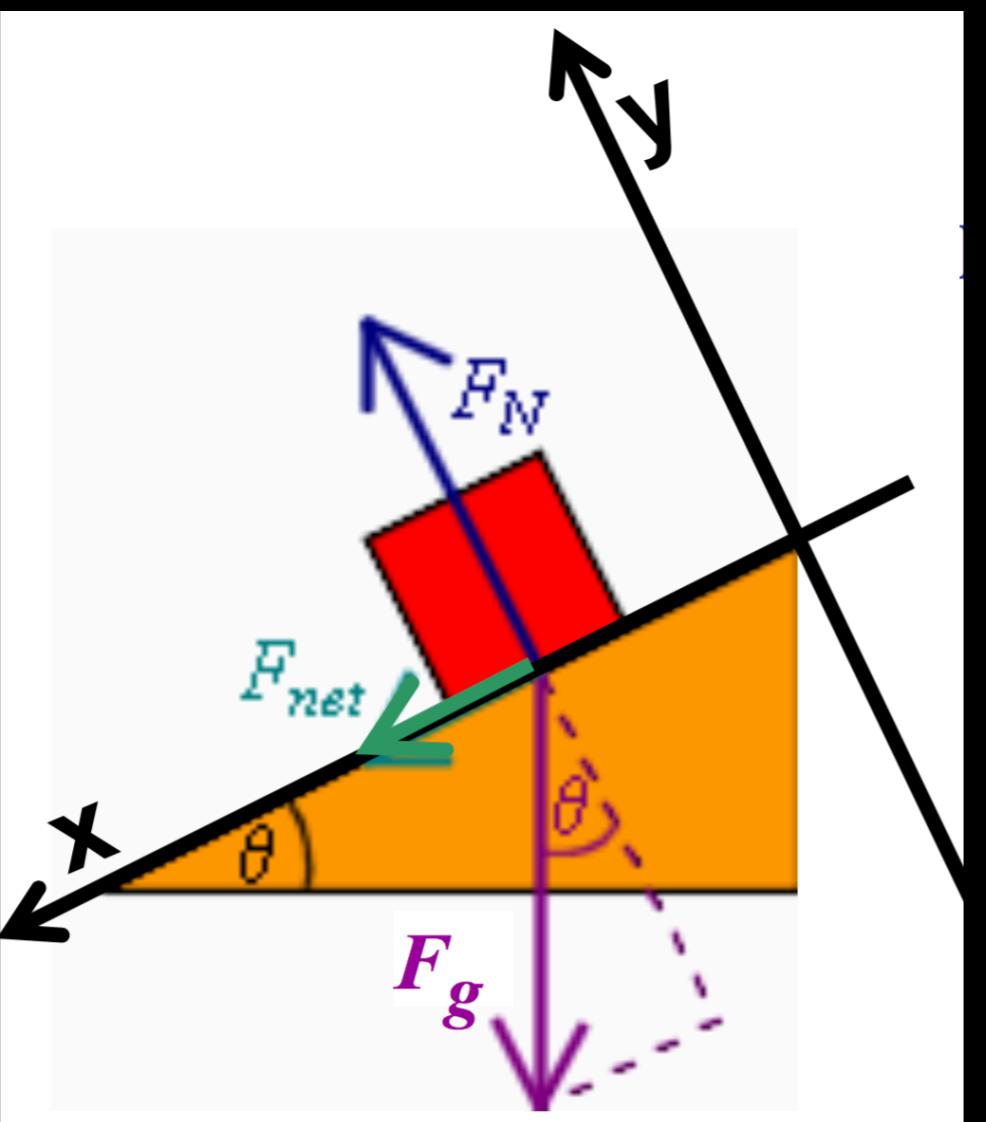
$$\sum F_y = N - mg + 40N = 0$$
$$N = mg - 40N$$

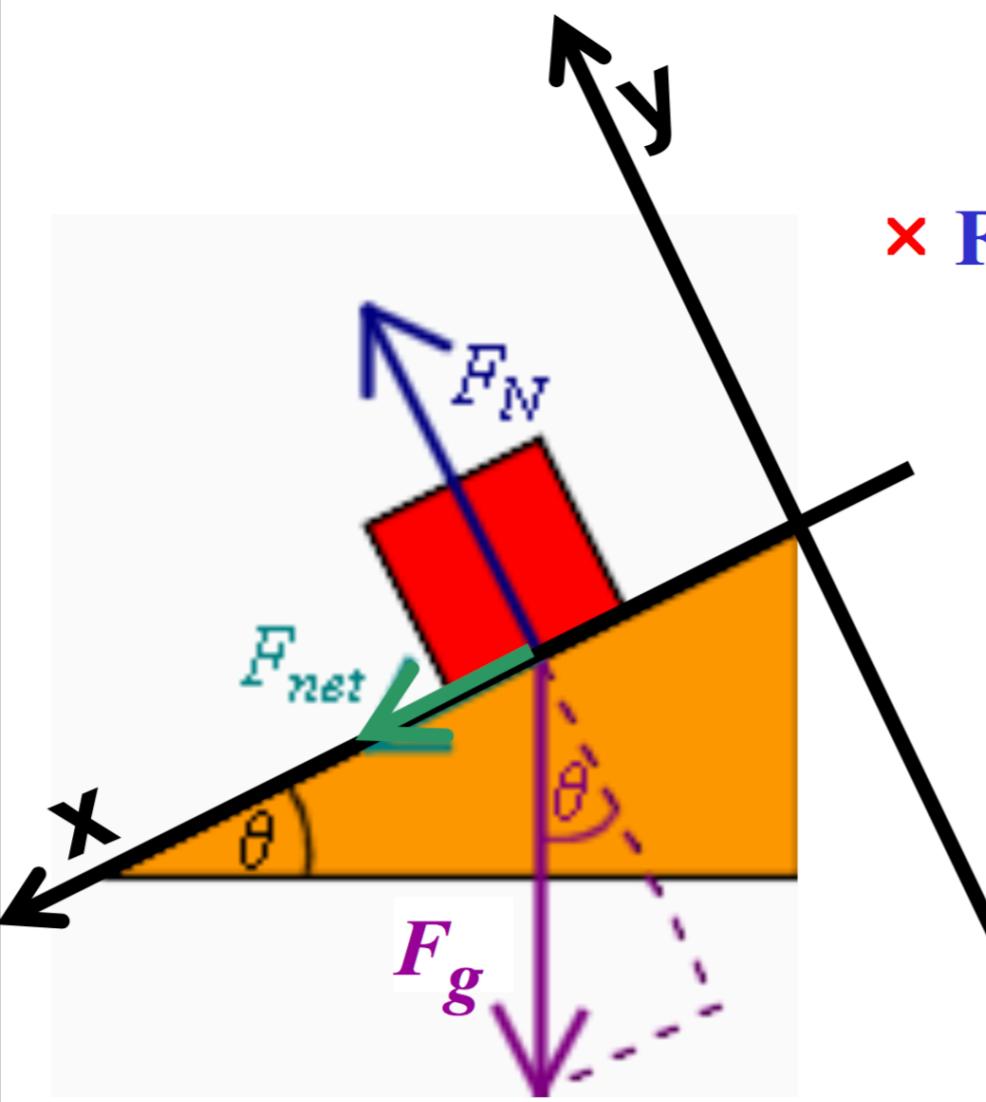
La forza normale **NON** è necessariamente **verticale** !



- ✗ 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

Assumiamo di avere un filo o una corda, che siano privi di massa, inestensibili e completamente privi di attrito

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

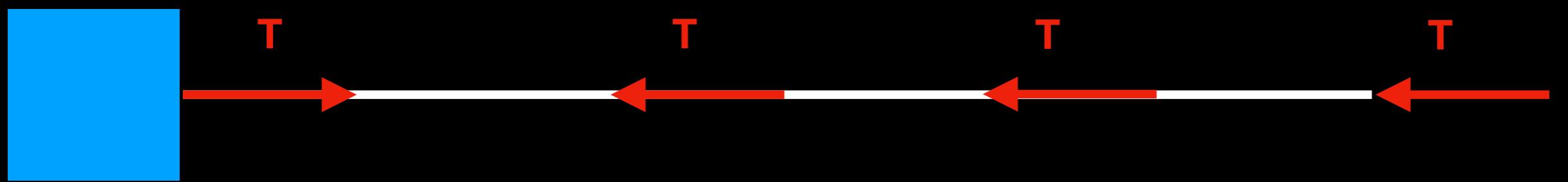
N.B. se la corda ha **massa trascurabile** forza esercitata ad un capo è **trasmessa** per tutta la corda fino al capo opposto, infatti:

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

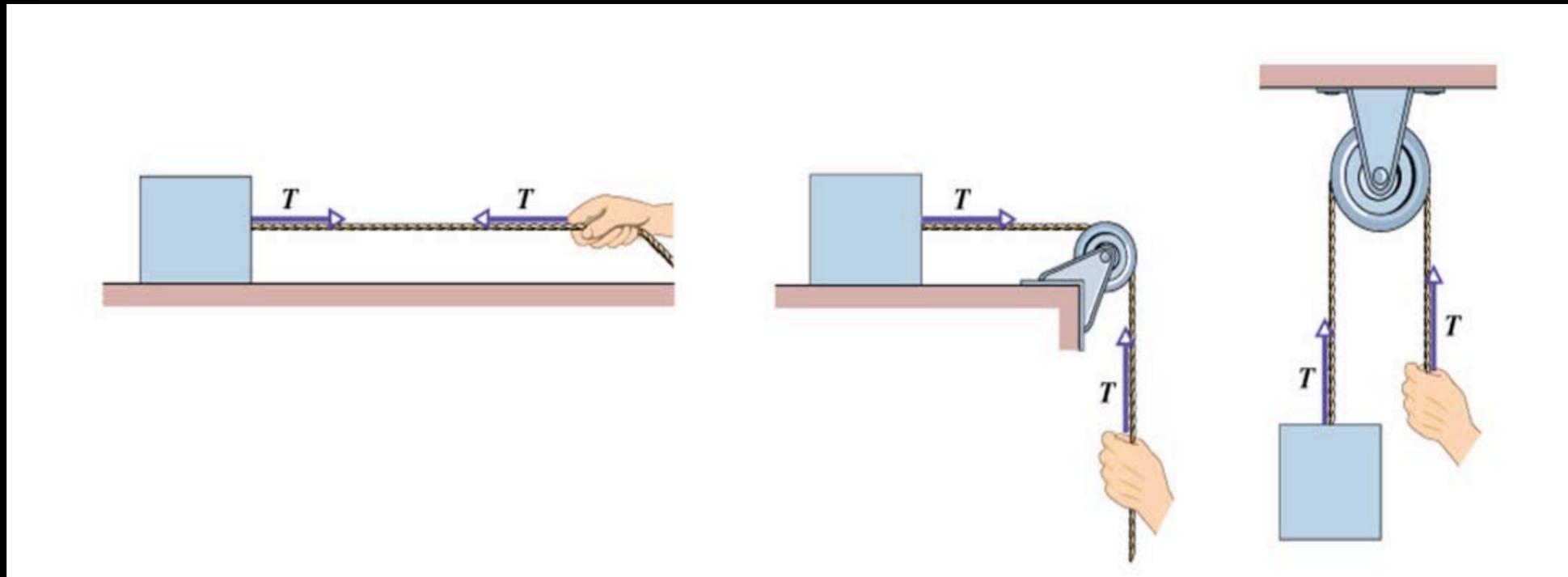
Corda







⇒ forze ai capi della corda sono uguali ed opposte!



Quale condizione ci consente di trasferire tutta la tensione attraverso la carrucola?

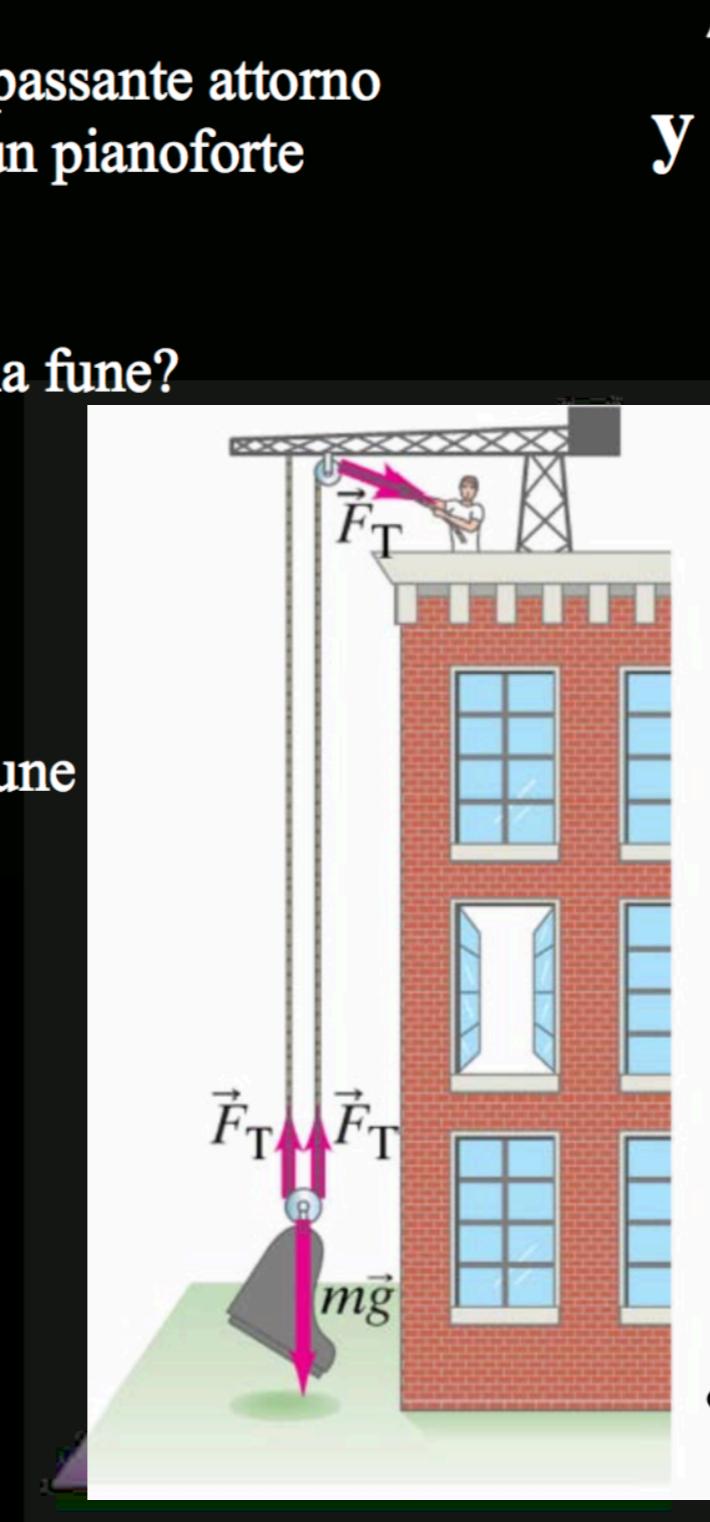
applicazione: utilità di una carrucola (In assenza di attriti)

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



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

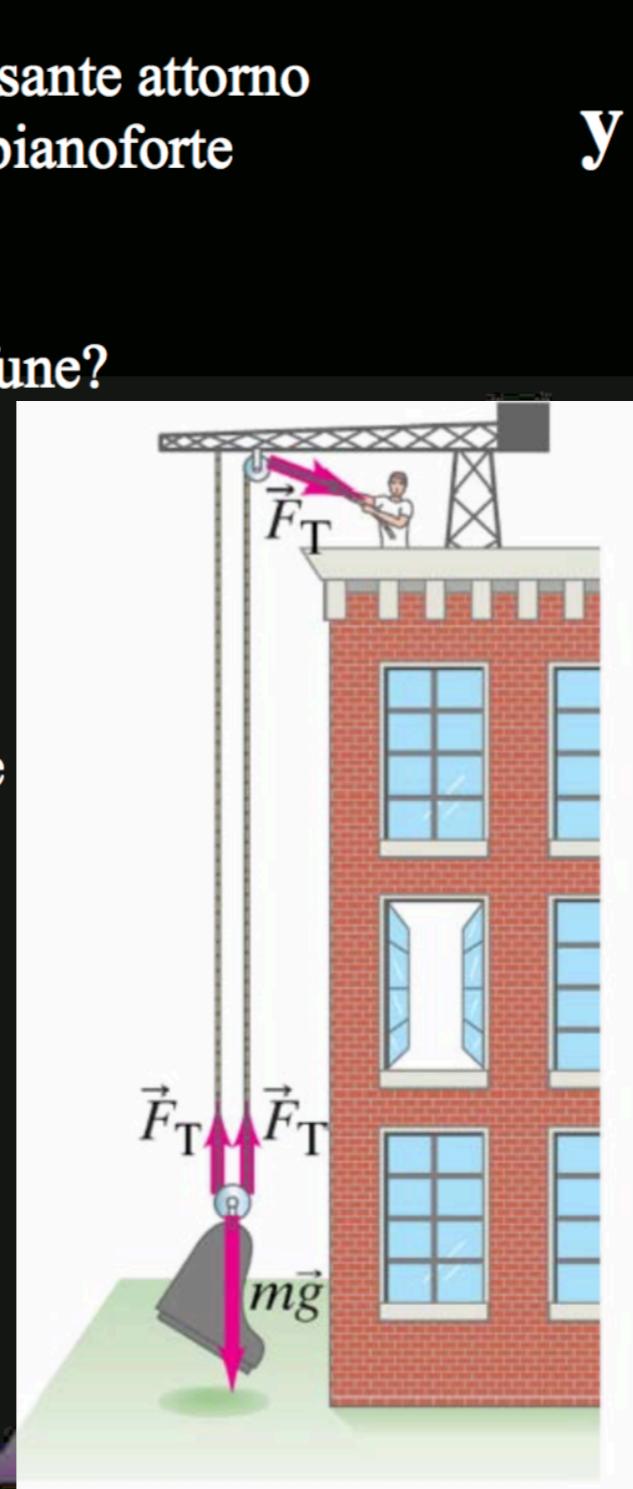
$$\sum \vec{F} = m\vec{a} = \vec{T} + \vec{T} + \vec{F}_g$$

$$ma = 2T - mg$$

Per far muovere il pianoforte con velocità costante:

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

$$T = mg / 2$$

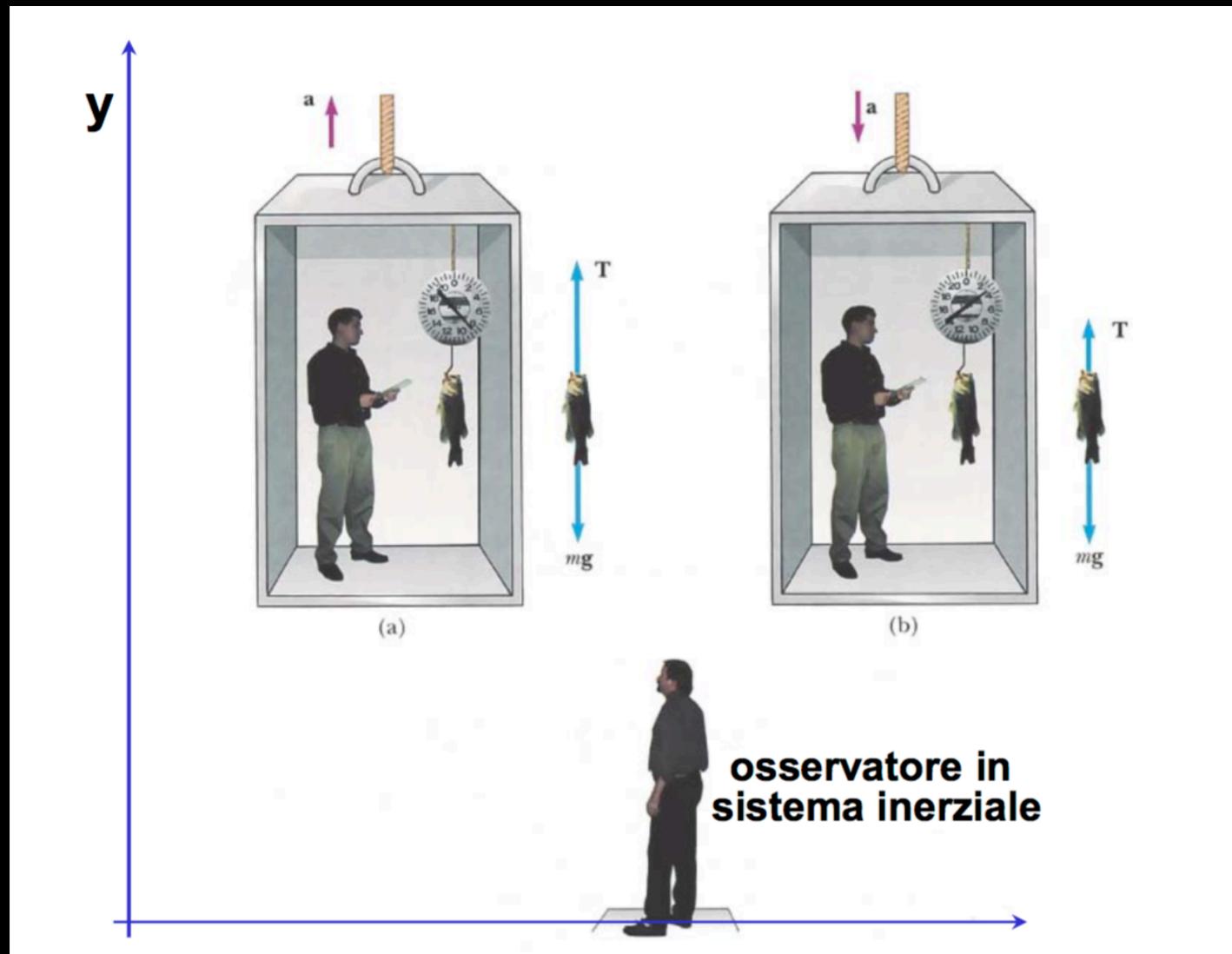


N.B.: generalmente questa e' la stessa condizione che imporremmo per l'equilibrio (quiete permanente), ma qui viene usata per mantenere una velocita' costante

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

applicazione: peso di un oggetto in ascensore

ascensore accelerato NON è
sistema di riferimento inerziale



$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= T - mg = ma_y \\ T &= mg + ma_y > mg\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Sigma F_y &= T - mg = -ma_y \\ T &= mg - ma_y < mg\end{aligned}$$

se ascensore è **fermo**

o in moto con **velocità costante**:

$$a_y = 0$$

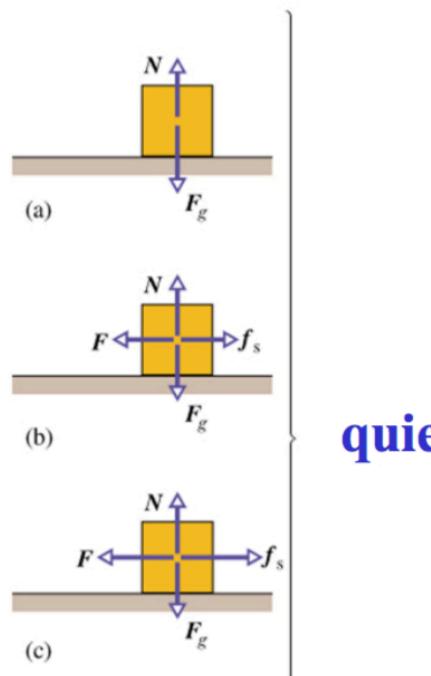
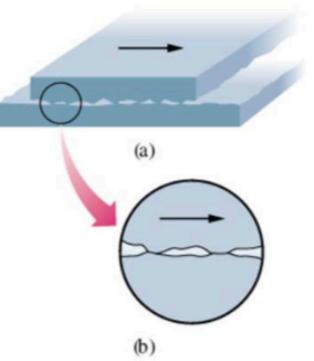
$$\sum F_y = T - mg = 0$$

Ossia esso rappresenta un sistema di riferimento...?

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]

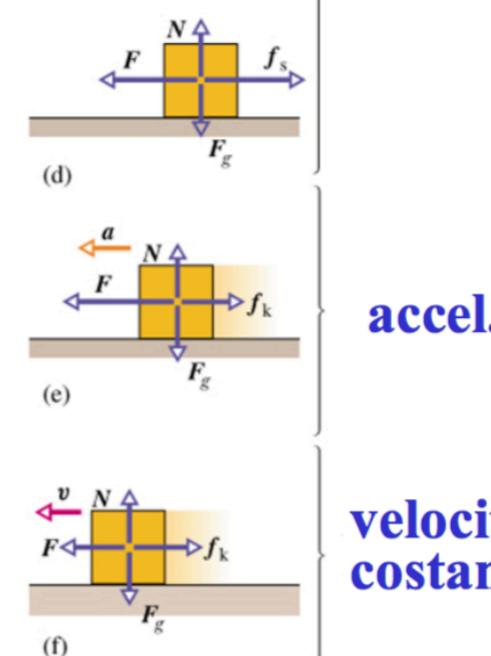
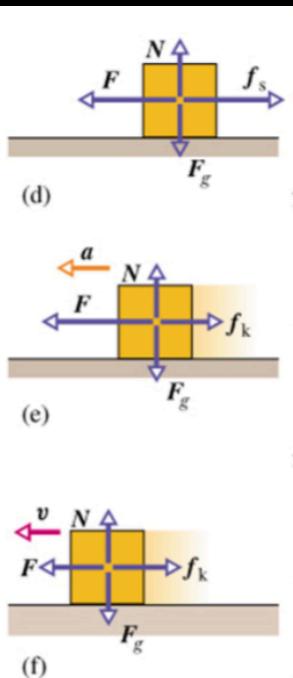


corpo in quiete
non applico nessuna forza.

applico forza $F < f_s$
il corpo rimane fermo

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

quiete



$\mathbf{F} = \mathbf{f}_s$
il corpo rimane fermo

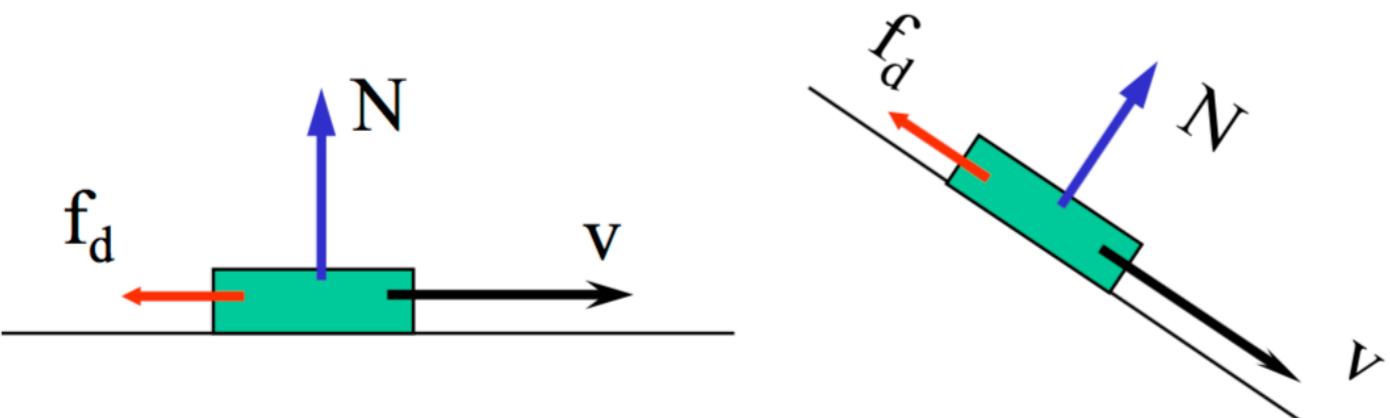
se $\mathbf{F} > \mathbf{f}_k$
il corpo acquista accelerazione \mathbf{a}

accel.
velocità costante

per mantenere \mathbf{v} costante riduco \mathbf{F} :
 $\mathbf{F} < \mathbf{F}_{\max}$

Forza di Attrito Dinamico

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



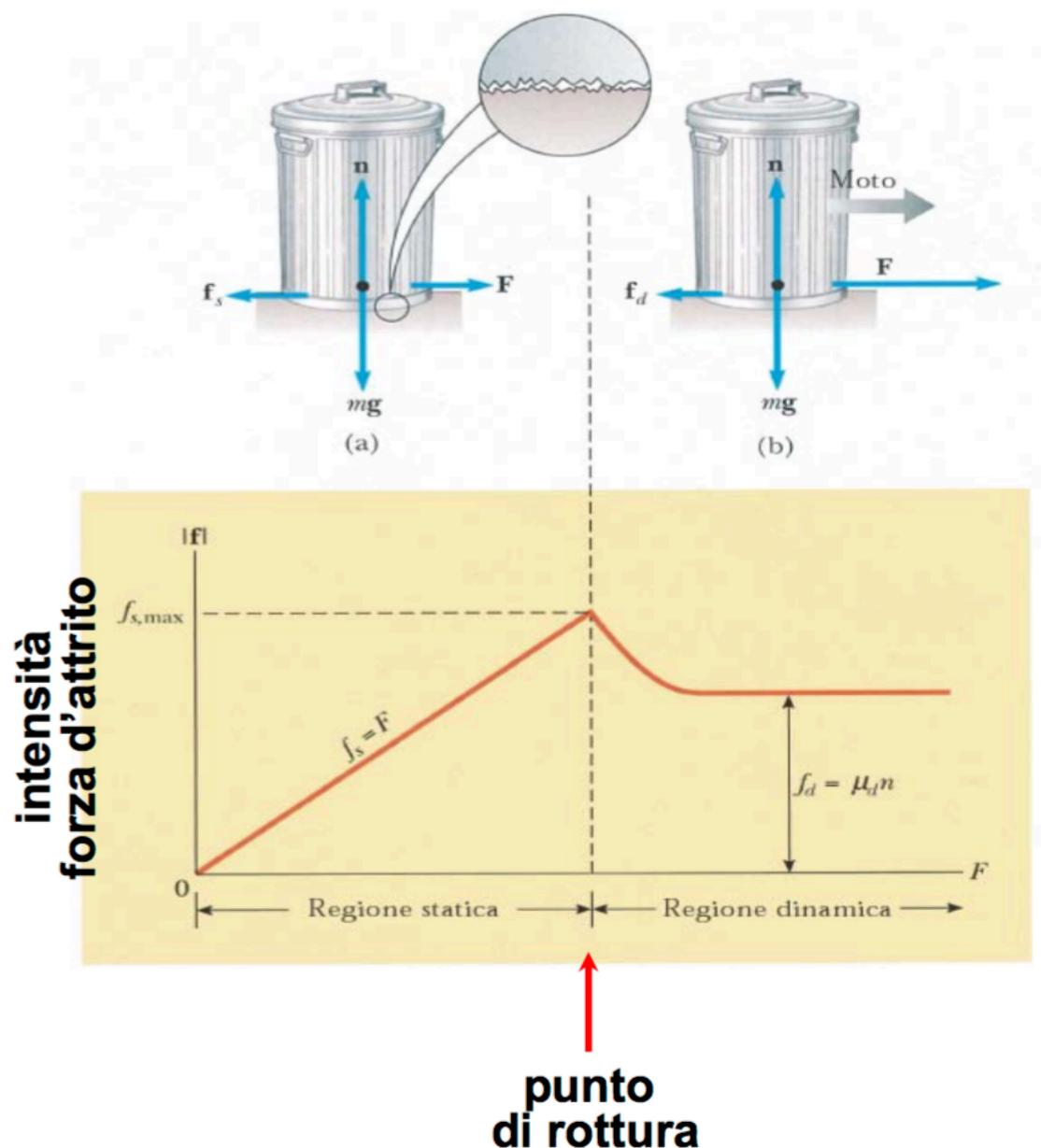
proprietà attrito

$$f_s \leq \mu_s N$$

$$f_d = \mu_d N$$

μ_s **coefficiente** attrito statico

μ_d **coefficiente** attrito dinamico



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

coefficienti di attrito

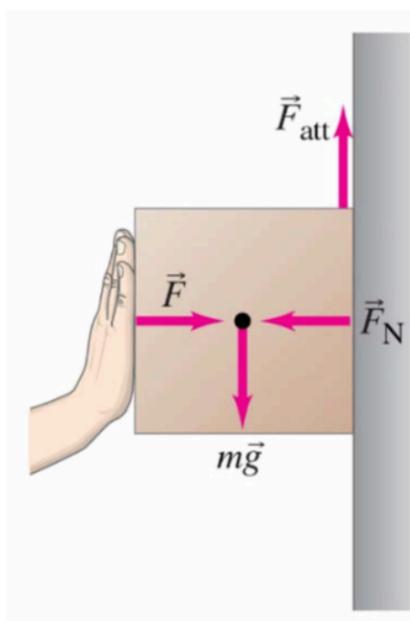
Materiale	Statico	Dinamico o Radente
Acciaio su acciaio	0.74	0.57
Acciaio su acciaio lubrificato	0.11	0.05
Alluminio su acciaio	0.61	0.47
Rame su acciaio	0.53	0.36
Ottone su acciaio	0.51	0.44
Vetro su vetro	0.94	0.40
Rame su vetro	0.68	0.53
Teflon su teflon	0.04	0.04
Teflon su acciaio	0.04	0.04
Acciaio 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

Utile?

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



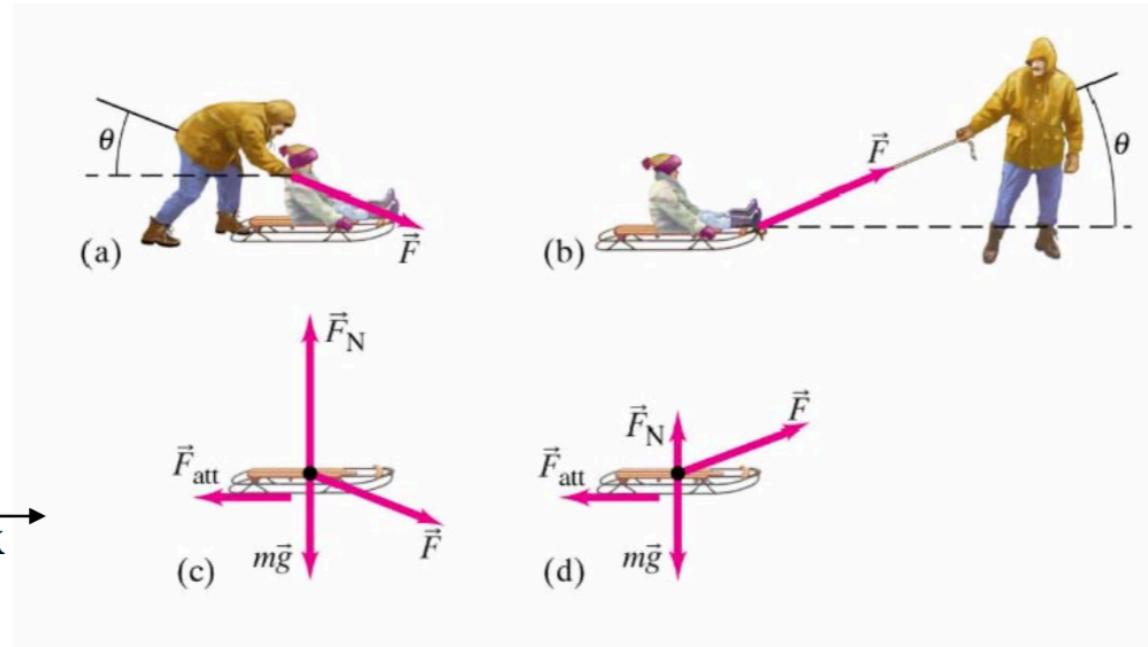
\vec{F} contrasta \vec{N}

$F_s = \mu_s N$ 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**:

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

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

se **tiro**:

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

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

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

Forza centripeta [moto circolare uniforme]

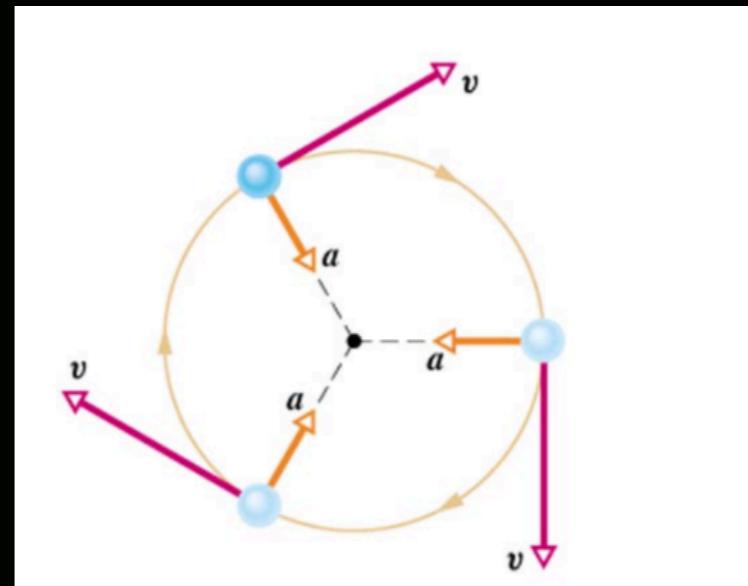
corpo con:

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

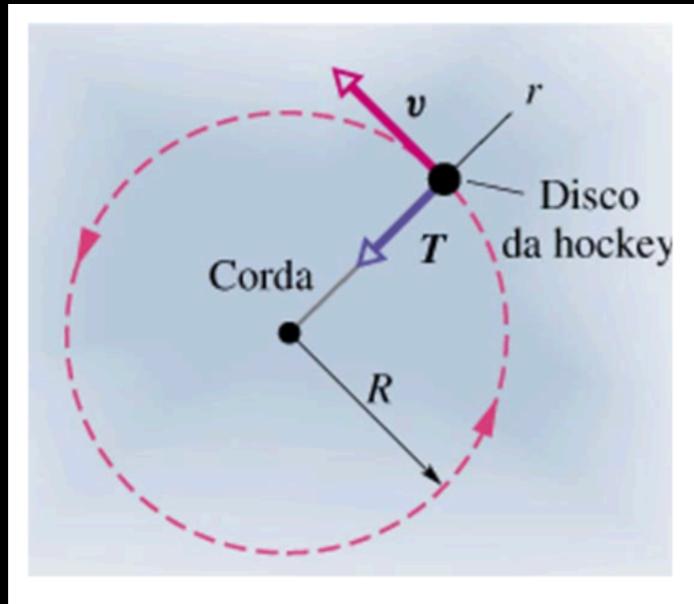
subisce accelerazione centripeta:

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

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



esempio: disco su traiettoria **circolare**



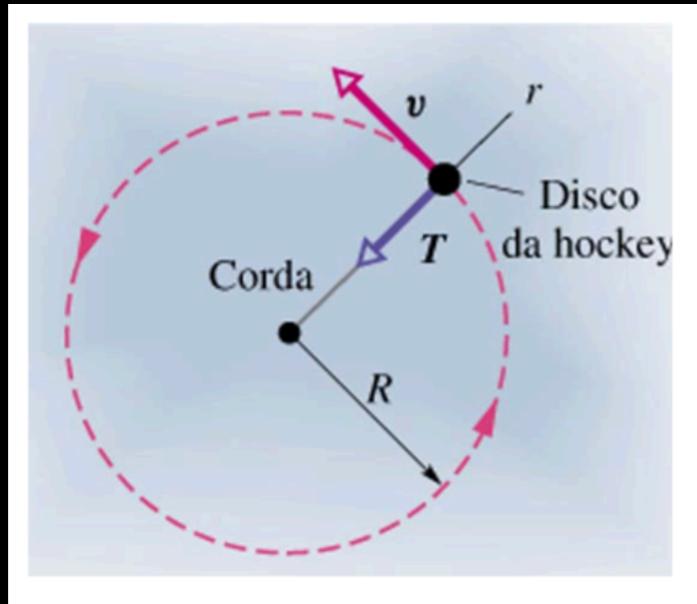
inerzia del disco: moto su linea retta
tensione del filo: mantiene
traiettoria circolare

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

Quindi e' la tensione del filo che esercita la forza necessaria a fare stare il disco sulla traiettoria circolare

Se rompo il filo?

esempio: disco su traiettoria **circolare**

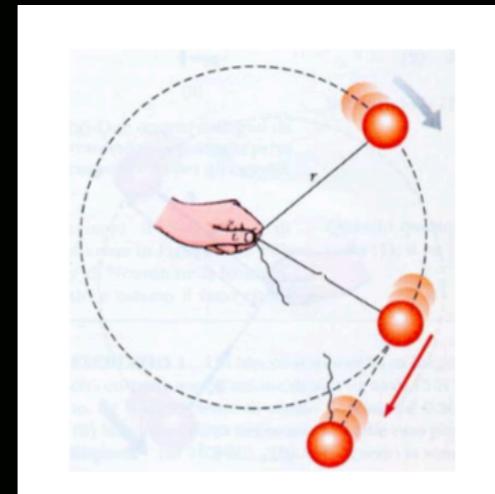


inerzia del disco: moto su linea retta
tensione del filo: mantiene
traiettoria circolare

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

Quindi e' la tensione del filo che esercita la forza necessaria a fare stare il disco sulla traiettoria circolare

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



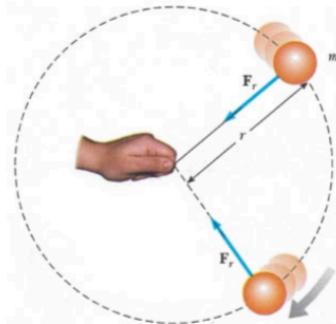
Attenzione:

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

esempi:

palla trattenuta da un filo

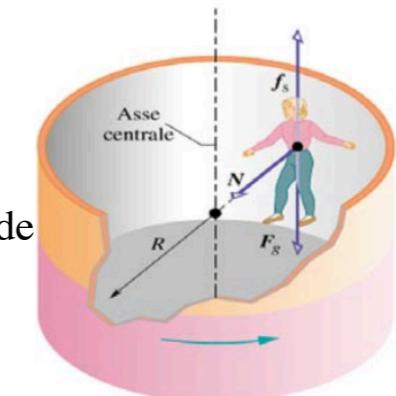
$$\rightarrow \vec{F}_r = \vec{T}$$



rotore del parco dei divertimenti

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

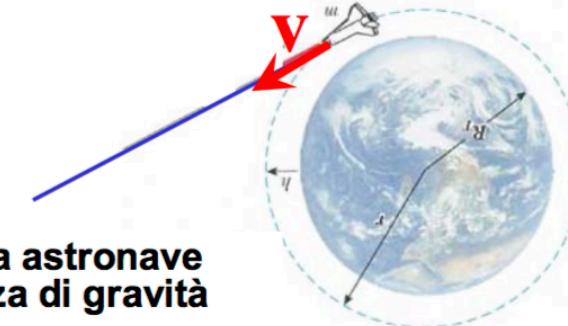
il funzionamento della giostra dipende dalla massa della persona?



satellite attorno alla terra: la forza gravitazionale vincola il satellite ad una orbita circolare

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

traiettoria astronave in assenza di gravità



Massa della Via Lattea?

Il sole ruota a circa 220 km/s ad una distanza dal centro della galassia di circa 8kpc (kiloparsec).

Sapendo che $1\text{pc}=3\times10^{16}\text{m}$ di che ordine di grandezza è la massa contenuta entro il raggio tracciato dal sole, assumendo un'orbita circolare e che tutta la massa della galassia sia contenuta nel suo centro? $[G=6.67\times10^{-11} \text{ m}^3\text{s}^{-2}\text{kg}^{-1}]$

Esprimere il risultato in masse solari sapendo che $M_{\text{sun}}\sim2\times10^{30}\text{kg}$

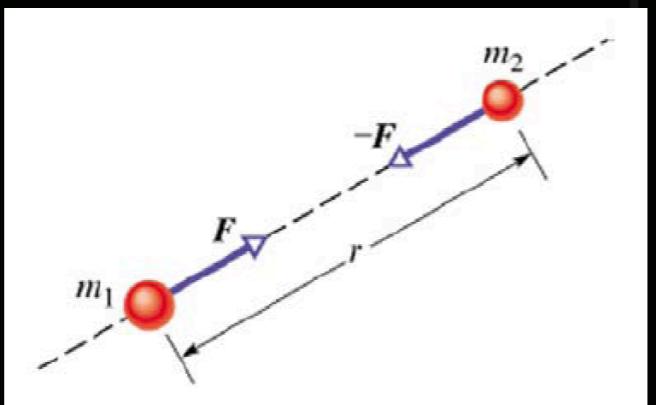
Forza Gravitazionale

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



Terra attira mela
mela attira Terra

Terra attira Luna
Luna attira Terra



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

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

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$$

✗ esempio di **azione e reazione**

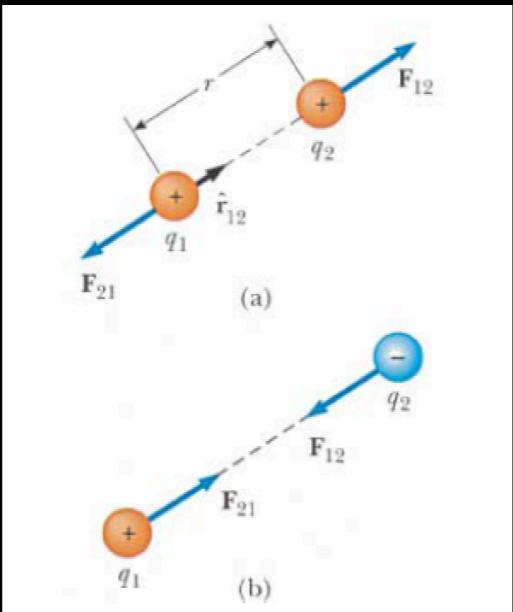
✗ **intensa** fra corpi **macroscopici**

✗ la più **debole** fra le forze

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

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**

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

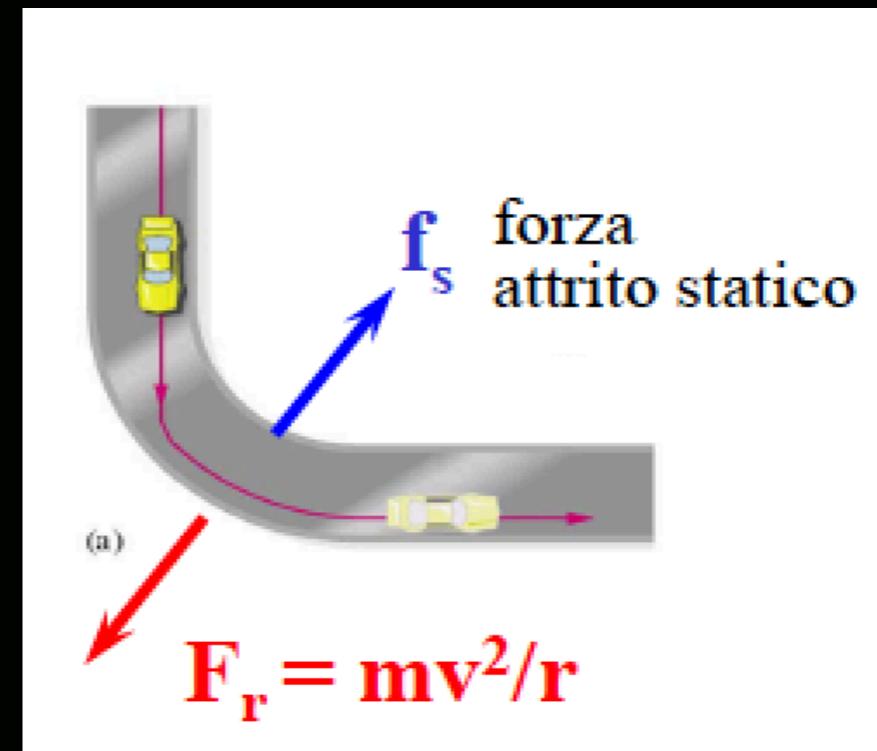
$$F_{\text{em}} \text{ (p-e)} \sim 10^{-7} \text{ N}$$

Forza centrifuga [forza apparente]

esempio 1:

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

questa forza è detta
forza centrifuga



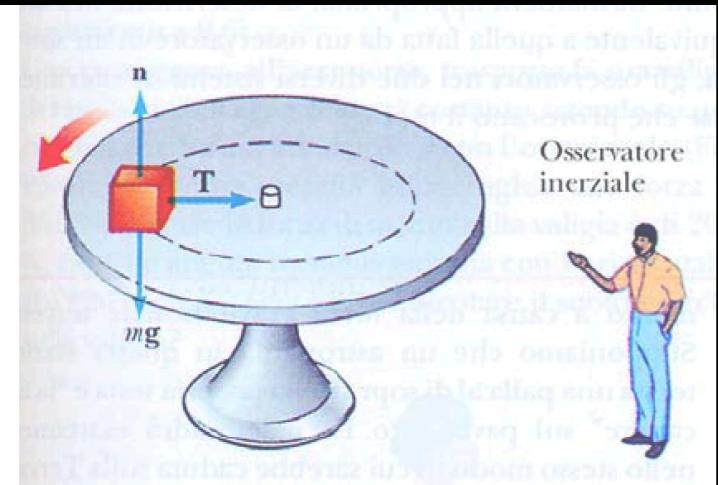
forza centrifuga: forza apparente,
viene sentita solo se l'osservatore
non è fermo o in moto rettilineo uniforme
[ossia in sistemi non inerziali]

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

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

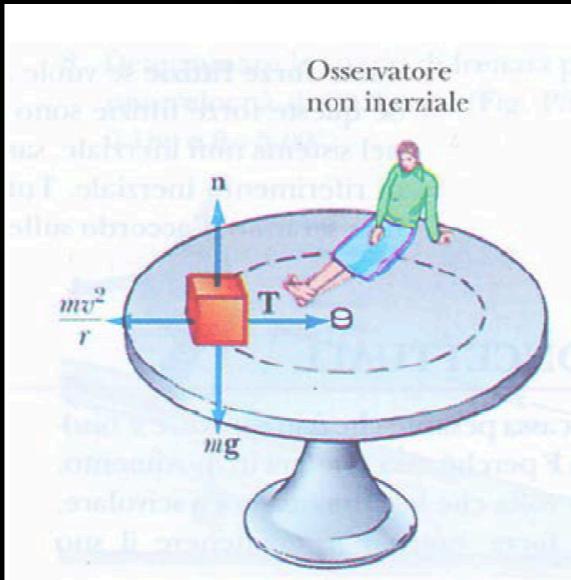
blocco di massa **m** fissato ad una fune su piattaforma rotante



osservatore **inertiale**:

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

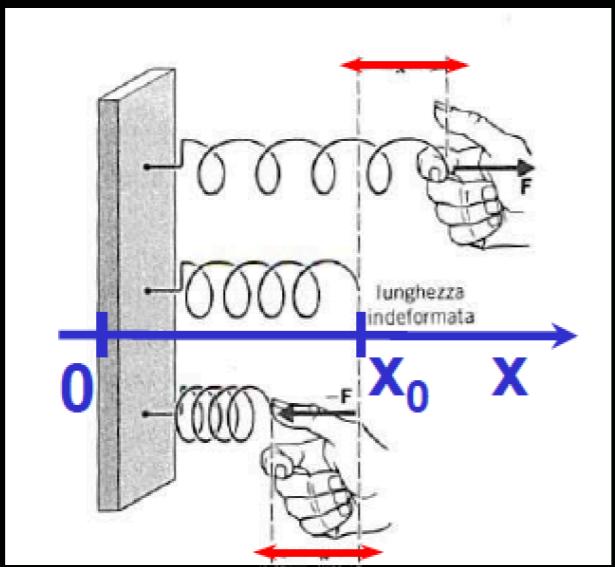
$$T - m \frac{v^2}{r} = 0$$

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

Forza elastica

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

esempio: molla



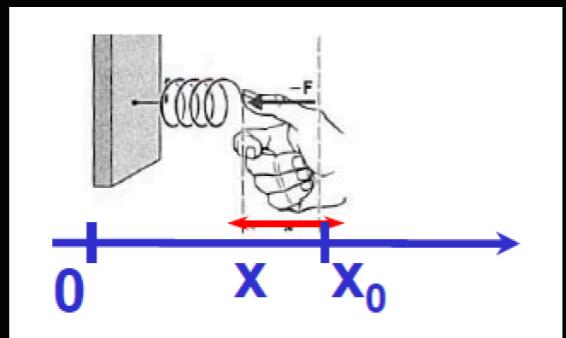
$$F = k(x - x_0)$$

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

Qual'e' la dimensione della costante elastica?

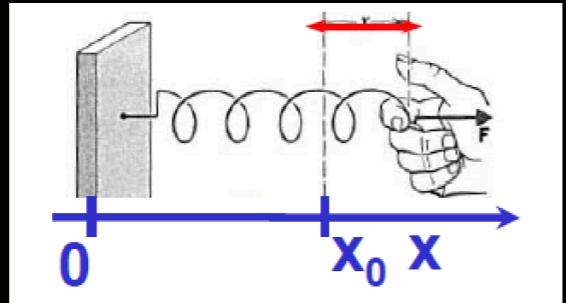
✗ se **comprimo** la molla la forza che esercito è **negativa**



$$x < x_0$$

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

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



$$x > x_0$$

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

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

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

1) il moto è unidimensionale

$$F_x = m a_x$$

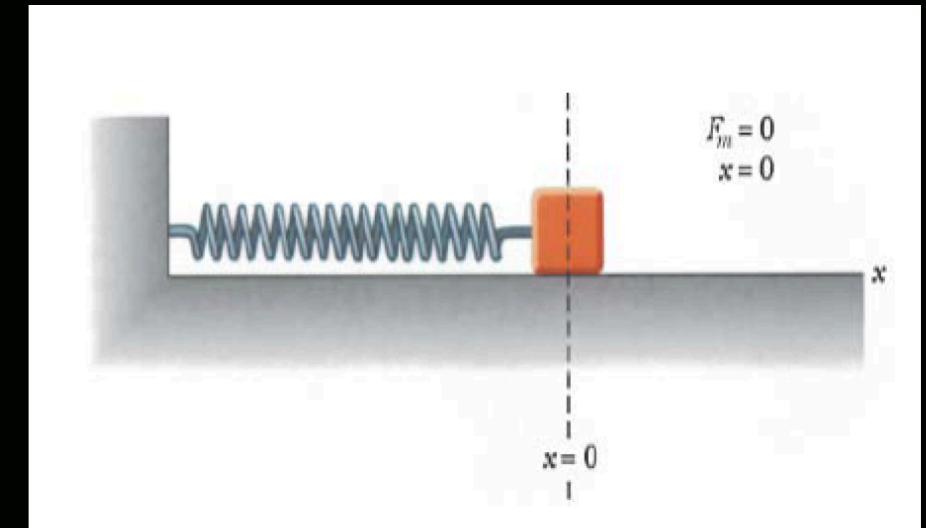
2) il II principio della dinamica si scrive (avendo posto $x_0=0$):

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

3) equazione differenziale di II grado omogenea a coefficienti costanti

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

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



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: Oscillatore armonico

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi_0)$$

con A e φ_0 **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

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

Cosa fanno velocità e accelerazione nel tempo? Cosa succede alla velocità nel punto di estensione massima?

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

Perché l'accelerazione è nulla quando l'oscillatore passa per il punto neutro?