A portrait of a man with a large, curly, light-colored wig, possibly a wigmaster or a character from a historical play. The man has a serious expression and is looking slightly to the right. The background is a plain, light color.

Dinamica

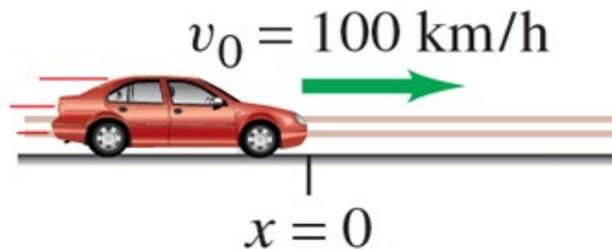
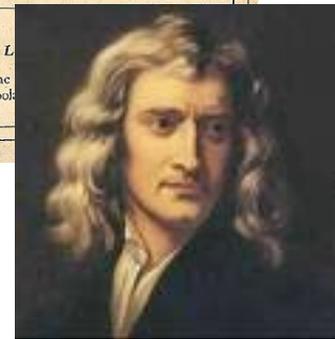
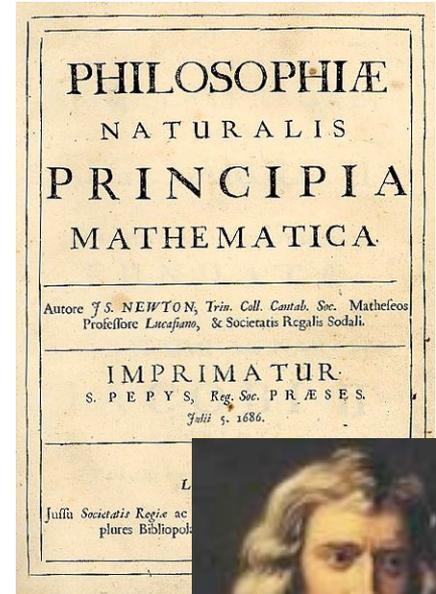
# Le Tre Leggi della Dinamica di Newton

1. Ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme fino a quando non agisca su di esso una forza risultante diversa da zero -> Sistemi di riferimento inerziali e non inerziali

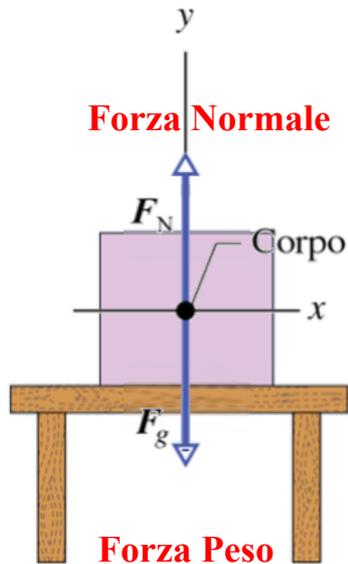
2. La forza netta agente su un corpo è uguale al prodotto della sua massa  $m$  per l'accelerazione  $\vec{a}$  assunta dal corpo:

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

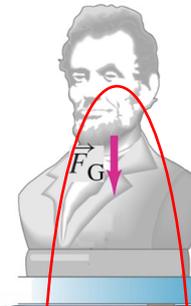
3. Ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria.



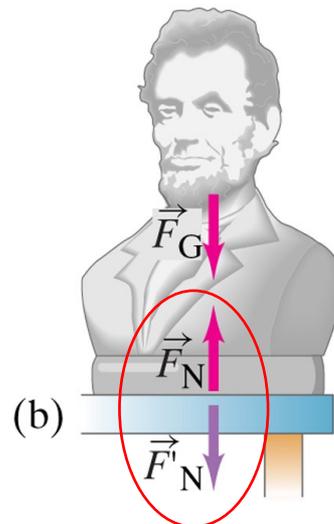
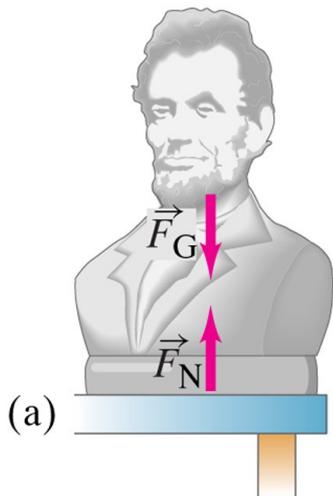
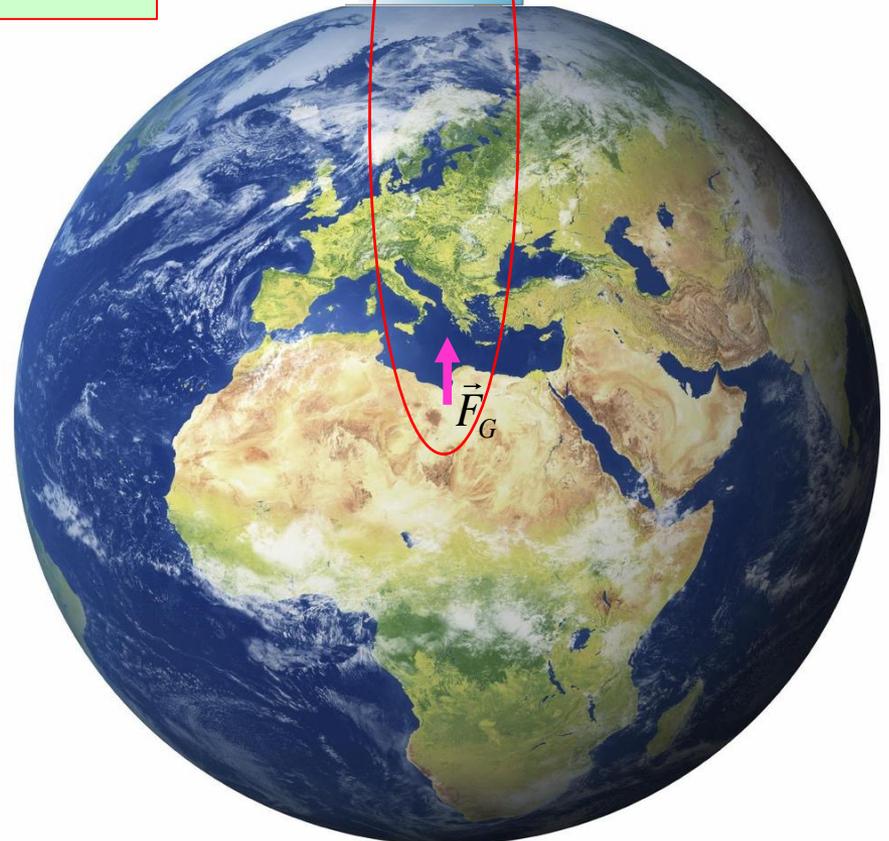
# Forza di Gravità (Peso) e Forza Normale



Forza Peso e Forza Normale sono sempre applicate allo stesso oggetto, quindi NON sono una coppia azione-reazione: si possono sommare vettorialmente e si possono annullare

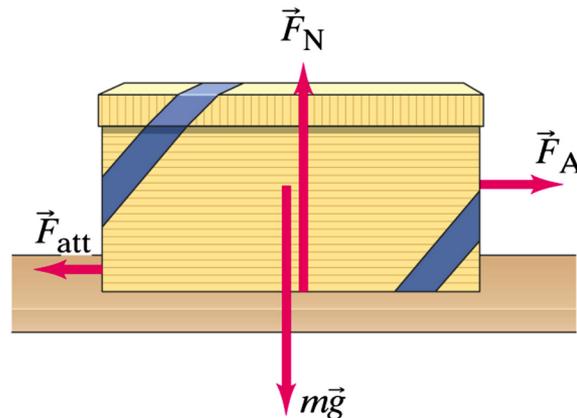
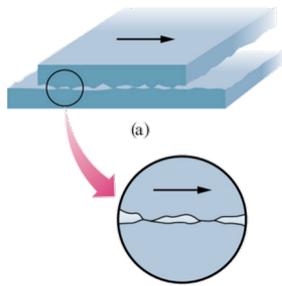
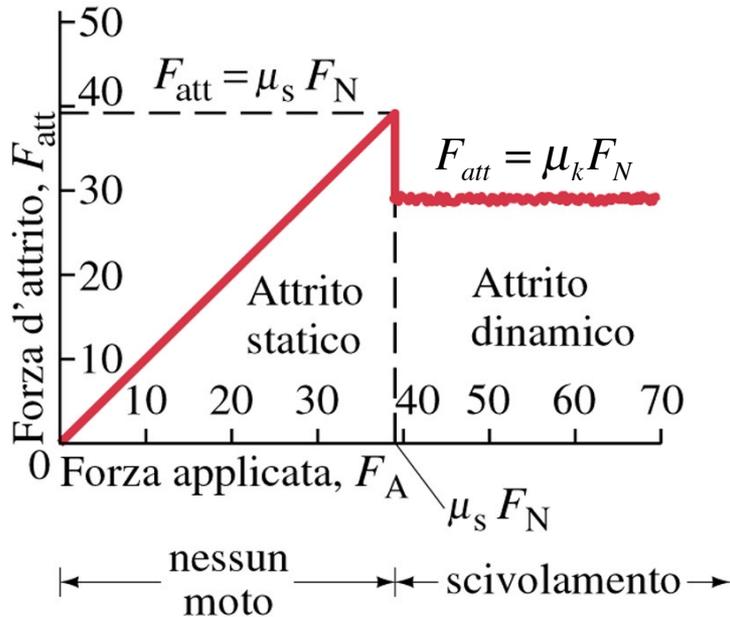


Coppia azione-reazione



Coppia azione-reazione

# Attrito Statico e Dinamico

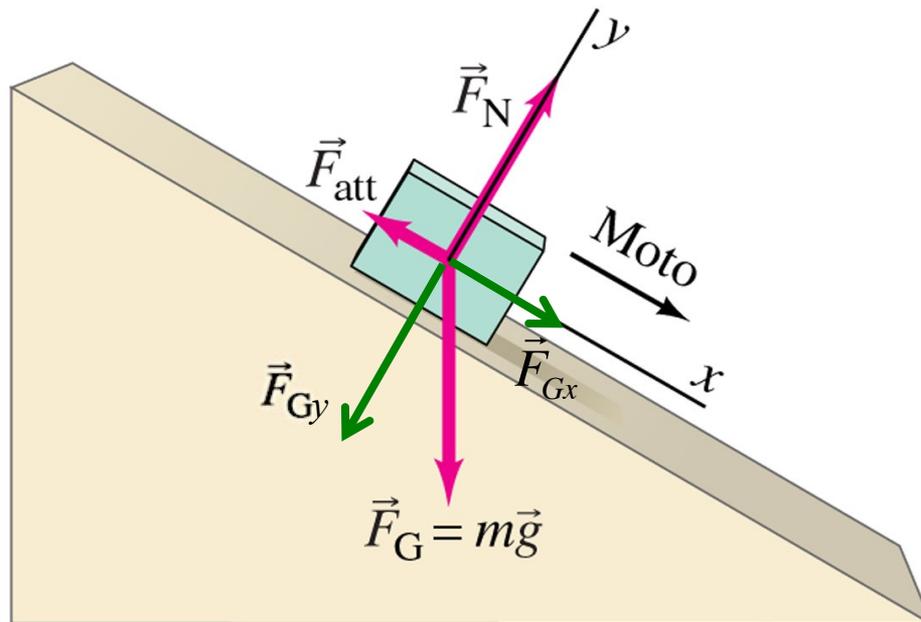


Alcuni valori del coefficiente di attrito radente.<sup>[1]</sup>

Superfici	$\mu_{rs}$ (statico)	$\mu_{rd}$ (dinamico)
Legno - legno	0,50	0,30
Acciaio - acciaio	0,78	0,42
Acciaio - acciaio lubrificato	0,11	0,05
Acciaio - alluminio	0,61	0,47
Acciaio - ottone	0,51	0,44
Acciaio - teflon	0,04	0,04
Acciaio - ghiaccio	0,027	0,014
Acciaio - aria	0,001	0,001
Acciaio - piombo	0,90	n.d.
Acciaio - ghisa	0,40	n.d.
Acciaio - grafite	0,10	n.d.
Acciaio - plexiglas	0,80	n.d.
Acciaio - polistirene	0,50	n.d.
Rame - acciaio	1,05	0,29
Rame - vetro	0,68	0,53
Gomma - asfalto (asciutto)	1,0	0,8
Gomma - asfalto (bagnato)	0,7	0,6
Vetro - vetro	0,9 - 1,0	0,4
Legno sciolinato - neve	0,10	0,05

# Dinamica su Piani inclinati

Sono molto frequenti problemi di dinamica che coinvolgono lo scivolamento di oggetti lungo **piani inclinati**. In questi casi la *competizione tra la forza di gravità e le forze di attrito* non avviene lungo la verticale ma lungo la **direzione del moto** degli oggetti sulla superficie inclinata, direzione che di solito si assume coincidere con l'**asse x** di un opportuno sistema di riferimento, il cui **asse y** è rivolto invece nella direzione perpendicolare a tale superficie:



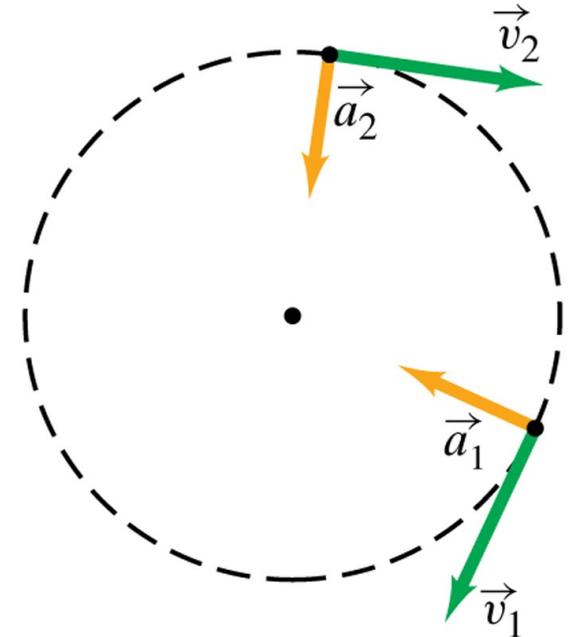
# Dinamica del moto Circolare Uniforme

Studiando la cinematica del **moto circolare uniforme** di un punto materiale su una circonferenza di raggio  $r$ , abbiamo visto che il vettore velocità (di modulo costante e sempre tangente alla traiettoria) è sottoposto ad ogni istante ad un cambiamento di direzione a causa della presenza di una **accelerazione centripeta** diretta verso il centro del cerchio e di modulo costante  $a_C = v^2 / r$ , dove – come sappiamo – la velocità si può anche calcolare conoscendo il **raggio** e il **periodo** di rotazione  $T$  (o la frequenza  $f$ ) :

$$v = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r f$$

Da un **punto di vista dinamico** ciò significa che, per la seconda legge di Newton, sulla particella, che assumiamo di massa  $m$ , deve agire una **forza risultante non nulla** proporzionale alla massa e all'accelerazione della particella stessa.

Dalla seconda legge della dinamica ricaviamo subito che il **modulo** di tale forza deve essere  $F_C = ma_C \rightarrow F_C = mv^2 / r$ , e che la sua **direzione** e il suo **verso** devono coincidere con quelli dell'accelerazione centripeta: anche questa forza punterà dunque verso il centro del cerchio, da cui il nome di **Forza Centripeta**.

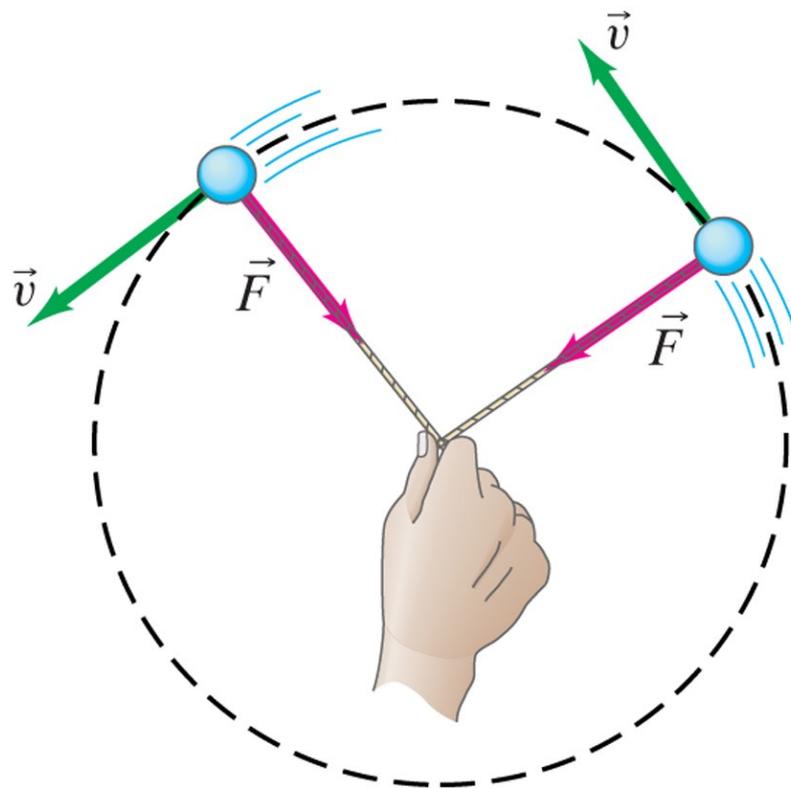


# La Forza Centripeta

## NOTA IMPORTANTE:

La forza centripeta **NON E'** un nuovo tipo di forza che sbuca dal nulla nei moti circolari ma è una sorta di «**soprannome**» che diamo a quelle forze che, applicate a certi oggetti, li costringono in qualche modo a percorrere traiettorie curvilinee o circolari. Ad esempio, nella figura qui accanto, **la forza centripeta che si esercita su una pallina che ruota a velocità costante è rappresentata dalla tensione della corda**, tenuta dalla mano.

Non è dunque il moto circolare della pallina a creare la forza centripeta, come intuitivamente verrebbe da pensare, ma è la **forza centripeta (la tensione)** esercitata dalla corda che, puntando costantemente verso il centro del cerchio, **costringe la pallina a modificare continuamente la sua velocità e quindi a ruotare lungo la sua traiettoria circolare!**

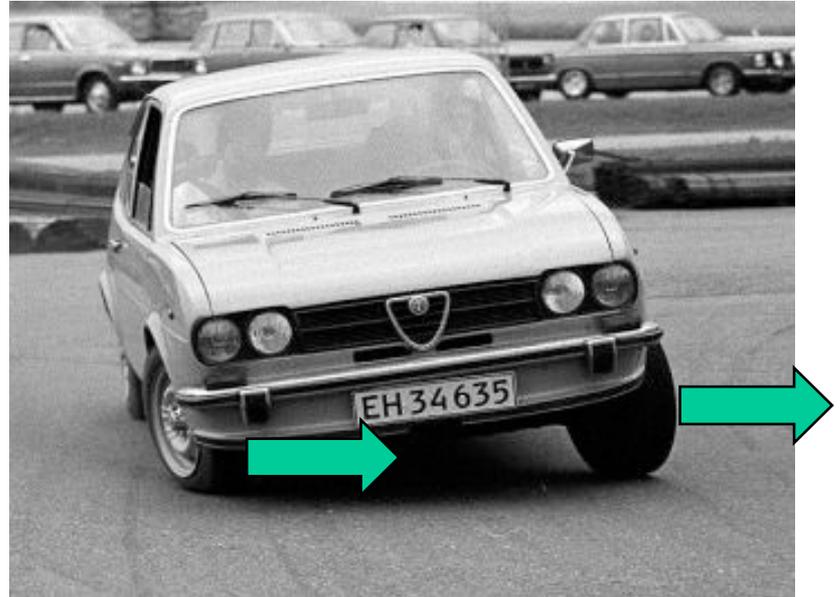


## Altri esempi di Forza Centripeta

### Percorrendo una curva in automobile

Da dove ha origine la forza centripeta che mantiene l'auto sulla curva impedendole di sbandare?

**Dalla forza di attrito delle ruote col terreno!**



### Orbitando intorno alla Terra

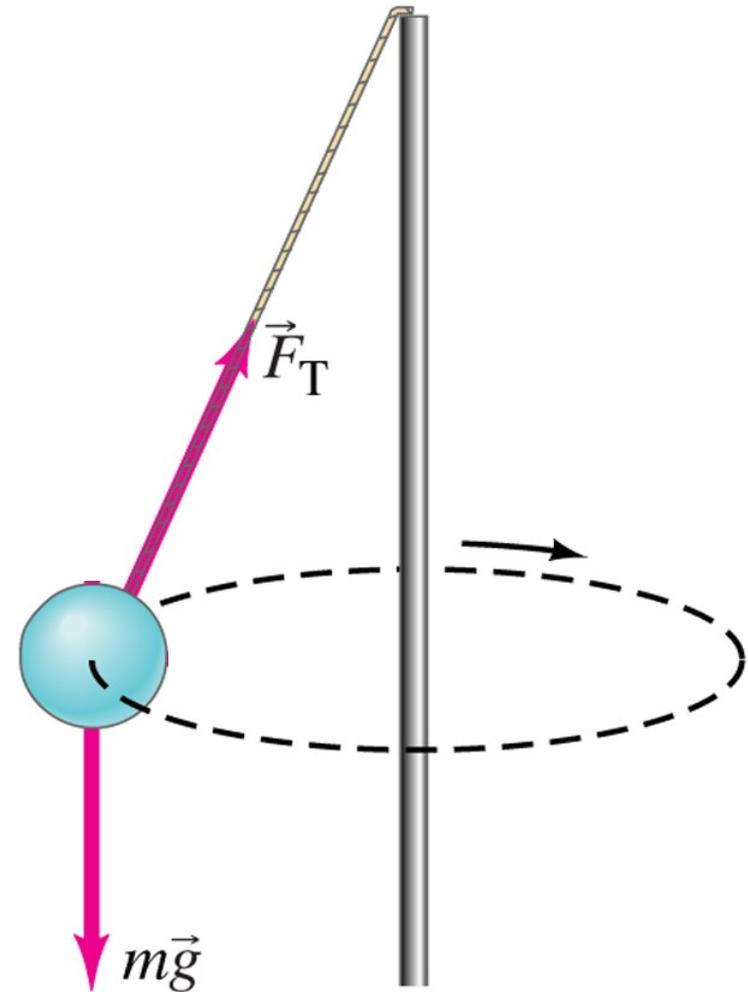
Da dove ha origine la forza centripeta che mantiene la navicella Atlantis in orbita attorno alla terra?

**Dalla forza di attrazione gravitazionale della Terra!**

# **La forza centripeta**

### Esempio concettuale 1

Una palla viene colpita e ruota attorno a un palo essendo legata alla sua estremità superiore (come in figura). In che direzione è rivolta l'**accelerazione centripeta**? Quale è la forza che la causa?



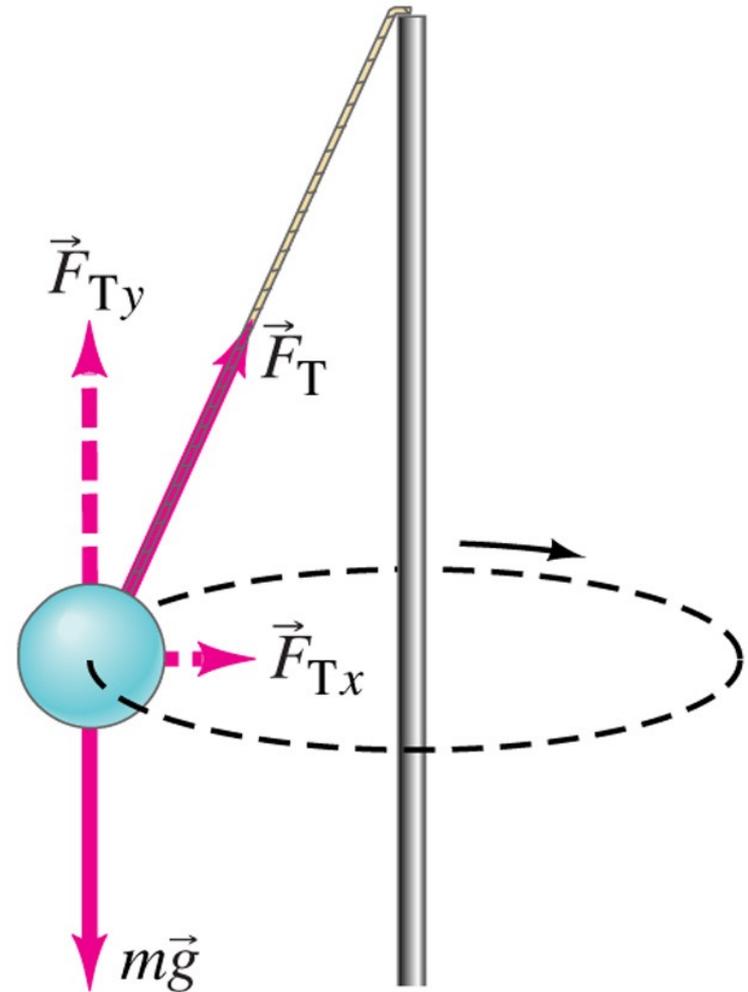
Fisica

Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

### Esempio concettuale 1

Una palla viene colpita e ruota attorno a un palo essendo legata alla sua estremità superiore (come in figura). In che direzione è rivolta l'**accelerazione centripeta**? Quale è la forza che la causa?

Evidentemente stavolta è solo la **componente orizzontale  $F_{Tx}$**  della **tensione della corda** a rappresentare la **forza centripeta**, mentre quella verticale  $F_{Ty}$  serve a **controbilanciare la forza peso della palla**.

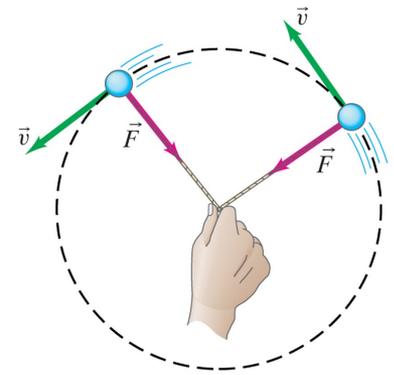


Fisica

Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

## Esercizio

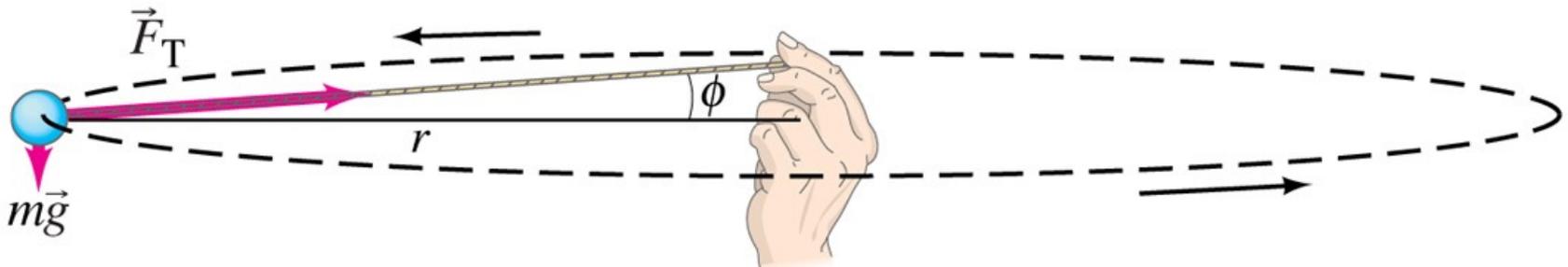
Calcolare la forza centripeta che bisogna esercitare su una **corda** attaccata a una **palla** di massa  $m=0.150$  kg per farla roteare su una circonferenza orizzontale di raggio  $0.600$  m, sapendo che la palla compie  $2.00$  giri al secondo ( $T=0.500$  s).



Il diagramma delle forze per la palla è mostrato nella figura qui sotto e si vede che su di essa agiscono la **forza peso**, di modulo  $mg$  e diretta verso il basso, e la **forza di tensione** di intensità  $F_T$  esercitata dalla corda in direzione della mano posta al centro della traiettoria circolare: sarà quest'ultima a rappresentare la **forza centripeta**.

In realtà sarebbe impossibile far roteare la palla mantenendola **perfettamente** orizzontale (cioè annullando l'angolo  $\Phi$ ), in quanto è necessaria una piccola componente verticale della tensione della corda per **equilibrare** la forza peso della pallina. Assumiamo dunque, in prima approssimazione, che il peso sia piccolo (anche se in realtà è pari ad  $1.5\text{N}$ ) e che  $\Phi$  sia trascurabile, e applichiamo la seconda legge di Newton alla direzione radiale:

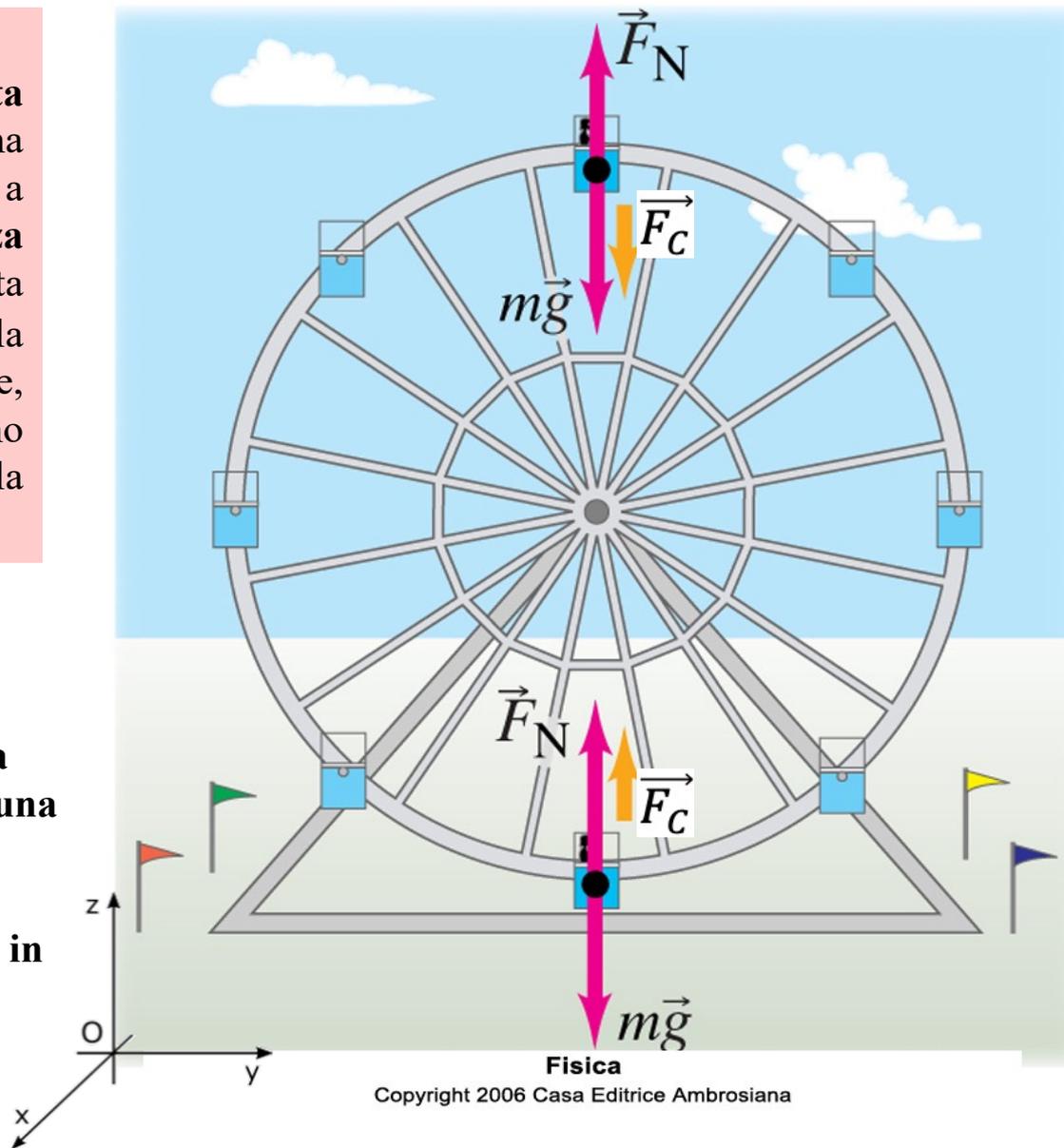
$$F_c \equiv F_T = m \frac{v^2}{r} = \frac{m}{r} \left( \frac{2\pi r}{T} \right)^2 = \frac{4\pi^2 r m}{T^2} = \frac{4\pi^2 (0.600\text{m})(0.150\text{kg})}{(0.500\text{s})^2} \approx 14\text{N}$$



## Esempio concettuale 2

Un turista su una ruota panoramica si muove su una circonferenza verticale di raggio  $r$  a velocità costante  $v$ . La forza normale che il seggiolino esercita sul turista nel punto più alto della ruota è: (a) minore, (b) maggiore, (c) uguale a quella che il seggiolino esercita nel punto più basso della ruota?

Si può rispondere, anche se non è molto intuitivo, ragionando dal punto di vista del sistema di riferimento terrestre. Qui la forza centripeta non è, come già detto, una nuova forza che si aggiunge alle altre ma è rappresentata dalla risultante delle DUE uniche forze in gioco, la forza peso e la forza normale, e sarà per definizione negativa nel punto più alto e positiva in quello più basso.



Fisica

Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

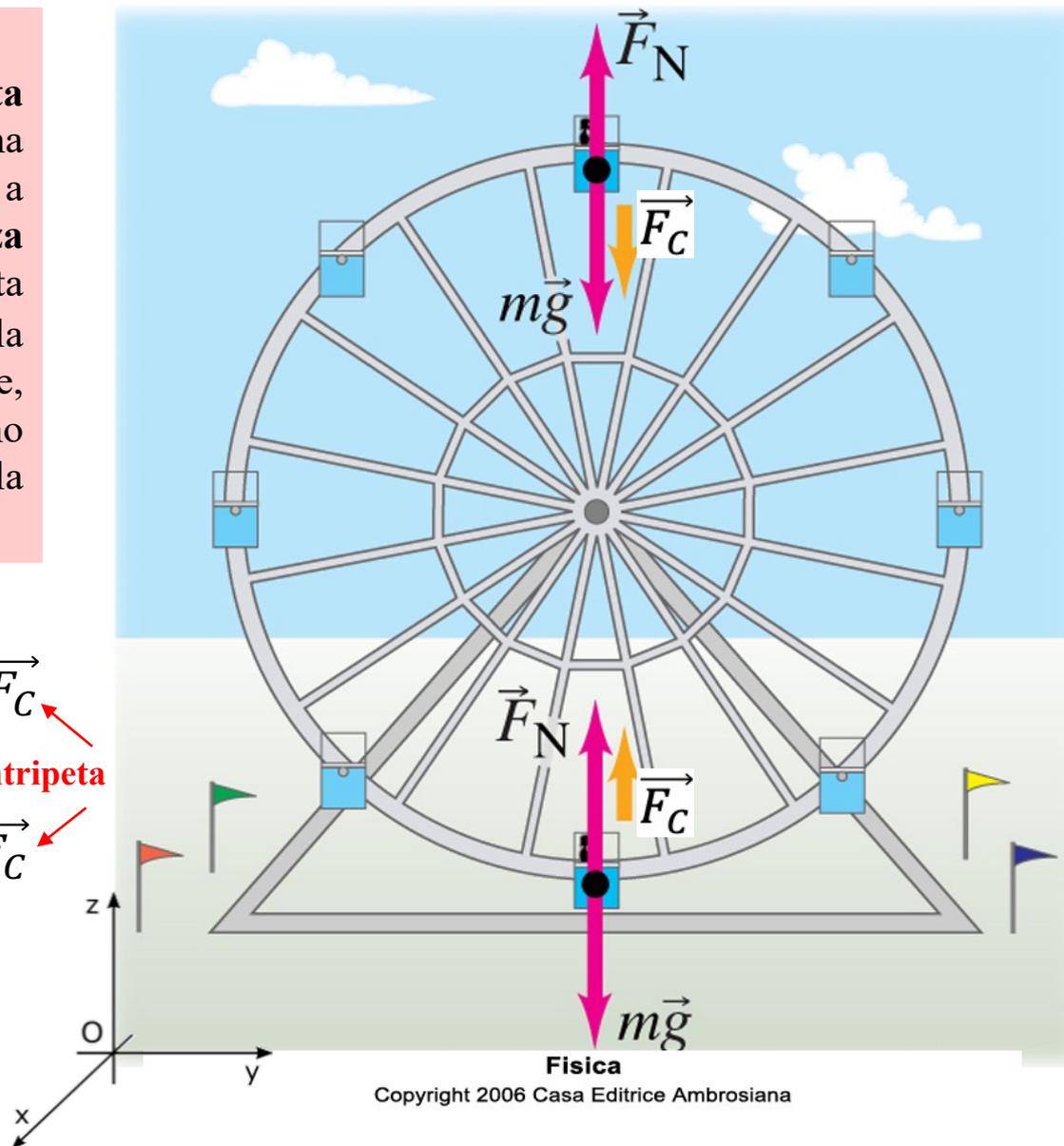
## Esempio concettuale 2

Un turista su una ruota panoramica si muove su una circonferenza verticale di raggio  $r$  a velocità costante  $v$ . La forza normale che il seggiolino esercita sul turista nel punto più alto della ruota è: (a) minore, (b) maggiore, (c) uguale a quella che il seggiolino esercita nel punto più basso della ruota?

Nel punto più alto:  $\vec{F}_N - m\vec{g} \stackrel{\text{def}}{=} -\vec{F}_C$

Forza Centripeta

Nel punto più basso:  $\vec{F}_N - m\vec{g} \stackrel{\text{def}}{=} \vec{F}_C$



## Esempio concettuale 2

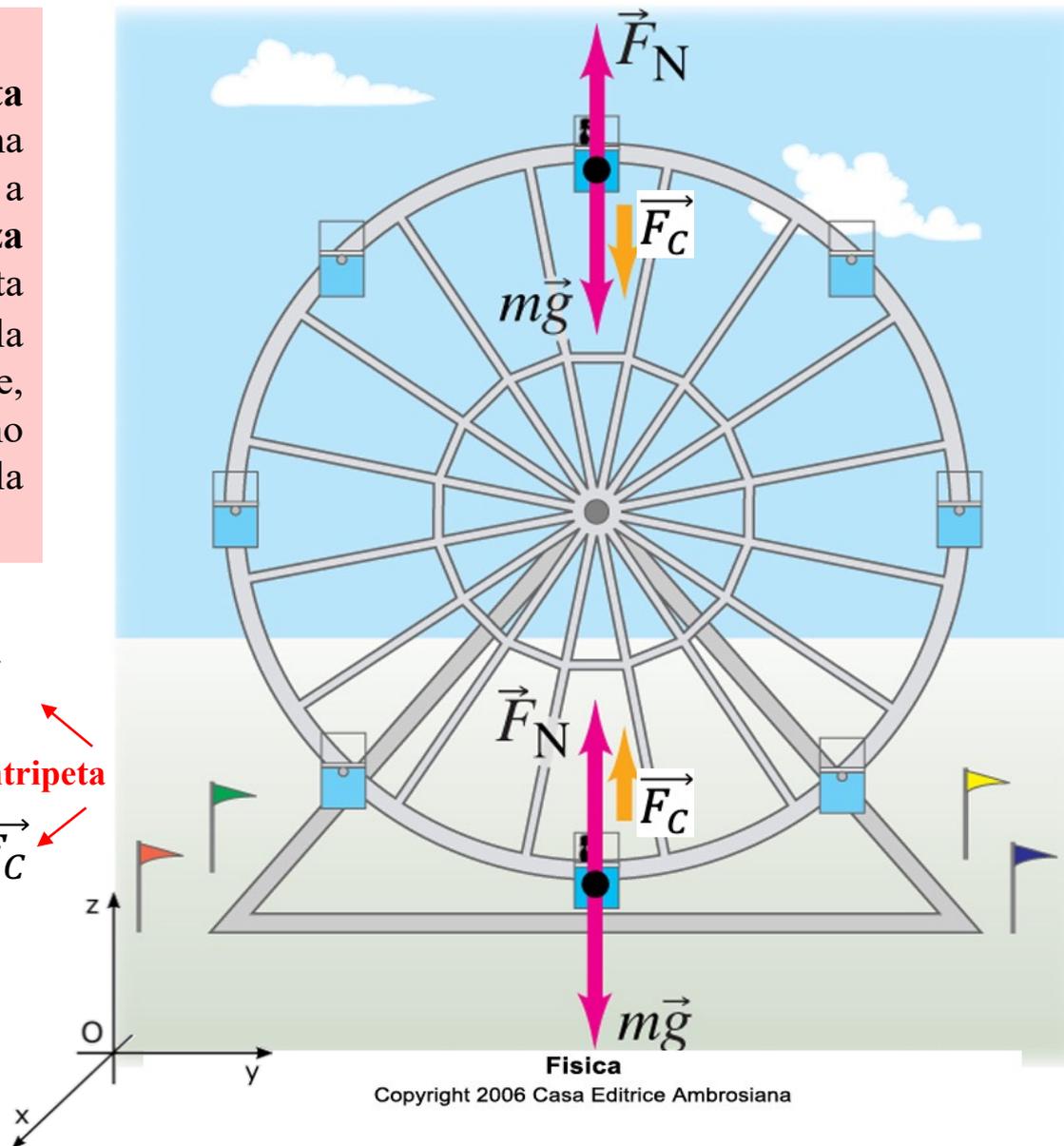
Un turista su una ruota panoramica si muove su una circonferenza verticale di raggio  $r$  a velocità costante  $v$ . La forza normale che il seggiolino esercita sul turista nel punto più alto della ruota è: (a) minore, (b) maggiore, (c) uguale a quella che il seggiolino esercita nel punto più basso della ruota?

Quindi avremo:

Nel punto più alto:  $\vec{F}_N = m\vec{g} - \vec{F}_C$

Forza Centripeta

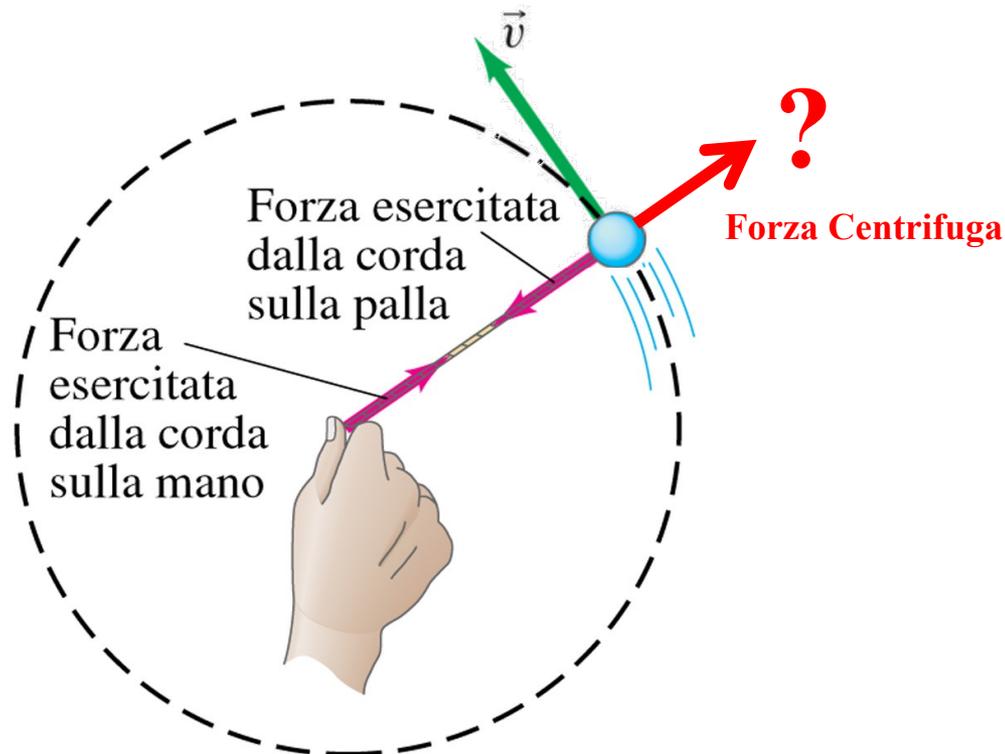
Nel punto più basso:  $\vec{F}_N = m\vec{g} + \vec{F}_C$



# Forza Centripeta e Forza Centrifuga

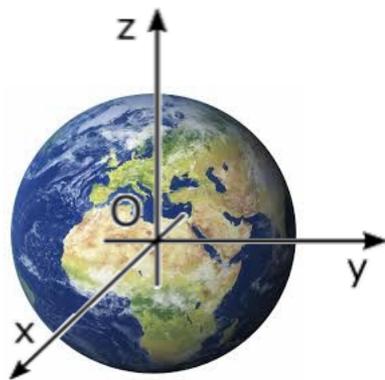
E' indubbio che, nell'esperienza della pallina che ruota per effetto della tensione della corda trattenuta dalla nostra mano, **la mano sente una forza**, esercitata su di lei dalla corda, **che punta verso l'esterno**: questa forza appare uguale ed opposta a quella centripeta (esercitata dalla corda sulla palla) e per questo viene chiamata **forza centrifuga**. La nostra sensazione è che anche la pallina senta questa forza e che per questo cerchi di «fuggire» verso l'esterno...

**Ma è davvero così?**

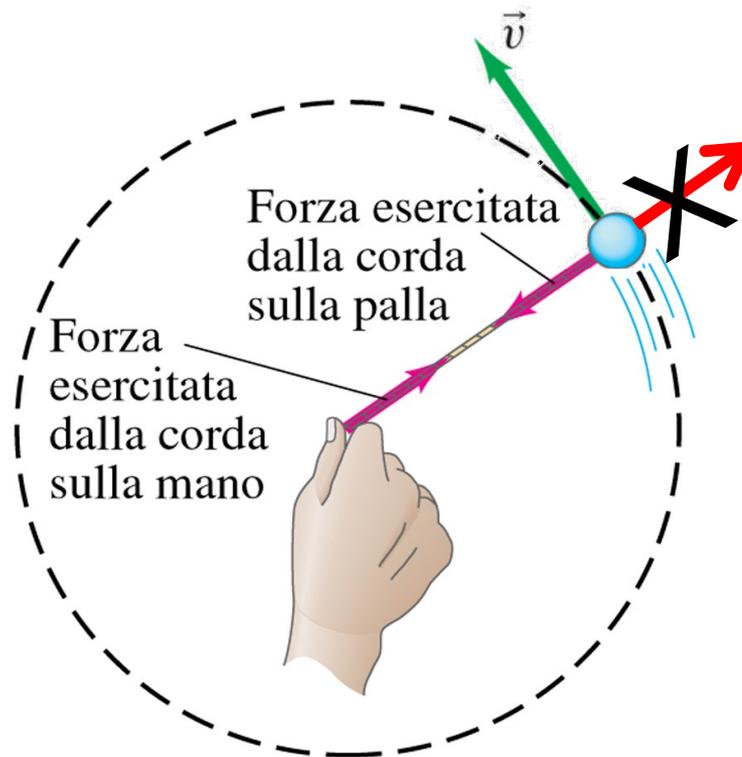


# Forza Centripeta e Forza Centrifuga

**NO:** in realtà, nel sistema di riferimento inerziale della Terra, **l'unica forza agente sulla pallina è la forza centripeta** esercitata dalla corda verso il centro della traiettoria circolare e **non esiste nessuna forza reale indipendente** diretta verso l'esterno: in questo sistema di riferimento terrestre la **forza centrifuga avvertita dalla mano** e generata su di essa dalla corda è solo una forza di reazione, per il terzo principio della dinamica, alla forza che la mano esercita sulla corda.

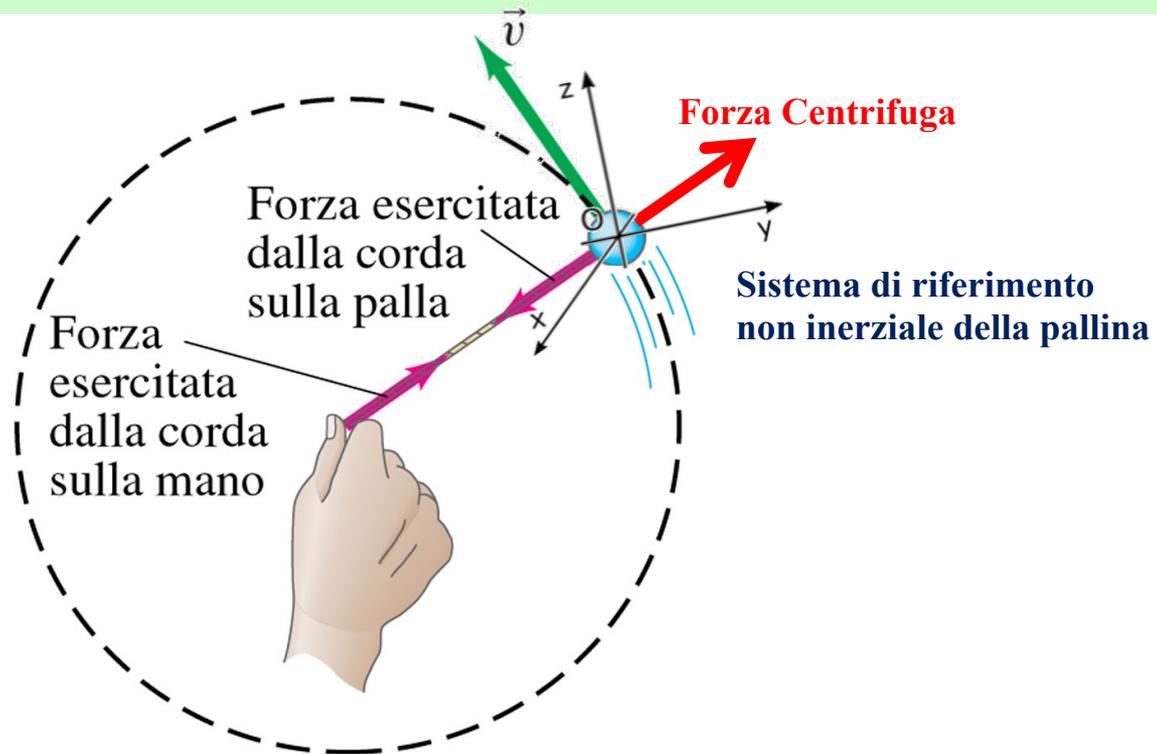


Sistema di riferimento inerziale della Terra



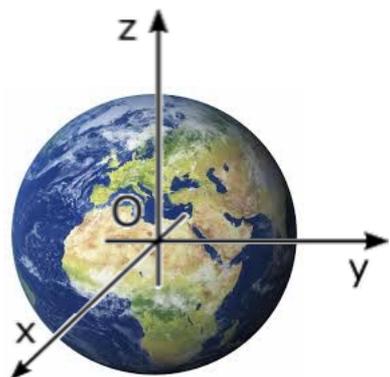
# Forza Centripeta e Forza Centrifuga

D'altra parte, **nel sistema di riferimento in rotazione della pallina**, quest'ultima – che per inerzia tenderebbe a muoversi lungo la direzione tangente della sua velocità – è costretta, dalla forza esercitata su di lei dalla corda, a deviare continuamente dalla sua potenziale traiettoria rettilinea e a percorrere la circonferenza: **la pallina percepisce questa costrizione come una forza centrifuga reale diretta verso l'esterno!** In altre parole, la **forza centrifuga** è una forza (**apparente** nel sistema di riferimento terrestre, ma **reale** nel sistema di riferimento della pallina) sintomatica del fatto che un certo corpo si trova in un **sistema di riferimento non inerziale!**

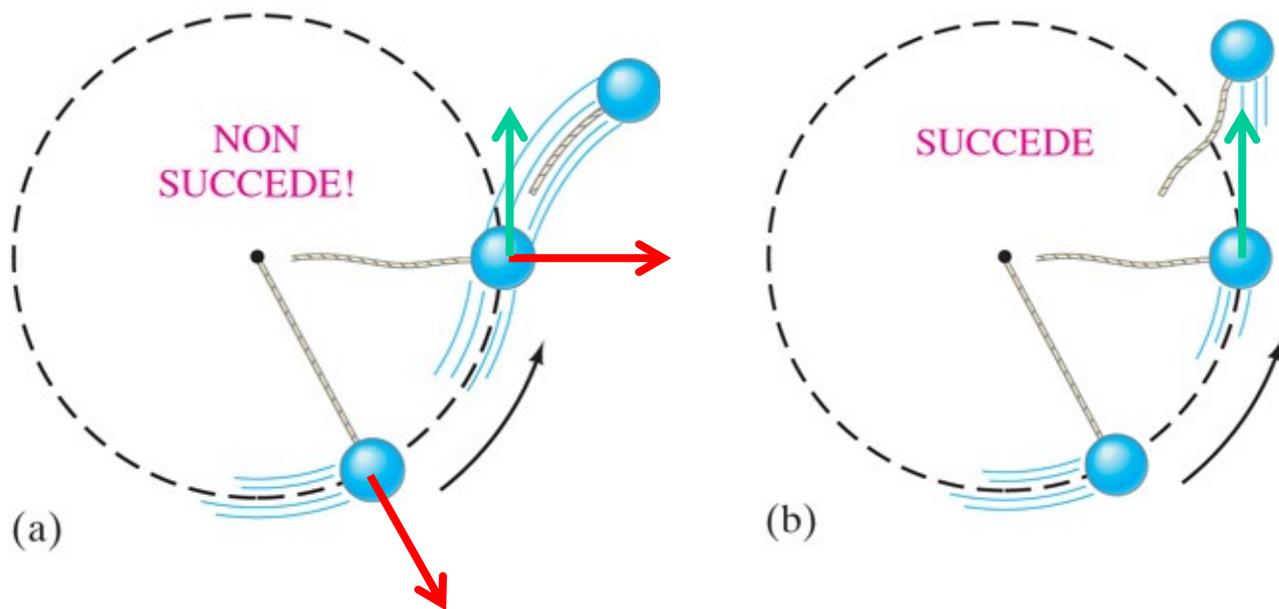


# Forza Centripeta e Forza Centrifuga

Il fatto che, nel sistema di riferimento della Terra, sulla pallina non agisca nessuna forza reale indipendente da quella centripeta e diretta verso l'esterno diventa evidente se ad un certo istante **si molla la corda** e si lascia libera la pallina di abbandonare la sua traiettoria circolare: una volta scomparsa la forza centripeta, se veramente esistesse una forza centrifuga indipendente, la pallina volerebbe via in **direzione radiale** come mostrato in figura (a); al contrario, sperimentalmente, essa segue invece, per **inerzia**, la **direzione tangenziale** alla traiettoria, come mostrato in figura (b), che è poi la direzione che il suo vettore velocità aveva all'istante in cui la mano ha mollato la presa (dunque la forza centrifuga scompare insieme a quella centripeta!).

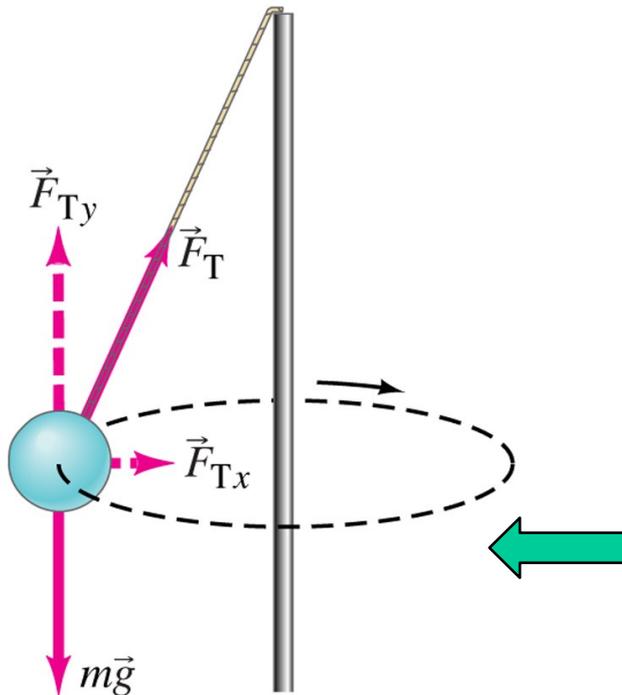


Sistema di riferimento inerziale della Terra



# Esempi di Forza Centrifuga

La **forza centrifuga** diretta verso l'esterno che avvertiamo quando giriamo seduti su una **giostra** come quella mostrata in figura, è dunque una **forza apparente** dal punto di vista del riferimento inerziale solidale con la Terra, ma diventa **reale** per noi che ci troviamo nel riferimento in **rotazione** solidale con la giostra, che è **non inerziale**: essa è, ancora una volta, dovuta al fatto che il nostro corpo, il quale tenderebbe **per inerzia** a proseguire il suo moto in linea retta, è invece costretto a girare assieme alla giostra a causa della **forza centripeta** esercitata dalla (componente orizzontale della) tensione della catena sui seggiolini su cui siamo seduti (come abbiamo visto accadere nell'esempio della palla incatenata).



Fisica

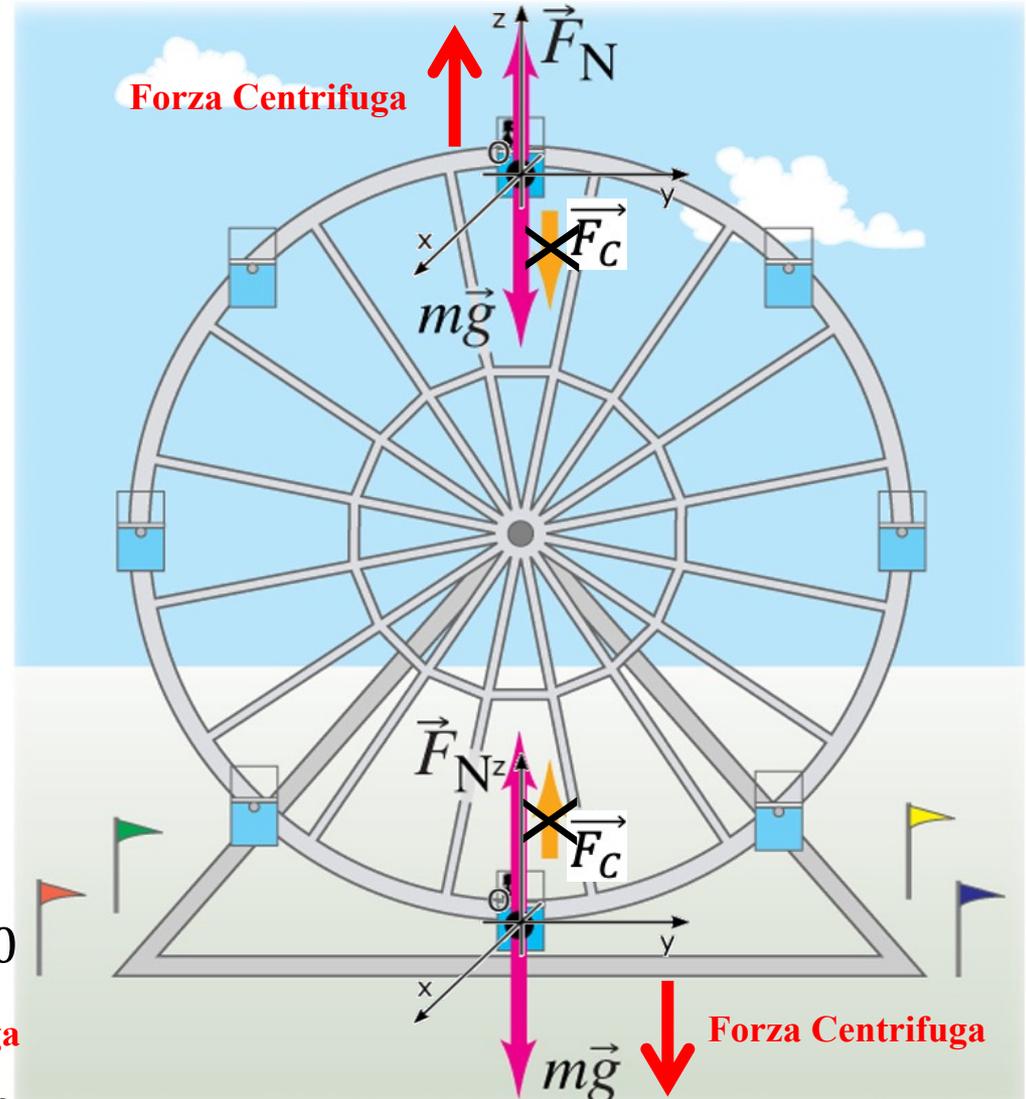
Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana



# Esempi di Forza Centrifuga

Riprendiamo l'esempio concettuale della ruota visto poco fa. Si chiedeva:

La **forza normale** che il seggiolino esercita sul turista nel punto più alto della ruota è: (a) **minore**, (b) maggiore, (c) uguale a quella che il seggiolino esercita nel punto più basso della ruota? **E' più intuitivo rispondere ragionando dal punto di vista del sistema di riferimento del turista: nella cabina il turista non percepisce nessuna forza centripeta, ma suppone invece che esista una forza centrifuga, uguale ed opposta a quella centripeta, che si aggiunge alla forza peso e a quella normale in modo da formare un sistema equilibrato (visto che nel suo S.R. lui è fermo).**



Fisica

Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

Nel punto più alto:  $\vec{F}_N - m\vec{g} + \vec{F}_C = 0$

Forza Centrifuga

Nel punto più basso:  $\vec{F}_N - m\vec{g} - \vec{F}_C = 0$

# Esempi di Forza Centrifuga

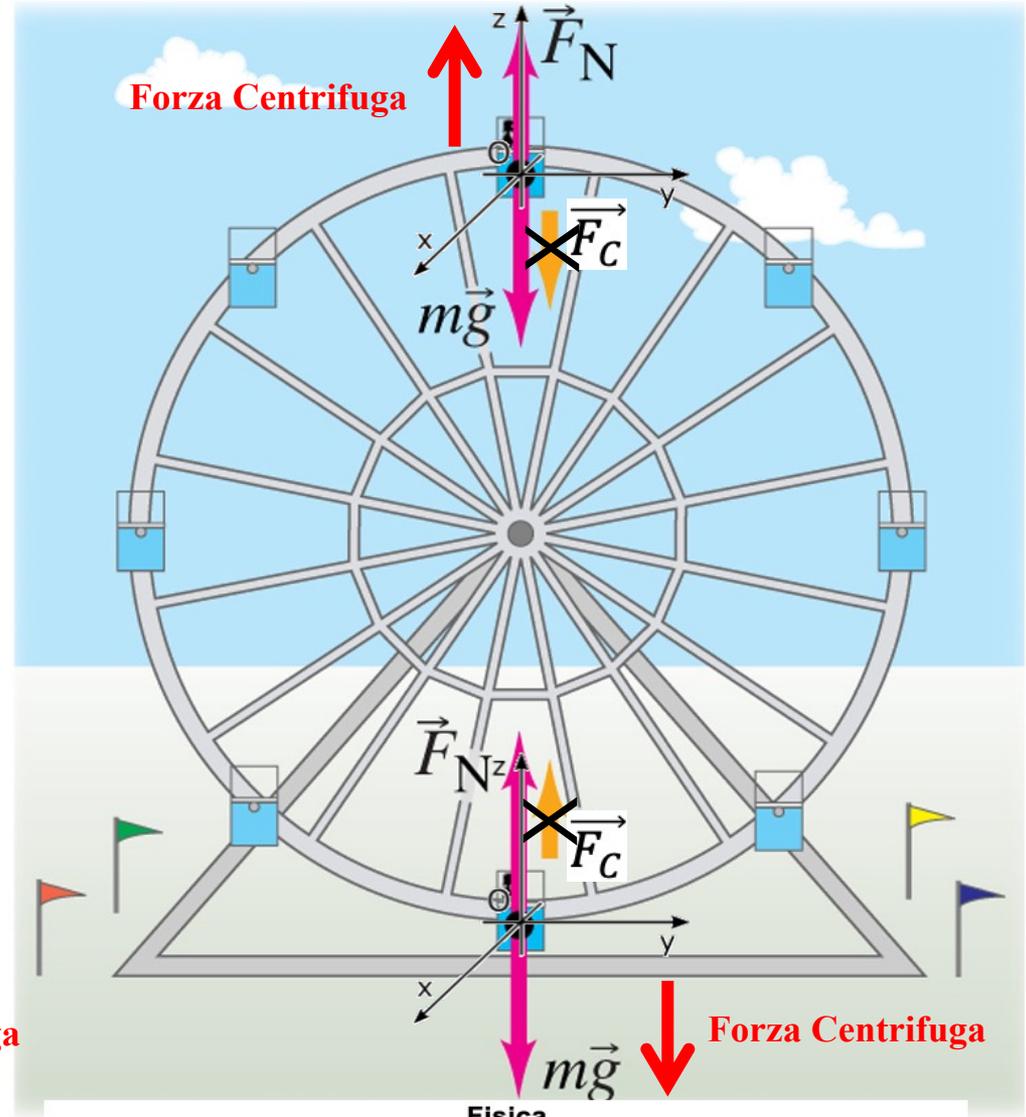
Riprendiamo l'esempio concettuale della ruota visto poco fa. Si chiedeva:

La **forza normale** che il seggiolino esercita sul turista nel punto più alto della ruota è: (a) **minore**, (b) maggiore, (c) uguale a quella che il seggiolino esercita nel punto più basso della ruota? **E' più intuitivo rispondere ragionando dal punto di vista del sistema di riferimento del turista: nella cabina il turista non percepisce nessuna forza centripeta, ma suppone invece che esista una forza centrifuga, uguale ed opposta a quella centripeta, che si aggiunge alla forza peso e a quella normale in modo da formare un sistema equilibrato (visto che nel suo S.R. lui è fermo).**

Nel punto più alto:  $\vec{F}_N = m\vec{g} - \vec{F}_C$

Forza Centrifuga

Nel punto più basso:  $\vec{F}_N = m\vec{g} + \vec{F}_C$



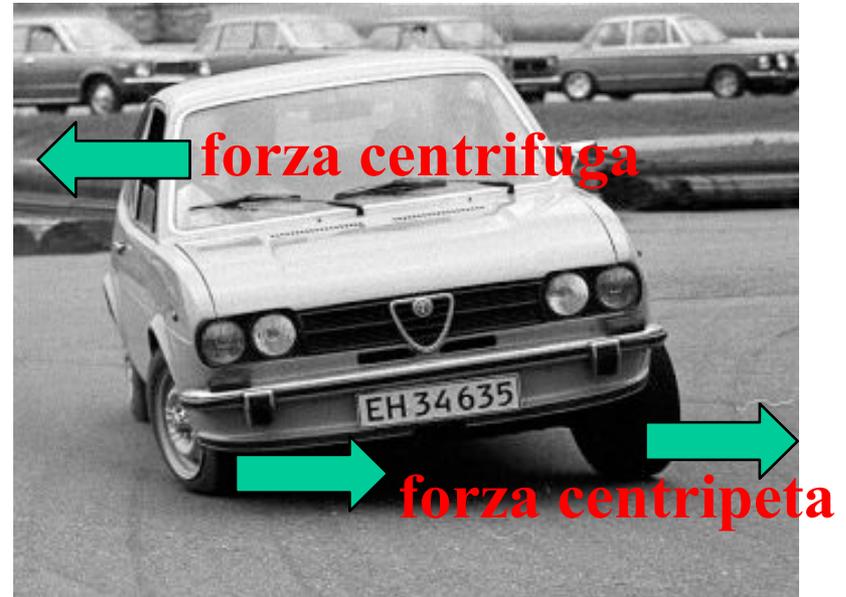
Fisica

Copyright 2006 Casa Editrice Ambrosiana

## Esempi di Forza Centripeta e Centrifuga

### Percorrendo una curva in automobile

Ormai sappiamo da dove ha origine la forza centripeta che mantiene l'auto sulla curva impedendole di sbandare, cioè dall'attrito delle ruote col terreno. Ma un passeggero dentro l'auto, durante la curva, sperimenta una forza centrifuga uguale ed opposta a quella centripeta, quindi verso l'esterno della curva.



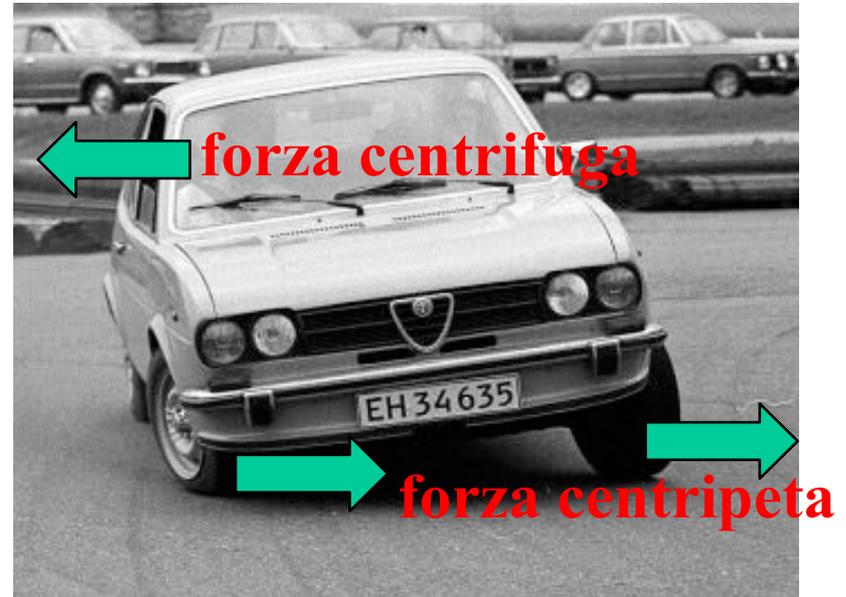
### Orbitando intorno alla Terra

Sappiamo che la forza centripeta che mantiene una navicella in orbita attorno alla terra è rappresentata dalla attrazione gravitazionale terrestre.

## Esempi di Forza Centripeta e Centrifuga

### Percorrendo una curva in automobile

Ormai sappiamo da dove ha origine la forza centripeta che mantiene l'auto sulla curva impedendole di sbandare, cioè dall'attrito delle ruote col terreno. Ma un passeggero dentro l'auto, durante la curva, sperimenta una forza centrifuga uguale ed opposta a quella centripeta, quindi verso l'esterno della curva.



### Orbitando intorno alla Terra

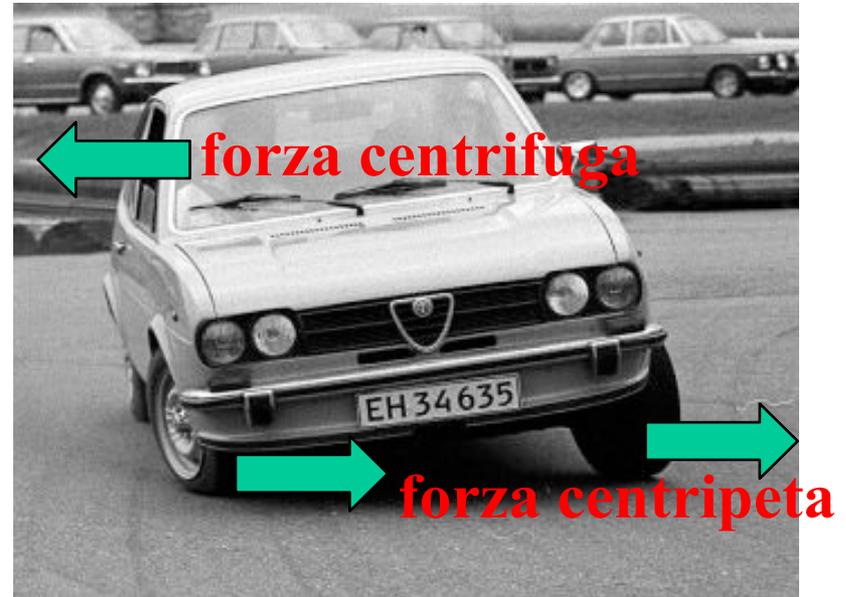
Sappiamo che la forza centripeta che mantiene una navicella in orbita attorno alla terra è rappresentata dalla attrazione gravitazionale terrestre.

Ma perchè, diversamente dal passeggero dell'auto, che viene schiacciato contro lo sportello, un astronauta dentro la navicella NON sente alcuna forza centrifuga agire su di lui ma sperimenta uno stato di galleggiamento, come in assenza di peso?

## Esempi di Forza Centripeta e Centrifuga

### Percorrendo una curva in automobile

Ormai sappiamo da dove ha origine la forza centripeta che mantiene l'auto sulla curva impedendole di sbandare, cioè dall'attrito delle ruote col terreno. Ma un passeggero dentro l'auto, durante la curva, sperimenta una forza centrifuga uguale ed opposta a quella centripeta, quindi verso l'esterno della curva.



### Orbitando intorno alla Terra

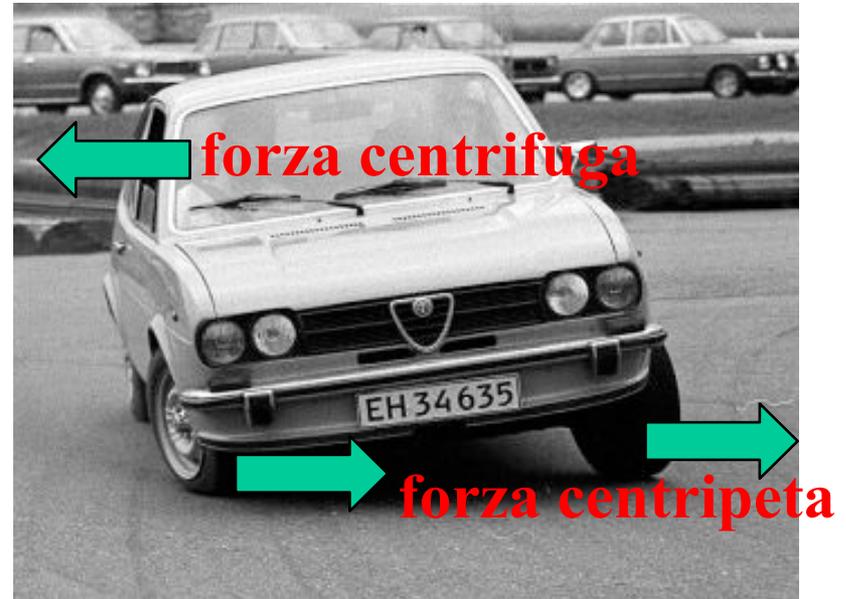
Sappiamo che la forza centripeta che mantiene una navicella in orbita attorno alla terra è rappresentata dalla attrazione gravitazionale terrestre.

Ma perchè, diversamente dal passeggero dell'auto, che viene schiacciato contro lo sportello, un astronauta dentro la navicella NON sente alcuna forza centrifuga agire su di lui ma sperimenta uno stato di galleggiamento, come in assenza di peso?

# Esempi di Forza Centripeta e Centrifuga

## Percorrendo una curva in automobile

Ormai sappiamo da dove ha origine la forza centripeta che mantiene l'auto sulla curva impedendole di sbandare, cioè dall'attrito delle ruote col terreno. Ma un passeggero dentro l'auto, durante la curva, sperimenta una forza centrifuga uguale ed opposta a quella centripeta, quindi verso l'esterno della curva.



## Orbitando intorno alla Terra

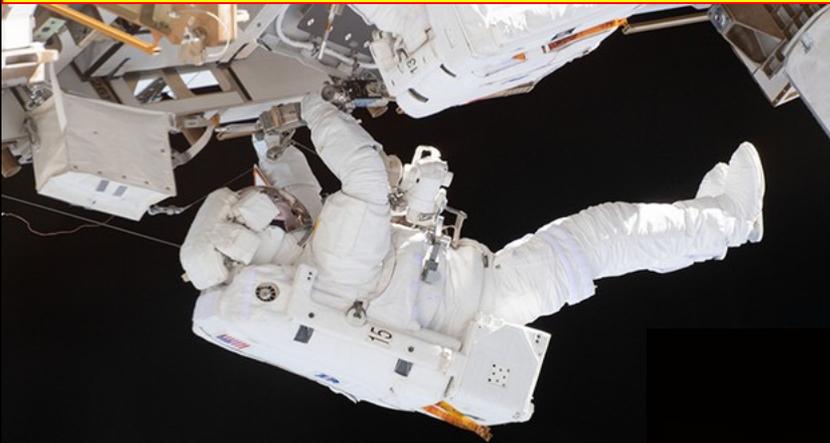
Sappiamo che la forza centripeta che mantiene una navicella in orbita attorno alla terra è rappresentata dalla attrazione gravitazionale terrestre.

Ma perchè, diversamente dal passeggero dell'auto, che viene schiacciato contro lo sportello, un astronauta dentro la navicella NON sente alcuna forza centrifuga agire su di lui ma sperimenta uno stato di galleggiamento, come in assenza di peso?

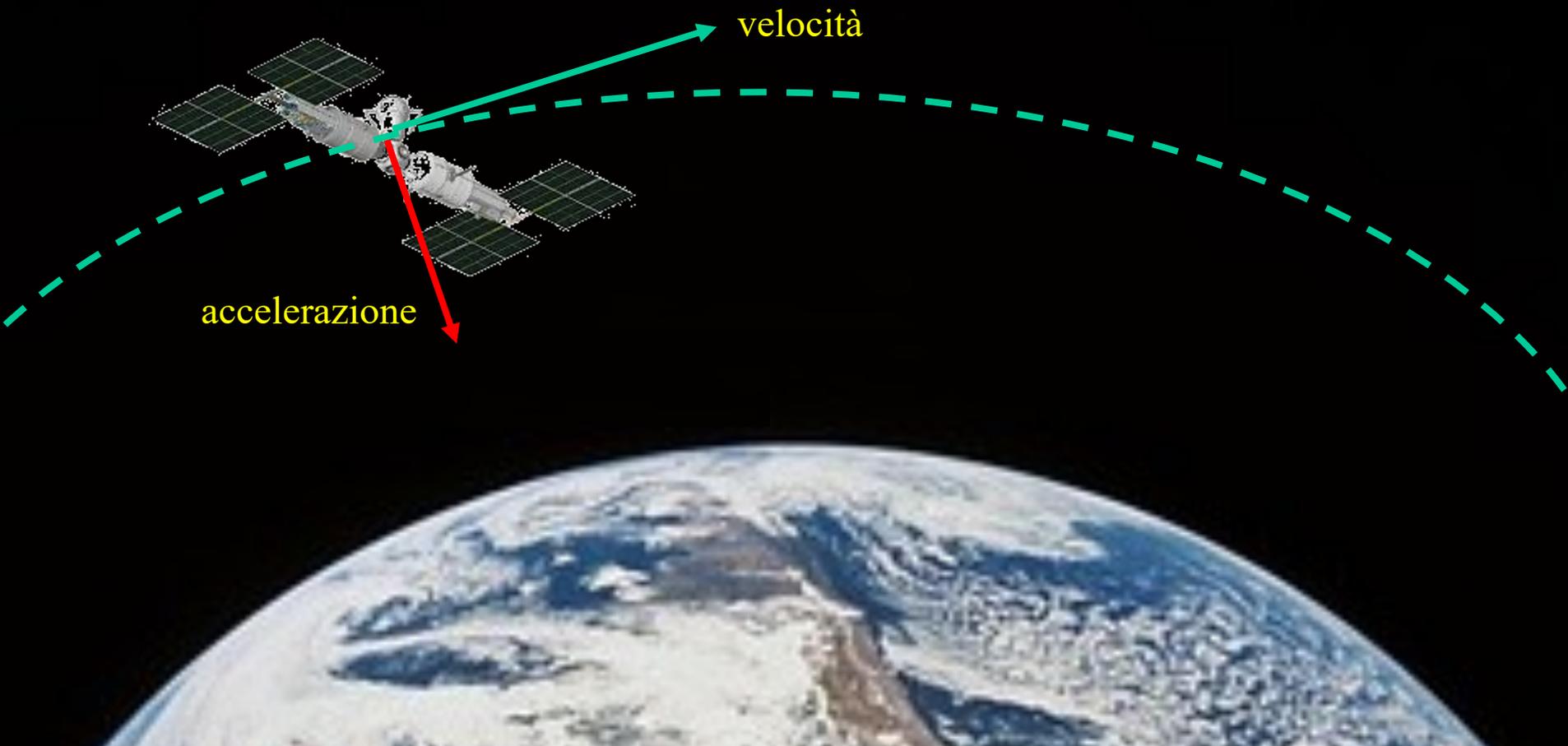
**Perché la forza gravitazionale è un'interazione fondamentale e agisce nello stesso modo sia sulla navicella che sugli astronauti al suo interno, i quali saranno dunque in orbita attorno alla Terra tanto quanto la navicella!**



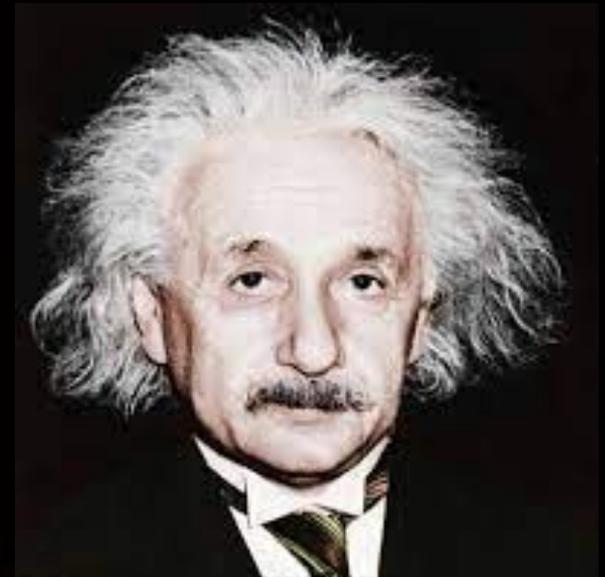
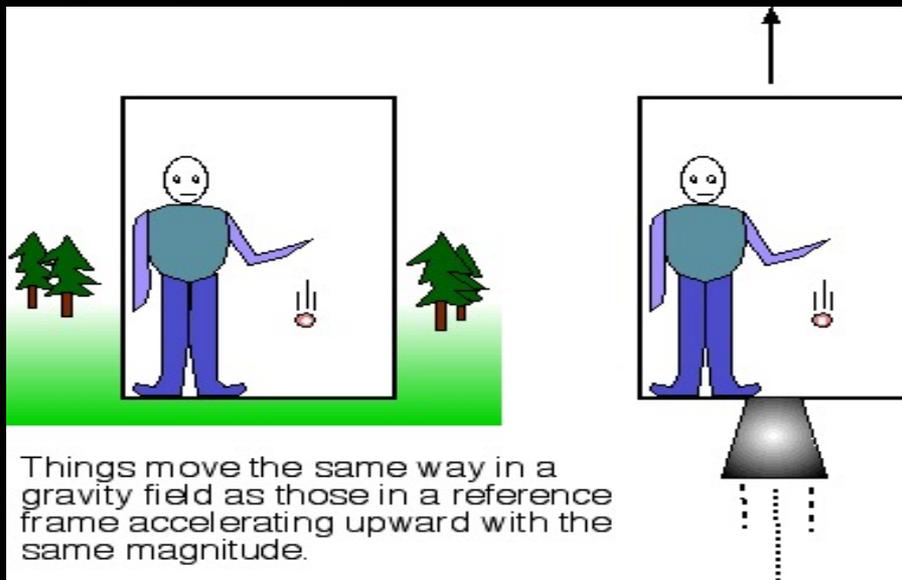
Il sistema di riferimento solidale a una navicella in orbita attorno alla Terra si comporta quindi, stranamente, come un **sistema inerziale**, e lo dimostra il fatto che, quando per qualche motivo escono fuori dalla navicella, gli astronauti continuano ad orbitare esattamente come facevano al suo interno...



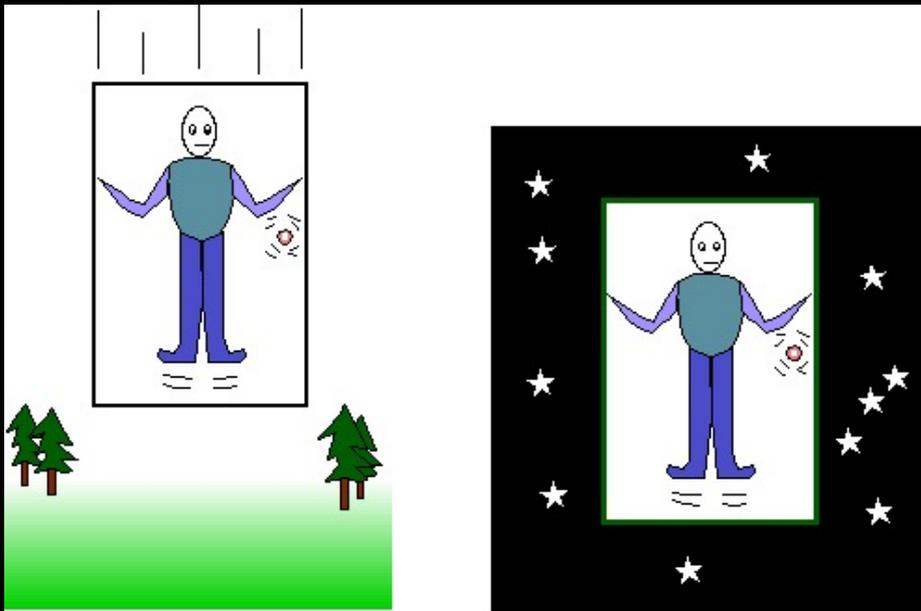
Ma il **vero motivo** per cui una navicella in orbita attorno alla Terra si comporta come un sistema di riferimento inerziale è che, in realtà, essa è in continua **caduta libera** all'interno del campo gravitazionale terrestre...



Con il suo **Principio di Equivalenza**, alla base della Relatività Generale (1915), Einstein stabilì: (1) che un sistema di riferimento accelerato è **equivalente** a un sistema di riferimento fermo in cui sia presente un campo gravitazionale!



Con il suo **Principio di Equivalenza**, alla base della Relatività Generale (1915), Einstein stabilì: (2) che un sistema di riferimento in **caduta libera** in un campo gravitazionale si comporta come un **sistema di riferimento inerziale**!



Things falling freely in a gravity field all accelerate by the same amount, so they move the same way as if they were in a region of zero gravity — “weightlessness”!

