

www.ufficiometeo.it



CORSO DI METEOROLOGIA
GENERALE E AERONAUTICA

11 - La Forza di Coriolis

Dr. Marco Tadini
meteorologo

U.M.A. Home Page - Ufficio Meteorologico Aeroportuale
www.ufficiometeo.it

PREMESSE

- Leggi di Newton (Principi della Dinamica)
 - Principio d'Inerzia
 - Principio Fondamentale
 - Principio di Azione e Reazione
- Moto Circolare Uniforme
 - Velocità Lineare e Angolare
 - Accelerazione Centripeta
 - Forza Centripeta e Centrifuga
- Forze Apparenti

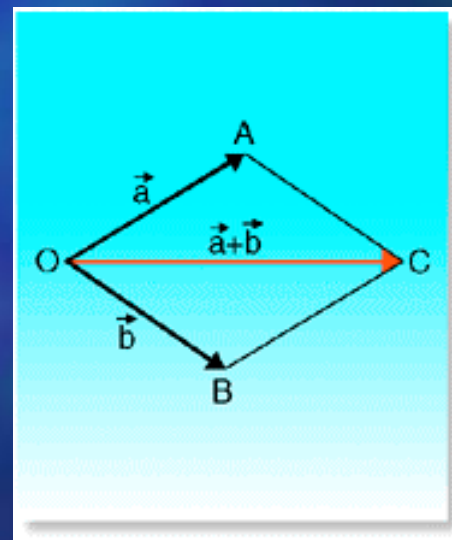
PRIMA LEGGE DI NEWTON (Principio d'Inerzia)

Un corpo tende a mantenere il proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, fino a quando non intervengono cause esterne (*forze*) a sollecitarlo.

FORZA

grandezza vettoriale che causa la variazione dello stato di quiete o di moto di un corpo

- **grandezze scalari**: risultano completamente definite da un numero, detto *modulo* o *intensità*
- **grandezze vettoriali**: per essere definite necessitano, oltre che di un'*intensità*, anche di una *direzione* e *verso*.



SECONDA LEGGE DI NEWTON

(Principio Fondamentale della Dinamica)

Quando ad un corpo di massa m viene applicata una forza F , esso acquista un'accelerazione a , con verso e direzioni coincidenti alla forza,

tale per cui:

$$F = m a$$

TERZA LEGGE DI NEWTON (Principio di Azione e Reazione)

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

$$F_{12} = - F_{21}$$

MOTO CIRCOLARE UNIFORME

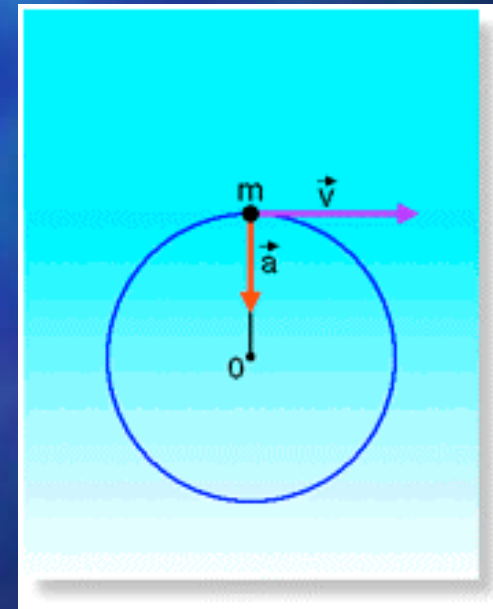
- un punto P si muove di m.c.u. se:
 - percorre una circonferenza di raggio r
 - compie ogni giro in un tempo costante T
- il vettore **velocità lineare** ha:
 - *intensità* costante $v = 2\pi r/T$
 - *direzione* tangente alla circonferenza in P
 - *verso* nel senso del moto
 - ⇒ intensità costante, direzione e verso cambiano
 - ⇒ accelerazione

MOTO CIRCOLARE UNIFORME

- il vettore **velocità angolare**:
 - rappresenta lo spostamento dell'angolo α seguito del moto di P sulla circonferenza
 - ha *intensità* costante $\omega = 2\pi/T$
 - ha *direzione* coincidente con l'asse di rotazione
 - ha *verso* rivolto in alto rispetto al piano della circonferenza, se P ruota in senso antiorario
 - si misura in rad/s (dimensione tempo⁻¹)
- la velocità lineare è $v = \omega r$

MOTO CIRCOLARE UNIFORME

- il vettore **accelerazione centripeta**:
 - rappresenta la variazione nel tempo della direzione del vettore velocità
 - ha *intensità* $a_{ct} = v^2/r = \omega^2 r$
 - ha *direzione* lungo il raggio della traiettoria
 - ha *verso* rivolto all'interno della traiettoria



MOTO CIRCOLARE UNIFORME

- se P è un corpo "reale" di massa m , per la II e III Legge Newton dovrà essere soggetto:

- ad una forza centripeta

$$F_c = m a_c = m v^2/r$$

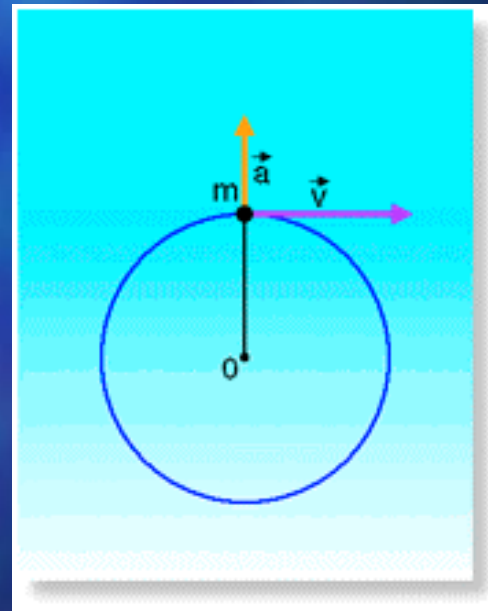
- ad reazione uguale e contraria

⇒ forza centrifuga F_{cf}

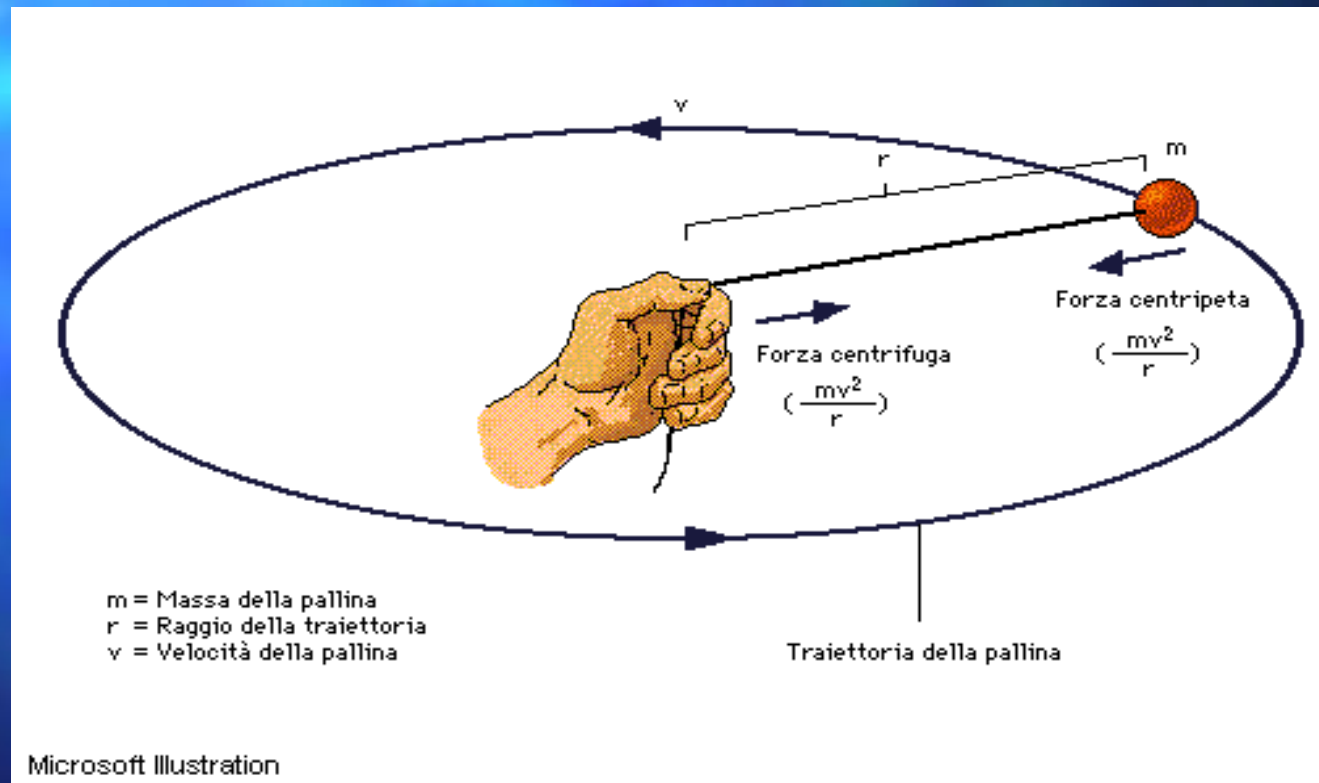
$$F_{cf} = F_{cp}$$

⇒ ac. centrifuga

$$a_{cf} = a_{cp}$$



MOTO CIRCOLARE UNIFORME



LE FORZE APPARENTI

- osservatore *inerziale*:
 - F_{cf} esiste solo come reazione a F_{cp}
 - se viene rimosso il *vincolo* (taglio del filo):
 - su m non agisce più alcuna forza
 - m si muove di moto rettilineo uniforme (Princ. Inerzia)
 - m assume direzione tangente alla circonferenza
- osservatore *non inerziale* (solidale a m):
 - percepisce una forza F_{cf} che tende ad allontanarlo
 - la *forza centrifuga* F_{cf} è:
 - una **forza apparente**
 - dovuta al moto relativo dell'osservatore

LA GIOSTRA DI CORIOLIS

- una giostra ruota in senso antiorario...
 - la velocità angolare della giostra è ω
 - un corpo sulla giostra a distanza r dall'asse...
 - la velocità lineare del corpo è $v_0 = \omega r$
 - il vincolo che tiene il corpo viene eliminato...
 - il corpo cade dalla giostra con velocità uguale a v
 - osservatore esterno: il corpo ha traiettoria retta tangente alla circonferenza di raggio r
 - osservatore sulla giostra: il corpo viene deviato alla destra del moto
- ⇒ **non vi è contributo della forza di Coriolis**

LA GIOSTRA DI CORIOLIS

- un osservatore fermo in piedi sulla giostra...
 - ha distanza r dall'asse di rotazione
 - ha velocità lineare $v_0 = \omega r$
 - sente ai piedi una forza centrifuga F_{cf}
 - se non è vincolato:
 - si comporta come l'oggetto del caso precedente
 - esce con direzione tangente alla circonferenza r
 - il suo moto appare rettilineo a osservatore esterno
 - a lui stesso appare invece deviato verso destra

LA GIOSTRA DI CORIOLIS

- osservatore cammina tangenzialmente...
 - sulla giostra in direzione opposta alla rotazione
 - velocità lineare v_1 minore di v_0
 - sulla giostra nella stessa direzione della rotazione
 - velocità lineare v_2 maggiore di v_0
 - osservatore esce dalla giostra più lentamente di prima (caso v_1) o più velocemente (caso v_2)
- osservatore esterno: il movimento appare sempre lineare, con velocità v_1 o v_2
- osservatore sulla giostra: il movimento appare sempre deviato sulla destra, ma...

LA GIOSTRA DI CORIOLIS

⇒ la differenza tra la traiettoria curvilinea percepita dall'osservatore che cade dalla giostra nel caso v_0 e le traiettorie curvilinee percepite dallo stesso osservatore nei casi v_1 e v_2 è dovuta al **contributo di Coriolis**

⇒ l'**effetto Coriolis** spiega la differenza tra le forze centrifughe nel caso stazionario e nei casi di moto tangenziale

LA GIOSTRA DI CORIOLIS

- osservatore sulla giostra in moto radiale:
 - esiste ancora una differenza tra forze centrifughe
 - la differenza è dovuta alla variazione del raggio
 - un osservatore esterno:
 - percepisce il moto come curvilineo
 - vede una traiettoria a diverse curvature (spirale)
 - osservatore sulla giostra in moto casuale:
 - la forza centrifuga totale viene divisa in:
 - componente radiale $m\omega^2 r$
 - componente normale al raggio $2m\omega v$
- ⇒ $2 m\omega v$ è la **FORZA DI CORIOLIS**

CON I PIEDI PER TERRA ...

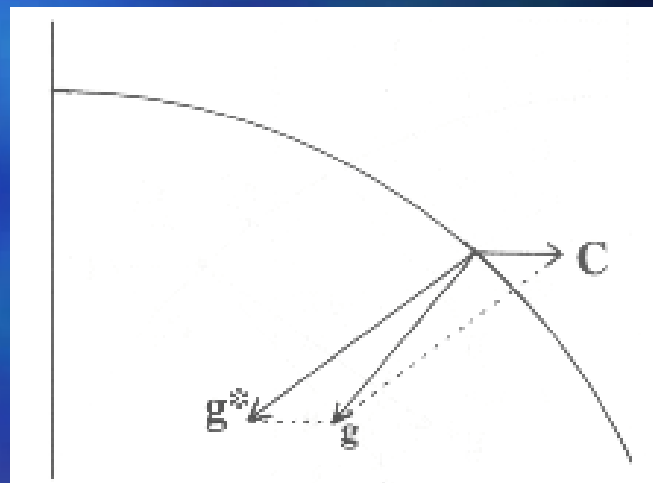
- Due diversi sistemi dinamici:
 - giostra: dominante è (spesso) la forza **centrifuga**
 - Terra: dominante è la **gravitazione**
- Equatore:
 - Raggio equatoriale: $R_{EQ} = 6370 \text{ km}$
 - Velocità rotazione: $V_{EQ} = 465 \text{ m/s}$
 - Forza centrifuga: $C_{EQ} = 0,034 \text{ N}$ (massa unitaria)
- 60° N (*equivalentemente 60° S*)
 - $R_{60^\circ \text{ N}} \approx \frac{1}{2} R_{EQ}$
 - $V_{60^\circ \text{ N}} \approx \frac{1}{2} V_{EQ}$
 - $C_{60^\circ \text{ N}} \approx \frac{1}{2} C_{EQ} \Rightarrow C_{60^\circ \text{ N}} = 0,017 \text{ m/s}^2$

CON I PIEDI PER TERRA ...

- Equatore:
 - C_{EQ} perpendicolare asse terrestre
 - C_{EQ} diretta verso l'alto
 - C_{EQ} opposta a G
- $60^\circ N$:
 - $C_{60^\circ N}$ perpendicolare asse terrestre
 - $C_{60^\circ N}$ non diretta verso l'alto
 - ⇒ $VC_{60^\circ N} = 0,008 \text{ N}$ diretta verso l'alto
 - $HC_{60^\circ N} = 0,014 \text{ N}$ diretta verso l'Equatore
- $45^\circ N$: $HC_{45^\circ N} = 0,017 \text{ N} = HC_{MAX}$
- $90^\circ N$: $C_{90^\circ N} = 0$

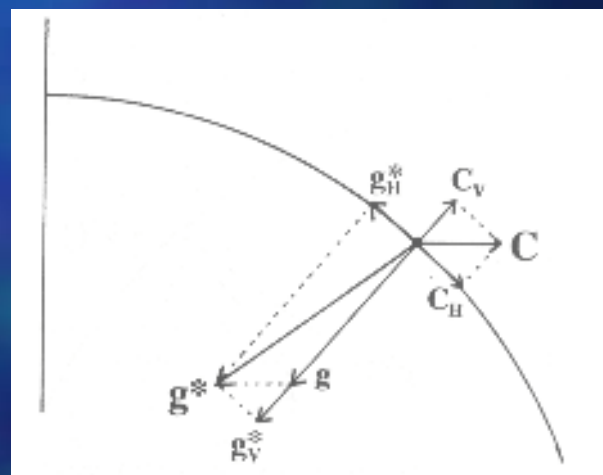
CON I PIEDI PER TERRA ...

- Gravità = Gravitazione + Forza Centrifuga
 - Gravitazione:
 - Forza di attrazione tra corpi
 - Campo gravitazionale Terra
 - Gravità:
 - effetto combinato di gravitazione e forza centrifuga
- sulla superficie Terra:
 - corpi stazionari
 - bilanciamento tra gravitazione e forza centrifuga
 - corpi non stazionari
 - movimenti verso est o verso ovest
 - movimenti verso nord o verso sud



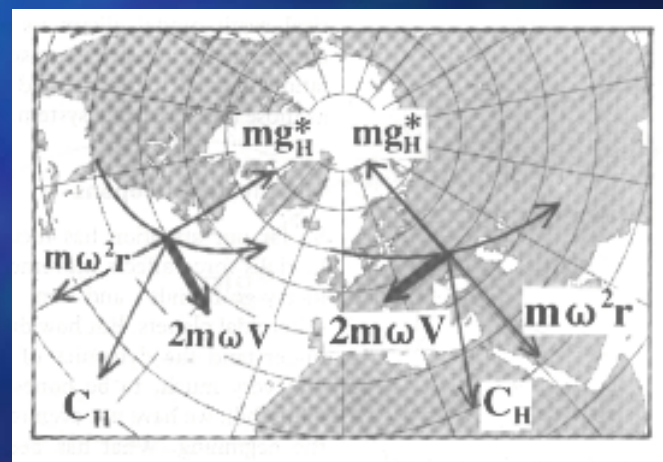
CON I PIEDI PER TERRA ...

- movimenti verso est o verso ovest
 - componenti orizzontali e verticali di C e G
 - la gravità g è la differenza tra G_V e C_V
 - corpi stazionari per bilanciamento tra G_H e C_H
 - se il corpo si muove verso est:
 - aumenta $C \Rightarrow$ aumenta C_H
 - il corpo viene tirato verso la destra del moto (equatore)
 - se il corpo si muove verso ovest:
 - diminuisce $C \Rightarrow$ diminuisce C_H
 - G_H tira il corpo verso la destra del moto (polo)



CON I PIEDI PER TERRA ...

- movimenti verso nord o verso sud
 - raggio di curvatura traiettoria varia con continuità
 - nei casi precedenti la traiettoria è un cerchio di latitudine
 - il raggio di curvatura della traiettoria rimaneva costante
 - traiettoria diviene una spirale
 - C_H non ha direzione meridiana
 - C_H scomposta in C_{HV} e C_{HH}
 - C_{HV} punta radialmente all'esterno
 - C_{HH} punta alla destra del moto
 - C_{HH} è la deviazione di Coriolis





CONCLUSIONI

Il meccanismo dell'effetto di Coriolis su un pianeta in rotazione su se stesso può essere espresso in termini di rottura dell'equilibrio tra la forza centrifuga e la componente orizzontale della gravitazione



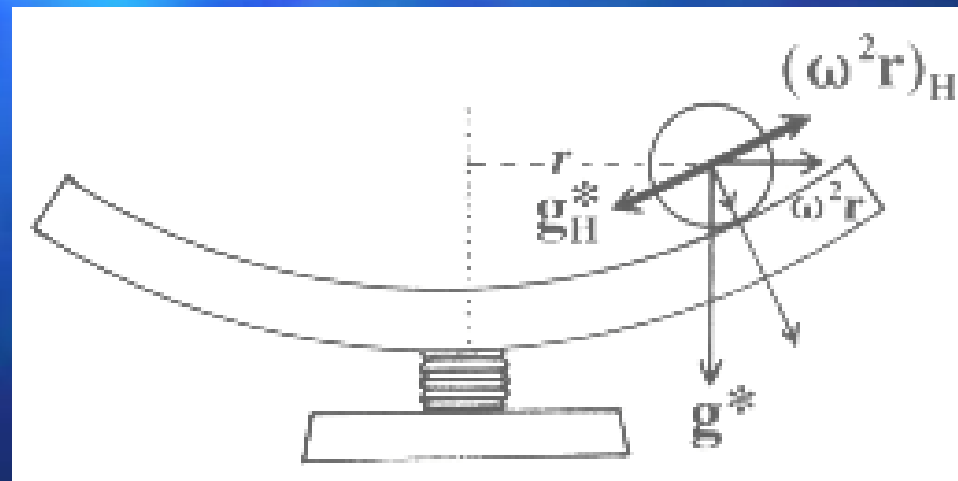
CONCLUSIONI

La differenza tra la giostra e la Terra è dovuta all'esistenza della componente orizzontale della gravitazione, che tende a riportare il corpo verso il centro di rotazione.



CONCLUSIONI

Potremmo annullare questa differenza se costruissimo una giostra parabolica.
(<http://satftp.soest.hawaii.edu/ocn620/coriolis>)





PERCHÉ TUTTO CIÒ ? IL VENTO !!

■ DEFINIZIONE

- spostamento orizzontale di masse d'aria

■ ORIGINE

- variazioni di temperatura
- dislivello barico tra due regioni
- rotazione terrestre (*sistema non inerziale*)

■ FORZE COINVOLTE

- forza di gradiente
- forza deviante
- forza centrifuga
- forza di attrito

FORZA DEVIANTE

TEOREMA DI CORIOLIS

- l'accelerazione assoluta di un punto materiale P in moto rispetto ad un sistema di riferimento mobile (*terna mobile*), che a sua volta si muove rispetto ad un sistema di riferimento inerziale fisso (*terna fissa*) è la somma di tre accelerazioni:
 - **ac. relativa a_r**
 - dovuta al moto di P rispetto alla terna mobile
 - **ac. di trascinamento a_t**
 - dovuta al moto della terna mobile rispetto alla terna fissa
 - **ac. complementare o di Coriolis a_c**

FORZA DEVIANTE

ACCELERAZIONE DI CORIOLIS

$$a_c = 2 \Omega v \sin \varphi = f v$$

($f = 2 \Omega \sin \varphi$ *parametro di Coriolis*)

dove:

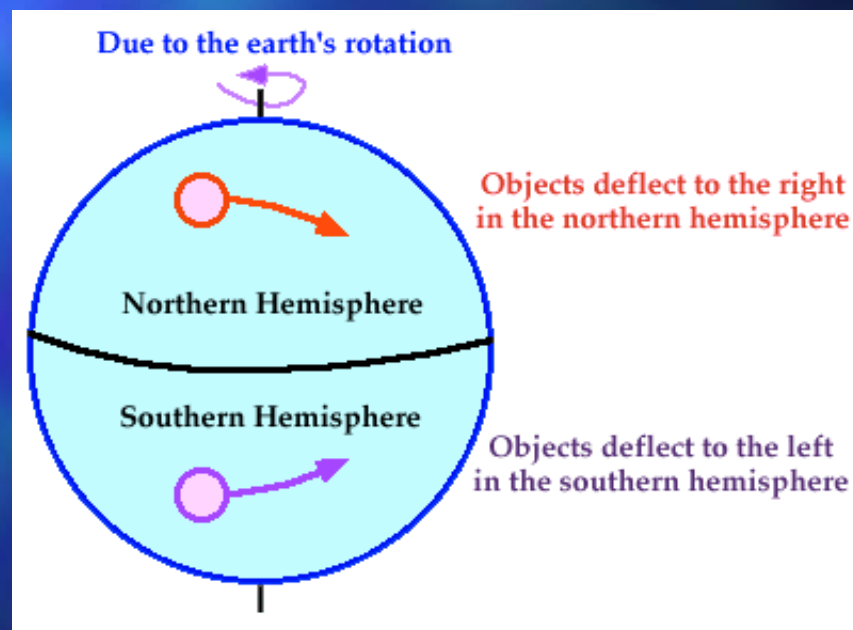
- Ω = velocità angolare rotazione terrestre
 - $\Omega = 729 \cdot 10^{-7}$ rad/s
- v = velocità del vento
- φ = latitudine geografica
 - equatore: $\sin \varphi = 0 \Rightarrow a_c = 0$
 - poli: $\sin \varphi = 1 \Rightarrow a_c = 2 \Omega v$

FORZA DEVIANTE

FORZA DEVIANTE o DI CORIOLIS

$$D_{(\text{unità di massa})} = a_c = 2 \Omega v \sin \varphi$$

- per osservatore al suolo:
un corpo in movimento
subisce una deviazione
 - 90° verso destra
nell'emisfero boreale
 - 90° verso sinistra
nell'emisfero australe



FORZA DEVIANTE

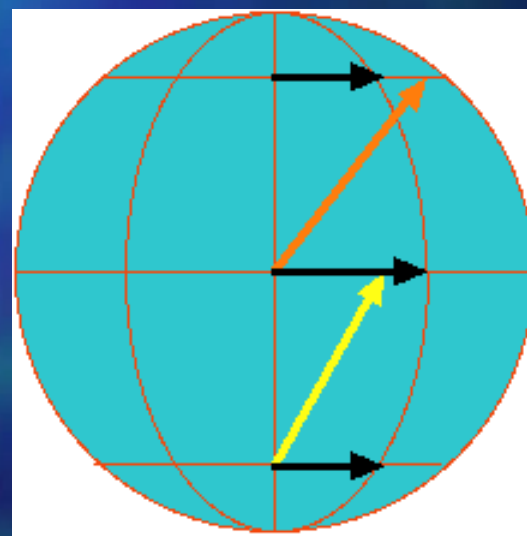
- **TEORIA DI GEORGE HADLEY (1685-1768)**
 - caso delle molecole di aria (teoria su origine alisei)
 - basata sul principio di conservazione della velocità
 - intuitivamente buona per il primo XVIII secolo:
 - Hadley comprese importanza rotazione Terra
 - spiega abbastanza bene i movimenti nord-sud
 - **matematicamente insufficiente**
 - in anticipo su Coriolis (1792-1843)

FORZA DEVIANTE: TEORIA DI HADLEY

- Terra ruota verso est con velocità angolare Ω
- due punti a due differenti latitudini:
 - hanno diversa distanza r_1 e r_2 da asse rotazione
 - sono in moto circolare uniforme con:
 - uguale periodo T , pari al periodo rotazione Terra
 - uguale velocità angolare, pari alla vel.angolare Terra
 - diverse velocità lineari

FORZA DEVIANTE: TEORIA DI HADLEY

- se un corpo si trova all'equatore:
 - ha traiettoria circolare con $R=R_{Terra}$
 - possiede velocità lineare $v_{eq} = 2\pi R/T$
- se il corpo si muove dall'equatore verso N:
 - conserva la propria velocità lineare
 - ha velocità maggiore rispetto corpi altre latitudini
 - \Rightarrow rispetto al suolo appare spinto verso E da una forza misteriosa
 - non esiste alcuna forza: Terra si muove a velocità inferiore al corpo



FORZA DEVIANTE: TEORIA DI HADLEY

CONCLUSIONE (Emisfero Nord)

un corpo in movimento viene deviato verso destra
rispetto ad un osservatore al suolo

- la deviazione dipende dalla differenza tra le velocità del corpo e del suolo
- la deviazione diviene significativa:
 - alte velocità
 - lunghe distanze (specialmente nord-sud)

EFFETTI DELLA FORZA DEVIANTE

FORZA DEVIANTE o DI CORIOLIS

$$D_{(\text{unità di massa})} = a_c = f v = 2 \Omega v \sin \varphi$$

- per la dipendenza da latitudine e velocità:
 - a parità di latitudine:
 - venti deboli: deviazione minore
 - venti intensi: deviazione maggiore
 - a parità di velocità:
 - venti equatoriali: deviazione minore
 - venti polari: deviazione maggiore