

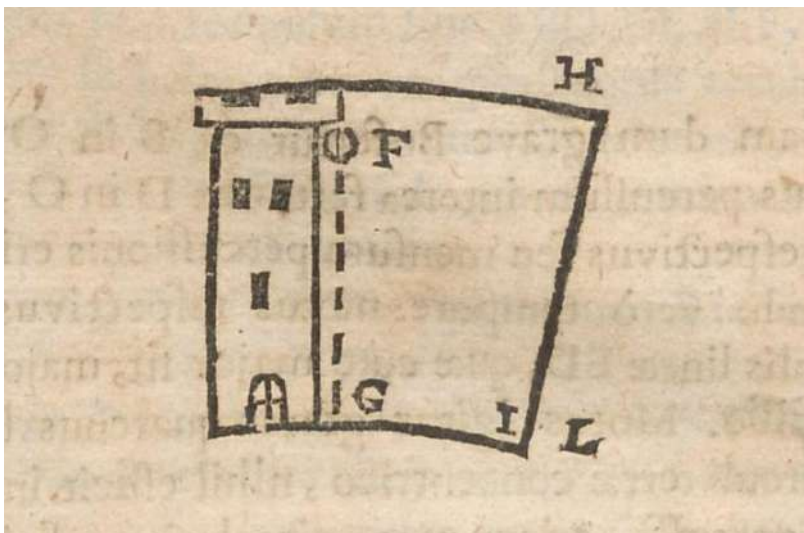
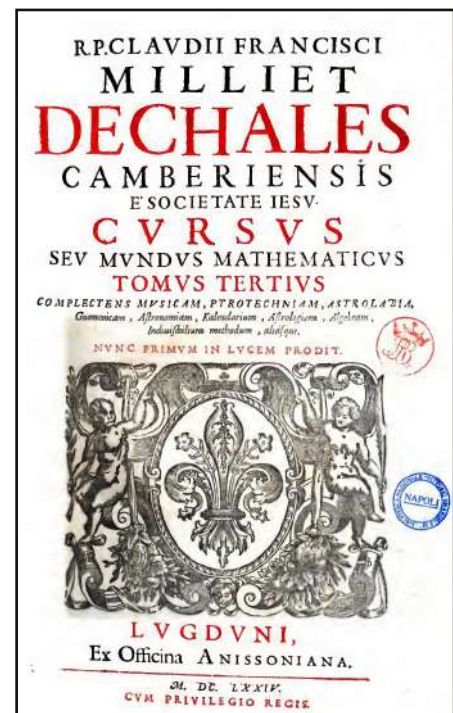
La forza di Coriolis e i suoi tanti «effetti»

Nei circa 50 anni a cavallo della metà del '600, intercorsi tra l'abiura di Galileo Galilei (1564-1642), richiesta dall'Inquisizione su una Terra in movimento e la pubblicazione dell'opera di Isaac Newton (1642-1726) *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) con cui, attraverso la formulazione delle equazioni e i principi della meccanica e della legge di gravitazione universale, fu accettata da buona parte del mondo scientifico la visione di una Terra in rotazione, diversi uomini di scienza si cimentarono a provare o a smentire la teoria copernicana.

L'astronomo gesuita italiano Giovanni Battista Riccioli (1598-1671) e successivamente un altro gesuita, il matematico francese Claude Francis Milliet Dechaies (1621-1678), sostenevano che il movimento della Terra avrebbe dovuto influire sul moto di una palla di cannone o sulla caduta di un grave da una sufficiente altezza, manifestandosi con uno spostamento in orizzontale del loro percorso, nella direzione della rotazione terrestre. Riccioli, che aveva condotto le prime misurazioni precise dell'accelerazione di gravità, riporta il possibile effetto della rotazione terrestre sui corpi in movimento nel suo *Almagestum Novum* del 1651.

Egli dice: “se la Terra ruotasse essa darebbe luogo ad uno spostamento laterale verso oriente di una palla di cannone rispetto alla sua direzione retta; un grave in caduta si sposterebbe anch'esso rispetto alla verticale, ma come si può avere occasione di riconoscere tale spostamento non si verifica”.

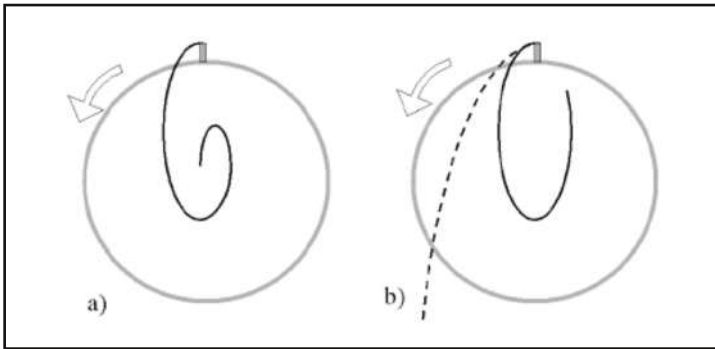
Così la mancata rilevazione di spostamenti fu considerata indicazione dell'immobilità della Terra. In ogni caso le traiettorie a cui



Dechaies: Una palla in F, posta in cima ad una torre, direttamente sopra il punto G, viene lasciata cadere. Mentre la palla cade, il punto G viene portato, dalla rotazione terrestre, in I. La palla F non arriva al punto G (ora in I). Questo perché la palla quando è posizionata in F ha uno slancio necessario a percorrere l'arco FH (attraverso il quale si muove la sommità della torre mentre la pallina scende) che è maggiore di quanto richiesto per l'arco GI. Pertanto, se la palla viene abbandonata, non arriverà al punto I, ma avanzerà ulteriormente in L

pervenivano i ragionamenti dei due studiosi venivano a contraddire l'ipotesi sostenuta dagli anti-copernicani secondo i quali su una Terra in rotazione intorno al proprio asse un oggetto lasciato cadere da una torre sarebbe “rimasto indietro” spostandosi verso ovest.

In effetti già Galileo Galilei asseriva che un oggetto in caduta dalla cima di una torre, possedendo all'inizio una velocità di rotazione superiore a quella alla base (per una diversa distanza dal centro di rotazione, allo stesso modo per cui la velocità di rotazione di un punto sul mozzo di una ruota è inferiore a quella di un punto sulla gomma),



Traiettoria di un oggetto in caduta secondo Newton: a) a spirale (ipotesi iniziale); b) secondo una ellisse (ipotesi successiva). In linea tratteggiata una traiettoria parabolica (non corretta)

avrebbe sopravanzato la torre atterrando appena ad est di essa.

Tra i tanti studi condotti nel corso della fine del '600 sulla caduta dei gravi vanno annoverati anche quelli di Newton, convinto assertore della teoria copernicana, che aveva speculato sulla traiettoria seguita da un peso in caduta da una torre ritenendola in primo momento una spirale diretta verso il centro della Terra; successivamente (1679-1680), nel corso di scambi di opinioni con Robert Hooke (1635-1703), all'epoca segretario della Royal Society, ipotizzò una traiettoria ellittica con il

centro della Terra in uno dei fuochi.

Con l'inizio del '700, mentre buona parte del mondo scientifico aveva accettato una Terra in movimento, la Chiesa continuava ad avere un atteggiamento quanto meno sospettoso. Dovranno trascorrere quasi cinquant'anni per un cambiamento importante da parte del Clero con la riforma, voluta da Papa Benedetto XIV, dell'*Indice dei Libri proibiti* del 1757 che, pur mantenendovi i tre testi della nuova visione dell'universo, il *De revolutionibus* di Copernico, l'*Epitome* di Keplero e il *Dialogo* di Galileo, non rifiutava un'apertura nei confronti delle tesi copernicane e galileiane, non escludendo a priori l'attendibilità di una Terra in rotazione, ma che solo dopo una prova concreta e definitiva della rotazione avrebbe potuto rivedere la sua posizione, così come aveva dichiarato più di un secolo prima, nel 1615, il cardinale Bellarmino (1542-1621), già presente al processo a Giordano Bruno e al primo processo a Galilei.

In tale nuovo clima il matematico e religioso italiano Giovanni Battista Guglielmini (1760-1817), dal 1790 al 1792, fu il primo a tentare misure precise sulle deviazioni rispetto alla verticale di corpi in caduta.

Per circa un anno effettuò numerosi esperimenti con piccole sfere di piombo dall'altezza di 78 m all'interno della Torre degli Asinelli a Bologna superando non poche difficoltà, dall'uso di candele per essere certo dell'assenza di movimenti di aria, all'impiego di un microscopio per misurare la posizione esatta delle impronte lasciate a terra dalle sfere. I risultati, che fornirono una deviazione verso est di 17 mm, furono riportati dallo studioso in un breve opuscolo *De diurno terrae motu* che suscitò un notevole interesse nel mondo scientifico, tanto da spingere altri studiosi ad esperimenti simili, come quelli del fisico e matematico tedesco Johann Friedrich Benzenberg (1777-1846) che nel 1802 dall'alto della chiesa di San Michele ad Amburgo rilevò uno spostamento sia verso est sia, in minore misura, verso sud.

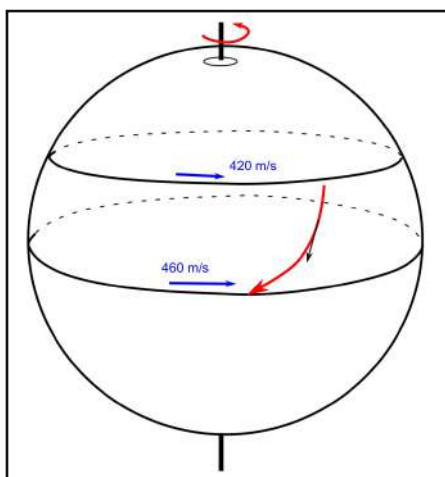
L'anno dopo fu condotto ancora in Germania un'altra esperienza simile ma stavolta all'interno di una miniera vicino Colonia che garantiva l'assenza di moti d'aria. Le impronte lasciate da ventinove sfere metalliche cadute a 90 m dalla superficie rilevarono uno spostamento medio trasversale di 8,5 mm.

Prima dell'evento il 25enne Carl Friedrich Gauss e il 54enne Pierre Simon de Laplace calcolarono una deflessione teorica di 8.8 mm combinando la rotazione della Terra con una equazione tridimensionale del moto dei ciottoli, dando così un primo contributo alla comprensione del fenomeno sottolineandone la causa responsabile, ma senza dare una interpretazione fisica corretta alle loro espressioni matematiche.

Seguirono altri esperimenti in miniera nel 1831 e nel 1848. Sebbene i valori rilevati non furono completamente in accordo con quelli teorici previsti, tutti presentarono entrambe le deviazioni verso est e verso sud. La discordanza nei rilievi venne giustificata dagli scienziati dell'epoca con diversi argomenti tra cui l'influenza dei campi elettromagnetici nel sottosuolo sulle biglie metalliche.

L'influenza della rotazione terrestre venne applicata per la prima volta anche in meteorologia.

Già nel 1686, lo scienziato inglese Edmond Halley (1656-1742), in seguito agli studi sulla circolazione atmosferica condotti nel corso dei suoi viaggi scientifici, aveva identificato nel processo di convezione termica la causa della formazione degli alisei (in ingl. *trade winds*), venti che ebbero notevole importanza



Ipotesi errata di Hadley sulle cause delle deviazioni degli alisei

nella storia della navigazione oceanica a vela.

Sarà l'avvocato e meteorologo didatta inglese George Hadley (1685-1768) ad introdurre la rotazione della Terra quale ulteriore elemento nella spiegazione degli alisei, come riportato nel primo numero del 1735 della *Philosophical Transactions*, la rivista scientifica della Royal Society, con il titolo *Concerning the cause of the general trade winds*. Egli giustificava la deviazione verso destra delle masse d'aria dirette verso l'equatore dalla maggiore velocità della superficie terrestre all'equatore rispetto a quella a latitudini superiori, assumendo una velocità assoluta dell'aria costante, in contrasto con quella reale. Un modello errato ma che fu a lungo considerato possibile.

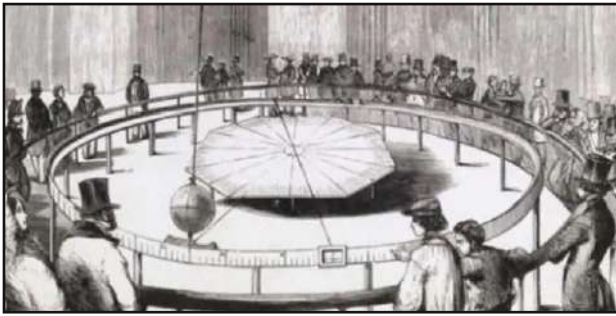
Tra la fine del '700 e l'inizio dell'800, in piena Rivoluzione Industriale la Francia, rendendosi conto di possedere una struttura produttiva in ritardo rispetto all'Inghilterra, decise di puntare ad una formazione tecnica di ogni figura coinvolta nell'industria fornendo una adeguata conoscenza sul funzionamento delle macchine. Tale riforma trovò disponibili molti insegnanti dell'École Polytechnique tra cui Gaspard Gustave Coriolis (1792-1843) particolarmente interessato alla dinamica delle macchine e a trovare espressioni matematiche con cui adattare i principi teorici alla meccanica applicata, come ebbe modo di fare nel libro di testo *Du Calcul de l'Effet des Machines* (Sul calcolo dell'azione meccanica), pubblicato nel 1829, in cui fornisce l'espressione corretta di energia cinetica, introdotta nel 1695 con la denominazione di forza viva dal matematico e scienziato tedesco Leibniz (1646-1716) nel suo *Specimen Dynamicum*. Nel corso della seconda metà dell'800 l'energia fu una delle grandezze fisiche più studiate tanto che il termine energia cinetica verrà coniato nel 1853 dall'ingegnere scozzese William Rankine (1820-1872) e quello di energia potenziale nel 1862 dal fisico britannico William Thomson, più noto come Lord Kelvin (1824-1907).

Coriolis, nel condurre un'analisi dinamica sulle ruote idrauliche, in cui si riconoscono elementi dotati di moto rotatorio combinato a moti traslatori (ad esempio il movimento del fluido all'interno della macchina), giunse a dimostrare che gli elementi appartenenti a un sistema in moto rotatorio risentono, in condizioni stazionarie della sola classica forza centrifuga, mentre gli elementi dotati di un proprio moto, sperimentano anche un'altra forza della stessa natura che per tale motivo Coriolis chiamò complementare, normale allo spostamento.

Nel 1835 Coriolis, nel suo lavoro più importante: *Sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps* (Sulle equazioni del moto relativo dei sistemi materiali) definisce matematicamente la forza centrifuga complementare in modulo, direzione e verso.

Nel 1851 si ebbe finalmente la prima esplicita prova sperimentale della rotazione della Terra quando il francese Léon Foucault (1819-1868) compì uno degli esperimenti più famosi della storia della scienza, l'esperienza del pendolo, passato alla storia come *pendolo di Foucault*. Dotato di ottime abilità manuali e di eccezionale intuito, pur non avendo avuto una formazione regolare, mentre era impegnato alla costruzione di uno strumento a specchi messi in forte rotazione da una macchina a vapore, il cui scopo, per cui divenne famoso, era quello di determinare la velocità della luce, si accorse che l'asse degli specchi oscillava sempre nello stesso modo anche quando il supporto dell'asta subiva dei movimenti (si trattava in effetti di una caratteristica di quegli apparati meccanici che lo stesso Foucault chiamerà in seguito giroscopi).

Da quanto aveva sperimentato, Foucault ebbe l'idea di costruire un particolarissimo pendolo capace di oscillare in tutte le direzioni: il piano di oscillazione, in cui il pendolo per azione della gravità si muove avanti e indietro, appare fisso mentre la Terra ruota sotto. Foucault diede così una dimostrazione del moto di rotazione della Terra, prima ad un pubblico ristretto di scienziati presso la sala del Meridiano dell'Osservatorio astronomico di Parigi quindi, grazie all'autorità di Luigi Bonaparte, il futuro Napoleone III e al suo gusto per la scienza, condusse lo stesso esperimento al Pantheon: la mattina del 26 marzo 1851 un



l'esperimento del pendolo di Foucault

vasto pubblico radunato dietro una balaustra di protezione vide oscillare una sfera in ottone di 28 kg, sospesa con un filo di acciaio di 67 metri alla cupola del monumento parigino, che ad ogni oscillazione (di circa 16 s) si spostava leggermente in senso orario come si notava dalla traccia lasciata da una punta della sfera su un letto di sabbia bagnata. Era la prova osservabile dalla Terra del suo moto di rotazione, dopo 218 anni dall'atto di abiura di Galilei su una Terra in movimento avanzata nei suoi Dialoghi. Passarono

circa 32 ore dalla prima oscillazione quando il pendolo giunse alla posizione da cui era partito. L'esperienza di Foucault ebbe un'ampia diffusione internazionale. Il successivo 9 aprile un pendolo oscillerà alla Russell Institution in Great Coram Street a Londra. Pochi mesi dopo verranno installati pendoli a Reims, New York, Roma, Bristol, Dublino, Ceylon e Rio de Janeiro... Il pendolo di Foucault fu un'attrazione all'Esposizione Universale di Parigi del 1855 e diede origine a numerose pubblicazioni scientifiche. Molto probabilmente Léon Foucault rimane ad oggi l'autore dell'esperimento di divulgazione scientifica universalmente più noto.

Nel 1856 il meteorologo statunitense William Ferrel (1817-1891) giunse a formulare una spiegazione sul comportamento dei venti, nota come legge di Ferrel: "indipendentemente dalla direzione dell'aria rispetto alla superficie, dalla rotazione terrestre si alza una forza che la deflette verso destra nell'emisfero settentrionale e verso sinistra nell'emisfero meridionale". Egli, avvalendosi di straordinarie capacità di sintesi scientifica, era giunto a tale risultato da un approfondito studio del vasto contributo scientifico dell'oceanografo statunitense Matthew Fontaine Maury (1806-1873) costituito essenzialmente di tabelle e carte dei venti e delle correnti in quasi tutto il pianeta. Independentemente da Ferrel, il meteorologo olandese C. Buys Ballot (1817-1890) nel 1857 pubblicò la sua regola, anch'essa dedotta sulla base di dati empirici, secondo cui, nell'emisfero settentrionale, la bassa pressione è a sinistra, un poco più avanti, se hai il vento alle tue spalle.

C'è da notare che nessuno dei tre studiosi aveva avuto l'occasione di leggere gli articoli di Coriolis, deceduto 8 anni prima del famoso esperimento del pendolo. Ciò si spiega probabilmente per il contenuto non immediato dei risultati di Coriolis che mai immaginava un'influenza della sua forza centrifuga composta in campi diversi da quello correlato alla teoria delle macchine. Un primo tenue collegamento ai fenomeni terrestri si ebbe intorno al 1860, più o meno quando la forza centrifuga composta entra nei testi di meccanica razionale. Per tutto il resto del secolo l'effetto della rotazione terrestre sui fenomeni meteorologici continuava ad essere studiato facendo riferimento a quanto era stato scoperto da Ferrel e Buys Ballot.

Tra il 1901 e il 1905 un team di ricerca dell'Istituto tedesco di Geodesia di Potsdam, sotto la direzione di Oskar Hecker (1864-1938), condusse da bordo di navi misure di variazione geografica dell'accelerazione di gravità sugli oceani Atlantico, Indiano e Pacifico. Le misure furono eseguite confrontando l'altezza della colonna di mercurio di un barometro con la pressione atmosferica ricavata dalla temperatura di ebollizione dell'acqua (l'altezza dipende dal peso e dalla pressione atmosferica: conoscendo h e pressione si ricava il peso, ovvero g).

Nell'analizzare i rilievi il nobile e fisico ungherese Loránd Eötvös (1848-1919) [pron. otvosc], all'epoca uno dei più noti studiosi del campo gravitazionale terrestre, intuì una differenza tra le misure condotte su rotte verso est rispetto a quelle su rotte opposte, verso occidente, attribuendo tale effetto (in seguito detto effetto Eötvös) alla componente verticale della forza di Coriolis. Nel 1908 le misure effettuate su due navi in navigazione su rotte opposte sul Mar Nero confermarono l'ipotesi dello scienziato ungherese a cui si deve la formula di correzione nelle misure del gradiente gravitazionale (tipico della ricerca di giacimenti petroliferi) effettuate a bordo di navi in movimento.

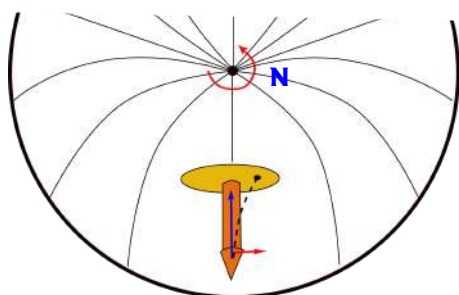
Per molti anni ancora non si pensò di impiegare la forza centrifuga complementare per studiare i fenomeni legati alla rotazione terrestre e non solo; si dovrà attendere il 1920 perchè venisse adoperata l'espressione *forza di Coriolis* con cui si cominciò a dare una spiegazione scientifica a fenomeni che erano già stati

riconosciuti sperimentalmente, come si è visto negli esempi di Ferrel e Buys Ballot o in quello, avvenuto intorno agli anni '30 del '900, dei cerchi d'inerzia negli oceani, poi interpretati come conseguenza dell'effetto di Coriolis.

Numerosi sono i casi interessati da tale effetto, con risultati a volte trascurabili, dai fenomeni dell'atmosfera a quelli dell'idrosfera in cui l'effetto si rende evidente sulle lunghe distanze (una corrente oceanica può avere una velocità tra 1 e 4 nodi, valori decisamente bassi, ma con effetti che agiscono su distanze anche di 10.000 km), dai sistemi rotanti in astrofisica a quelli persino in ambito atomico.

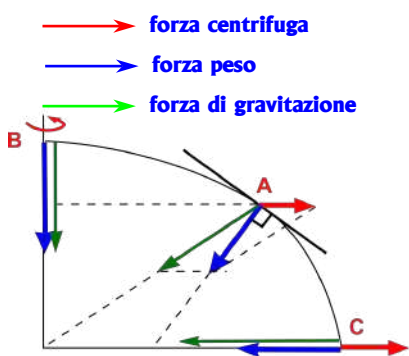
Un valido modo per conoscere la forza di Coriolis, senza addentrarsi troppo in aspetti matematici, è quello di presentare alcuni esempi.

ALCUNI CASI IN CUI SI MANIFESTA LA FORZA DI CORIOLIS

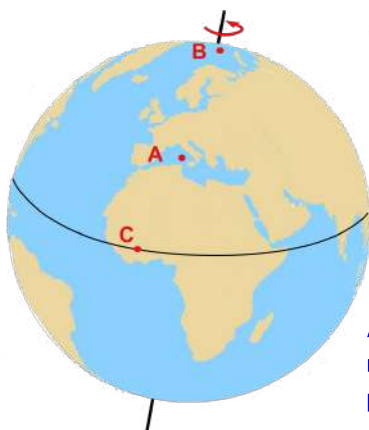


Deflessione dalla verticale, verso est, di un corpo in caduta per la forza di Coriolis (in rosso - perpendicolare allo spostamento).

In realtà la deviazione è verso sud est in cui lo spostamento verso sud (molto più piccolo) è dovuto alla componente orizzontale (in direzione nord-sud) della forza centrifuga (Ciò vale nell'emisfero Nord; di segni opposti per l'emisfero Sud).



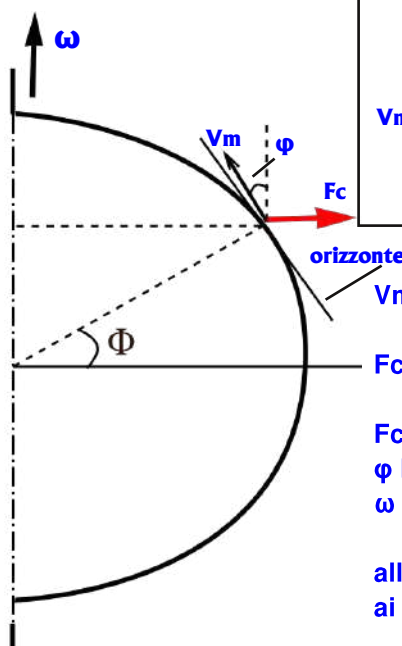
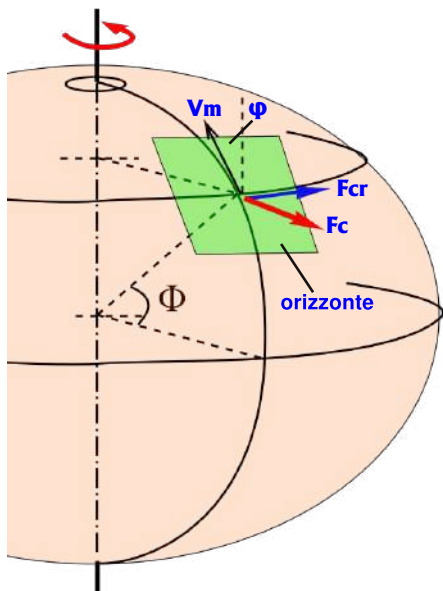
→ forza centrifuga
→ forza peso
→ forza di gravitazione



Sulla Terra la forza centrifuga (in rosso) è perpendicolare all'asse di rotazione, massima all'equatore e nulla ai poli. La forza di gravitazione (in verde), diretta verso il centro della Terra non coincide con la forza peso, perpendicolare alla superficie (in blu), a causa della forma non sferica della superficie terrestre.

A tali forze si aggiunge per corpi in movimento la forza di Coriolis, decisamente più piccola

Esempio per uno spostamento di un corpo lungo un meridiano con velocità V_m



deviazione verso destra per effetto di F_{cr} (perpendicolare a V_m)
verso di F_{cr} : F_{cr} deve ruotare di 90° in senso antiorario (lo stesso della Terra vista dal polo Nord) per sovrapporsi a V_m

vista dall'alto nel piano dell'orizzonte

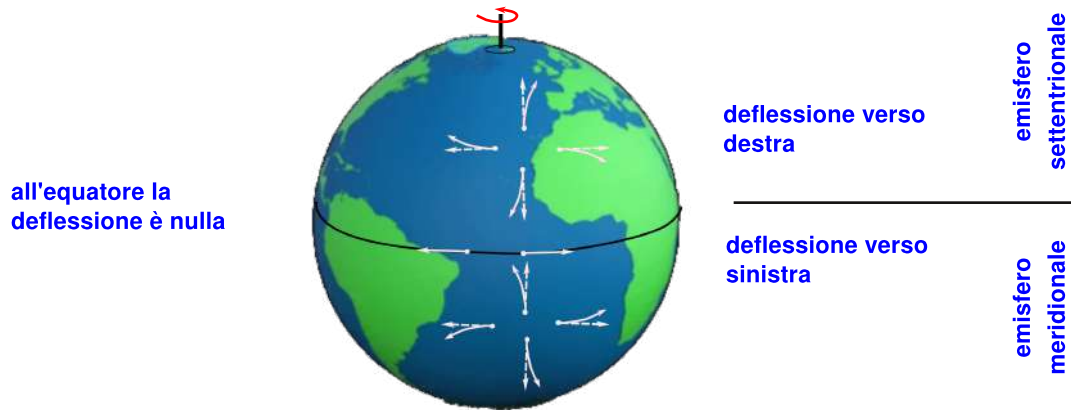
V_m velocità lungo il meridiano;

F_c forza centrifuga;

F_{cr} forza di Coriolis = $2m\omega \sin(\varphi)$;
 φ latitudine;
 ω velocità angolare della Terra.

all'equatore $\Rightarrow \sin\varphi = 0 \Rightarrow F_{cr} = 0$
ai poli $\Rightarrow \sin\varphi = 1 \Rightarrow F_{cr} = \max$

Deflessione di movimenti a grande scala ad opera della forza di Coriolis



Nozioni di fisica

Un principio importante della meccanica classica è quello, dovuto a Galileo Galilei, per cui le leggi della fisica appaiono le stesse sia che stiamo fermi sia che ci muoviamo con velocità uniforme lungo una linea retta. Nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632) di Galilei, Filippo Salviati, l'accademico che l'autore immagina il protagonista difensore del sistema copernicano, descrive una nave in viaggio a velocità costante, senza scosse, su un mare perfettamente calmo, al cui interno *mosche, farfalle e simili animalletti volanti* continuano a muoversi come nulla fosse e colui che è all'interno non può comprendere se la nave cammina, o pure sta ferma... Tale episodio, riportato da Galilei per far nascere nel lettore il dubbio che anche in una Terra che si muove non ci si rende conto che si sta muovendo, è indicativo di una proprietà dei fenomeni, oggi nota come *relatività galileiana*.

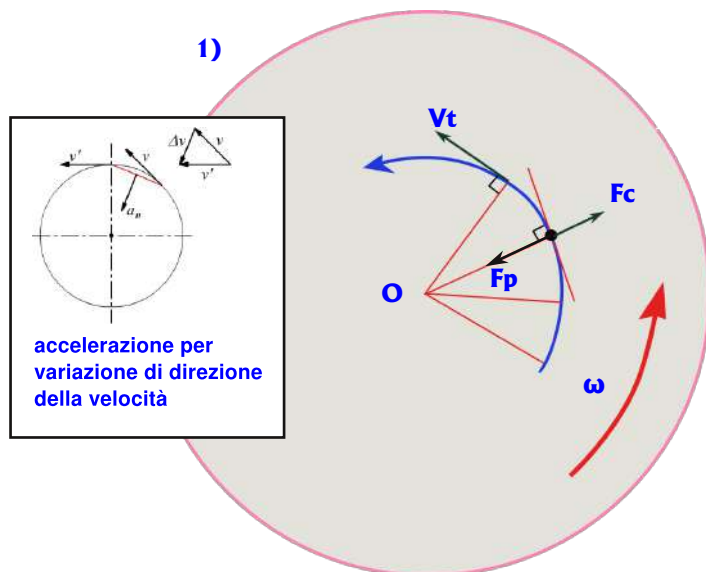
Un altro esempio lo fornisce il fisico Richard Feynman (1918-1988): "un ragazzo che fa rimbalzare una palla su un aereo che sta volando a velocità costante, trova che la palla rimbalza nello stesso modo in cui rimbalzerebbe a terra. Anche se l'aereo si sta muovendo ad altissima velocità: a meno che la velocità non cambi, le leggi appaiono al ragazzo le stesse, come quando l'aereo è fermo" (per tale motivo tale principio è anche noto come *invarianza galileiana*).

Se tale proprietà fosse stata enunciata e compresa qualche anno prima del *Dialogo* non sarebbero state prodotte argomentazioni su una Terra immobile, in opposizione alle nuove teorie di Copernico e Galileo, come quella riportata in *Dieci libri di pensieri diversi* di Alessandro Tassoni (1565-1635) del 1620 in cui viene riportato l'assurdo comportamento degli uccelli in volo che sarebbero velocissimi muovendosi nel senso di rotazione del pianeta e stenterebbero ad avanzare in senso opposto. Una visione errata che sarebbe equivalente a quella assurda per cui in un treno in corsa questo verrebbe a scorrere sotto i piedi se facessimo un bel salto.

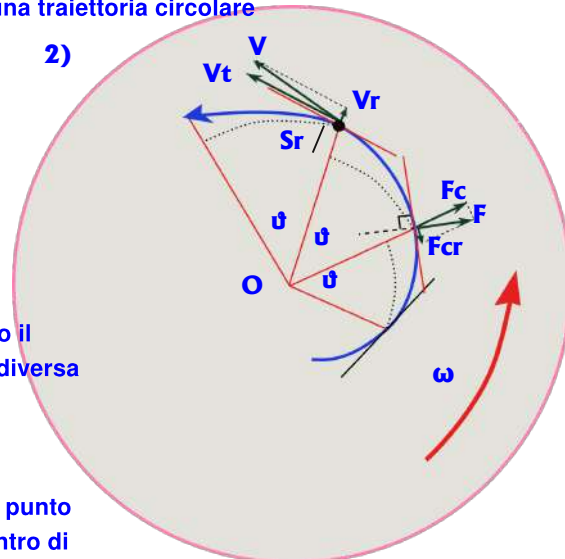
Ora un sistema che risulta essere fermo o si muove di moto rettilineo uniforme è detto *sistema inerziale*. Un esempio classico è rappresentato ancora dal treno con i suoi passeggeri: il treno è un sistema inerziale fino a quando mantiene un moto rettilineo a velocità costante (moto uniforme); improvvisamente il treno frena decelerando, perdendo la caratteristica di sistema inerziale: un passeggero all'interno del treno, mentre decelera, si sposta in avanti soggetto ad una forza che tende a far continuare il moto al passeggero, a mantenere la sua inerzia. Tale forza è pertanto detta di inerzia e non appartiene alla categoria delle forze che si originano per interazione fisica tra corpi quali la gravitazione, un cavo che trattiene un peso, un urto, l'azione tra due cariche elettriche, l'attrito tra due elementi. Per tale motivo assume anche il nome di forza fittizia o apparente, aggettivi che possono confondere, come se non fosse vera, ma è pur sempre un'entità fisica in grado di sollecitare il corpo su cui agisce, con qualche tipica caratteristica tra cui quella di essere direttamente proporzionale alle masse.

Esse appaiono così nei sistemi non inerziali, nel treno dell'esempio precedente quando frena, ma pure nei sistemi rotanti, anche quando la velocità di rotazione è costante, questo perché l'accelerazione ha origine non da una variazione di intensità ma per variazione di direzione. In essi la forza apparente è la forza centrifuga

Moto circolare di un corpo: 1) vincolato; 2) dotato di moto lungo il raggio



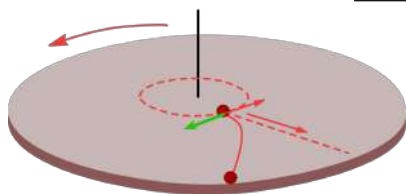
1) Su un corpo (il punto nel disegno) vincolato in un sistema in moto circolare agisce la comune forza centrifuga F_c , perpendicolare in ogni punto alla tangente al moto e passante per il centro di rotazione (O), equilibrata dalla forza centripeta F_p (attrito, collegamento diretto con O, altrimenti il corpo non stazionerebbe). Il corpo così percorre una traiettoria circolare



2) Se il corpo è dotato di un proprio movimento (nell'es. lungo il raggio con velocità costante V_r) esso seguirà una traiettoria diversa da quella circolare. Nell'esempio il punto, ad ogni variazione d'angolo θ , si sposta di un valore costante S_r lungo il raggio. La traiettoria effettiva è una spirale.

La forza d'inerzia totale F è anch'essa perpendicolare in ogni punto alla tangente al nuovo moto e (in genere) non passa per il centro di rotazione. Essa è somma vettoriale della forza centrifuga ordinaria F_c (passante per il centro di rotazione) e della forza di Coriolis F_{cr} perpendicolare a V_r .

La velocità V è somma vettoriale di V_t (velocità tangenziale dovuta al moto circolare) e V_r (velocità radiale dovuta al moto lungo il raggio)



La giostra

Un esempio spesso usato per presentare l'effetto di Coriolis.

Se una persona posta sulla giostra tenta di spostare radialmente una palla si accorge che deve spingerla anche lateralmente per farla andare dritta: deve contrastare la forza di Coriolis (in verde), perpendicolare allo spostamento.

riconosciuta fin dall'antichità per la sua azione, del resto intuitiva, di trattenere dal cadere un corpo in rapido movimento circolare, come il sasso fatto ruotare dal fromboliere nella fionda (il cui uso può paragonarsi alla disciplina sportiva del lancio del martello), uno schema utilizzato da alcuni filosofi per spiegare il motivo per cui un corpo celeste non cade verso la Terra. Per altri filosofi, tra cui Aristotele, i corpi celesti, non avendo peso, non potevano cadere. Sarà il fisico olandese Christiaan Huygens (1629-1695) nel 1659 a coniare il termine *forza centrifuga* (*vi centrifuga*) e a determinare, con un ragionamento geometrico, l'espressione dell'accelerazione di un corpo in moto circolare uniforme, oggi indicata con la formula $a=v^2/r$. Huygens, che non credeva all'ipotesi di attrazione universale di Newton, riteneva che la gravità non era la conseguenza di una attrazione fra masse, ma una reazione al movimento centrifugo.

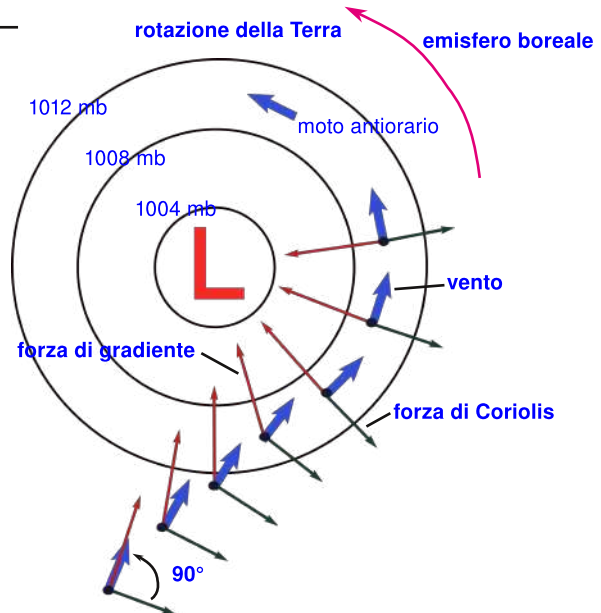
Fu solo fra la fine del 1679 e l'inizio del 1680 che lo scienziato inglese Robert Hooke intuì nella forza centripeta l'effettiva causa di un moto rotatorio, spostando così l'attenzione dall'oggetto in rotazione al corpo centrale e trasferì a Newton un tale nuovo modo di analizzare i moti non rettilinei. Il moto di un corpo orbitante è così caratterizzato da due componenti uguali ed opposte, una componente centripeta che "tirando" verso il centro il corpo ne permette un percorso curvo ed una forza centrifuga la cui azione inerziale tende a far compiere all'oggetto una traiettoria rettilinea, tangente alla curva, quella in effetti assunta dall'oggetto quando viene meno l'azione diretta verso il centro di rotazione (si annulla la forza centripeta): il fromboliere abbandona la presa.

Se il corpo posto nel sistema rotante è dotato anche di un moto proprio si viene ad aggiungere una ulteriore forza d'inerzia, la forza di Coriolis. Le suddette forze d'inerzia sono entrambe perpendicolari sia all'asse di rotazione sia alla corrispondente velocità (rotazione e traslazione rispettivamente). Per il verso la forza centrifuga punta all'esterno della traiettoria, quello della forza di Coriolis è tale che l'angolo di 90° tra forza e velocità è misurato nello stesso senso del moto di rotazione del sistema (in fisica si impiega la cosiddetta convenzione della mano destra).

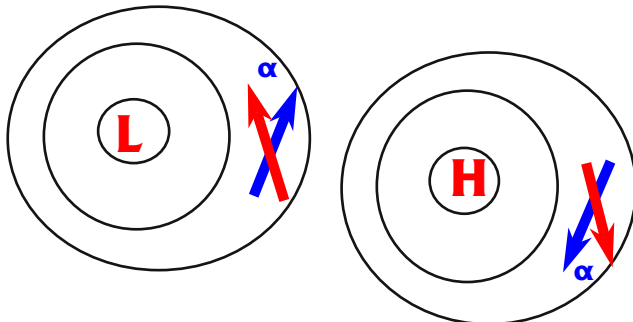
Gli effetti dovuti alla rotazione terrestre sono bassi nell'unità di tempo, ciò perché la velocità di rotazione della Terra è decisamente piccola (circa 7×10^{-5} rad/s, contro $1 \approx 1,5$ rad/s di una comune giostra di un parco

Movimento di massa d'aria in quota in zona ciclonica (emisfero settentrionale)

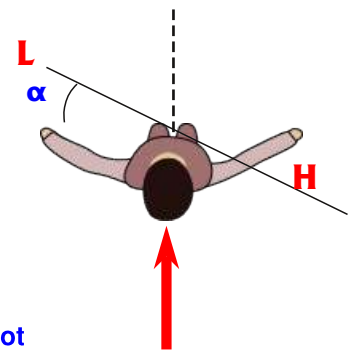
Una massa d'aria immersa in campo barico è soggetta ad una forza di gradiente diretta verso la zona di bassa pressione (vento di gradiente). Appena l'aria si mette in movimento agisce la forza di Coriolis che la fa deviare a destra (a sinistra nell'emisfero sud) dalla sua traiettoria rettilinea diretta. Lo schema riportato si riferisce al vento in quota su cui non agisce l'attrito con il suolo. In tal caso il vento spira parallelamente alle isobare (vento geostrofico)



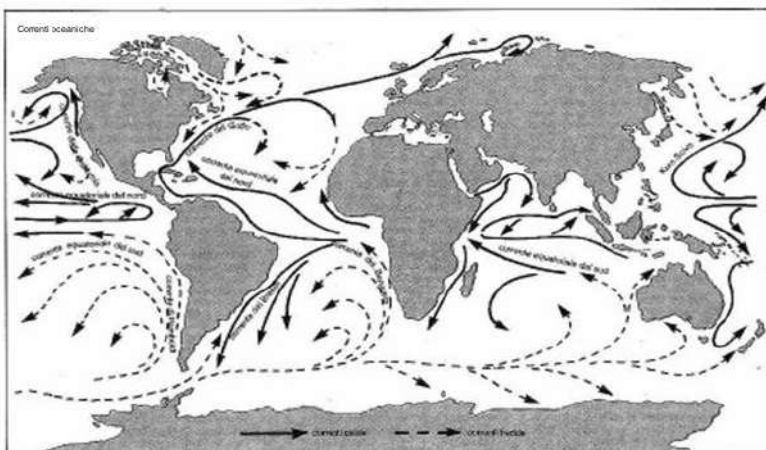
Il vento al suolo risente dell'attrito (strato di attrito fino a circa 700 m) che devia verso la bassa (rosso) la direzione del vento rispetto a quello in quota (blu). L'angolo di deviazione α è di circa 5° sul mare e 30° sulla terra



considerazioni valide nell'emisfero nord

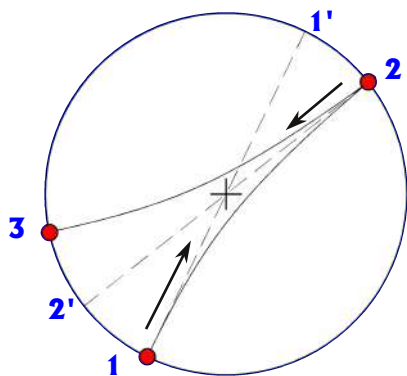


Regola di Buys Ballot
Con alle spalle il vento (quello assoluto, combinazione del vento apparente con la velocità dell'imbarcazione) la bassa è a sinistra più avanti e l'alta a destra poco più dietro.



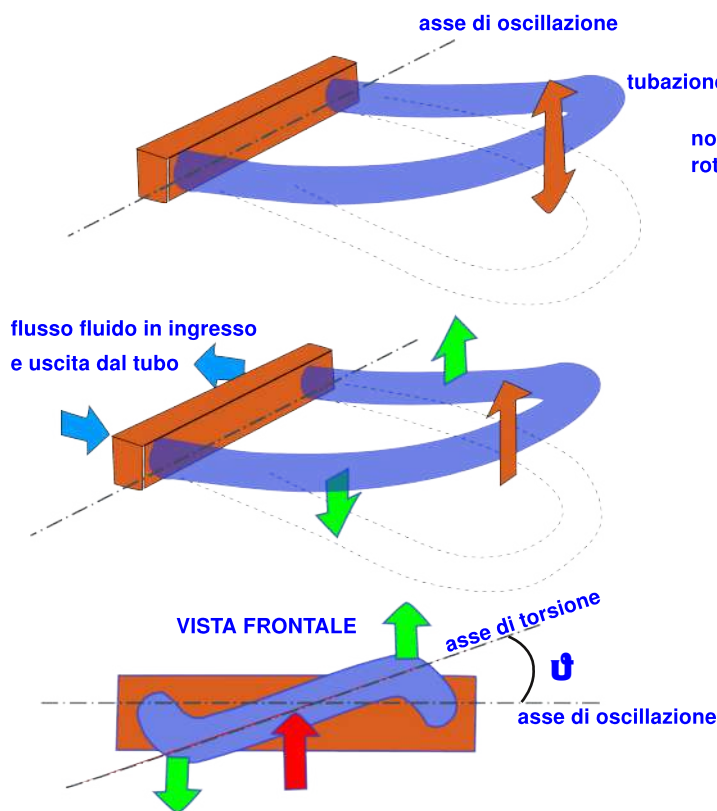
Correnti oceaniche

Principalmente dovute all'azione del vento (correnti di deriva), hanno caratteristiche analoghe alla circolazione atmosferica. Ulteriori influenze determinano, comunque, una loro irregolarità sia in direzione sia intensità anche se si riconosce l'effetto della forza deviante di Coriolis. Così gli alisei originano correnti di deriva che deviano a destra del vento (con circolazione oraria) nell'emisfero nord e a sinistra (circolazione antioraria) nell'emisfero sud.



Pendolo di Foucault (visto dall'alto)

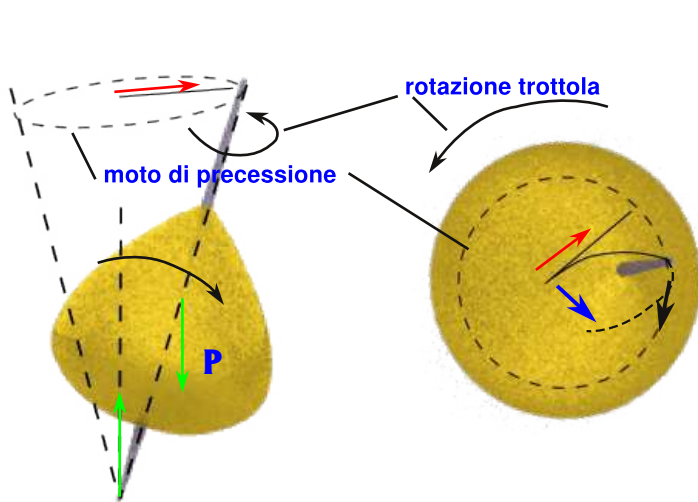
Il peso del pendolo da 1 oscillerebbe fino a portarsi in 1' se non vi fosse l'azione della forza di Coriolis che in realtà lo devia verso destra (nell'emisfero settentrionale) portandosi in 2. Allo stesso modo da 2 invece di giungere in 2' si porta in 3. Così il pendolo ruota in senso orario (opposto a quello della Terra. (nota: per chiarezza gli spostamenti sono stati notevolmente amplificati rispetto alla realtà - alla latitudine di Parigi lo spostamento è di circa 11° in un'ora di oscillazioni)



nota: un'oscillazione può considerarsi un moto rotatorio limitato a pochi gradi

Misuratore di portata massica

Il sensore è costituito da una tubazione fatta oscillare ad alta frequenza intorno a un asse, creando così le condizioni perché si manifesti l'effetto di Coriolis (le frecce in rosso sono indicative delle oscillazioni). Quando il fluido transita nel tubo si generano due forze di Coriolis (frecce verdi) uguali ed opposte (il flusso è opposto nei due rami), perpendicolari al piano costituito dall'asse di rotazione (oscillazione) e dal vettore velocità del fluido che inducono un effetto di torsione del tubo, il cui valore θ è funzione del prodotto mV e quindi della portata di massa.



la trottola sbandata: vista frontale e dall'alto

Trottola

Durante il movimento rapido della trottola la forza peso (applicata nel baricentro) può trovarsi fuori del punto di appoggio. Si viene così a creare un momento di ribaltamento che induce un movimento (in rosso) dell'asse. Tale movimento, risentendo della forza di Coriolis (in blu) viene deflesso, con la tendenza a ritornare in posizione verticale se non vi fosse la continua azione sbandante. Tale effetto si ripete per tutti gli angoli di rotazione generando un movimento complessivo che, in assenza di forze disturbanti, consiste di un moto circolare dell'asse della trottola, detto precessione che

divertimenti). Nel senso comune vi sono casi in cui l'effetto, pur presente, viene esaltato a tal punto da farlo sembrare uno scherzo della natura. Così si dice che il consumo delle rotaie dei treni è maggiore su un lato, una condizione in pratica di poco valore se si pensa che alla latitudine di 45° per un treno che viaggia a 200 km/h l'accelerazione di gravità (e quindi il peso) è più di 1700 volte l'accelerazione di Coriolis: il peso del treno incide maggiormente sul consumo delle rotaie. Un altro esempio riportato è quello sul volo di un aereo che sarebbe condizionato dall'effetto di Coriolis. Occorre tenere presente però che l'effetto è in pratica impercettibile rispetto alle modalità di controllo del volo che per le lunghe distanze non è certamente una retta visto che su una sfera la rotta più breve congiungente due punti è un arco di cerchio massimo (una ortodromia come si insegna in astronomia nautica). Vi è poi il famoso effetto sugli scarichi dei lavandini per cui il flusso dell'acqua si presenta come un vortice destrorso nel nostro emisfero e sinistrorso in quello agli antipodi. Se si considera solo la forza centrifuga associata al vortice (in verità le forze di attrito sono di gran lunga più alte) e si immagina il fenomeno a una latitudine di 80° (la forza di Coriolis aumenta con la latitudine), questa è più di 7000 volte quella di Coriolis.

Nelle pagine precedenti sono illustrati alcuni esempi dell'effetto di una tale forza "fittizia" che mai il suo scopritore avrebbe immaginato esistessero.
