

LA FORZA DI CORIOLIS - LA LEZIONE

Ancora sulle prove fisiche della rotazione terrestre

Nel Seicento quando i fondatori della meccanica (Galilei, Hooke e Newton) posero le basi per la misura della deviazione rispetto alla verticale di un grave in caduta libera dovuta alla rotazione terrestre si sviluppò un dibattito secondario sull'impiego di proiettili lanciati da cannoni. Un esempio famoso è l'immagine (fig.1) raffigurante un monaco e un borghese che osservano il lancio di un cannone disposto verticalmente chiedendosi da che parte cadrà l'oggetto lanciato, incisione riportata nel 1690 nell'opera di Pierre Varignon, *Nouvelles conjectures sur la pesanteur*.



fig.1 Lanci verticali di palle di cannone realizzati dal monaco Marin Mersenne e dall'ingegnere Pierre Petit nel 1638

I due protagonisti della vicenda erano stati oltre cinquanta anni prima padre Marin Mersenne, traduttore francese di un'opera di Galilei e corrispondente di Descartes, e l'ingegnere Pierre Petit. L'esperienza, nelle diverse versioni raccontate non diede risultati soddisfacenti. [Mersenne](#), amico di Cartesio, cercava una prova della rotazione terrestre, ma ancor oggi è difficile analizzare, tenendo conto della presenza dell'aria, il lancio di una palla di cannone con un alzo verticale prossimo a 90° . Anche l'astronomo reale John Flamsteed nel 1679 durante una seduta della Royal Society, secondo Arnol'd, "propose di sparare in alto, verticalmente, delle palle di cannone e di verificare la posizione esatta del punto di caduta." Paradossalmente un gesuita, [Giovanni Battista Riccioli](#) grande astronomo, aveva già nel 1651, affrontando le prove a favore della rotazione terrestre nell'opera *Almagestum novum*, presentato una sofisticata esperienza copernicana ideale sul moto di palle di cannone e la rotazione terrestre, accompagnandola con un disegno esplicativo (fig.2).

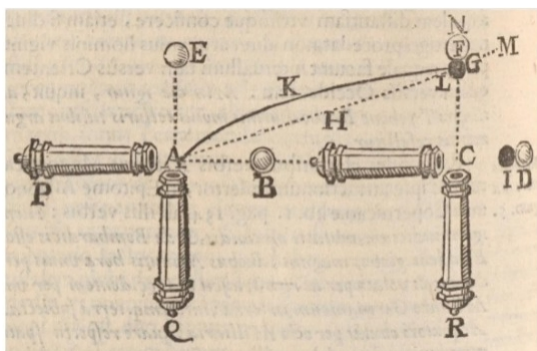


fig.2 Disegno dall'*Almagestum novum* di Giovanni Battista Riccioli sul lancio di una palla di cannone lungo il meridiano e sulla sua deviazione provocata dalla rotazione terrestre

Il proiettile era questa volta lanciato lungo il meridiano verso Nord. Ammettendo valida l'ipotesi copernicana, la velocità della Terra inizialmente doveva essere più alta di quella dei punti più lontani, risultando proporzionale al raggio R del parallelo. La variazione di questa velocità come modificava il moto dell'oggetto?

Invece di rispondere a questa domanda secondo l'argomentazione del gesuita, è più semplice adottare una trattazione moderna legata alla rotazione bidimensionale di una piattaforma e agli effetti (forze) subite da un corpo in movimento al di sopra di essa.

Con riferimento alla fig.3, un oggetto che si muove radialmente, dall'esterno verso l'interno, oltre alla consueta forza centrifuga che lo spinge verso l'esterno risente di una spinta laterale (perpendicolare sia alla velocità angolare di rotazione che alla sua velocità relativa); verso destra se la rotazione è antioraria, verso sinistra se la rotazione del disco è oraria. La spiegazione intuitiva è che i punti più interni del disco hanno, per un osservatore esterno, una velocità tangenziale inferiore a quelli più esterni determinando una differenza di velocità e quindi una componente laterale che corrisponde all'effetto (la forza apparente) che agisce sull'oggetto in movimento relativo sul disco. La forza, fu chiamata da Coriolis nel 1835 forza centrifuga composta, ma in molte discussioni qualitative seicentesche era in qualche modo presente.

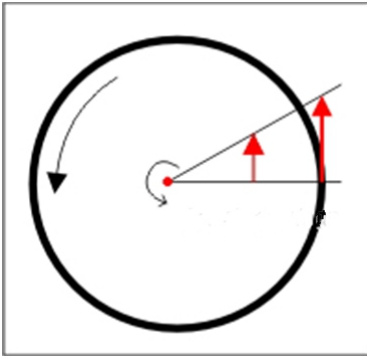


fig.3 I diversi punti un disco in rotazione mostrano velocità decrescenti all'avvicinarsi al centro

Accenniamo adesso alla spiegazione di Riccioli del fenomeno balistico descritto dalla fig.2. In prossimità del meridiano, il moto, considerato approssimativamente piano, era scomposto in due direzioni perpendicolari e l'osservatore era esterno alla Terra. I due movimenti erano rappresentati da due cannoni uno verticale che puntava verso Nord e uno orizzontale con la bocca disposta verso Est. Trascurando la resistenza dell'aria se la velocità orizzontale si fosse mantenuta costante come quella verticale la traiettoria sarebbe stata una retta e la palla di cannone si sarebbe mantenuta lungo il meridiano. Invece, man mano che il proiettile si avvicina al Nord, la velocità tangenziale diminuisce provocando una curvatura della traiettoria e uno spostamento a Est rispetto alla linea meridiana, per un osservatore solidale alla Terra. In termini moderni la parabola risultante è la composizione di un moto rettilineo uniforme verticale e uno uniformemente decelerato orizzontale per punti che si trovano tutti alla stessa distanza dal centro della Terra (ma a distanze diverse dall'asse di rotazione), in sostanza l'equivalente tridimensionale della rotazione del disco.

Anche dopo l'introduzione della forza centrifuga composta e della dimostrazione di Foucault della precessione del piano di oscillazione del pendolo, la spiegazione di tutti gli effetti dovuti al movimento dei corpi all'interno di sistemi rotanti con velocità angolare ω non fu immediatamente ricondotta all'espressione trovata da Coriolis. Un contributo importante all'affermazione della forza di Coriolis fu la spiegazione dei meteorologi della dinamica atmosferica a grandi scale.

Dinamica atmosferica a grandi scale

La meccanica di un fluido in movimento è particolarmente complessa, specie nel caso di turbolenza. Poco dopo la scoperta di Foucault un meteorologo statunitense William Ferrel affrontò il problema globale di una descrizione qualitativa dei moti dell'atmosfera e degli oceani determinati dalla rotazione terrestre (W. Ferrel, [*An essay on the wind and the currents of the ocean*](#), 1856). Già nel Settecento [George Hadley](#) aveva ipotizzato la formazione di celle convettive planetarie di aria calda, riscaldata dall'irradiazione della superficie prossima all'equatore, sospinta verso l'alto che si muoveva verso i poli per poi ripercorrere a bassa quota il percorso inverso che la

riportava verso l'equatore. E Ferrel spiegava che la teoria di Hadley sui moti atmosferici si basava su tre forze. A queste il meteorologo statunitense aggiungeva una quarta e ultima forza dovuta alla rotazione della Terra che provocava moti relativi dell'atmosfera verso Est o verso Ovest. L'equazione della forza era dipendente dalla velocità della Terra, dalla velocità della particella dell'atmosfera e dal seno della latitudine e veniva associata al nome di Laplace. A grandi scale i moti risultanti dell'atmosfera divenivano allora rappresentabili secondo zone con venti orientati rispettivamente verso Est e verso Ovest e con celle convettive più complesse rispetto a quelle proposte da Hadley.

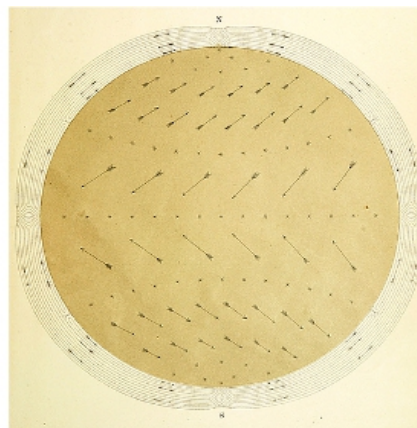
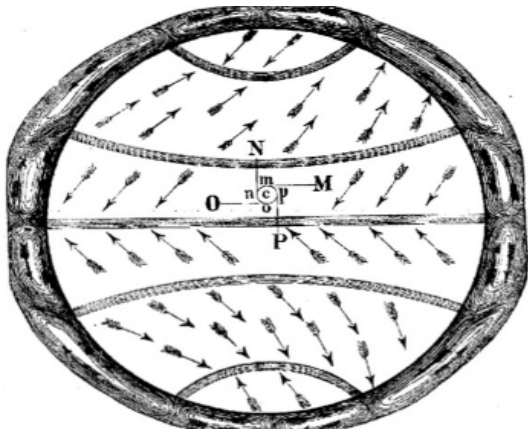


fig.4 Le celle di convezione e i moti globali dell'atmosfera ipotizzati da Ferrel per una Terra in rotazione nel 1856; **fig.5** La circolazione atmosferica su grandi scale proposta dal meteorologo William Ferrel nel 1877

Negli anni Ferrel perfezionò il suo modello, proponendo, nei suoi numerosi trattati di meteorologia, una carta dei principali moti dell'atmosfera. Furono però i meteorologi scandinavi ad esplicitare un riferimento indiretto a Coriolis. Nel 1876 C. M. Guldberg e H. Mohn nella memoria *Études sur les mouvements de l'atmosphère* parlarono di una forza, detta *centrifuga composta*, come forza deviatrice (nella dinamica dei fluidi l'equazione di Newton è espressa come forza su unità di massa) uguale a $2\omega \sin\Phi v$, con Φ latitudine e ω velocità angolare della Terra.

Oggi, in un'approssimazione dovuta tra gli altri al geofisico svedese Carl Gustav Rossby, la circolazione verticale (meridiana) planetaria in ogni emisfero è suddivisa in tre celle. La prima cella, approssimativamente compresa tra 0° e 30° di latitudine, è quella di Hadley dovuta essenzialmente alla convezione. La seconda, tra 30° e 60° di latitudine, detta di Ferrel è spiegata in termini di forza di Coriolis. L'ultima tra 60° e 90° è quella polare.

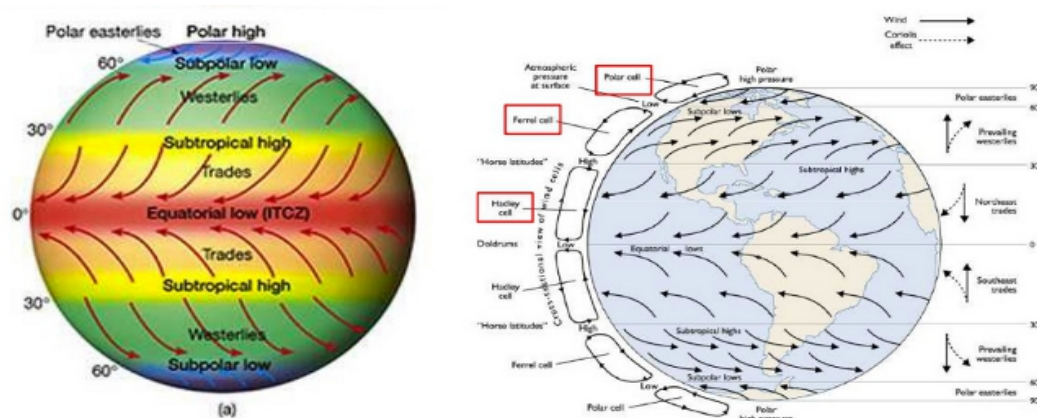


fig.6 Una rappresentazione moderna dei principali moti di circolazione atmosferica a grandi scale secondo un modello semplificato detto geostrofico; **fig.7** Le principali celle di convezione (Hadley, Ferrel, polare), i moti dell'atmosfera e le forze di Coriolis

Nel nostro emisfero, a partire dall'equatore, al suolo si hanno gli [Alisei](#), venti orientali, poi una zona di calma a cui segue una zona con venti prevalentemente caldi occidentali e infine nelle zone più a Nord venti orientali freddi. A grandi altezze si formano delle [correnti a getto](#) che influenzano profondamente i viaggi aerei transoceanici. Tutta la dinamica atmosferica e anche quella oceanica è legata alla rotazione terrestre. Senza entrare nei dettagli qui, basti ricordare che i moti atmosferici sono classificati secondo una scala spaziale che può andare da pochi centimetri fino a distanze dell'ordine delle decine di migliaia di chilometri. La tabella che segue dà un'idea della varietà delle situazioni che si possono affrontare nella troposfera (caratterizzata da una temperatura decrescente all'aumentare dell'altitudine e dall'elevata densità). In essa si sviluppano i principali fenomeni atmosferici legati al clima. Per rimanere ai soli moti a grande scala nella fig. 9 è rappresentato un ciclone associato a un [anticiclone](#) su scale sinottiche (1000 km) o planetarie (10000 km) nell'emisfero Nord.

Classificazione dei moti atmosferici secondo la loro scala spaziale

TIPO DI MOVIMENTO	SCALA ORIZZONTALE
vortici turbolenti piccolissimi	1+10 cm
vortici turbolenti piccoli	0,1+1 m
trombe d'aria	1+10 m
impulsi, raffiche	10+100 m
tomado	100 m
fronti	10+100 km
uragani	100 km
cicloni sinottici	1000 km
onde planetarie	10.000 km
maree atmosferiche	10.000 km
venti medi zonali	10.000 km

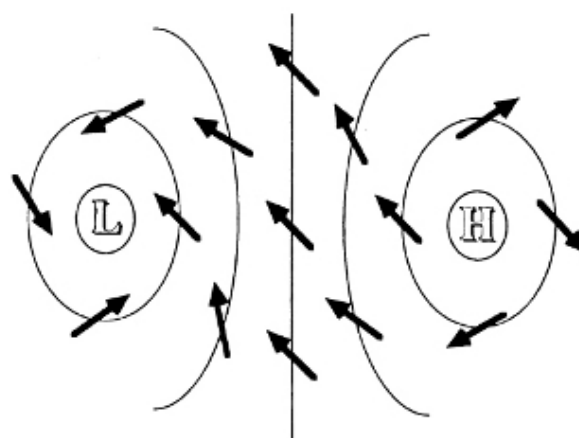


fig.8 Classificazione dei moti atmosferici; fig.9 Formazione di una coppia ciclone-anticiclone nell'emisfero boreale (H indica la zona di alta pressione, L quella di bassa pressione)

L'area di alta pressione anticiclonica è indicata con il simbolo H (*high*) e quella di bassa pressione ciclonica con la lettera L (*low*). Le isobare sono schematizzate con linee sottili e i venti con frecce marcate. I venti, che si muovono dalle aree ad alta pressione verso quelle a bassa, producono, in concomitanza con fenomeni termici, una concentrazione di massa (nubi) nella circolazione ciclonica centrata intorno a L e una divergenza di massa (cielo sereno) nella circolazione anticiclonica centrata intorno a H. La direzione del vento non coincide però con quella del gradiente di pressione (la forza perpendicolare alle isobare) proprio a causa della rotazione terrestre. L'effetto Coriolis nel nostro emisfero provoca infatti una rotazione oraria per la circolazione anticiclonica e una antioraria per quella ciclonica. Rotazioni che sono completamente invertite nell'emisfero Sud. I venti a terra nella zona anticiclonica sono generalmente deboli e l'intenso irraggiamento determina al suolo temperature basse d'inverno ed eccezionalmente alte d'estate. Nell'area ciclonica invece, dove le isobare risultano chiuse attorno a un centro di minima pressione, le velocità dei venti possono raggiungere grandissimi valori. Le velocità hanno inoltre una componente radiale che punta verso il centro del ciclone (occhio). La dinamica di questi fenomeni è assai complessa e le loro dimensioni possono essere confrontabili con quelle dei continenti.

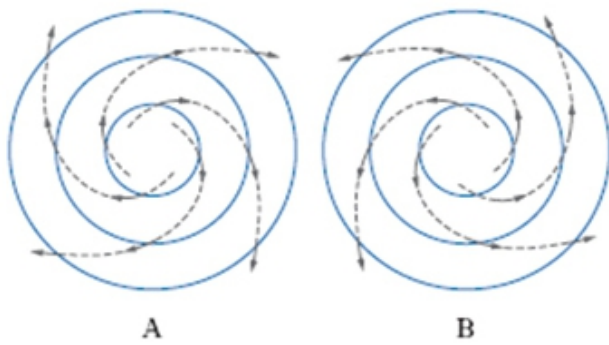


fig.10 Circolazione del vento al suolo: A, nell'emisfero Nord, B, nell'emisfero Sud; fig.11 Rappresentazione delle isobare in una zona di alta pressione (A, anticiclone) nell'Europa centrale. Intorno al ciclone vi sono tre zone di bassa pressione (C, ciclone);

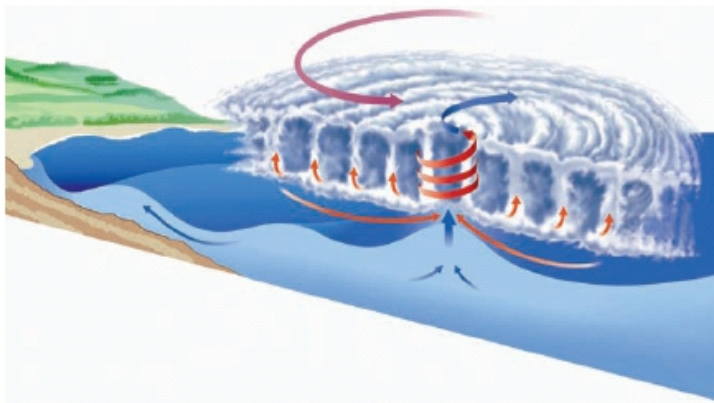


fig.12 Struttura di un ciclone tropicale. In corrispondenza del minimo di pressione si crea un vortice nel quale si determina un movimento spiraleggiante verso l'alto di massa d'aria calda e umida con conseguente formazione di corpi nuvolosi cumuliformi e intense precipitazioni

Dalla forza centrifuga composta al teorema di Coriolis

Gaspard-Gustave de Coriolis, insegnante dell'École Polytechnique, nel 1835 presentò alla rivista della Scuola la memoria *Sur les équations du mouvement relatif des systèmes de corps*, approfondendo un tema già discusso negli anni precedenti. L'obiettivo dell'autore era dimostrare che nei sistemi rotanti "esistono due specie di forze supplementari". Le ordinarie forze centrifughe rappresentano il primo tipo di forze supplementari. "Le seconde, aventi direzione perpendicolare alla velocità relativa e all'asse di rotazione del sistema in movimento, sono uguali al doppio del prodotto della velocità angolare per la proiezione della velocità relativa su un piano perpendicolare all'asse di rotazione. Queste ultime hanno –continuava Coriolis- grandi analogie con le forze centrifughe ordinarie." E dopo aver discusso i termini della corrispondenza tra le due classi di forze l'autore concludeva: "a causa di queste analogie credo di dover dare alle nuove forze il nome di forze centrifughe composte." Nel 1839 Coriolis divenne direttore dell'École Polytechnique, incarico che mantenne fino alla sua morte nel 1843. Nel 1848 Joseph Bernard sul Journal de l'École Polytechnique propose una derivazione semplificata (e sbagliata) della nozione di forza centrifuga composta e definì teorema di Coriolis l'espressione delle forze nei due sistemi di riferimento. Nel 1851 furono realizzate le spettacolari dimostrazioni a Parigi della rotazione della Terra con i pendoli di Léon Foucault, protetto del futuro Napoleone III. La profonda trasformazione della capitale francese durante il secondo Impero si accompagnò a una grandissima crescita quantitativa della Scuola scientifica. Nel 1854 Foucault divenne, grazie all'intervento di Napoleone III, il fisico dell'Osservatorio di Parigi.



fig.13 Napoleone III e sua moglie visitano i lavori dell'Opera

Charles Eugène Delaunay, astronomo del *Bureau des longitudes* e professore di meccanica (al Politecnico e nella Facoltà di scienze), pubblicò, nel 1856, un importante manuale: *Traité de mécanique rationnelle*. In esso, per la prima volta, la forza centrifuga composta di intensità $2m\omega v$ serviva per spiegare le principali prove fisiche della rotazione terrestre: il calcolo della deviazione verso Est dei gravi in caduta libera nel nostro emisfero e lo studio del movimento di un pendolo, ovvero, come specificava l'autore, la bella esperienza di Foucault. Nessun riferimento esplicito a Coriolis era presente nel trattato di meccanica razionale. Solo alcuni anni dopo, nel novembre del 1859, in un dibattito dell'Accademia delle scienze sulla fisica del Globo che lo coinvolse con Joseph Bertrand e Jacques Babinet, il professore di meccanica riconobbe ampiamente il contributo di Coriolis all'introduzione della seconda forza fittizia. Nella discussione, per determinare gli effetti della rotazione terrestre sui corsi d'acqua, Delaunay si affidò "alla teoria delle forze apparenti nei movimenti relativi dovuta a Coriolis [...], introdotta negli ultimi anni nell'insegnamento ordinario di meccanica razionale." Improvvisando una lezione di meccanica, per un pubblico che non mostrava particolari conoscenze della nuova forza, continuava: "La teoria di Coriolis [utilizza] due forze fittizie: 1° la forza centrifuga dovuta alla rotazione della terra; 2° un'altra forza che Coriolis ha chiamato forza centrifuga composta e ha completamente definita in modulo, direzione e verso." (*Comptes Rendus Academie Des Sciences*, 1859, p. 689). "Per definire la forza centrifuga composta [...] consideriamo AB lungo una retta parallela all'asse di rotazione della terra [...] la forza centrifuga composta è: 1° perpendicolare al piano individuato da AB e dalla velocità dei corpi, 2° essa ha l'espressione $2m\omega v \sin \alpha$ con m massa dei corpi, ω velocità angolare della terra, e l'angolo α che v forma con AB." (*Comptes Rendus Academie Des Sciences*, 1859, p. 690) Infine esplicitò il verso della forza in un caso particolare con le parole: "Se la velocità delle molecole sono dirette lungo il meridiano, da nord verso sud, la forza centrifuga composta sarà diretta orizzontalmente, da est verso ovest, ed avrà il valore $2mv \omega \sin \lambda$ con λ latitudine geografica del luogo." (*Comptes Rendus Academie Des Sciences*, 1859, p. 690) L'intervento finale spettò al giovane Piobert che discusse alcune piccole deviazioni del moto dei proiettili, dovute alla rotazione terrestre, a partire dalla teoria di Siméon Denis Poisson del 1839: *Researches sur le mouvement des projectiles dans l'air, en ayant égard à leur figure et leur rotation, et à l'influence du mouvement diurne de la terre*. Il riferimento di Delaunay alla teoria di Coriolis presentata nei corsi di meccanica razionale divenne negli anni seguenti puntuale. All'ex direttore dell'École i manuali dedicarono spazio nel volume di Cinematica nei testi di Meccanica generale o di Meccanica razionale. Spesso, con un paragrafo intitolato: il teorema di Coriolis. Come esempio si può prendere il Volume primo del *Traité de mécanique*, di Edouard Collignon del 1873. La versione digitalizzata da Google è quella di una copia conservata alla biblioteca G. Castelnuovo dell'Università La Sapienza di Roma. Il testo influenzò le *Lezioni di meccanica razionale* di Tullio Levi-Civita e Ugo Amaldi pubblicate cinquanta anni dopo in Italia da Zanichelli nel 1923.



Le côté LH, qui ferme le contour, est égal au produit $\frac{1}{2}jd\theta^2$. Divisons par $\frac{1}{2}d\theta^2$ les quatre côtés du quadrilatère LRSH. Cela revient à y substituer une figure semblable, L'R'S'H', dont les côtés (fig. 184) seront $j, j', j'',$ et $\frac{2SH}{d\theta^2} = 2\omega r, \sin \alpha$. Le côté L'H' est la résultante géométrique des côtés L'R', R'S', S'H', chacun pris dans le sens des flèches. Par conséquent, l'accélération j du mouvement absolu est la résultante de trois accélérations, savoir : l'accélération j_r du mouvement d'entraînement, l'accélération j_r' du mouvement relatif, et l'accélération $j_c = 2\omega v, \sin \alpha$, qui est perpendiculaire à la fois à la vitesse relative et à l'axe instantané de rotation, et dirigée dans le sens SH (fig. 185), c'est-à-dire dans le sens où la rotation instantanée tend à faire tourner l'extrémité S d'une aiguille A'S dirigée suivant la vitesse relative.

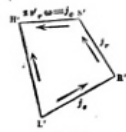


Fig. 184.

Cette accélération complémentaire j_c est nulle lorsque $\omega = 0$, c'est-à-dire lorsque l'entraînement se réduit à une simple translation, ou lorsque $v = 0$, ou enfin lorsque $\sin \alpha = 0$, c'est-à-dire lorsque la vitesse relative est nulle ou dirigée suivant l'axe instantané de rotation. Dans ces divers cas particuliers, l'accélération absolue est la résultante de deux accélérations seulement, celle du mouvement relatif et celle du mouvement d'entraînement. Dans tout autre cas, il faut joindre à ces deux accélérations l'accélération complémentaire. Tel est le théorème sur l'accélération dans le mouvement relatif; on lui donne le nom de *théorème de Coriolis*.

DÉCOMPOSITION DE L'ACCÉLÉRATION COMPLÉMENTAIRE SUIVANT TROIS AXES RECTANGULAIRES.

185. La définition que nous venons de donner de la troisième accélération est bien complète, mais elle est, en général, d'une application peu commode; on la simplifie en dé-

[fig.14 Frontespizio del libro di Meccanica razionale di Tullio Levi-Civita e Ugo Amaldi del 1923](#); [fig.15 Pagina del trattato di Collignon del 1873 sul théorème de Coriolis](#)

Il teorema di Coriolis nel manuale di Collignon divenne una relazione cinematica tra le accelerazioni in un riferimento fisso (detto assoluto) e uno rotante (relativo). L'accelerazione nel riferimento assoluto era posta uguale a tre termini: l'accelerazione relativa, quella centrifuga e il termine complementare $2\omega v_r \sin \alpha$ (perpendicolare sia alla velocità relativa che all'asse istantaneo di rotazione). L'accelerazione complementare, chiariva l'autore, era detta *centrifuga composta*. Per decine di anni nei testi di Meccanica razionale la nuova forza fu chiamata centrifuga composta e il nome di Coriolis fu associato al teorema delle accelerazioni.

La forza di Coriolis

La descrizione dinamica del moto di un corpo è indipendente dal sistema di riferimento scelto. Estendere questa proprietà da sistemi di riferimento inerziali a quelli rotanti, trascurando gli effetti relativistici, comporta una trasformazione di coordinate e conseguentemente una relazione tra le velocità (in genere associata al nome di Galilei) e una tra le accelerazioni (il "*teorema di Coriolis*") in un sistema di riferimento inerziale e le stesse grandezze relative all'osservatore nel sistema rotante.

I due punti di vista sono interpretabili in termini di accelerazioni caratteristiche dell'osservatore nel sistema in movimento e quindi, attraverso il secondo principio della dinamica, di forze. La forza centrifuga è la più nota delle forze apparenti, ma da sola non riesce a spiegare la traiettoria di oggetti come quella di una palla lanciata da un ragazzo in una giostra in movimento osservata all'interno del sistema rotante. Come abbiamo detto più volte Coriolis introdusse nel 1835 il termine correttivo. Oggi questo termine è esprimibile nella forma vettoriale: $\mathbf{a}_c = 2\mathbf{v}_r \times \boldsymbol{\omega}$ (non sempre i segni dell'accelerazione di Coriolis, nei diversi manuali, coincidono con questa espressione); l'accelerazione di Coriolis, a parte il fattore 2, è il prodotto vettoriale, indicato con il simbolo \times , della velocità relativa \mathbf{v}_r per la velocità angolare $\boldsymbol{\omega}$. La forza di Coriolis è allora semplicemente: $\mathbf{F}_c = 2m\mathbf{v}_r \times \boldsymbol{\omega} = -2m\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{v}_r$. Dal punto di vista formale la forza di Coriolis è analoga a quella di Lorentz se si sostituisce alla carica il doppio della massa e al campo magnetico la velocità angolare. Le orbite circolari, con asse la velocità angolare, sono allora uno dei tratti caratteristici di \mathbf{F}_c .

Le applicazioni della nuova forza fittizia sono molteplici, ma qui ci limiteremo a discuterne alcune legate alla rotazione terrestre con la sola aggiunta delle applicazioni negli strumenti di misura della portata.

Per un punto che si trova sulla superficie terrestre, la rotazione della Terra intorno al proprio asse avviene in un tempo prossimo a 24 ore (oggi, come accennato nella [lezione](#) su Foucault, invece del giorno solare di 86400 secondi si utilizza il giorno sidereo di 86164 secondi). La velocità angolare ha allora un'intensità $\omega = 2\pi/T \cong 7,29 \cdot 10^{-5}$ rad/s. L'intensità della forza di Coriolis dipenderà inoltre dal seno dell'angolo α formato dai due vettori \mathbf{v}_r e $\boldsymbol{\omega}$: sarà perciò nulla per vettori paralleli e massima per vettori perpendicolari.

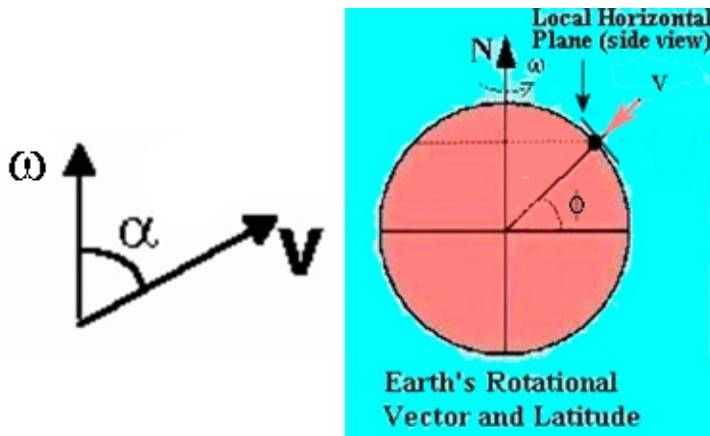


fig.16 L'intensità della forza di Coriolis viene a dipendere dal seno dell'angolo formato dalla velocità angolare e dalla velocità relativa dell'oggetto in movimento; fig.17 Nel caso della caduta dei corpi in un punto di latitudine Φ la forza di Coriolis dipende dal coseno della latitudine, poiché l'angolo tra ω e v è $\alpha = 90^\circ + \Phi$.

Ritornando alla caduta dei gravi lungo la verticale è facile convincersi che per un punto di latitudine Φ , $\alpha = 90^\circ + \Phi$, quindi $\mathbf{F}_c = 2m\mathbf{v}\omega \sin\alpha = 2m\mathbf{v}\omega \cos\Phi$. La forza apparente, dipendendo dal coseno della latitudine, è minima ai poli e massima all'equatore. Il verso della forza di Coriolis è tale che nell'emisfero Nord vi è uno spostamento verso Est; mentre nell'emisfero australe, dove la velocità angolare ha il verso opposto, la deviazione è verso Ovest.

Consideriamo ora un secondo caso particolare: quello del moto di una nave ad esempio lungo l'equatore. Il fisico Lóránd Eötvös notò nell'Ottocento che se la velocità relativa del mobile era verso Est la misura di precisione dell'accelerazione di gravità effettuata sulla nave risultava minore del valore standard; viceversa si potevano rilevare piccole correzioni positive per il moto verso Ovest. Facendo riferimento alle proprietà del prodotto vettoriale è facile capire che nel primo caso la forza di Coriolis è opposta a quella gravitazionale, mentre nel secondo caso è concorde all'accelerazione di gravità. Si consideri ora il moto di un corpo sulla superficie tangente al meridiano. Scomponendo la velocità in due vettori sul piano del meridiano si ha una componente di intensità $v_r \cos\Phi$, parallela a ω e una componente perpendicolare $v_r \sin\Phi$. Il prodotto vettoriale del primo termine (parallelo a ω) e della velocità angolare stessa ω è nullo. L'intensità della forza di Coriolis in quest'ultimo caso dipende dal seno della latitudine Φ .

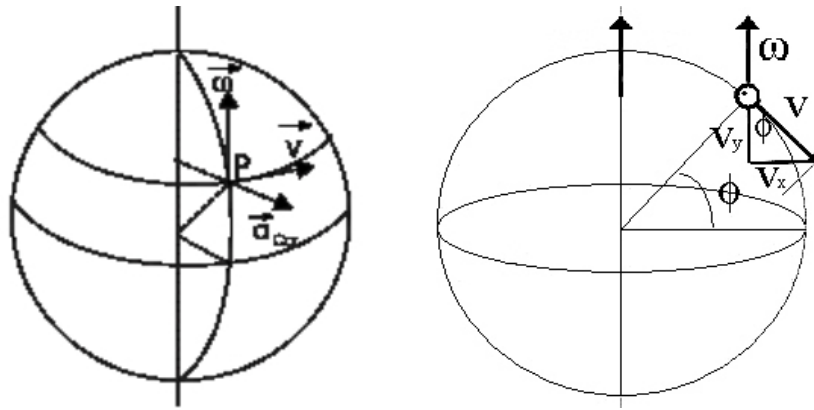


fig.18 In un generico punto P della superficie terrestre dell'emisfero Nord se la velocità relativa del mezzo è verso destra (est) l'accelerazione di Coriolis risulta verso l'esterno e ha una componente opposta rispetto all'accelerazione di gravità; **fig.19** Lungo il meridiano una velocità tangente v, nel punto di latitudine Φ , ha due componenti v_x e v_y , proporzionali rispettivamente a $\sin\Phi$ e $\cos\Phi$. Delle due solo la prima dà un contributo diverso da zero per la forza di Coriolis

Per una latitudine $\Phi=43^\circ$ e una velocità elevata di 30 m/s, l'accelerazione risulta: $a_c=2\omega v_r \sin\Phi \cong 2,98 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$. Un valore di intensità sufficiente per influenzare la dinamica complessa dell'atmosfera e degli oceani ma non quella che si ritrova nel vortice di un lavandino di casa ! In questo caso per le velocità in gioco (poche decine di centimetri al secondo) l'accelerazione è di almeno due ordini di grandezza più piccola.

Senza entrare nel complesso mondo della dinamica atmosferica è possibile accennare alle implicazioni idrodinamiche del principio di Coriolis parlando di uno strumento di misura della portata di un fluido all'interno di un condotto oscillante. Nei misuratori di portata a effetto Coriolis un fluido è costretto ad attraversare un tubicino a forma di U. Il tubicino è sottoposto a piccole oscillazioni periodiche, trasversali al piano della fig.20. Nel momento di passaggio al suo interno di un gas o di un liquido le oscillazioni non saranno più uniformi in tutto il tubicino, ma la parte iniziale del condotto subisce una leggera deviazione, diciamo verso il basso, e quella finale nel verso opposto. La sincronia iniziale è dunque alterata. Grazie ad opportuni sensori è possibile valutare le piccole variazioni di movimento (le deformazioni) che vengono a dipendere dalla forza di Coriolis e quindi dalla densità e dalla velocità del fluido. La misura dello sfasamento delle oscillazioni e della frequenza di risonanza dell'ampiezza delle oscillazioni sono le due misure che permettono di ricavare in modo indipendente le due grandezze caratteristiche del fluido: la portata e la densità.

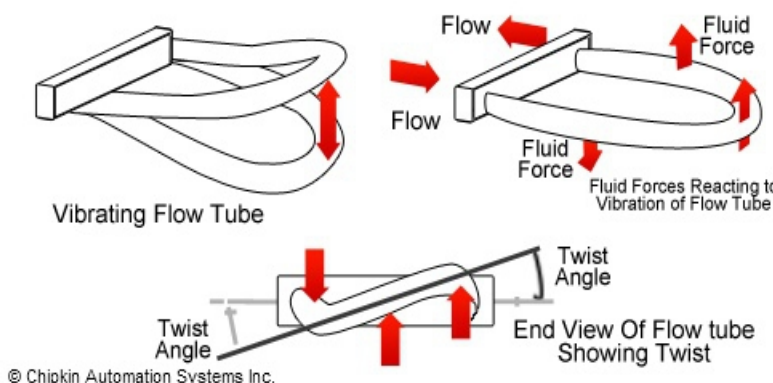
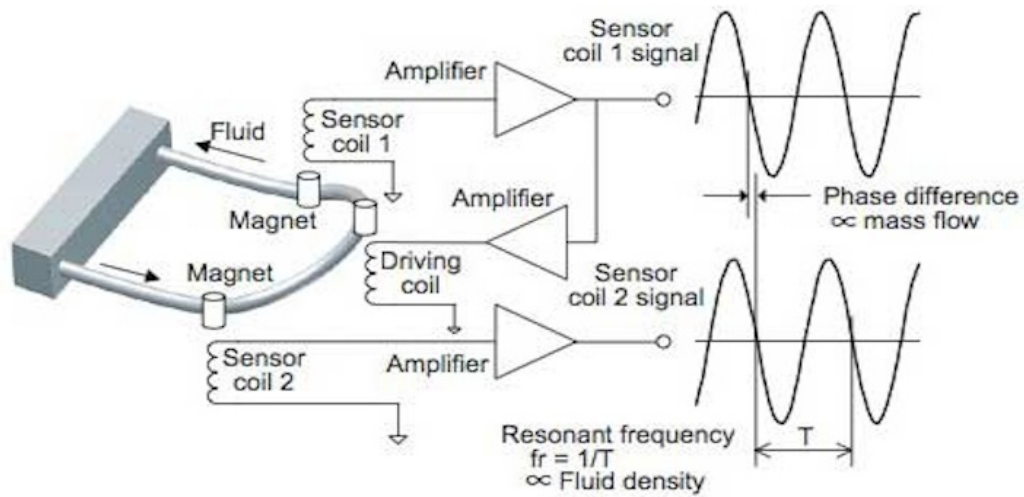


fig.20 Il tubo dello strumento viene fatto oscillare regolarmente. Quando questo è attraversato da un fluido i due bracci del condotto risentono di forze di Coriolis opposte che provocano una deformazione misurata da un angolo di torsione



[fig.21](#) Negli strumenti a effetto Coriolis in due distinti punti sono misurate le oscillazioni. Lo sfasamento delle curve sinusoidali è proporzionale al flusso di materia. Mentre la frequenza di oscillazione che provoca il massimo dell'ampiezza è funzione, in una maniera non semplice, della densità del fluido