

Fisica I, *a.a.* 2014–2015 – Secondo Appello

1 Luglio 2015, Ore 15 Aula PN1 Polo Porta Nuova

Anna M. Nobili

1 Rotazione della Terra e circolazione dei venti

¹ Sulla Terra le zone equatoriali e quelle polari ricevono un diverso flusso di luce solare (maggiore nelle zone equatoriali, minore in quelle polari). Questo diverso riscaldamento crea dei moti convettivi nell'atmosfera: nella zona equatoriale l'aria calda sale dal basso verso l'alto, si raffredda e viaggia verso le zone polari dove si raffredda ulteriormente, discende a basse altezze, ritorna lungo la superficie della Terra verso la zona equatoriale, si riscalda di nuovo, risale verso l'alto e il ciclo ricomincia. Disegnate il percorso –cella convettiva– e il verso di percorrenza nell'emisfero nord e in quello sud.

Se la Terra non ruotasse questi moti convettivi globali si svolgerebbero nei piani meridiani. Invece la circolazione dei venti in quota nelle zone temperate avviene soprattutto lungo i paralleli.

1. Scrivete le dimensioni fisiche del flusso di luce solare sulla superficie della Terra e spiegate qualitativamente (nel caso semplice in cui i raggi solari siano esattamente perpendicolari all'asse di rotazione della Terra) perché le zone equatoriali della superficie terrestre vengono riscaldate dal Sole di più di quelle polari.
2. Considerate una massa d'aria m che –in assenza di rotazione della Terra– segua il moto convettivo descritto e si trovi alle nostre latitudini mentre viaggia verso il polo nord con velocità \vec{v} tangente alla sua cella convettiva. In questa configurazione assumete ora che la Terra, insieme con la sua atmosfera, ruoti con velocità angolare $\vec{\omega}_{\oplus}$ diretta verso il polo nord. Spiegate in modo quantitativo perché la massa d'aria considerata sarà spinta a muoversi lungo il parallelo, e dite in quale verso. Dite in quale verso sarà spinta una analoga massa d'aria nell'emisfero meridionale che stia viaggiando verso il polo sud.

Invece del fenomeno di circolazione globale dei venti descritto sopra consideriamo ora fenomeni atmosferici su piccola scala. Alle nostre latitudini, per un osservatore solidale con la Terra in rotazione, è data una massa d'aria m' che si muove verso est con velocità \vec{v}' tangente al parallelo.²

3. Si scopre che la massa m' considerata isolatamente si deve muovere verso sud. Spiegate perché calcolando la forza agente sulla massa lungo la tangente alla superficie terrestre (indicate con ϑ la latitudine misurata dall'equatore verso il polo). Dite cosa succederebbe ad una analoga massa con la stessa velocità nell'emisfero sud.
4. Restando all'emisfero nord, scopriamo che in realtà l'aria non viene spinta verso sud perché ci sono differenze di pressione che generano sufficienti forze di pressione (dalla isobara di pressione più alta a quella di pressione più bassa) le quali si oppongono alla forza che spinge verso sud generando zone locali di circolazione dei venti. Dimostrate che per la velocità \vec{v}' qui considerata ciò avviene se la zona a pressione più alta è alla destra della velocità. Dite quale sarà in questo caso il verso di circolazione locale dei venti (se orario o antiorario).

¹Le risposte ai quesiti devono essere numerate come i quesiti stessi. Le grandezze cui il testo ha assegnato uno specifico simbolo devono conservare nelle risposte lo stesso simbolo. Ogni simbolo deve essere definito.

²Nel testo distribuito i quesiti che seguono erano indicati per errore come 4 e 5 rispettivamente.

2 Soluzione

L'atmosfera terrestre è un gas che circonda la Terra, è trattenuta dalla forza gravitazionale (leggermente modificata dalla forza centrifuga, che è presente perché la Terra ruota) e ruota con essa. In questo esercizio vediamo cosa succede quando masse di aria si muovono rispetto alla Terra e quindi, avendo una velocità non nulla rispetto ad un sistema di riferimento non inerziale, sono soggette alla forza di Coriolis.

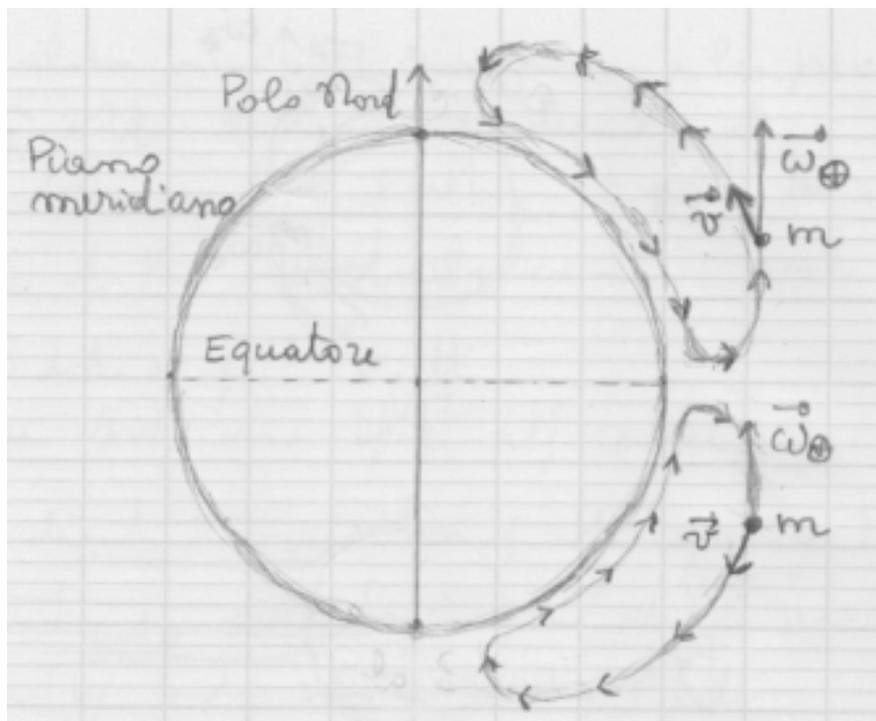


Figure 1: Le celle convettive dovute al diverso riscaldamento tra zone equatoriali e zone polari e descritte nel testo hanno schematicamente, nei due emisferi, l'andamento mostrato (rappresentate in un piano meridiano come suggerito). Il disegno non è in scala perché il raggio terrestre di circa 6400 km è certamente molto maggiore dell'altezza della cella convettiva dato che la maggior parte della atmosfera terrestre si trova entro i primi 10 km di quota. Tuttavia è certo che il verso di percorrenza alle basse quote (lungo la superficie terrestre) è opposto a quello alle alte quote (per esempio ai circa 10 km di altezza alla quale volano gli aerei nelle rotte intercontinentali).

1. Sappiamo che il flusso di energia solare sulla superficie terrestre (detto anche “costante solare”), che indichiamo con Φ , è definito come la quantità di energia solare (J) che nell'unità di tempo (s) colpisce una unità di superficie (m^2). Quindi le sue dimensioni fisiche sono:

$$[\Phi] = \frac{[J]}{[m]^2[s]} = \frac{[kg][m]^2[s]^{-2}}{[m]^2[s]} = [kg][s]^{-3}$$

In Fig. 2 si mostra geometricamente perché, a parità di flusso solare, le zone equatoriali vengono riscaldate di più di quelle polari. Per un osservatore sulla superficie della Terra i raggi del Sole arrivano tutti paralleli tra di loro, come per una sorgente posta a distanza infinita. Infatti il raggio della Terra è tanto minore della distanza Terra-Sole ($\frac{R_{\oplus}}{d_{\oplus\odot}} \simeq \frac{6400 \text{ km}}{1.5 \cdot 10^8 \text{ km}} \simeq 4.3 \cdot 10^{-5}$) che l'angolo sotto il quale la Terra viene vista dal Sole è piccolissimo e ai fini del riscaldamento della superficie terrestre può essere considerato nullo (quindi, raggi solari paralleli).

La figura si riferisce, come indicato nel testo, al caso in cui i raggi di luce solare sono perpendicolari all'asse di rotazione della Terra. (Ricordiamo che questa situazione si verifica

esattamente 2 volte all'anno, agli equinozi). Come si vede in figura, all'equatore i raggi solari sono perpendicolari al piano tangente alla superficie terrestre, mentre vicino ai poli (a causa della forma sferica della Terra) fanno col piano tangente un angolo minore di 90° . Ne segue che la stessa energia solare si distribuisce su una superficie maggiore che non all'equatore, e quindi il riscaldamento per unità di superficie è minore. Arriveremmo alla stessa conclusione considerando la stessa quantità di superficie terrestre nelle due zone e calcolando il flusso che essa assorbe nei due casi: all'equatore su di essa i raggi solari cadono perpendicolarmente (e quindi vengono totalmente assorbiti), mentre ai poli solo la componente perpendicolare alla superficie viene assorbita, che è una frazione del totale pari al coseno della latitudine.

Il flusso di luce solare diminuisce col quadrato della distanza dal Sole della superficie considerata, quindi si potrebbe osservare che le zone polari essendo più lontane ricevono un minore flusso e quindi vengono meno riscaldate. Tuttavia poiché la differenza è solo di un raggio solare, le zone polari ricevono un flusso solare minore che all'equatore di una frazione pari a $(\frac{R_\oplus}{d_{\oplus\odot}})^2 \simeq 1.8 \cdot 10^{-9}$, che è del tutto trascurabile rispetto alla differenza dovuta alla diversa inclinazione della superficie rispetto ai raggi solari, che è pari al coseno della latitudine. Ad esempio, ad una latitudine di 89° il flusso è minore di quello all'equatore di $\cos 89^\circ = 1.7 \cdot 10^{-2}$, cioè l'effetto della diversa inclinazione è circa 10 milioni di volte più rilevante, ai fini di produrre una differenza di riscaldamento, di quello della diversa distanza dal Sole.

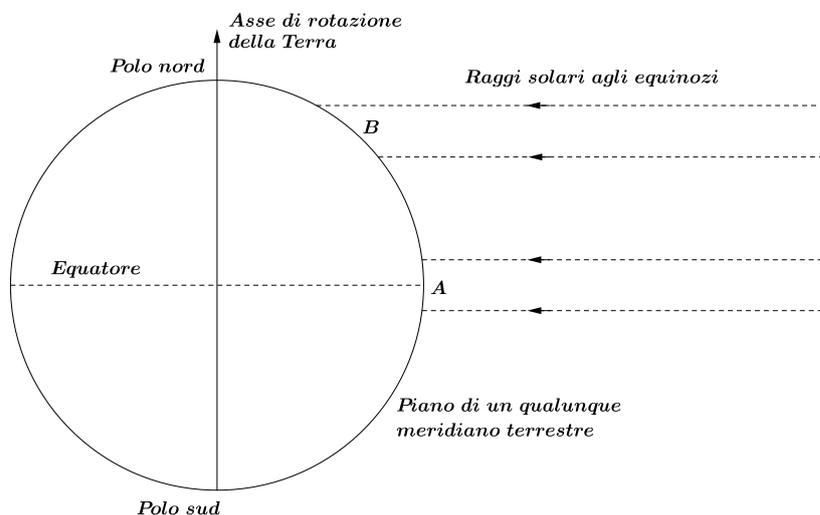


Figure 2: Il riscaldamento della superficie terrestre è maggiore nelle zone equatoriali e minore in quelle polari a causa della diversa inclinazione tra la normale alla superficie e la direzione dei raggi solari. Come mostrato in figura (che si riferisce in particolare agli equinozi), lo stesso flusso solare si distribuisce su una superficie di area minore all'equatore che non in vicinanza dei poli ($A < B$) e quindi il riscaldamento della superficie terrestre è maggiore nelle zone equatoriali e minore in vicinanza dei poli.

2. Sia ϑ la nostra latitudine (circa 44° per Pisa). Se la massa d'aria m viaggia verso Nord vuol dire (vedi Fig. 1) che si tratta di una massa d'aria ad alta quota. Poiché essa si trova in un riferimento rotante, e con una velocità non nulla, sappiamo che è soggetta alla forza di Coriolis:

$$\vec{F}_{Cor} = -2m\vec{\omega}_\oplus \times \vec{v} \quad (1)$$

e come vediamo dai vettori $\vec{\omega}_\oplus$ e \vec{v} riportati in Fig. 1 essa deve essere diretta perpendicolarmente al piano del foglio (che è il piano meridiano della massa d'aria m) in verso entrante. Si tratta quindi di una forza tangente al parallelo sul quale si trova la massa d'aria, e diretta nello stesso verso della rotazione della Terra (che è quello da ovest verso est). Ci aspettiamo

quindi che ad alta quota, alle nostre latitudini, i venti globali spirano, in questo modello semplificato, da ovest verso est lungo i paralleli. Ciò è confermato da un fatto ben noto: nei voli intercontinentali Italia/USA il volo di ritorno (cioè da ovest verso est) ha una durata inferiore a quello di andata a causa dei venti favorevoli in direzione da ovest verso est.

Una analoga massa in quota nell'emisfero sud ha una velocità diretta verso il polo sud. Poiché ovviamente il verso di rotazione della Terra è uno solo, l'angolo tra il vettore velocità e quello della massa d'aria aumenta di 90° rispetto al caso nell'emisfero nord, ma resta sempre minore di 180° e pertanto il prodotto vettore (e quindi la forza di Coriolis) non cambia. Concludiamo che anche nell'emisfero sud i venti in quota spirano lungo i paralleli nello stesso verso di rotazione della Terra (da ovest verso est)

3. Per la massa locale m' che alla nostra latitudine si muove con velocità \vec{v}' come indicato nel testo la forza di Coriolis:

$$\vec{F}'_{Cor} = -2m'\vec{\omega}_\oplus \times \vec{v}' \quad (2)$$

ha modulo $F'_{Cor} = 2m\omega_\oplus v'$ perché i vettori $\vec{\omega}_\oplus$ e \vec{v}' sono tra loro perpendicolari ed è diretta come indicato in Fig. 3 (nel piano meridiano perpendicolarmente all'asse di rotazione della Terra e verso l'esterno). La sua componente tangente alla superficie terrestre (che sposta la massa d'aria lungo la superficie terrestre) è diretta verso sud (quindi in questo caso verso l'equatore) ed ha modulo:

$$F'_{CorTangente} = 2m'\omega_\oplus v' \sin \vartheta \quad (3)$$

Una massa analoga nell'emisfero sud a latitudine $-\vartheta$ è soggetta anch'essa alla stessa forza di Coriolis (2) e la sua componente tangente alla superficie terrestre di modulo (3) è diretta verso l'equatore.

Concludiamo quindi che masse d'aria dotate di velocità (rispetto alla Terra rotante) tangenti ai paralleli e dirette nello stesso verso di rotazione della Terra vengono spinte ad accumularsi verso l'equatore.

4. Questa conclusione vale in assenza di altre forze. Sappiamo che localmente nell'atmosfera ci sono zone di alta e bassa pressione, e si vede facilmente che tra due isobare (curve di livello della pressione, cioè curve lungo le quali la pressione ha lo stesso valore) si genera una forza di pressione diretta lungo il gradiente di pressione (vettore perpendicolare alla isobara) dalla isobara a pressione più alta a quella a pressione più bassa. Quindi, se per la massa m' di Fig. 3 l'isobara a pressione più alta si trova alla destra del vettore velocità della massa d'aria, essa sarà soggetta ad una forza di pressione diretta lungo il meridiano da sud verso nord, e quindi in verso opposto a quello della forza di Coriolis (3). In questo caso la massa d'aria non viene dislocata verso sud ma si muove lungo l'isobara (zona detta ciclonica ad indicare che l'aria si muove in verso antiorario)

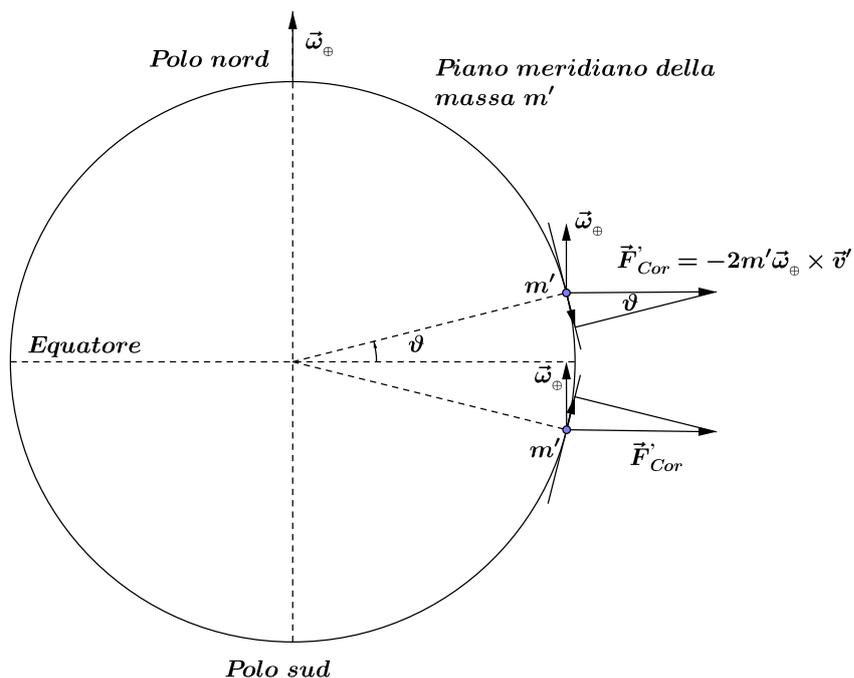


Figure 3: Forza di Coriolis (e sua componente tangente alla superficie terrestre) per una massa d'aria m' che si muove lungo il parallelo con velocità \vec{v}' nello stesso verso di rotazione della Terra nell'emisfero nord o in quello sud. La figura rappresenta il piano meridiano della massa d'aria, e quindi il suo vettore velocità \vec{v}' (perpendicolare al piano del foglio e di verso entrante) non è visibile.