

Dinamica dell'atmosfera

Presentazione del corso

Leonardo Primavera

Dipartimento di Fisica
Università della Calabria

- 1 Struttura dell'atmosfera terrestre.
- 2 Equazioni fluide e parametri fondamentali.
- 3 Equazione di Navier-Stokes in un sistema non-inerziale. Effetti della forza di Coriolis.
- 4 Flussi geostrofici e dinamica della vorticità.
- 5 Onde lineari barotropiche e instabilità barotropica.
- 6 Effetti della stratificazione.
- 7 Turbolenza.
- 8 Lo strato di Ekman.
- 9 Convezione e approssimazione di Boussinesq.
- 10 Circolazione oceanica.

Cos'è la Geophysical Fluid Dynamics (GFD)?

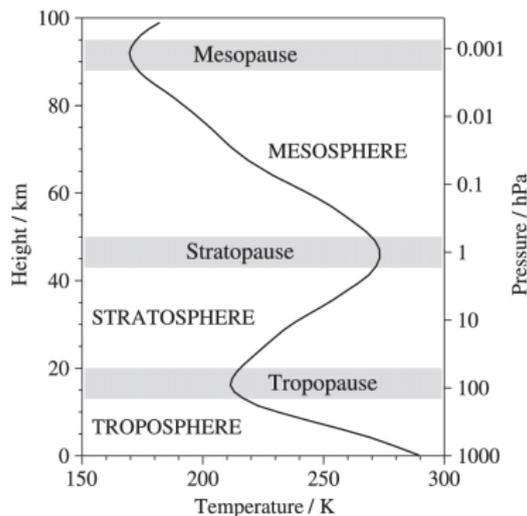
- Studio di flussi a **grande scala** nell'atmosfera terrestre
- Questo include lo studio di fenomeni che avvengono in diverse zone dell'atmosfera
- L'atmosfera è un **mezzo stratificato** e la terra ruota. Studieremo quindi principalmente il moto di fluidi con **rotazione e stratificazione**.
- Lo studio dell'atmosfera è un campo vastissimo che include, oltre allo studio dei fenomeni a grande scala, alcuni dei quali verranno da noi studiati nel corso, anche:
 - 1 variabilità dell'atmosfera (previsioni del tempo e cambiamenti climatici)
 - 2 dinamica degli oceani (correnti, onde a grande scala) ma anche effetti della turbolenza in fluidi non terrestri (es.: la grande macchia rossa di Giove, la macchia scura di Nettuno, ecc.)
 - 3 per estensione, la dinamica dei moti interni della terra, responsabili, ad esempio della generazione del campo magnetico della terra (effetto dinamo), dei pianeti e del sole

Perchè studiare l'atmosfera terrestre?

- Senza l'atmosfera e gli oceani la terra non potrebbe contenere vita
- Lo studio dei moti che si verificano nell'atmosfera e negli oceani è di importanza fondamentale per la vita e le attività umane. Esempi:
 - 1 Predizione di fenomeni atmosferici distruttivi (uragani, tornados, ecc.)
 - 2 fenomeni periodici presenti nell'atmosfera: es., i monsoni nei paesi dell'est
 - 3 passaggio anomalo, con periodicità dai 3-5 anni di masse d'acqua calda nel pacifico tropicale e nella costa est del sud-America (fluttuazioni ENSO)
 - 4 l'accumulo di materiali inquinanti che vengono trasportati dalle correnti atmosferiche e addensati in alcune zone particolari può davvero influenzare il clima ed essere responsabile di cambiamenti climatici globali?

Struttura dell'atmosfera terrestre

- Atmosfera: mezzo stratificato in pressione, densità e temperatura
- Convenzionalmente divisa in strati come:
 - **Troposfera**: 0-15 km circa, dove la maggior parte dei fenomeni meteorologici prendono luogo;
 - **Stratosfera**: 20-40 km circa, che contiene la fascia di ozono;
 - **Mesosfera**: 50-90 km circa.
- Al di sopra c'è l'atmosfera superiore, dove domina la ionizzazione e l'ipotesi fluida è meno verificata a causa della rarefazione.



Equazioni fluide e parametri fondamentali

- Richiamiamo brevemente in questa parte le equazioni che governano il moto dei fluidi e che sono state oggetto del corso di **Meccanica dei fluidi**.

- 1 Equazione di conservazione della massa (o equazione di continuità):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- 2 Equazione del momento (o di Navier-Stokes):

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}_{\text{ext}} + \frac{\nu}{\rho} \nabla \cdot \sigma_{ij}$$

- 3 Equazione dell'energia:

$$\rho C_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = \kappa \nabla^2 T + U_{ij} \otimes \sigma_{ij}$$

- 4 Equazione di stato:

$$p = \rho RT \quad \rho = \rho_0 [1 - \alpha(T - T_0)]$$

Equazioni fluide e parametri fondamentali

- Parametri fondamentali:

- ① Numero di Reynolds:

$$Re = \frac{\text{termini di trasporto}}{\text{termini viscosi}} = \frac{LU}{\nu}$$

- ② Numero di Prandtl:

$$Pr = \frac{\text{diffusione viscosa}}{\text{diffusione termica}} = \frac{C_p \nu}{\kappa}$$

- ③ Numero di Péclet (o numero di Reynolds termico):

$$Pe = \frac{\text{termini di trasporto}}{\text{diffusione termica}} = \frac{\rho C_p LU}{\kappa} = Pr \cdot Re$$

- ④ Numero di Froude:

$$Fr = \frac{\text{termini di trasporto}}{\text{forze esterne (gravità)}} = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$

Equazione di Navier-Stokes in un sistema non-inerziale.

Effetti della forza di Coriolis

- Dopo aver richiamato brevemente le equazioni fluide (Navier-Stokes) e i parametri fondamentali, inizieremo lo studio degli effetti della rotazione sul moto dei fluidi
- Questo ci porterà a scrivere le equazioni fluide in un sistema non inerziale. Faremo vedere come gli effetti della forza centrifuga siano, di fatto, trascurabili, mentre la presenza della forza di Coriolis ha effetti molto rilevanti
- Questo comporterà l'introduzione di nuovi parametri caratteristici:
 - 1 Numero di Rossby:

$$Ro = \frac{\text{velocità cinematica}}{\text{velocità di rotazione}} = \frac{U}{\Omega L}$$

- 2 Numero di Ekman:

$$Ek = \frac{\text{diffusione viscosa}}{\text{effetti della rotazione}} = \frac{\nu}{\Omega L^2}$$

Flussi geostrofici e dinamica della vorticità

- Considereremo cosa succede quando le velocità tipiche del moto sono molto più piccole della velocità di rotazione della terra e gli attriti si possono trascurare. In queste condizioni:

$$Ro \ll 1 \quad Ek \ll 1$$

- Faremo vedere che, in queste condizioni (Teor. Taylor-Proudman):

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0$$

che vuol dire che le componenti orizzontali della velocità non dipendono da z e quindi le particelle di fluido si muovono nel piano orizzontale tutte insieme, cioè come una colonna.

- Inoltre faremo vedere che: $\mathbf{v} \perp \nabla p$, il che vuol dire che le particelle di fluido si muovono lungo le *isobare* del fluido!
- Flussi di questo tipo sono detti **geostrofici** e il moto bi-dimensionale può essere descritto in termini di un'unica variable, detta *vorticità potenziale*

Onde lineari barotropiche e instabilità barotropica

- Nelle equazioni di Navier-Stokes, i termini di trasporto della velocità sono non-lineari, mentre quelli legati alla rotazione del fluido (accelerazione di Coriolis) sono lineari.
- Nella situazione in cui: $Ro \ll 1$ (basse velocità rispetto alla velocità di rotazione), i termini non lineari possono essere *linearizzati* e si possono calcolare i *modi normali* del problema, cioè le **onde lineari**.
- Tipi principali di onde:
 - 1 **onde di Kelvin**, che si sviluppano in prossimità di un bordo (es., vicino un costa);
 - 2 **onde di Poincaré**, (o *onde di gravità inerziali*), che si sviluppano nel fluido libero in presenza di rotazione;
 - 3 **onde di Rossby**, (o *onde planetarie*, che sono influenzate dagli effetti di sfericità della terra.
- Infine, sotto opportune condizioni, tali onde possono dare origine a **instabilità**.

Effetti della stratificazione

- Finora sono stati considerati solo gli effetti della rotazione. Tuttavia la presenza della gravità induce ulteriori effetti, dovuti alla **stratificazione**.
- Dall'equazione dell'equilibrio idrostatico (da Navier-Stokes):

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g$$

da cui risulta che esiste una stratificazione di pressione e quindi di densità.

- Quando una particella di fluido viene spostata dalla posizione di equilibrio essa oscilla attorno ad essa, sotto l'azione della gravità e della spinta di Archimede ad una frequenza detta *Frequenza di Brunt-Väisälä*:

$$N = \sqrt{\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz}}$$

- Queste sono le cosiddette *onde di gravità interne*.
- Tali onde possono manifestarsi in una varietà di condizioni, ed esamineremo le più comuni.
- Nel caso opposto, in cui la densità cresca con l'altezza si ha una situazione instabile, la cosiddetta *Instabilità di Rayleigh-Taylor*. Casi del genere possono verificarsi anche localmente nell'atmosfera e quindi avere *overturning regions*.

- Molte situazioni in presenza di rotazione o stratificazione sono instabili. Questo può portare alla crescita di piccole perturbazioni e alla transizione alla turbolenza.
- Tipici esempi sono le instabilità delle onde lineari viste in precedenza, alla convezione o alla instabilità di Kelvin-Helmoltz, in presenza di un gradiente di velocità.
- Verranno richiamati quindi i principali risultati della teoria K41 sulla turbolenza, le proprietà statistiche dei campi di velocità, l'intermittenza per la turbolenza omogenea e isotropa.
- In seguito, verranno analizzate le differenze più significative con il caso dell'atmosfera, quindi in presenza di rotazione e stratificazione.

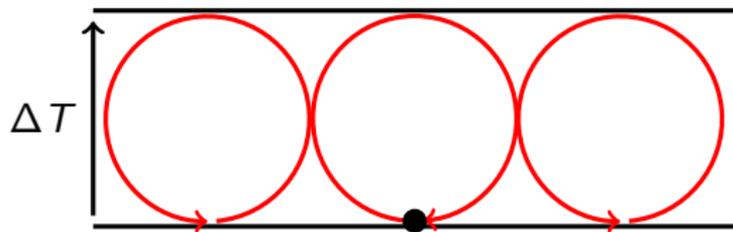
- Nel numero di Ekman, $Er = \nu/(\Omega L^2)$, L rappresenta un'altezza caratteristica del flusso.
- Se si considera L come tutta la profondità della porzione di atmosfera considerata, Ek è generalmente **molto piccolo**, a causa della piccolezza di ν !
- Tuttavia, sappiamo che nei flussi in presenza di pareti si genera uno strato limite molto stretto, in prossimità del quale ν può diventare importante (strato limite). La stessa cosa succede nel caso dell'atmosfera, in prossimità del suolo.
- La differenza fondamentale è che nel caso di fluidi ordinari l'ampiezza dello strato limite dipende solo da ν , mentre nel caso di fluidi in rotazione, come l'atmosfera, dipende anche dagli altri parametri del moto (ad es., la rotazione). Nel caso dell'atmosfera, questo si chiama **strato di Ekman**.

Convezione e approssimazione di Boussinesq

- In moltissimi casi, l'atmosfera pu essere considerata come un **fluido incompressibile**
- Tuttavia questa ipotesi non è verificata quando si deve tener conto dei **moti convettivi**:

moti generati dal galleggiamento di masse di fluido causate da una stratificazione di temperatura

- Approssimazione di Boussinesq: le variazioni di densità si considerano trascurabili, tranne nei termini di galleggiamento (Forza di Archimede) nell'equazione del momento



- Verranno evidenziate le principali differenze ed analogie tra il caso dell'atmosfera e quello degli oceani.
- Le principali differenze risiedono nell'influenza delle maree, anche se minima, e nel forcing esterno costituito dai venti che soffiano sopra gli oceani.
- Verranno quindi evidenziate le varie cause che possono portare alla formazione di flussi stabili nel tempo, tipo la *Corrente del golfo*, che si origina nel golfo del Messico e arriva fino alle coste est dell'Europa, influenzandone drasticamente il clima.

- Lezioni: Leonardo Primavera
- Esercitazioni: Prof. Sergio Servidio
- L'esame consta di una prova orale, su tutti gli argomenti svolti nel corso di teoria ed in quello di esercitazioni

- Cushman-Roisin: *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*, Prentice Hall, 1993.
- Pedlosky: *Geophysical fluid dynamics*, Springer, 1986.
- Wyngaard: *Turbulence in the Atmosphere*, CUP, 2010.
- Chandrasekar: *Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*, Oxford University Press, 1961.

