



Copertina

Corso di Fisica dello Strato Limite Atmosferico

La turbolenza e il suo ruolo nello Strato Limite Atmosferico

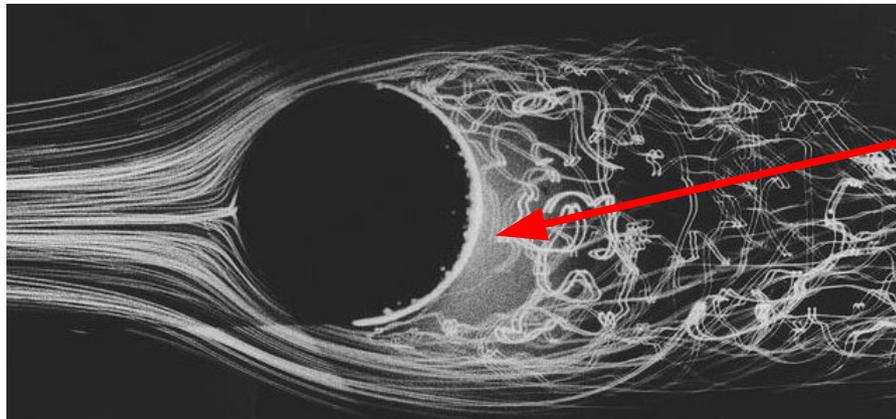
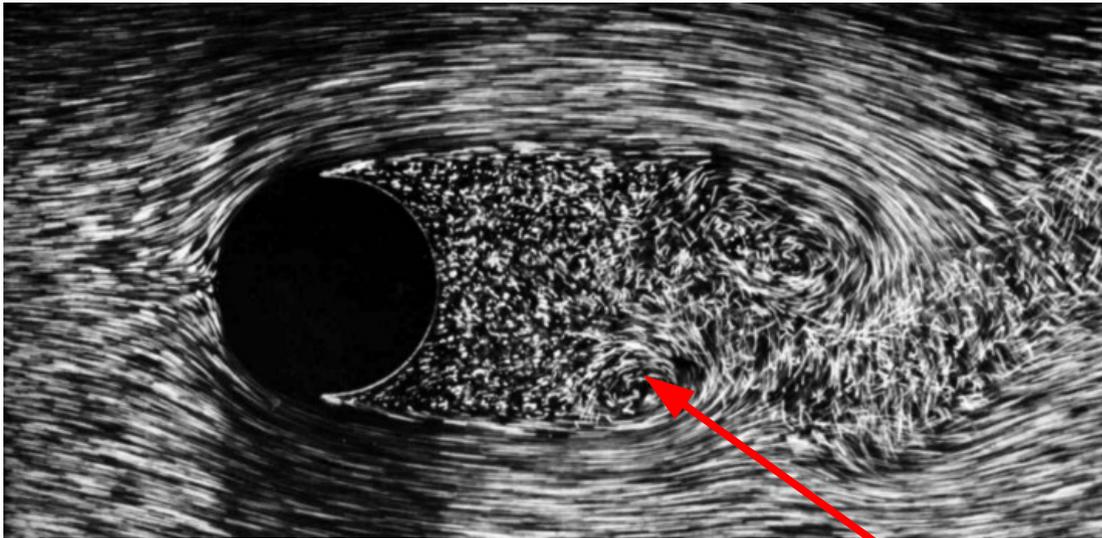
Giaiotti Dario & Stel Fulvio

Sommario della lezione

- Che cos'è la turbolenza nei fluidi
- La turbolenza nello strato limite atmosferico
- La caratteristica stocastica della turbolenza e l'ipotesi di G. I. Taylor
- Il ruolo della turbolenza nello strato limite atmosferico
- Richiami di statistica utili alla trattazione della turbolenza
- Equazioni fondamentali per la descrizione dei moti turbolenti nello strato limite atmosferico
- Bibliografia di riferimento e per approfondimenti.

Che cos'è la turbolenza?

L'identificazione della turbolenza si fonda sull'osservazione e l'esperimento



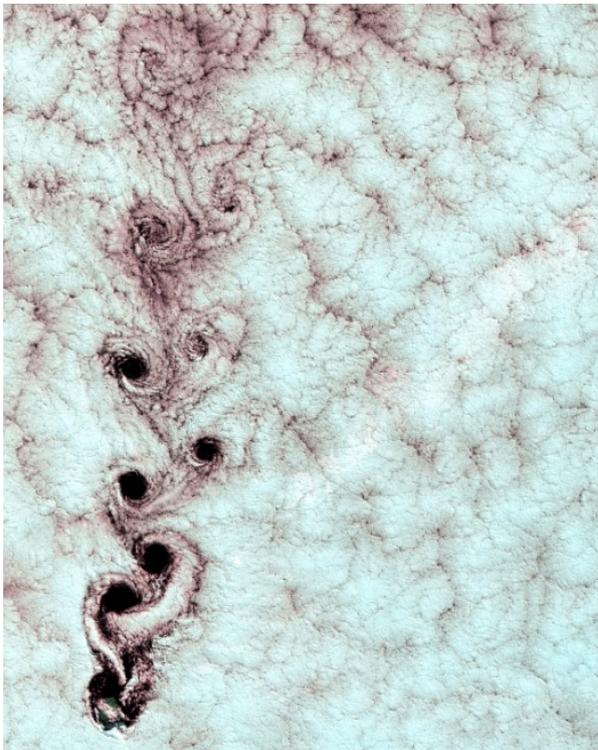
Vortici: moti su traiettorie chiuse o quasi

L'interpretazione più naturale ed intuitiva è quella di considerare la turbolenza come il moto del fluido descritto da vortici di dimensioni variabili e mutevoli nel tempo

La turbolenza del ABL differisce rispetto a quella osservata in esperimenti di laboratorio

Le differenze tra la turbolenza generata in laboratorio e quella dell'ABL sono:

- a) esiste la turbolenza generata dai gradienti della velocità (**turbolenza meccanica**), come in laboratorio, a cui si sovrappone la turbolenza dovuta alle celle convettive (**turbolenza convettiva**);
- b) Esiste **interazione tra la turbolenza presente nell'ABL ed il flusso della libera atmosfera**, il quale è prevalentemente determinato dai gradienti di pressione e dalla forza di Coriolis.

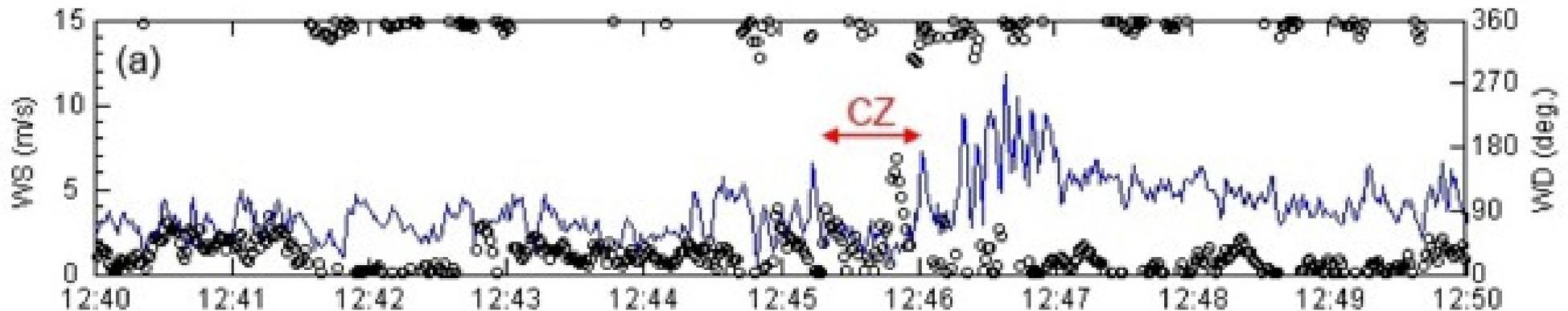


Alcune tappe fondamentali nella rappresentazione della turbolenza

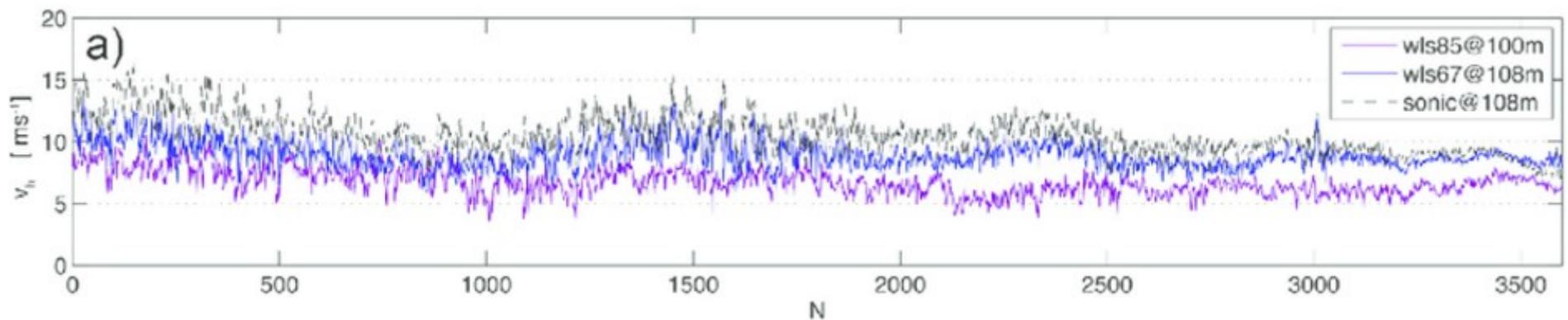
- Taylor G. I. (1915 e 1938)
Prima definizione della turbolenza e ipotesi di stazionarietà
- Von Karman T. e Prandtl L. (1918 e 1940)
Teoria dell'altezza di rimescolamento
- Monin A. S. e Obukhov A. (1954)
Teoria dello strato superficiale e teoria della similarità
- Monin A. S. e Kazanski A. B. (1961)
Teoria della similarità per l'intero ABL

Le caratteristiche stocastiche delle grandezze fisiche nell'ABL

Le misure euleriane di grandezze quali la velocità del vento, la temperatura e l'umidità producono serie temporali con presenza di fluttuazioni casuali.



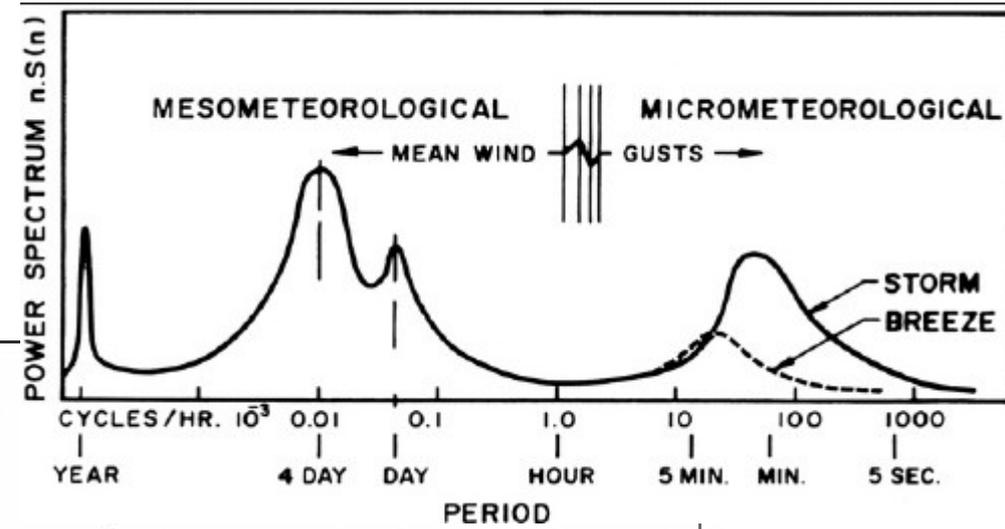
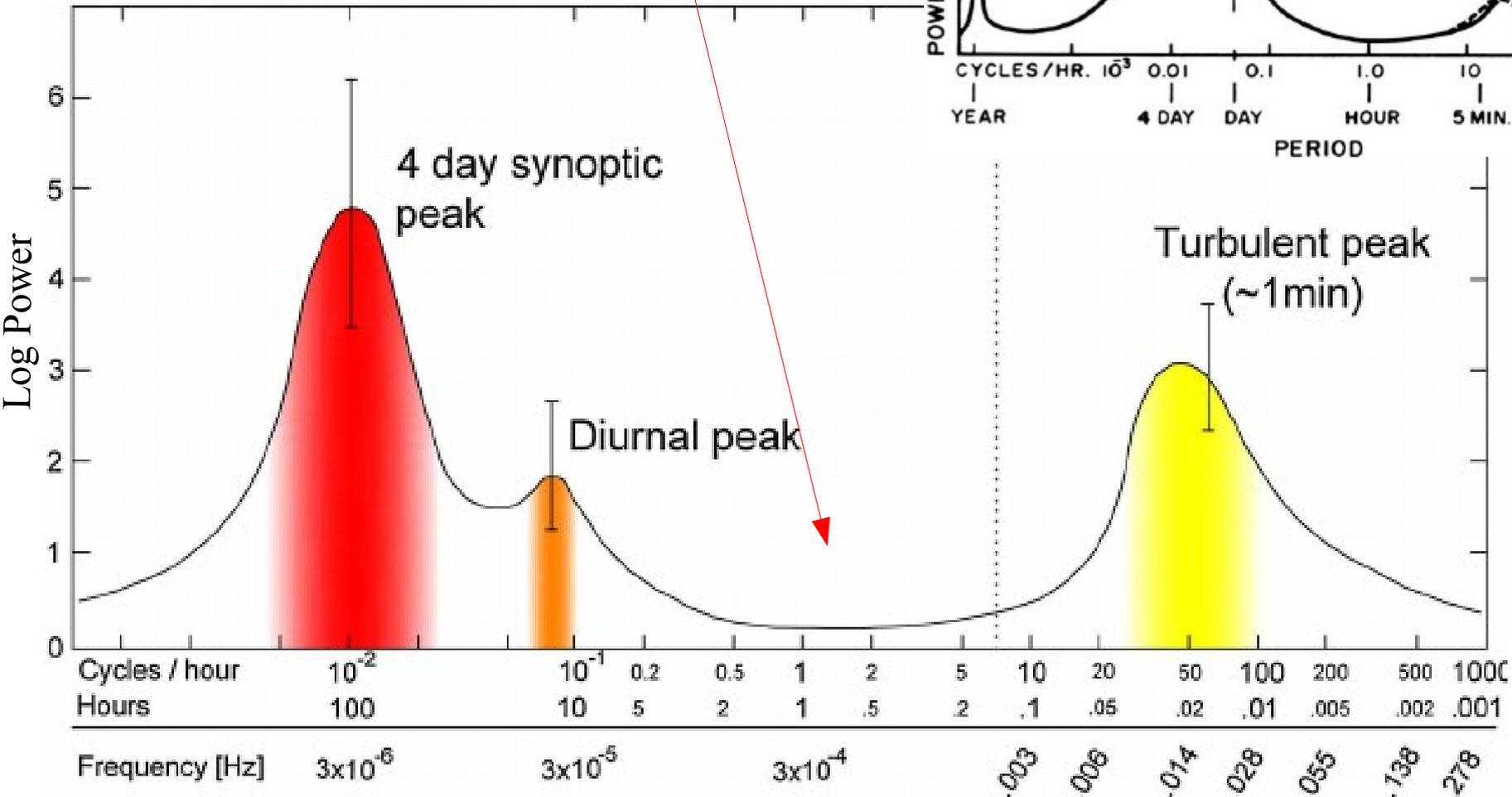
Esempio di misure ad alta frequenza di intensità e direzione del vento orizzontale nel ABL.
In ascissa ore UTC



Serie temporali dell'intensità del vento misurate con anemometri sonici per quattro ore consecutive in diversi periodi dell'anno.
In ascissa numero di campionamenti.

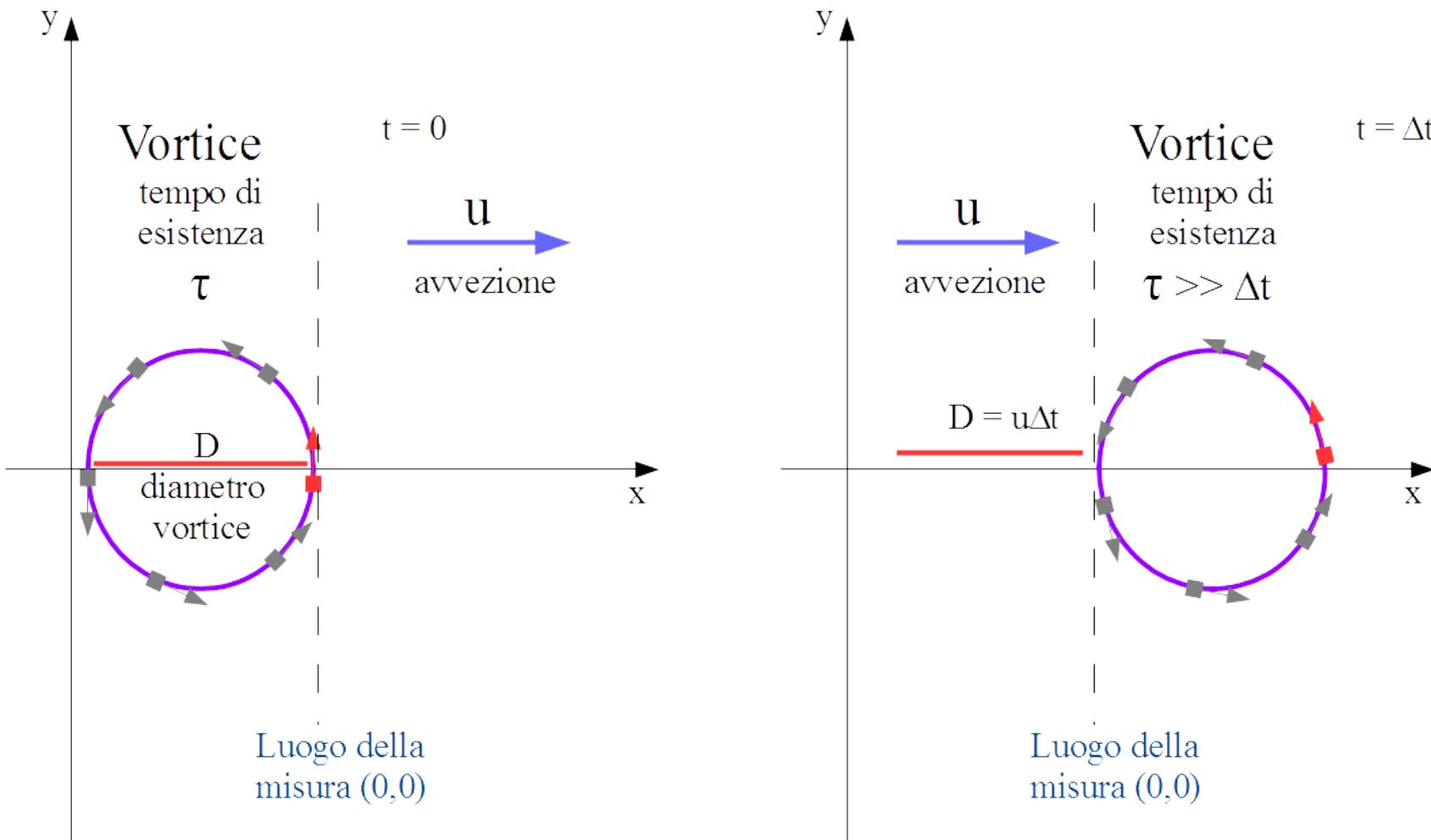
Caratteristiche dello spettro di potenza dell'intensità orizzontale del vento

Esiste una chiara separazione del contributo dovuto ai venti a scala sinottica e alla mesoscala rispetto a quello associato alla turbolenza. E' lo: **spectral energy gap**



L'ipotesi di Taylor sulla turbolenza (frozen turbulence)

Nel 1938 G. I. Taylor, interpretando le serie temporali di misure delle grandezze fondamentali di fluidi turbolenti in esperimenti di laboratorio e dell'ABL, ipotizza che tali fluttuazioni siano dovute a vortici che hanno una vita media molto maggiore dei tempi tipici di avvezione della loro struttura

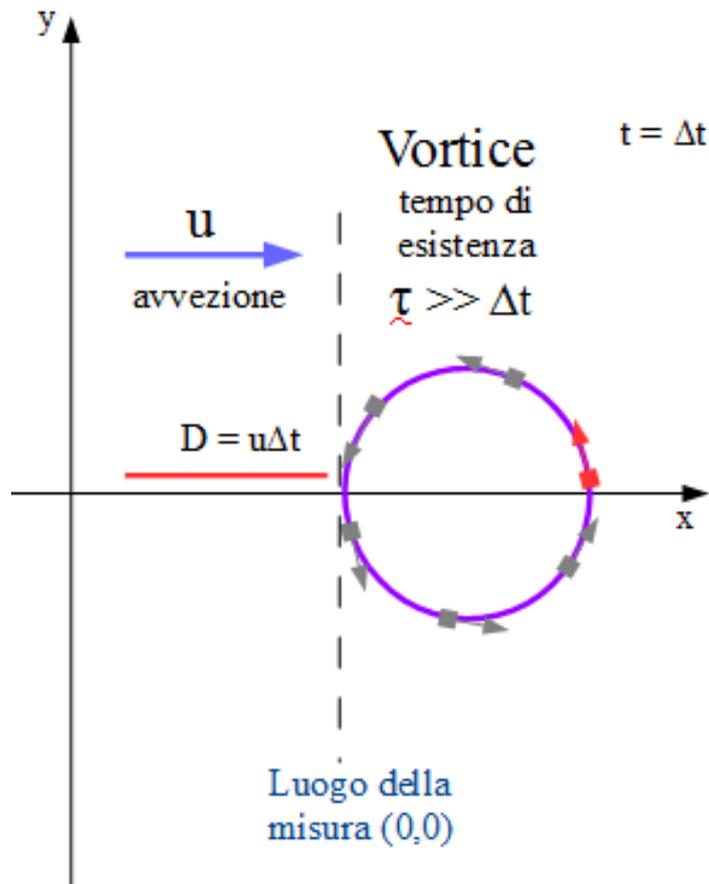


L'ipotesi di Taylor sulla turbolenza (frozen turbulence) e l'interpretazione delle misure

Secondo l'ipotesi di Taylor, le fluttuazioni osservate nelle misure euleriane delle grandezze fondamentali dei fluidi sono dovute all'avvezione dei vortici che costituiscono la turbolenza del fluido.

Si consideri la misura di temperatura: T

Nell'ipotesi di Taylor, per il vortice: $\frac{dT}{dt} = 0$



$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

Misure delle variazioni temporali diventano misure spaziali della turbolenza

$$\frac{1}{u} \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\Delta x = u \Delta t$$

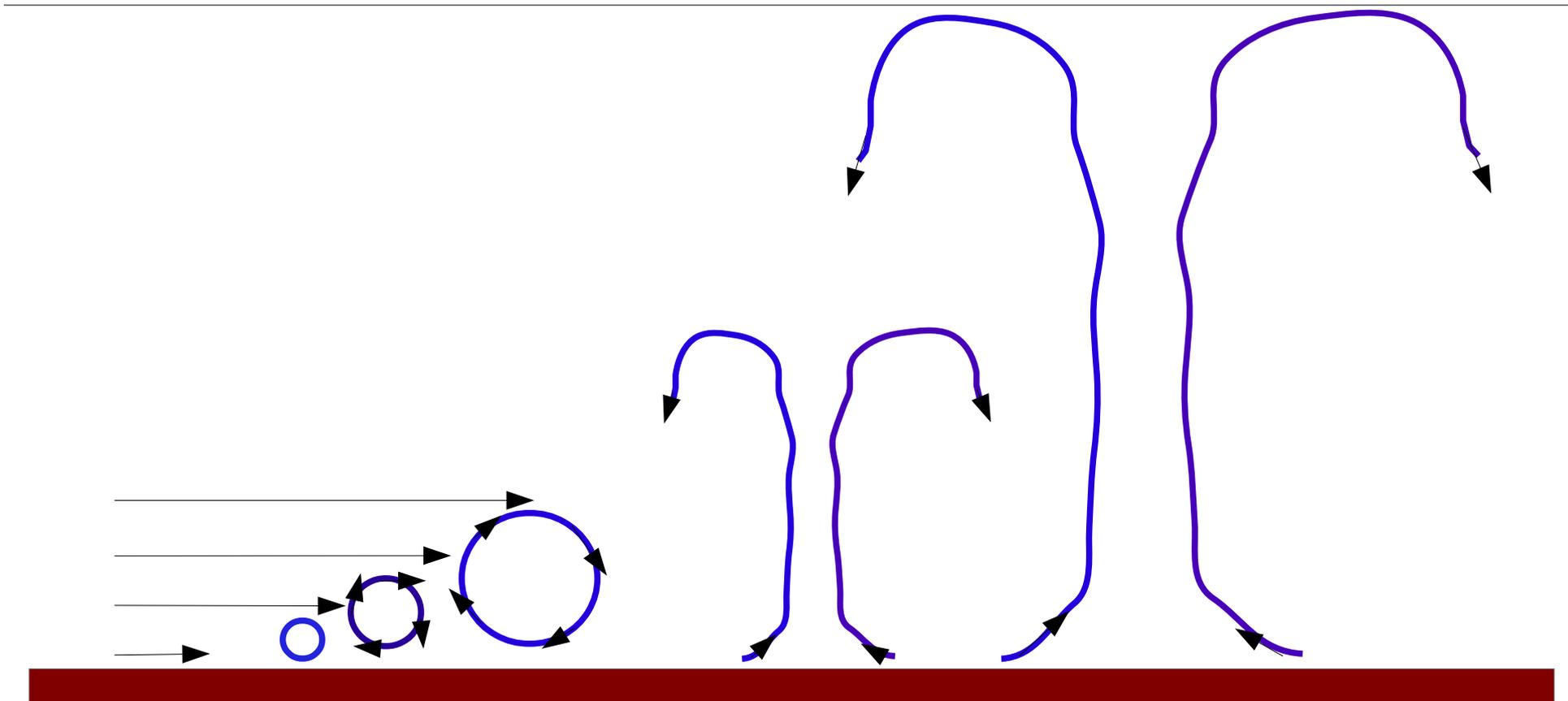
Periodicità temporali sono periodicità nella distribuzione spaziale dei vortici

$$\frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{Pu}$$

Dimensioni tipiche dei vortici nell'ABL

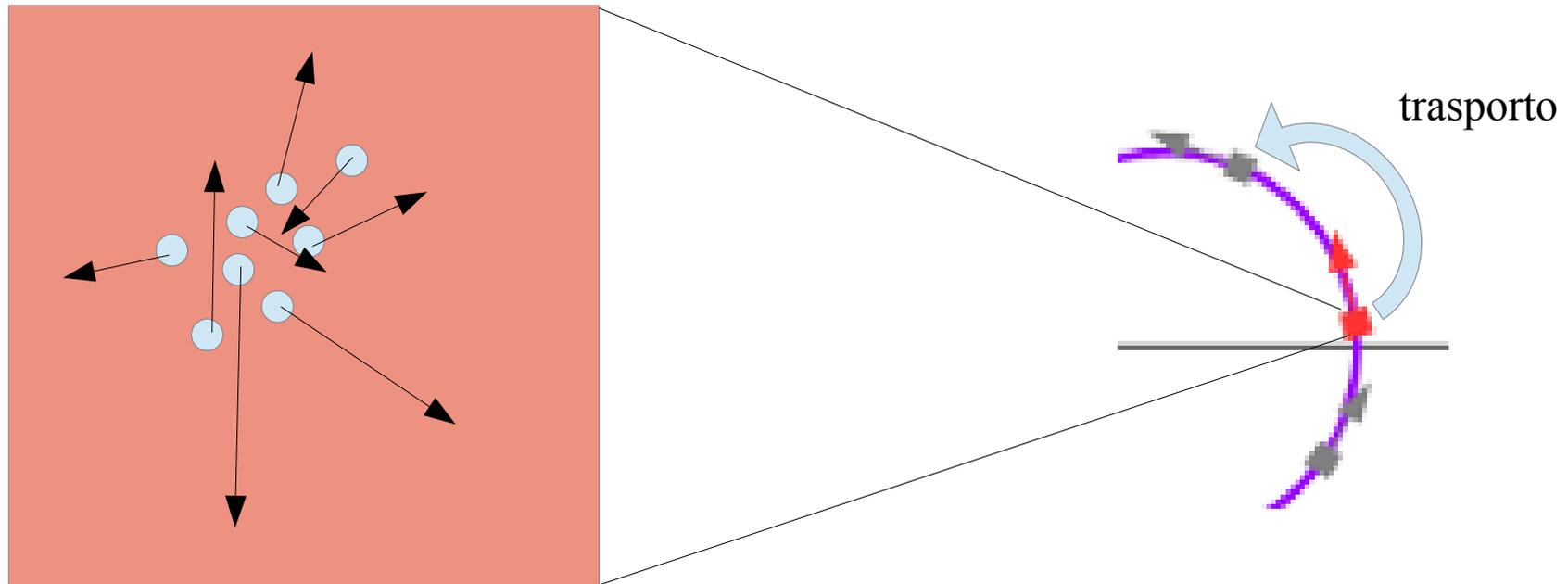
Le dimensioni tipiche dei vortici nell'ABL vanno dai pochi millimetri all'intero spessore dell'ABL

Libera Atmosfera



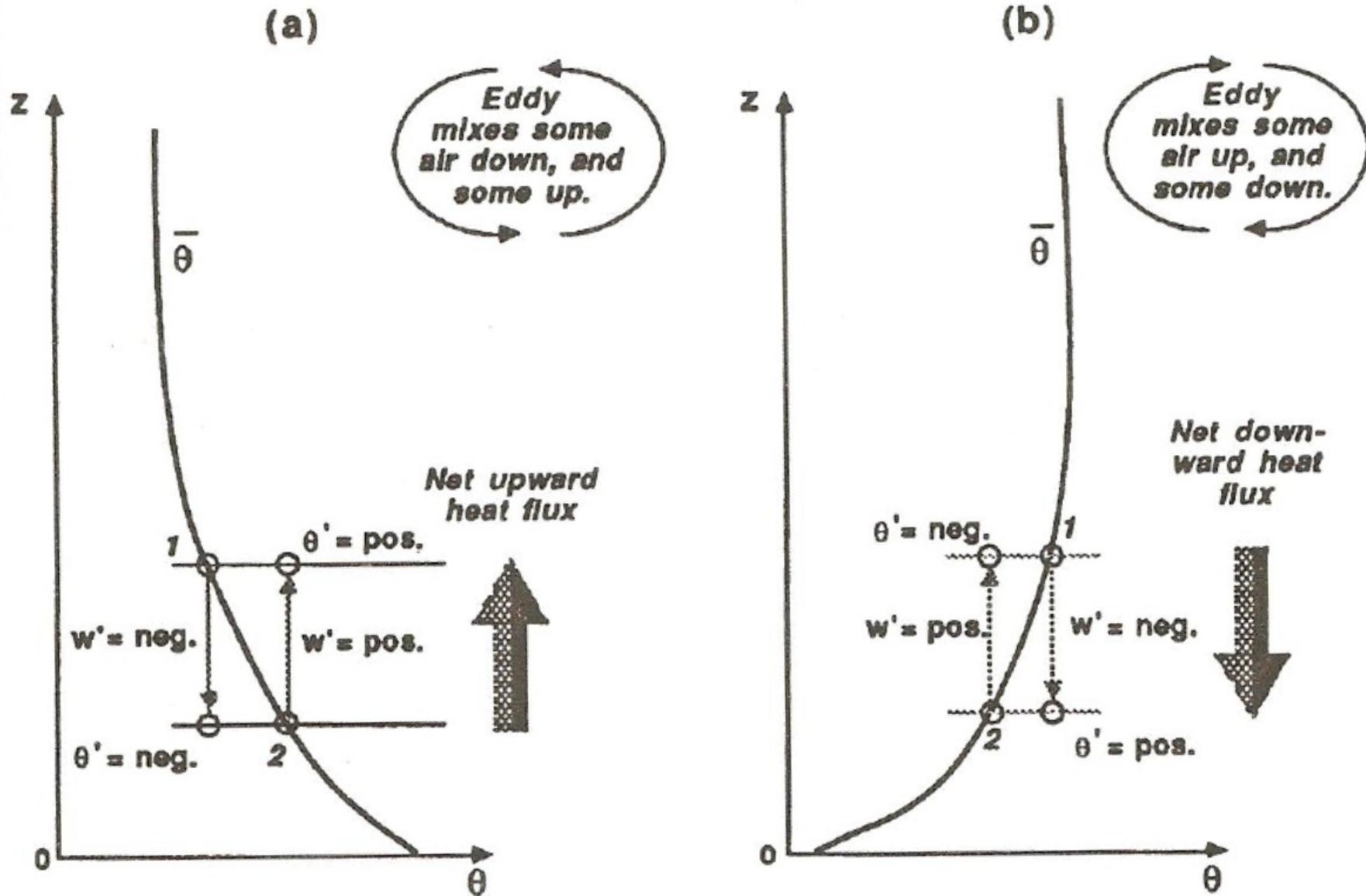
Importanza della turbolenza nel trasporto di proprietà del fluido

La turbolenza è diversi ordini di grandezza più efficiente nel trasporto di proprietà del fluido rispetto al trasporto dovuto alla diffusività molecolare



I vortici operano avvezioni su scale spaziali molto più piccole rispetto al flusso medio del fluido, ma molto più grandi rispetto a quelle del cammino libero medio delle molecole

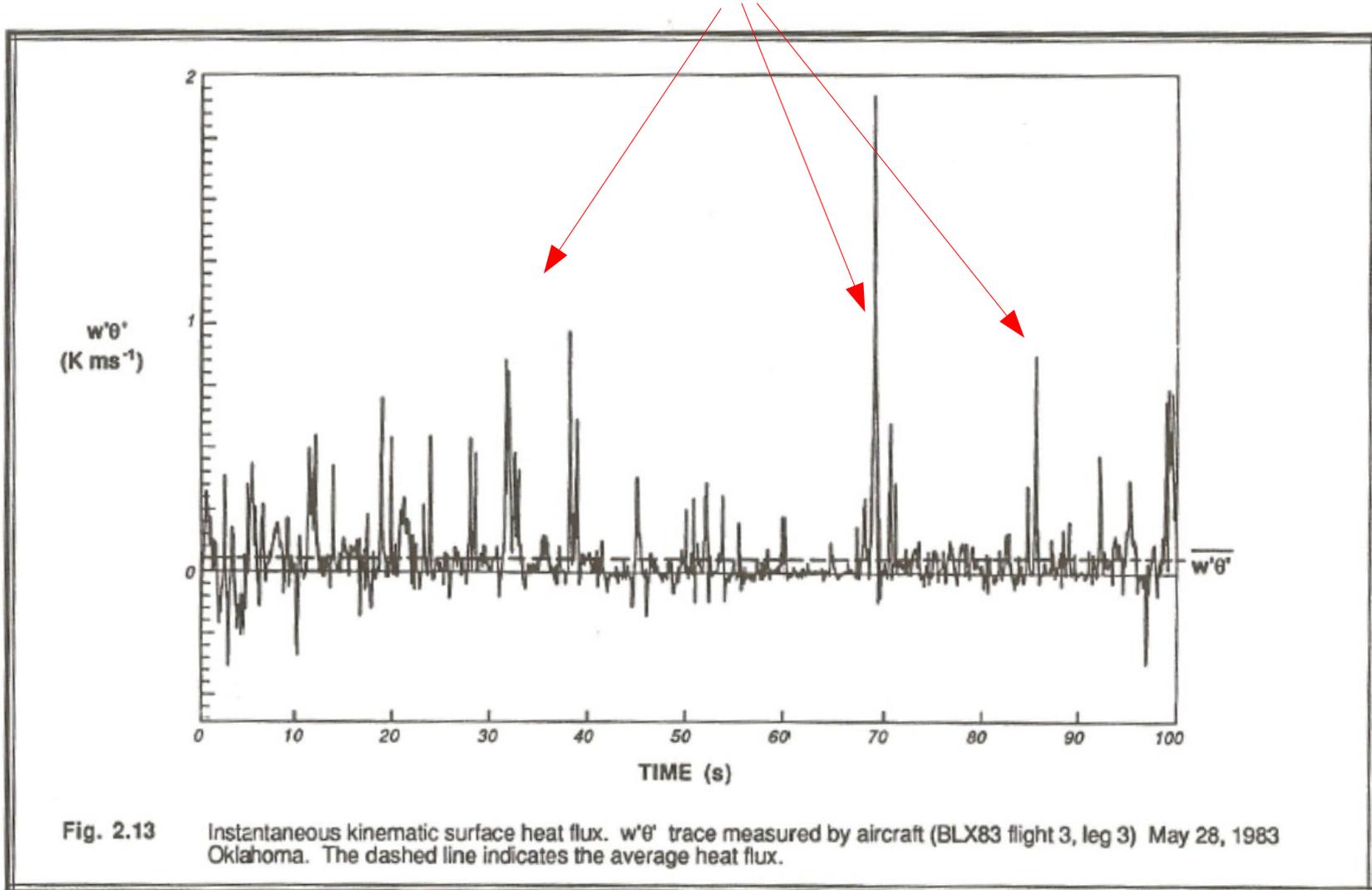
Processi di trasporto della turbolenza lungo la verticale e convezione sul verso



Importanti sono le fluttuazioni rispetto alla media
La turbolenza tende a rimuovere i gradienti

Esempi di trasporto turbolento

Mediamente il trasporto non è nullo grazie a, seppur poche, asimmetrie

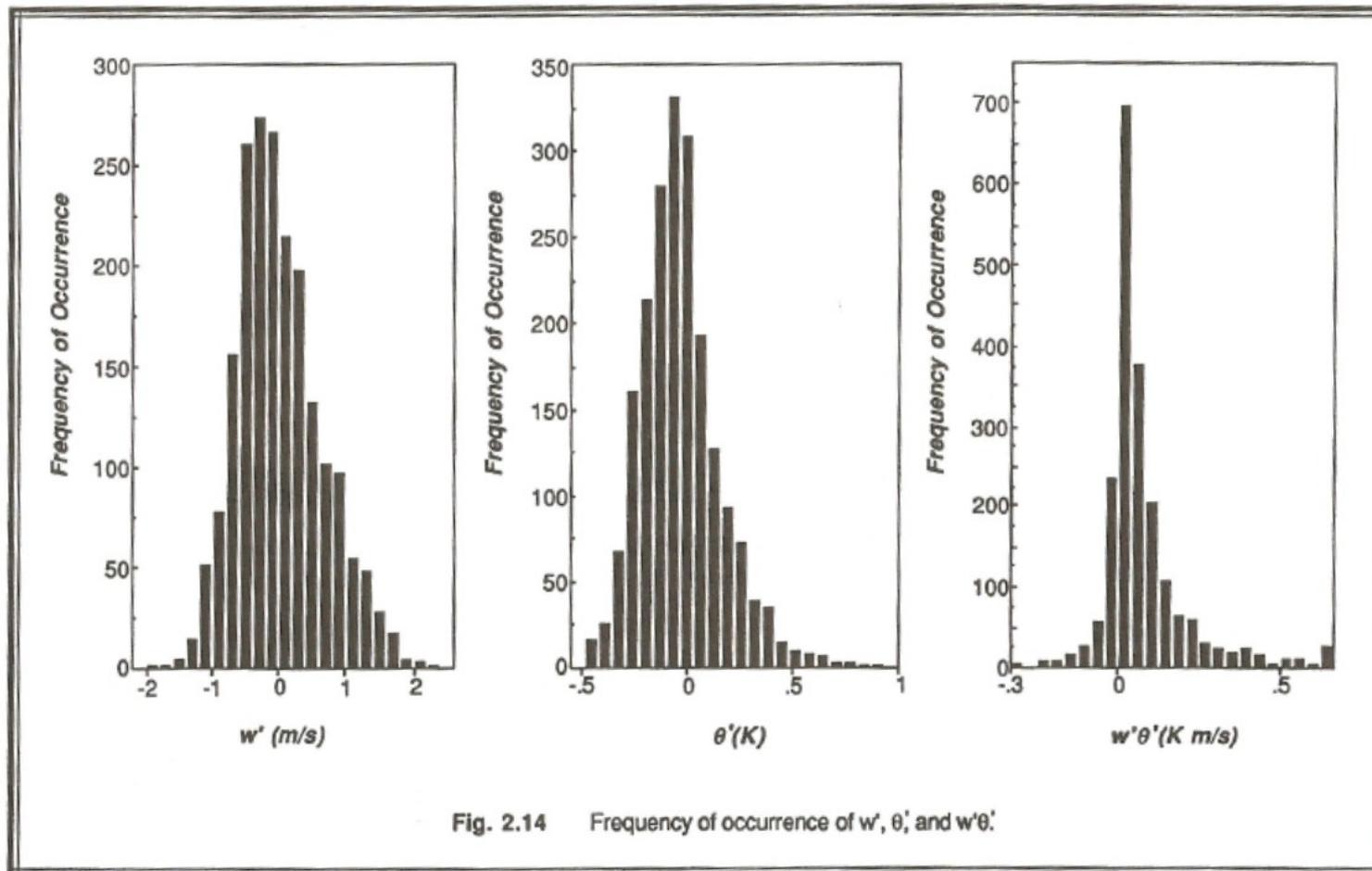


Statistica delle grandezze coinvolte nel trasporto.

Le fluttuazioni delle velocità verticali sono distribuite quasi simmetricamente attorno allo zero

Le fluttuazioni della temperatura potenziale è asimmetricamente distribuita attorno allo zero

Ne risulta un trasporto netto di temperatura (energia termica) verso l'alto



Tipico andamento dei flussi nelle due classi principali di ABL

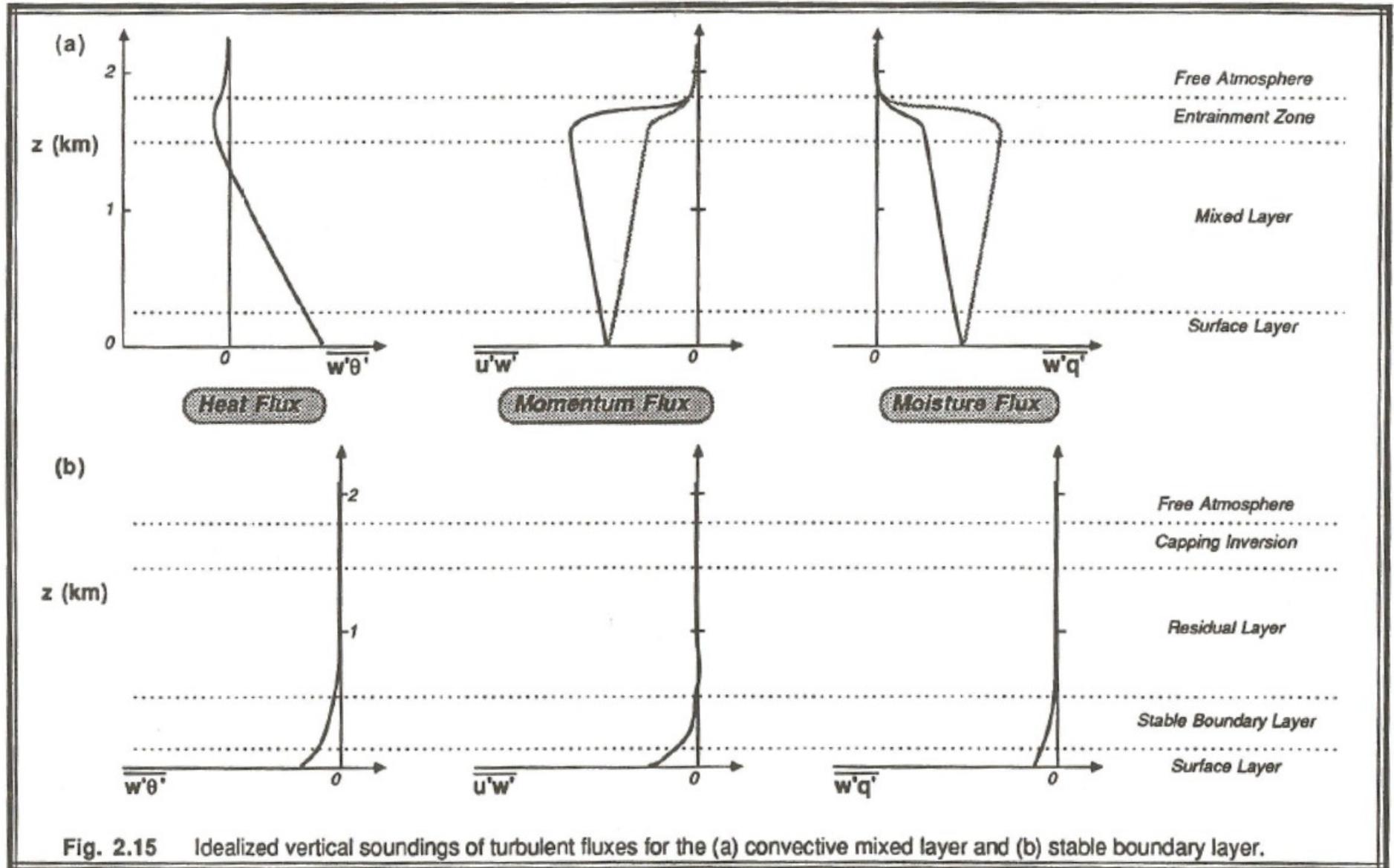


Fig. 2.15 Idealized vertical soundings of turbulent fluxes for the (a) convective mixed layer and (b) stable boundary layer.

L'ipotesi di Taylor porta ad un approccio statistico alla turbolenza

Rivisitazione dei principali operatori e stimatori statistici e loro applicazioni alla turbolenza, nel caso specifico dello Strato Limite Atmosferico

La funzione densità di probabilità per una variabile casuale continua

La funzione probabilità per una variabile casuale discreta

La funzione densità di probabilità congiunta di due o più variabili casuali

Il valore di aspettazione e il suo stimatore statistico

La varianza ed il suo stimatore statistico

La covarianza ed il suo stimatore statistico

Il coefficiente di correlazione lineare

Le equazioni fondamentali per l'ABL

Equazioni fondamentali per la descrizione dei moti turbolenti nello strato limite atmosferico

Oltre a quanto esposto a lezione possono essere utili da consultare i seguenti testi:

- **The Atmospheric Boundary Layer**, Garratt J. R., Cambridge University Press - capitolo 2
- **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**, Stull R. B., Kluwer Academic Publisher capitolo 3