

Copertina

Corso di Fisica dell'Atmosfera

Caratteristiche generali dell'atmosfera terrestre

Giaiotti Dario
dgiaiotti@units.it

Moodle: 774SM - FISICA DELL'ATMOSFERA 2023

Sommario della lezione

- Perché dedicarsi allo studio dell'atmosfera terrestre?
- Composizione chimica dell'atmosfera e abbondanze relative in funzione della quota.
- Evoluzione temporale della composizione chimica dell'atmosfera terrestre.
- Andamento termico medio in funzione della quota.
- Classificazione dell'atmosfera in funzione del profilo termico verticale.
- Proprietà elettriche dell'atmosfera in funzione della quota.
- Circolazione planetaria generale.
- Masse d'aria e fronti permanenti.
- Sezioni longitudinali del campo termico e dei venti.
- Bibliografia di riferimento e per approfondimenti.

Perché dedicarsi allo studio dell'atmosfera terrestre?

- Utilità pratica: ci viviamo dentro.
 - Le attività umane sono condizionate dall'evolversi dell'atmosfera (**programmazione**).
 - Le attività umane condizionano l'evolversi dell'atmosfera (**consapevolezza e responsabilità**).
- Motivazione scientifica: presenta problemi non risolti di grande valenza concettuale.
 - L'atmosfera terrestre è un **sistema complesso** che ci:
 - a) propone **aspetti** della realtà ancora **poco conosciuti**;
 - b) propone **comportamenti noti**, ma **scarsamente predicibili**;
 - c) richiede un **approccio conoscitivo multidisciplinare**;

Per un giovane studente o un ricercatore, il sistema fisico “atmosfera terrestre” è da considerarsi un ambito della scienza ove applicarsi se si vuole trattare questioni specifiche poco chiare e questioni concettuali di valenza generale.

Si veda l'articolo:

Four golden lessons for young researchers,
Weinberg S., Nature vol 426, Nov, 26 2003, page 389.

Alcune considerazioni su come affrontare lo studio dell'atmosfera terrestre

- Non è necessario conoscere nei dettagli tutti i lavori svolti sul tema, prima di cimentarsi nella ricerca, ma è indispensabile avere ben chiari i concetti fondamentali e le evidenze sperimentali che li sostengono o che li mettono in crisi.
 - Questo corso aspira a fornirvi concetti ed evidenze per permettervi di approfondire da soli l'argomento e per accostarsi ai problemi ancora insoluti.
- Non avere timore di apprendere strumenti e concetti apparentemente non attinenti con la fisica dell'atmosfera. L'approccio interdisciplinare è quello vincente.
 - Questo corso vi proporrà esempi di risultati ottenuti facendo uso di idee e metodi provenienti da discipline diverse e spesso considerate molto distanti.
- Provare a proporsi problemi e a spiegare evidenze con gli strumenti appresi durante le lezioni e negli altri corsi seguiti fino ad oggi. Non limitarsi a riprodurre i risultati presentati nel corso, durante la preparazione e soprattutto dopo lo svolgimento dell'esame.
 - Questo corso aspira ad insegnarvi ad analizzare i problemi e a proporli per la soluzione.
- Avere consapevolezza del percorso storico compiuto dalle idee e dalle evidenze che a lezione vengono enunciate come i fondamenti della disciplina. Non limitarsi a riprodurre i fondamenti presentati nel corso; assimilarli come frutto del pensiero e dell'azione di altre persone che le hanno elaborate in tempi passati.
 - Questo corso aspira ad insegnarvi a riflettere sui fondamenti piuttosto che abituarsi ad essi.

La composizione chimica dell'atmosfera nei pressi della superficie della Terra

Chemical species	Molecular weight (g mol ⁻¹)	Proportion by volume	Chemical species	Molecular weight	Proportion by volume
N ₂	28.01	78%	O ₃	48.00	~500 ppb
O ₂	32.00	21%	N ₂ O	44.01	310 ppb
Ar	39.95	0.93%	CO	28.01	120 ppb
H ₂ O (vapor)	18.02	~0.5%	NH ₃	17.03	~100 ppb
CO ₂	44.01	380 ppm	NO ₂	46.00	~1 ppb
Ne	20.18	19 ppm	CCl ₂ F ₂	120.91	480 ppt
He	4.00	5.2 ppm	CCl ₃ F	137.37	280 ppt
CH ₄	16.04	1.7 ppm	SO ₂	64.06	~200 ppt
Kr	83.8	1.1 ppm	H ₂ S	34.08	~200 ppt
H ₂	2.02	~500 ppb	AIR	28.97	

(ppm, ppb, ppt) = parts per (million, billion, trillion)

~ 422.80 ppm (2024)

Andamento della composizione chimica dell'atmosfera con la quota

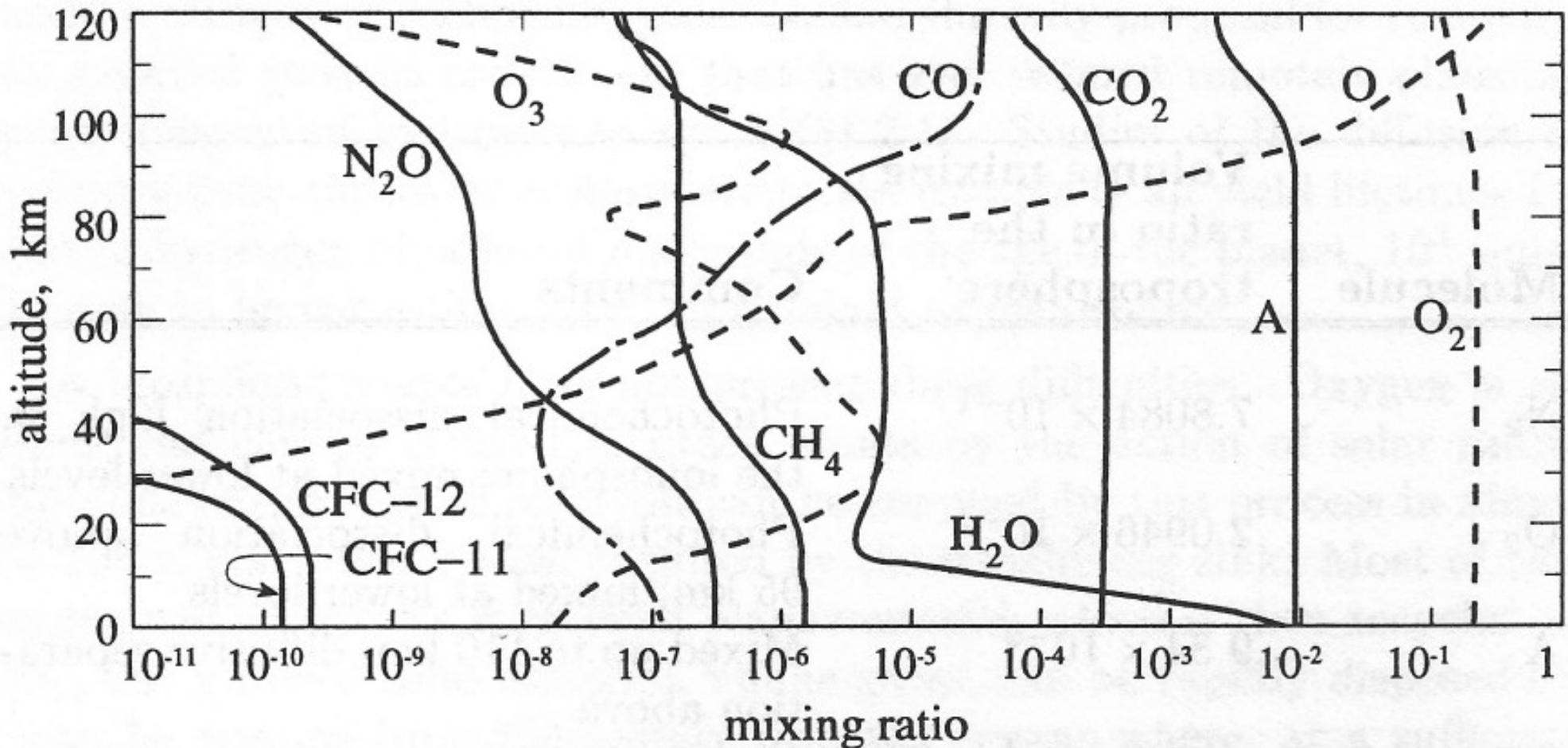
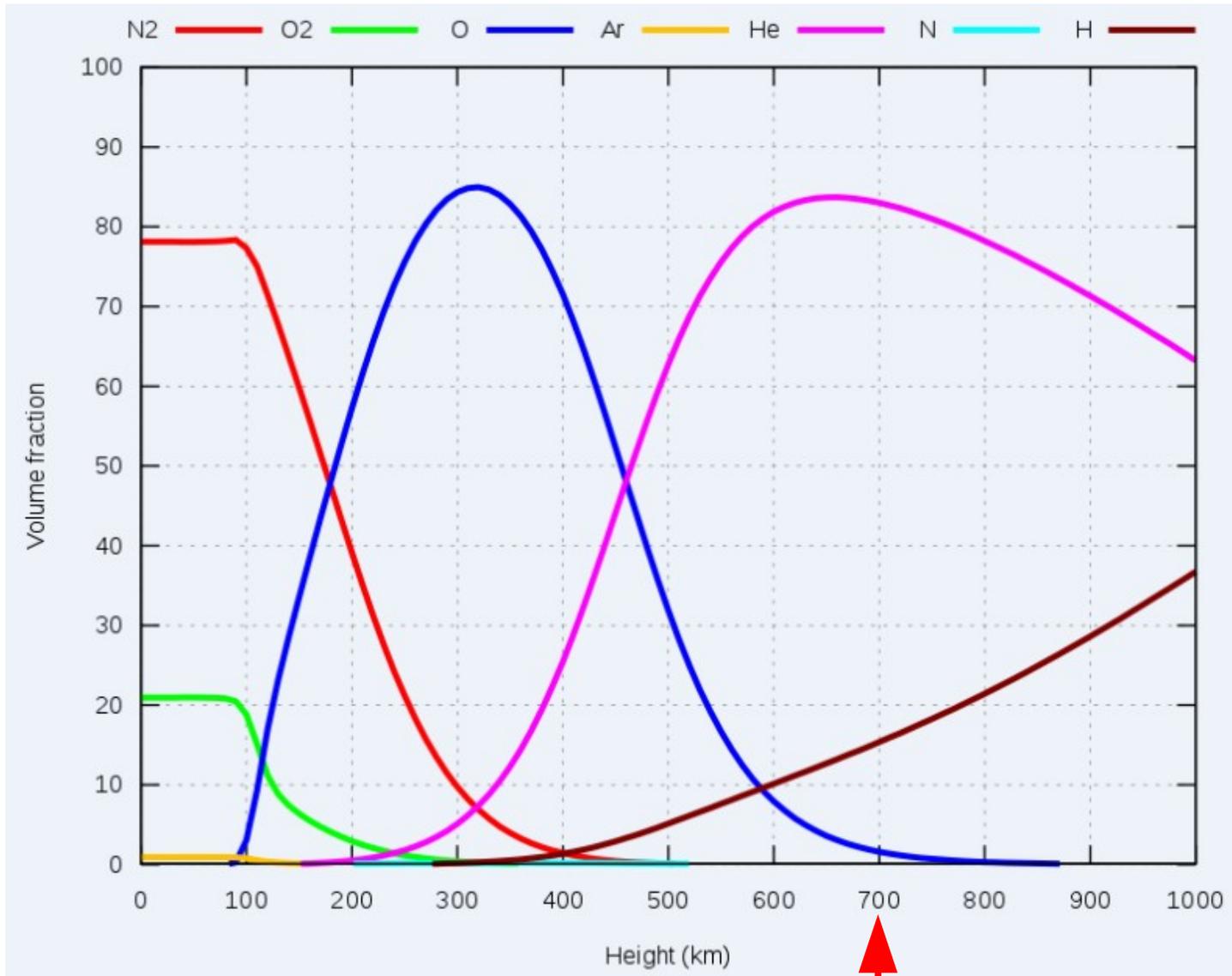


Figure 1.1 Vertical profiles of mixing ratios of selected species at an equinox. CFC-11 and CFC-12 are chlorofluorocarbons.

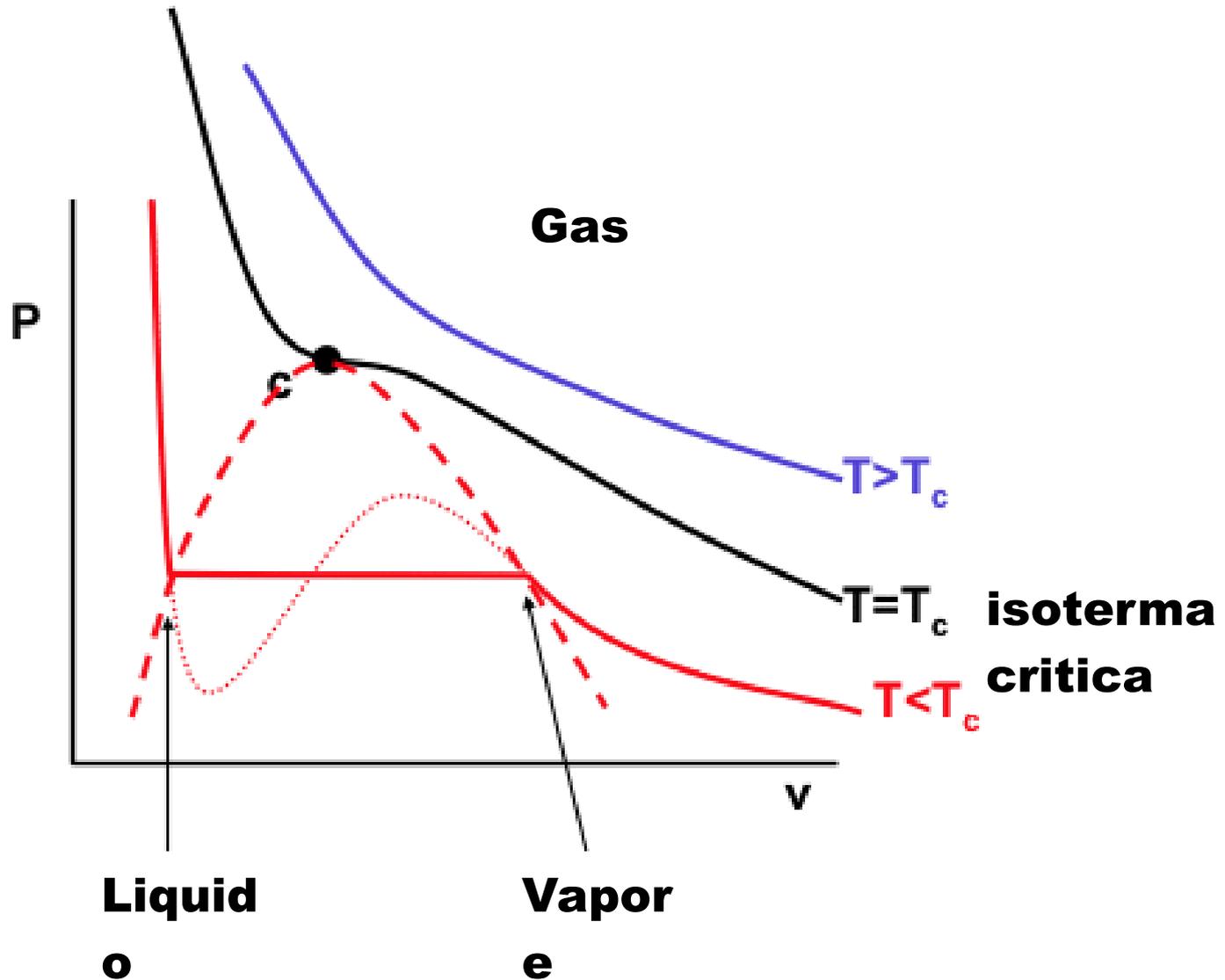
Il rapporto di mescolanza (**mixing ratio**)

Andamento della composizione chimica dell'atmosfera con la quota – fino alla esosfera



↑ Inizio
dell'esosfera

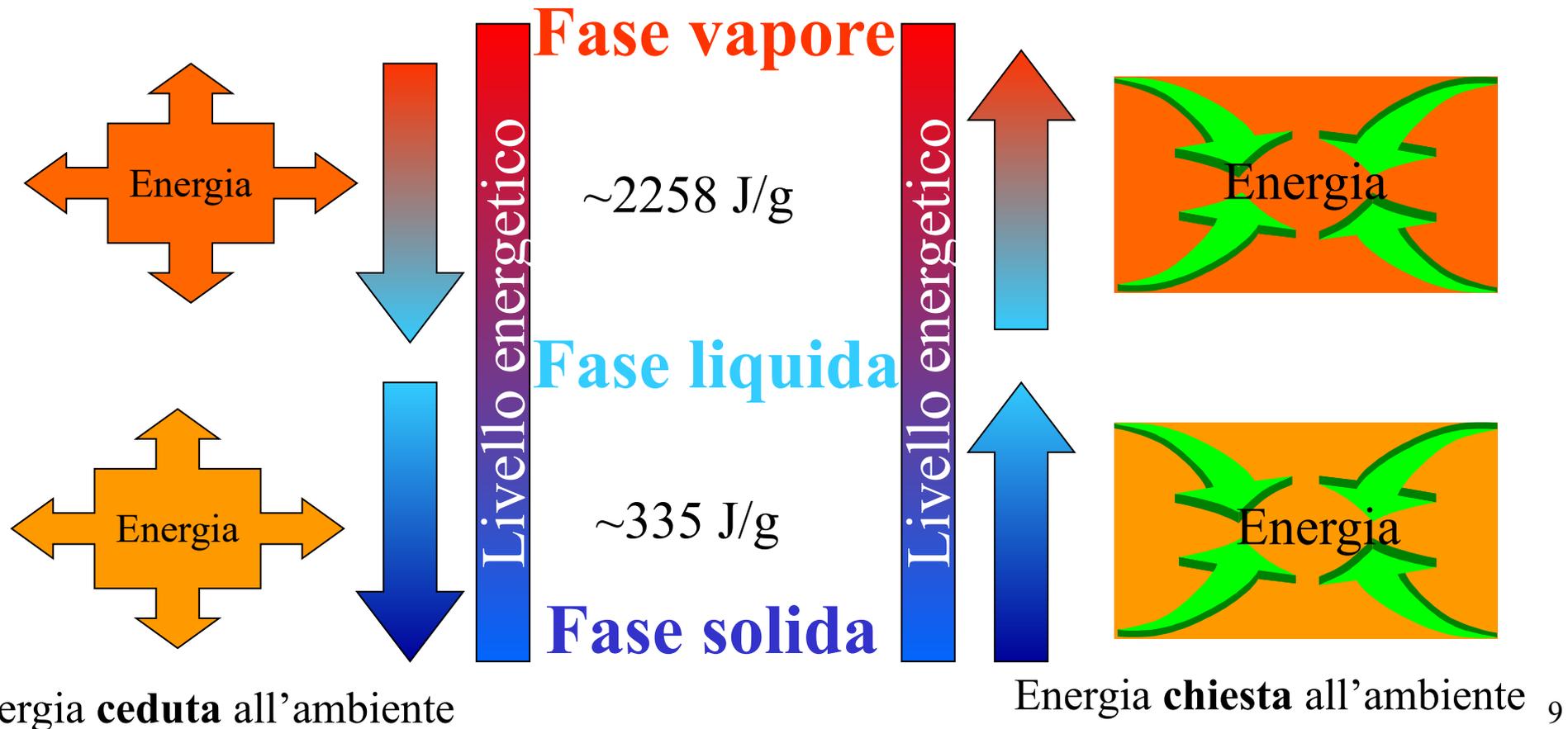
Differenza tra gas e vapore



Energetica dei passaggi di fase dell'acqua

Il ruolo dei passaggi di fase dell'acqua in atmosfera è fondamentale per l'equilibrio del sistema atmosfera

Nei passaggi di fase dell'acqua energia viene ceduta o chiesta all'ambiente che circonda le molecole d'acqua



Alcuni richiami sulla molecola dell'acqua

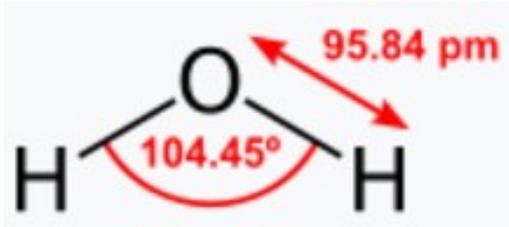


Table 1 Selected physical properties of water

Property	Water
Formula	H ₂ O
Molecular weight (g mol ⁻¹)	18
Density (kg L ⁻¹)	0.998
Boiling point (K)	373
Molecular volume (nm ³)	0.0299
Volume of fusion (nm ³)	0.0027
Liquid density maximum (K)	277
Specific heat (J K ⁻¹ g ⁻¹)	4.18
(J K ⁻¹ mol ⁻¹)	75.2
Heat of vaporization (kJ g ⁻¹)	2.3
(kJ mol ⁻¹)	41.4
Surface tension (mN m ⁻¹)	72.8
Viscosity (μPa s)	1002
Dielectric constant	78.6
Dipole moment (Cm × 10 ³⁰) ^a	6.01

Values at 293 K unless indicated.

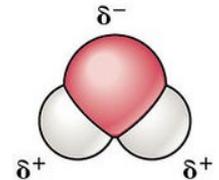
^aIn the gas phase.

Molecola composta da **due** atomi di **idrogeno** e **uno** di **ossigeno** che sono legati condividendo elettroni (legame covalente)

Vista da “lontano” la molecola dell'acqua può considerarsi **sferica (~100 pm)**

L'**Ossigeno** è più elettronegativo dell'**Idrogeno**, pertanto la particolare distribuzione degli elettroni attorno ai nuclei genera un **dipolo elettrico**.

2,2	(X _r)	Hydrogen	H	1	Z
3,44	(X _r)	Oxygen	O	8	Z



La molecola dell'acqua è una **molecola polare**, quindi tende ad attrarre altre molecole (legami Idrogeno).

Ne consegue:

- è un ottimo solvente;
- elevata temperatura di fusione;
- elevata temperatura di vaporizzazione;
- elevato calore specifico.

Rispetto altri composti chimici simili (es. H₂S)

I principali gas e le loro concentrazioni nel tempo

- La composizione chimica dell'atmosfera del nostro pianeta è ben diversa dalla composizione chimica del resto dell'universo.
- La composizione chimica dell'atmosfera del nostro pianeta cambia nel tempo.
- Le concentrazioni dei gas e dei vapori componenti l'atmosfera terrestre attuale è sostanzialmente diversa da quella primordiale (4 Gy).
- Esistono variazioni della composizione chimica atmosferica significative a scale temporali diverse.
- La significatività della variazione non dipende solo dalle variazioni di massa (concentrazioni), ma soprattutto dagli effetti che queste variazioni causano sul sistema Terra.

Serie temporale delle concentrazioni di anidride carbonica (CO₂) negli ultimi 50 anni

Recent Monthly Average Mauna Loa CO₂

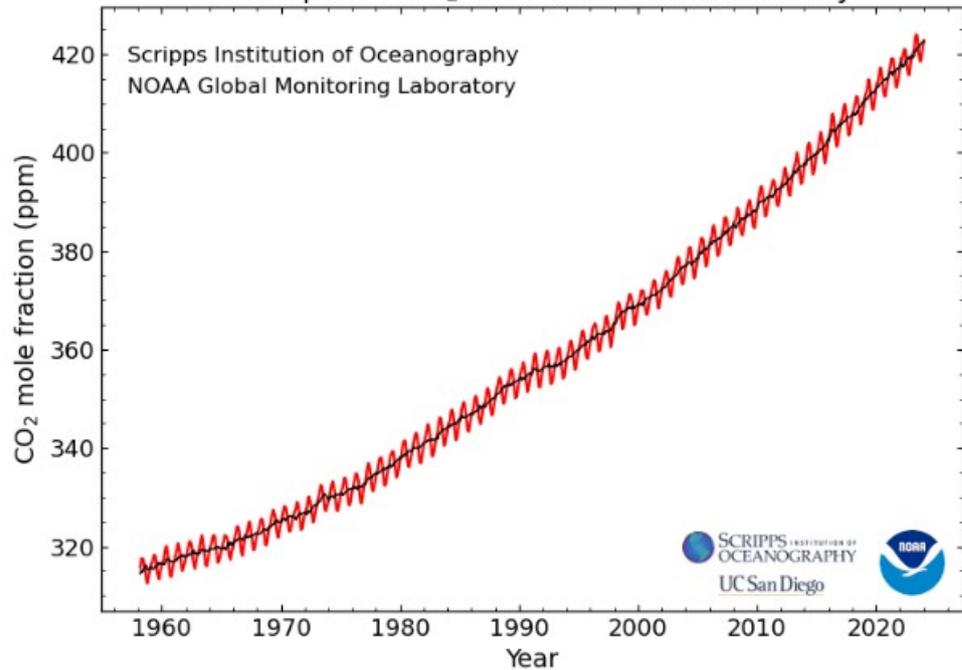
January 2024: 422.80 ppm
January 2023: 419.48 ppm
Last updated: Feb 05, 2024

Esiste in ciclo stagionale

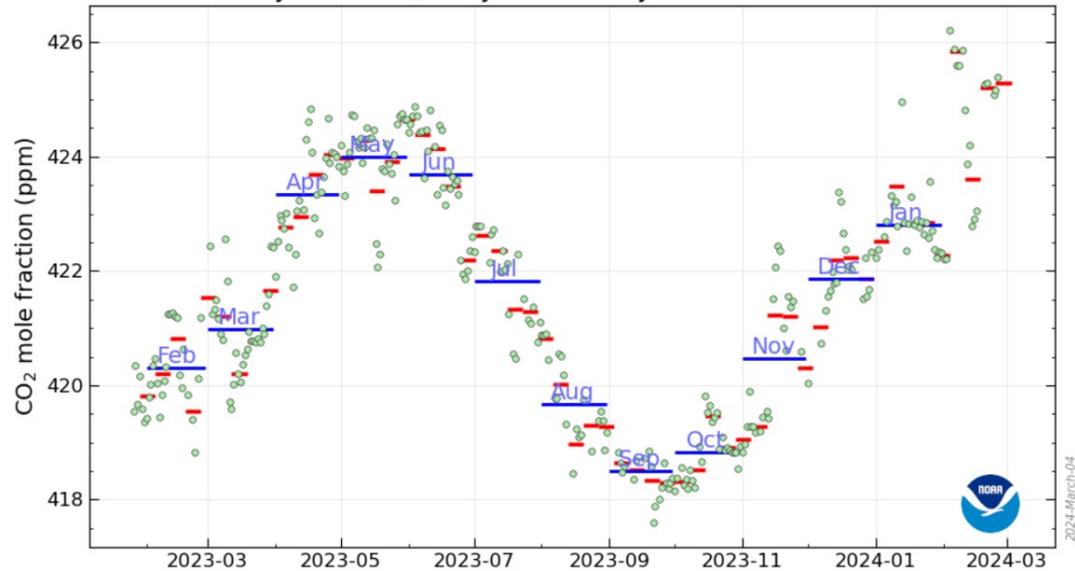
Sovrapposto ad un trend interannuale

Figura tratta da: NOAA Earth System Research Laboratory
<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory

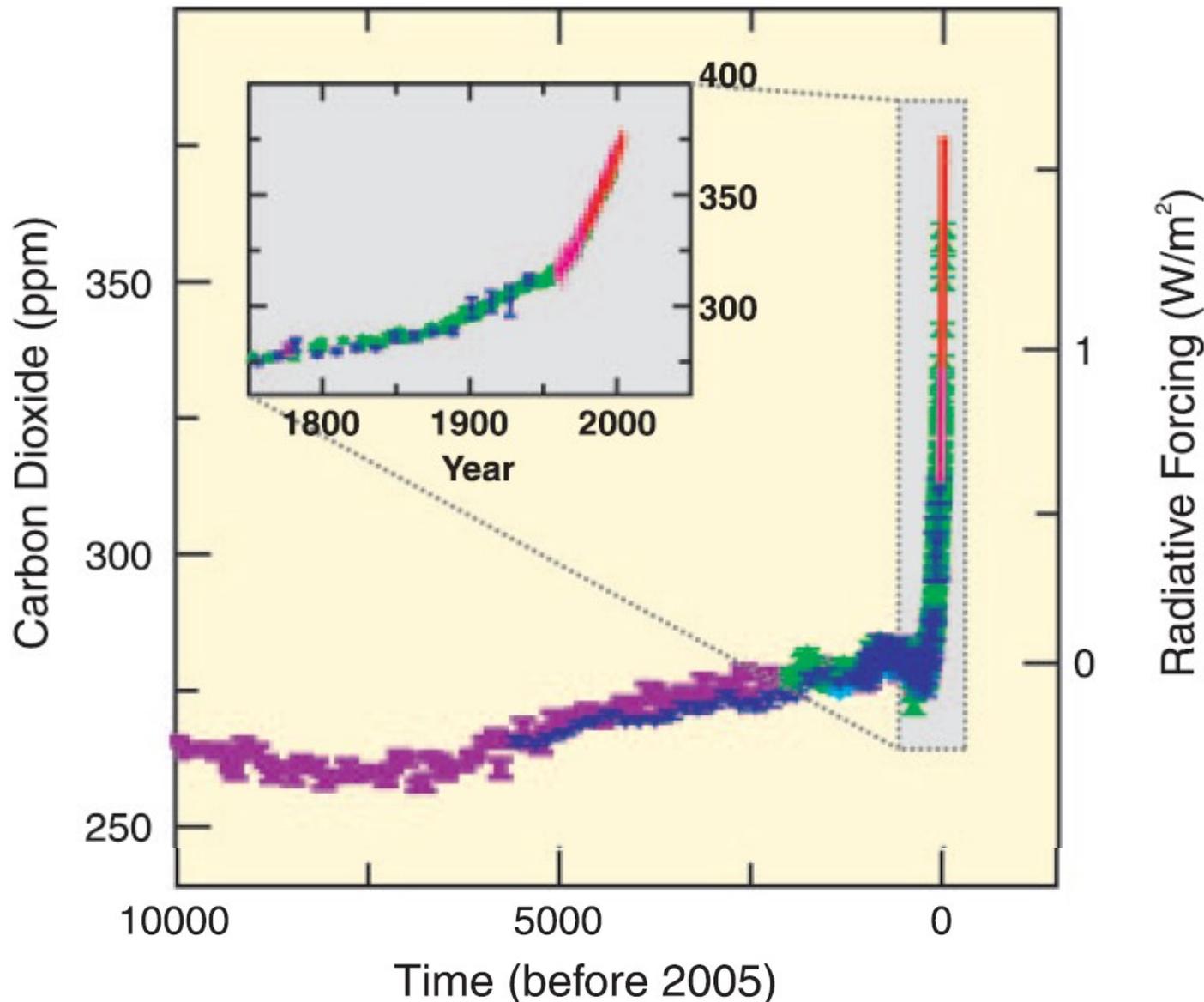


One year of CO₂ daily and weekly means at Mauna Loa



Serie temporale delle concentrazioni di anidride carbonica (CO₂) negli ultimi 10⁴ anni

Changes in GHGs from ice core and modern data



Dall'anno 1750 in poi la serie viene presentata ingrandita.

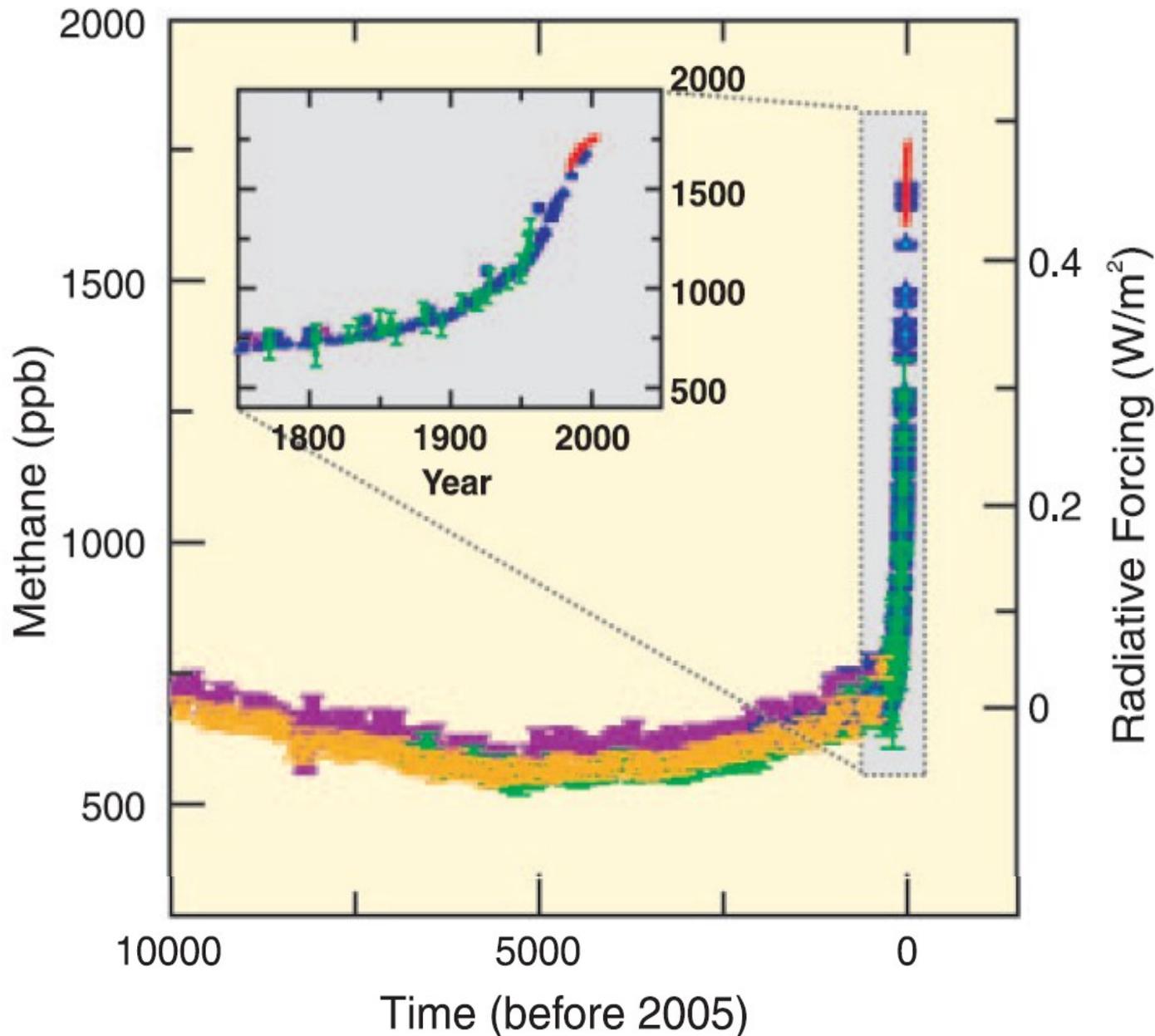
Colori diversi indicano risultati tratti da diverse ricerche.

In rosso sono riportate misure dirette, negli altri colori sono presentate stime dedotte da carote di ghiacci permanenti.

La forzante radiativa e relativa ai valori del 1750.

Figura tratta da: IPCC's Fourth Assessment Report (AR4) 2007

Serie temporale delle concentrazioni di metano (CH_4) negli ultimi 10^4 anni



Dall'anno 1750 in poi la serie viene presentata ingrandita.

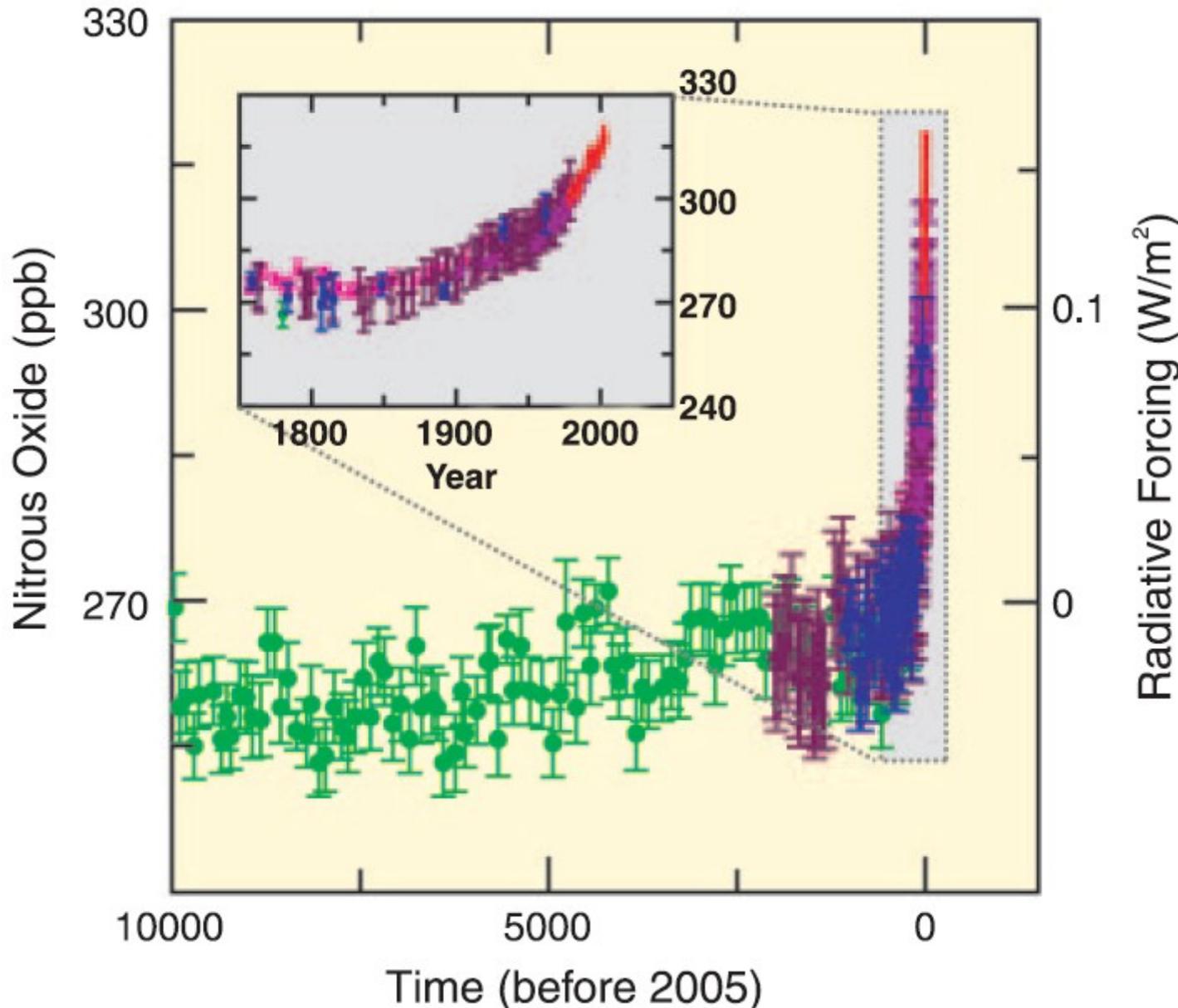
Colori diversi indicano risultati tratti da diverse ricerche.

In rosso sono riportate misure dirette, negli altri colori sono presentate stime dedotte da carote di ghiacci permanenti.

La forzante radiativa e relativa ai valori del 1750.

Figura tratta da: IPCC's Fourth Assessment Report (AR4) 2007

Serie temporale delle concentrazioni di N_2O negli ultimi 10^4 anni



Dall'anno 1750 in poi la serie viene presentata ingrandita.

Colori diversi indicano risultati tratti da diverse ricerche.

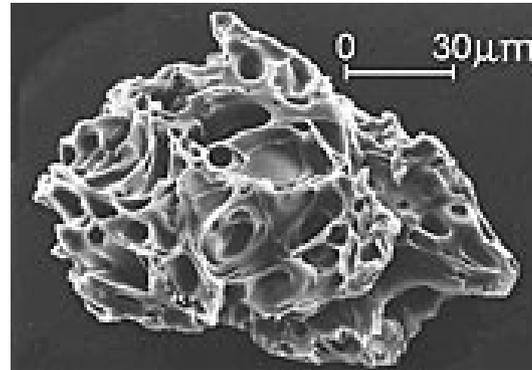
In rosso sono riportate misure dirette, negli altri colori sono presentate stime dedotte da carote di ghiacci permanenti.

La forzante radiativa e relativa ai valori del 1750.

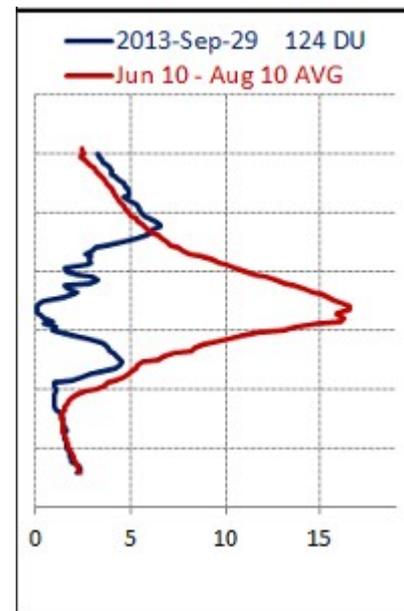
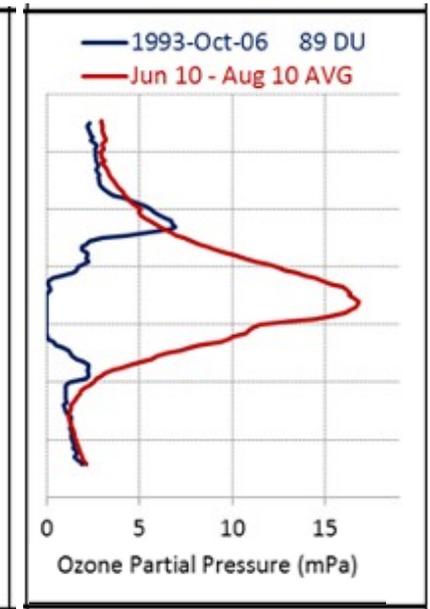
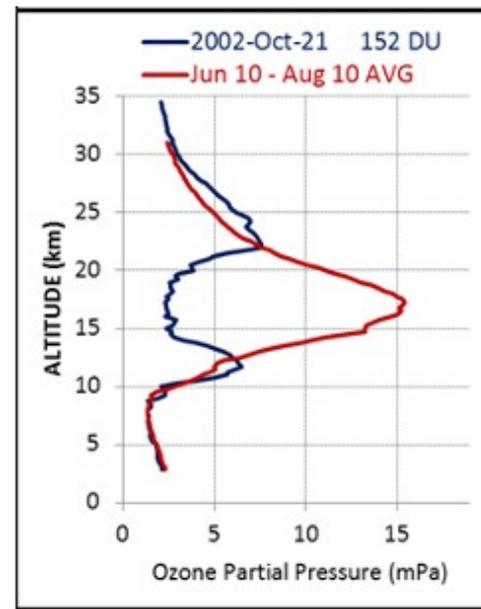
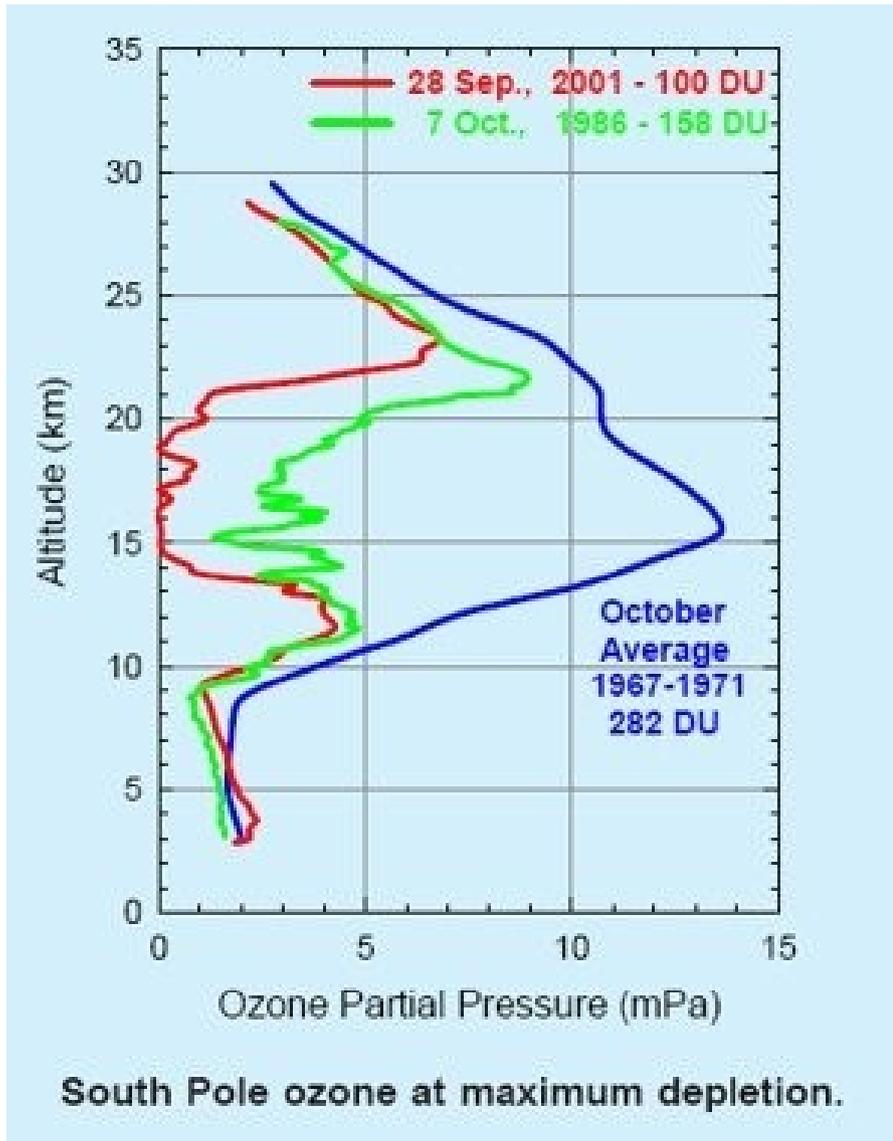
Figura tratta da: IPCC's Fourth Assessment Report (AR4) 2007

Immissioni naturali ed immissioni antropiche

La composizione chimica dell'atmosfera cambia perché in essa vengono **immessi** gas, vapori e particelle materiali sia per cause naturali e per il contributo di **emissioni** di origine



Le variazioni stagionali dell'Ozono stratosferico sull'Antartide



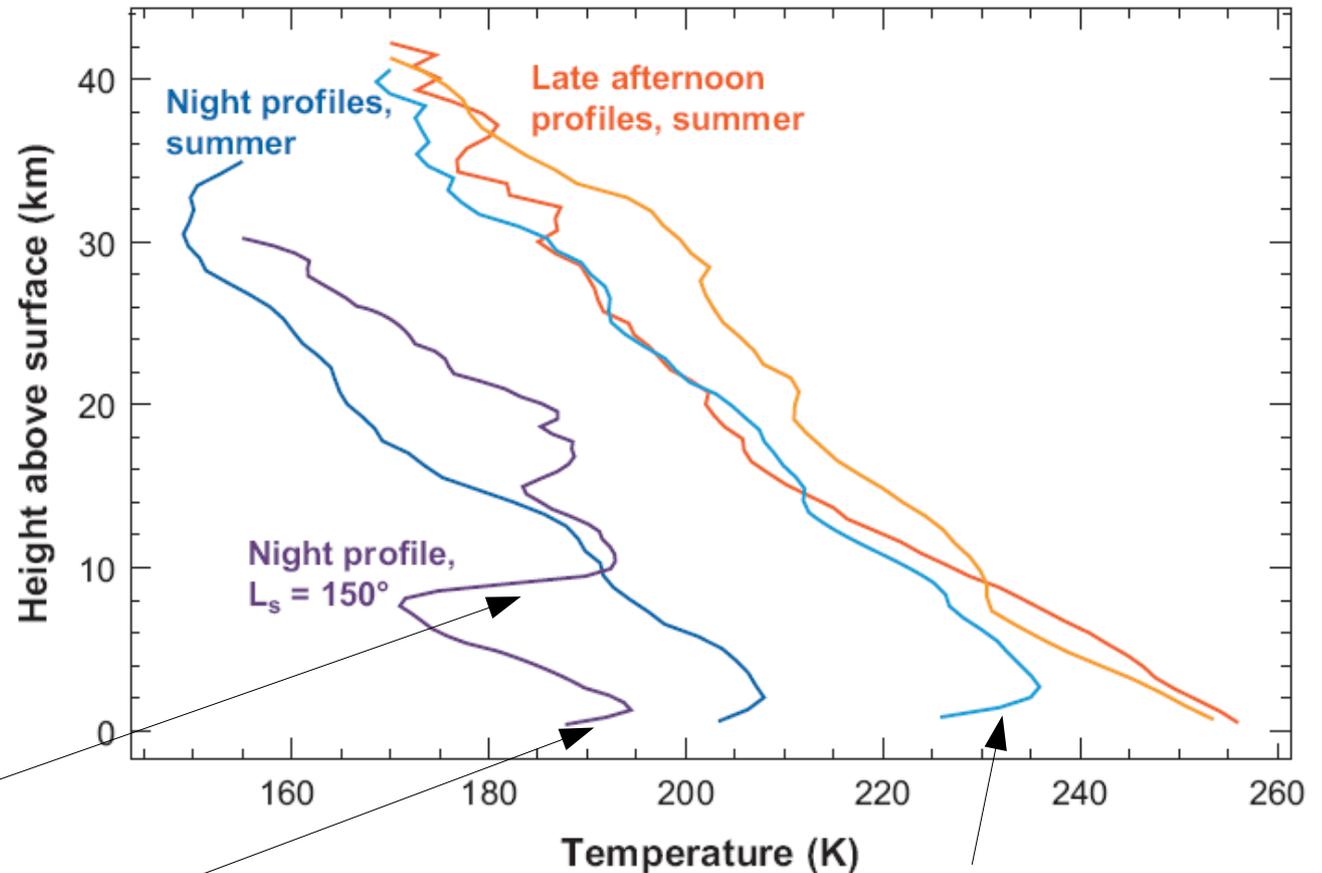
1 Dobson Unit would contain about 2.69×10^{16} ozone molecules for every square centimeter of area at the base of the column.

Figure tratta da: NOAA Earth System Research Laboratory

Esempi di profili termici dell'atmosfera del pianeta Marte

Figure 3

Temperature profiles as a function of height as derived from MGS radio occultation data. Late-afternoon temperatures are shown from southern mid-latitudes during summer. Nighttime temperatures are also shown from mid-latitudes during summer. A nighttime profile is shown with large waves taken near the Tharsis volcanoes at $L_s = 150^\circ$.



Le quote alle quali il segno del gradiente verticale della temperatura cambia sono chiamate **inversioni termiche**. Per la Terra si tratta di strati in cui la temperatura sale con la quota

Temperatura atmosferica e quota

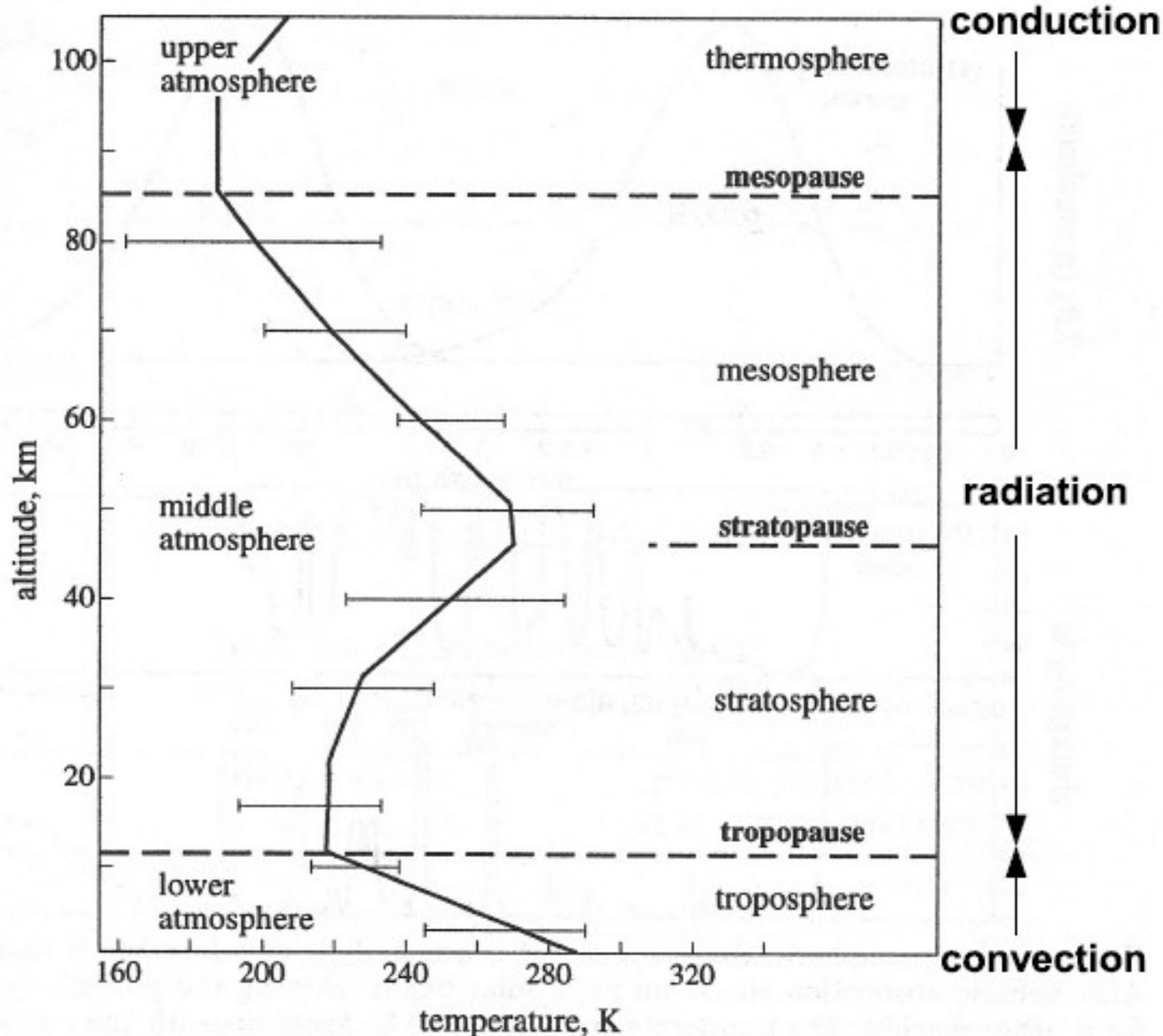
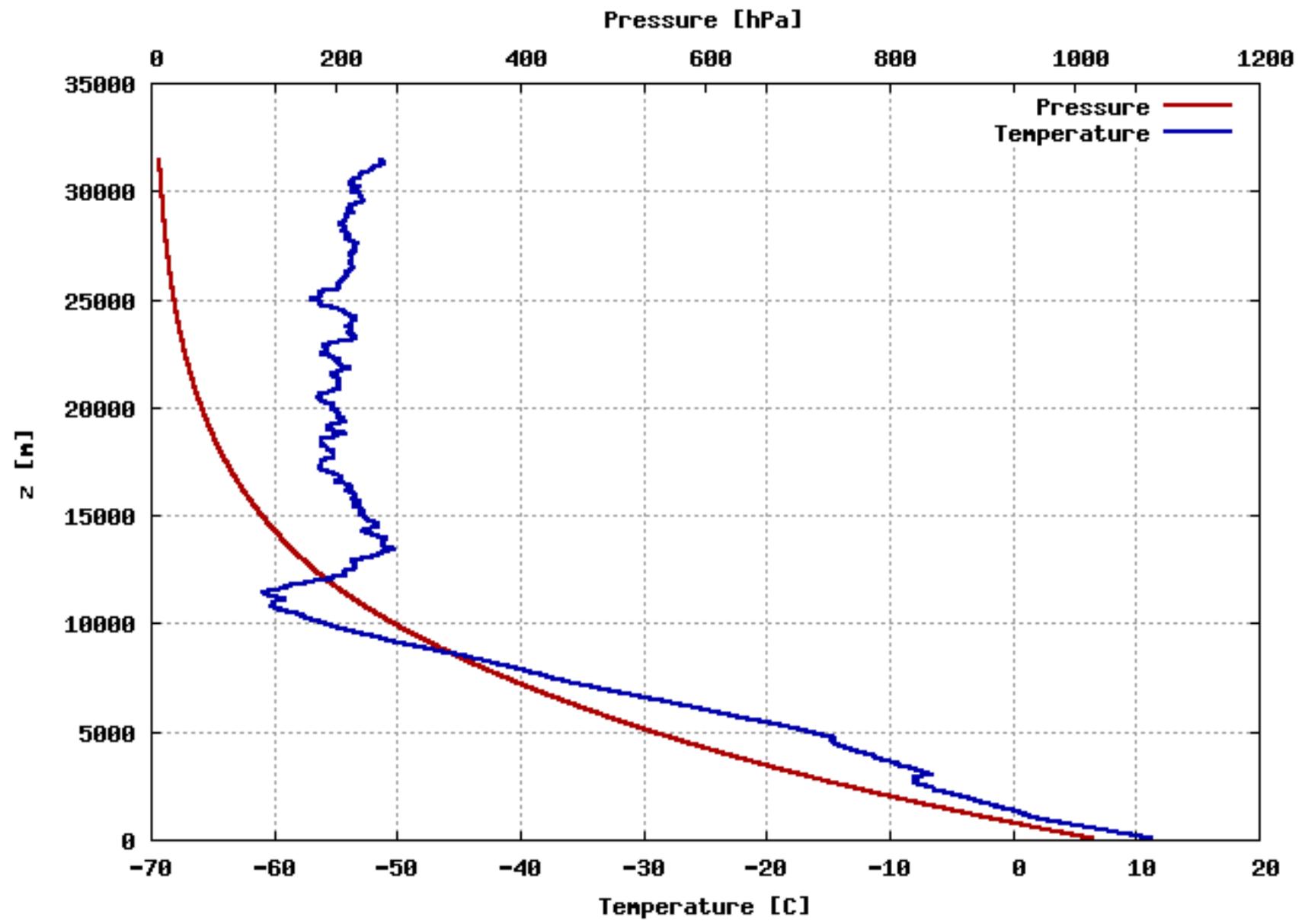


Figura tratta da:
Goody, R. 1995
Principles of
Atmospheric Physics
and Chemistry.
Oxford University Press.

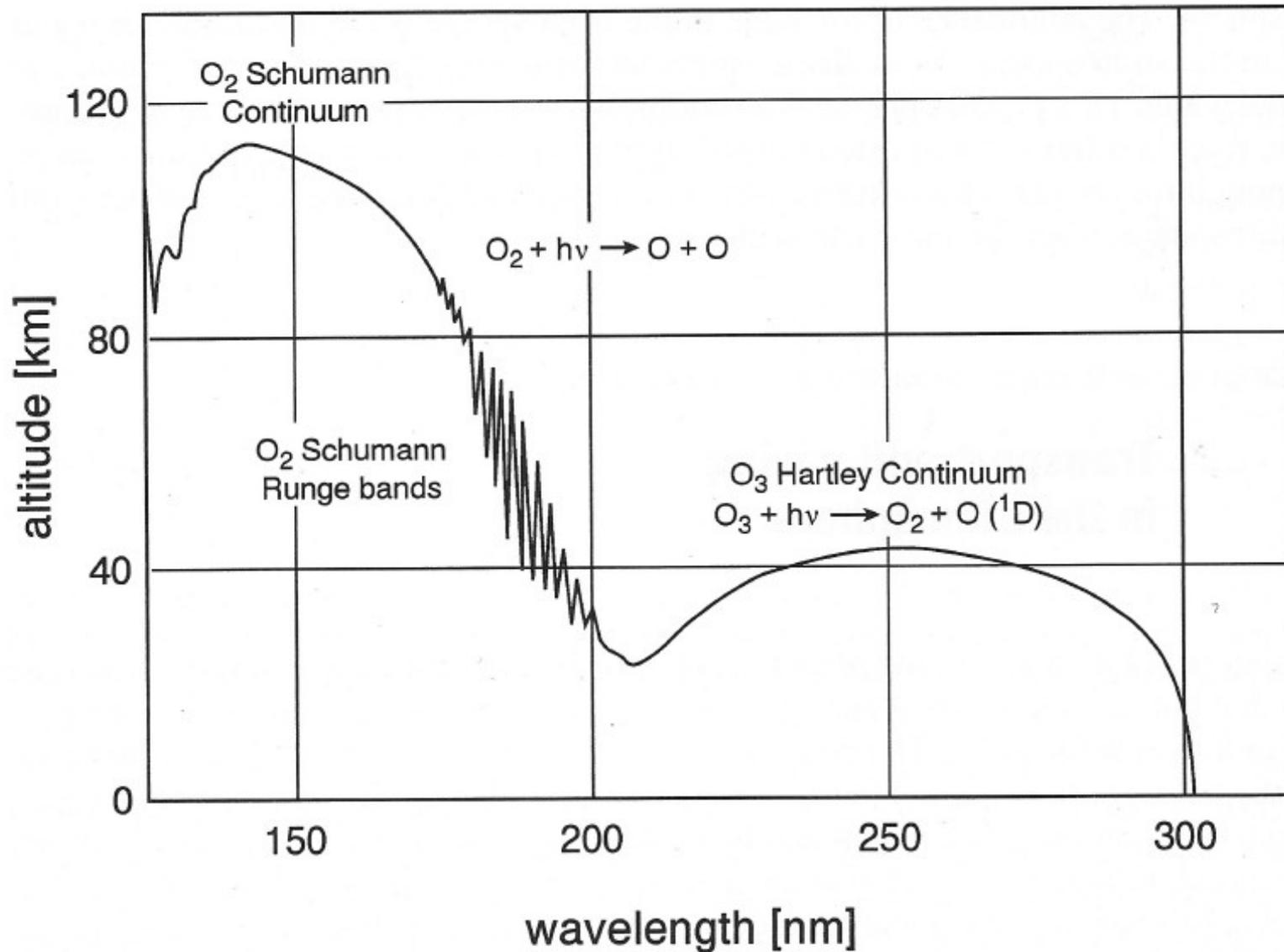
Figure 1.2 Vertical temperature structure of the atmosphere. The solid curve represents the U.S. Standard Atmosphere, see Appendix B. The horizontal bars show the range of monthly mean temperatures in the Northern Hemisphere.

Temperatura e pressione negli strati più bassi dell'atmosfera - esempio di misure

Temperature and pressure profiles in FVG troposphere - 16/03/2020 12:00 UTC



Penetrazione della radiazione ultravioletta nell'atmosfera terrestre



Quota alla quale la radiazione proveniente dallo spazio (Sole) si riduce ad 1/10 dell'intensità originale.

Figura tratta da:
Zellner, R. 1999
Global Aspects of
Atmospheric
Chemistry,
vol. 6 -
Topics in Physical
Chemistry.
Springer.

Fig. 1.2. Penetration of solar ultraviolet radiation into the atmosphere as a function of wavelength and absorption by oxygen and ozone. The curve indicates the altitude at which incoming radiation is attenuated to about one-tenth of its initial intensity.

I gas responsabili delle principali inversioni termiche nell'atmosfera terrestre.

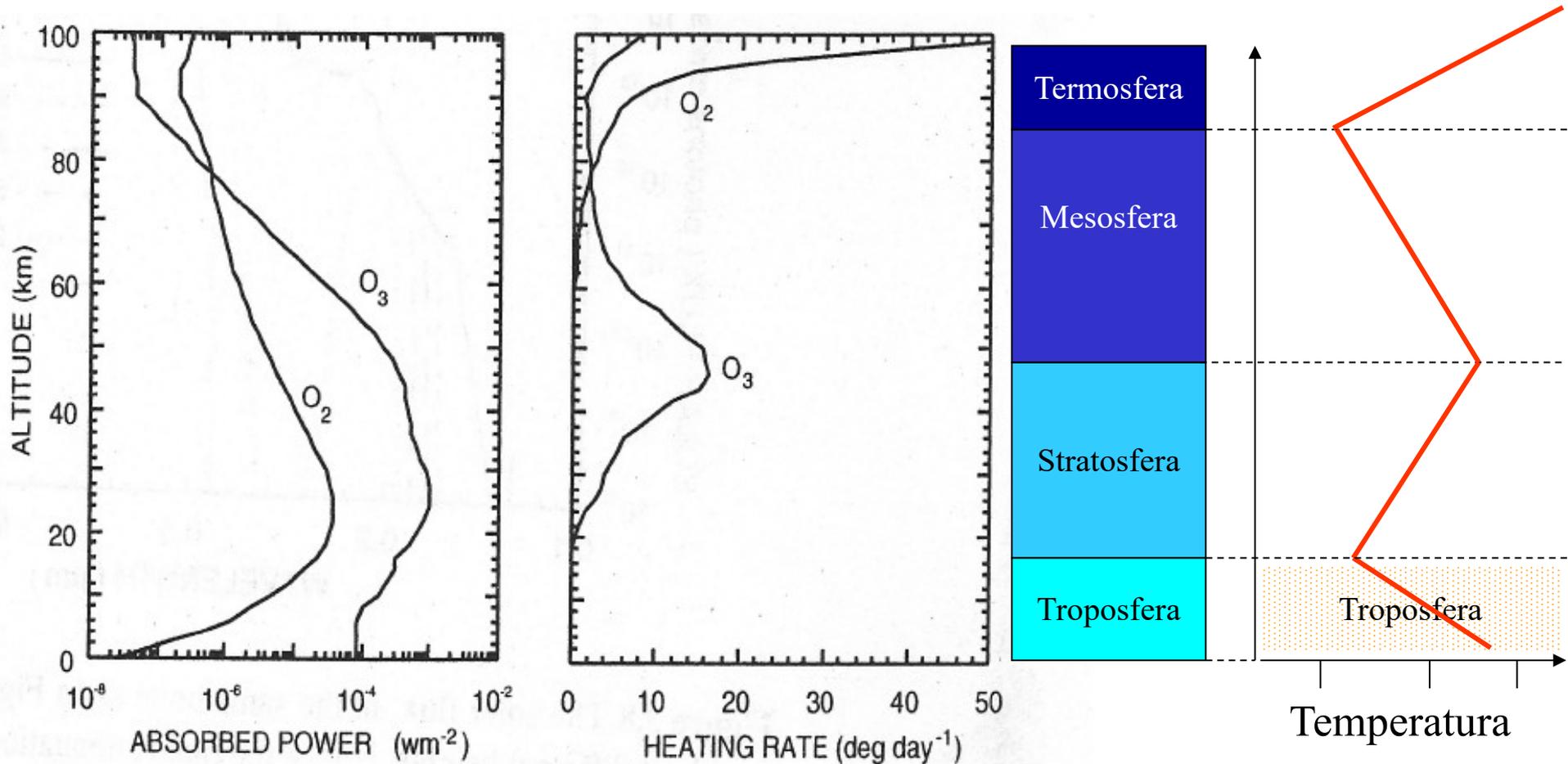


Figura presa da
Visconti, G. 2001
Fundamentals of
Physics and Chemistry
of the Atmosphere.
Springer-Verlag
Berlin.

Figure 3.9 The absorbed power per unit volume (*left*) and the heating rate (*right*) as a function of altitude. The increasing specific heat as the height decreases makes oxygen mainly responsible for heating in the thermosphere and ozone responsible in the stratosphere

La radiazione solare e l'assorbimento dei gas atmosferici

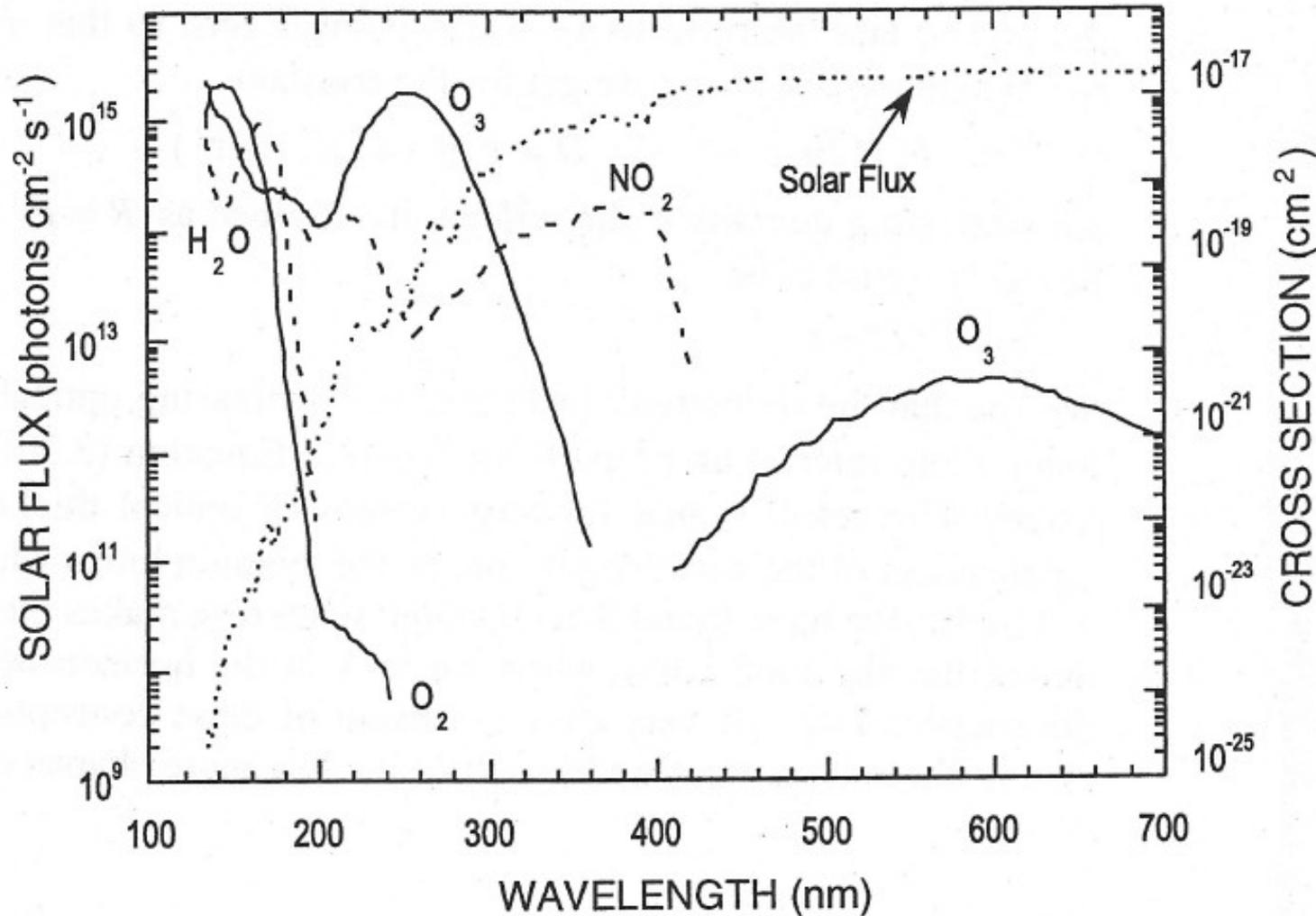


Figure 3.7 The flux of solar radiation in units of photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ for an interval of 5 nm, and the absorption cross section in cm^2 for a few gases in the atmosphere of the Earth

Figura tratta da
Visconti, G. 2001
Fundamentals of
Physics and Chemistry
of the Atmosphere.
Springer-Verlag Berlin.

Flusso energetico specifico in funzione della quota

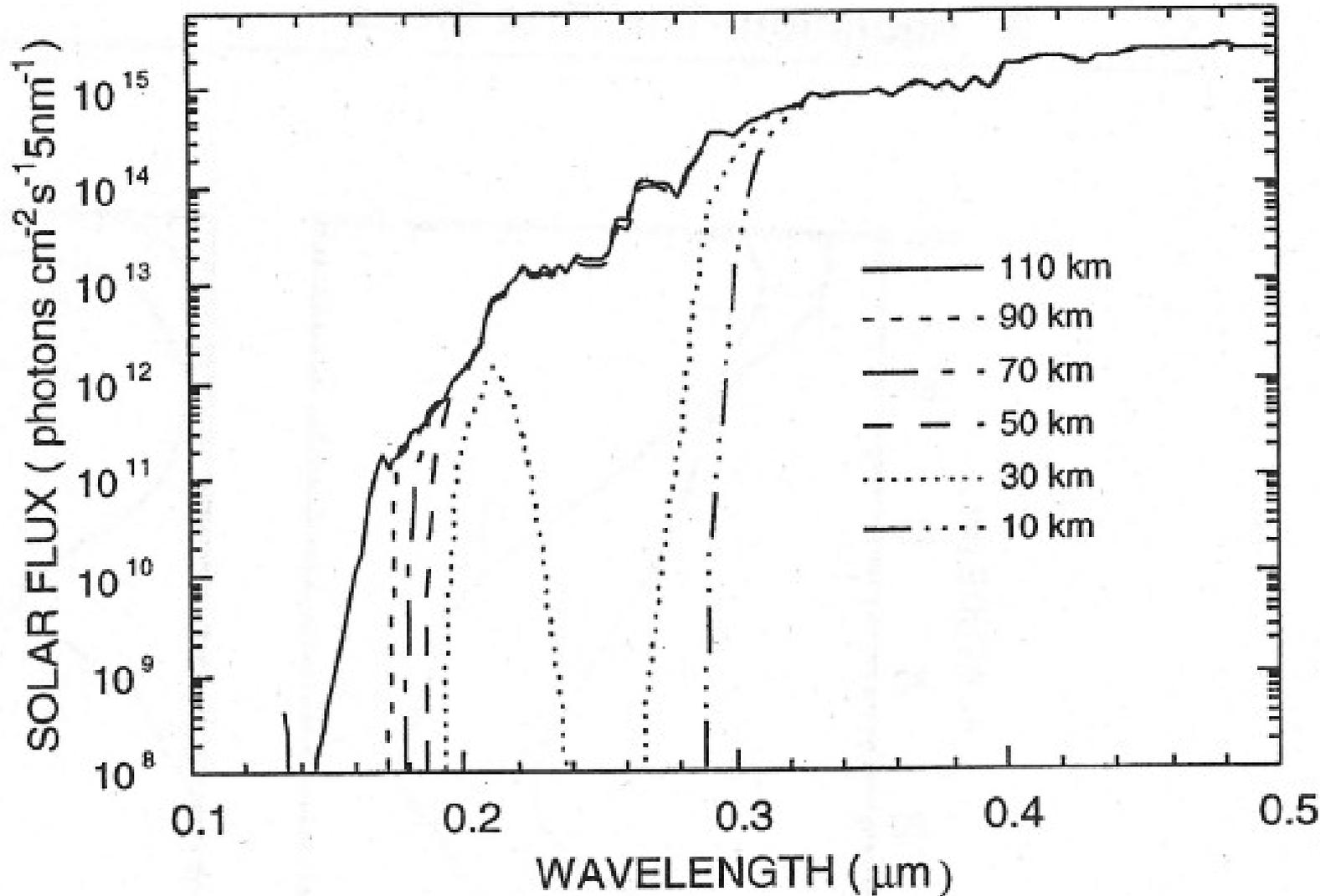
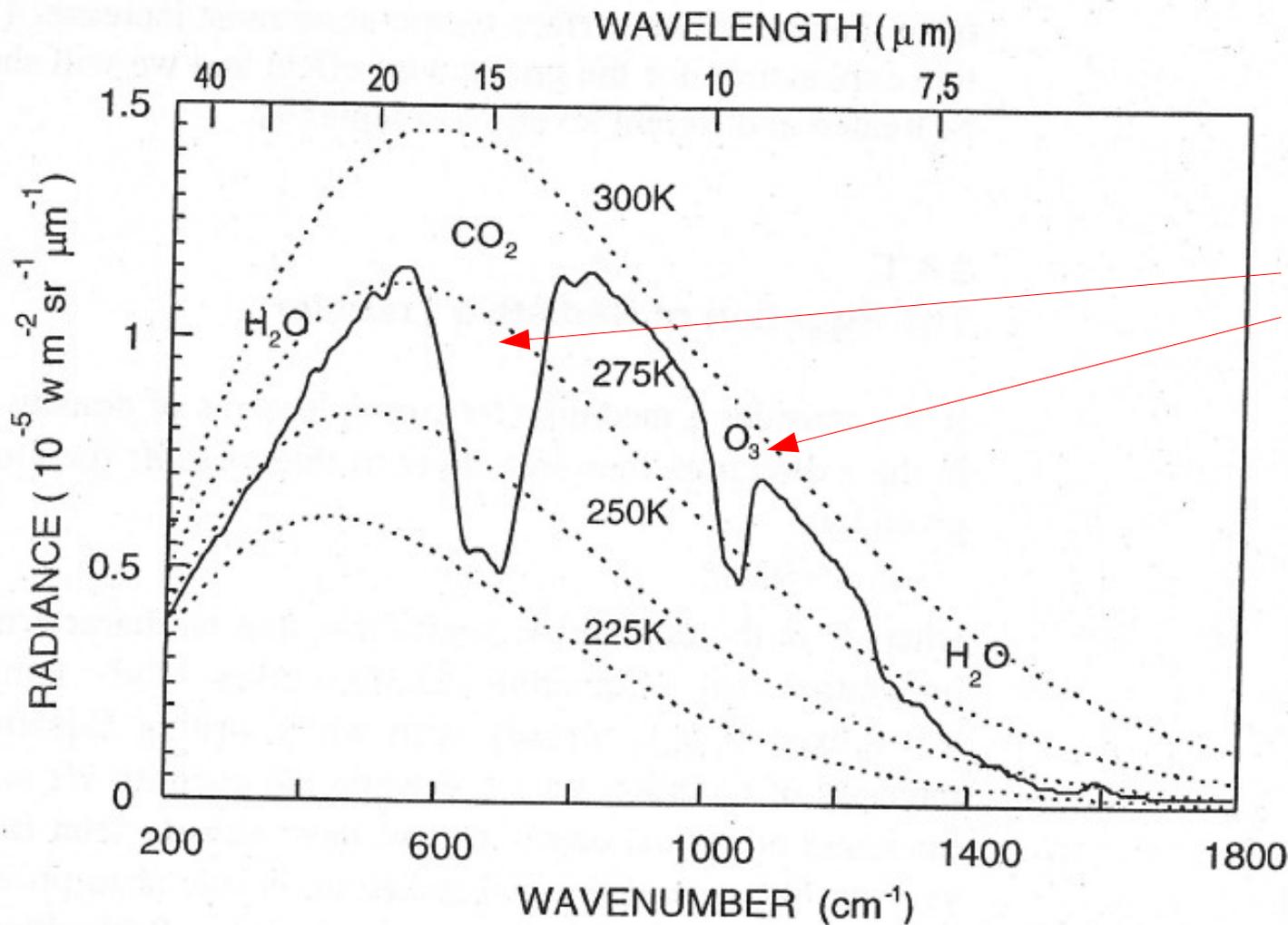


Figura tratta da
Visconti, G. 2001
Fundamentals of
Physics and Chemistry of
the Atmosphere.
Springer-Verlag Berlin.

Lo spettro emissivo della Terra e assorbimento dell'atmosfera

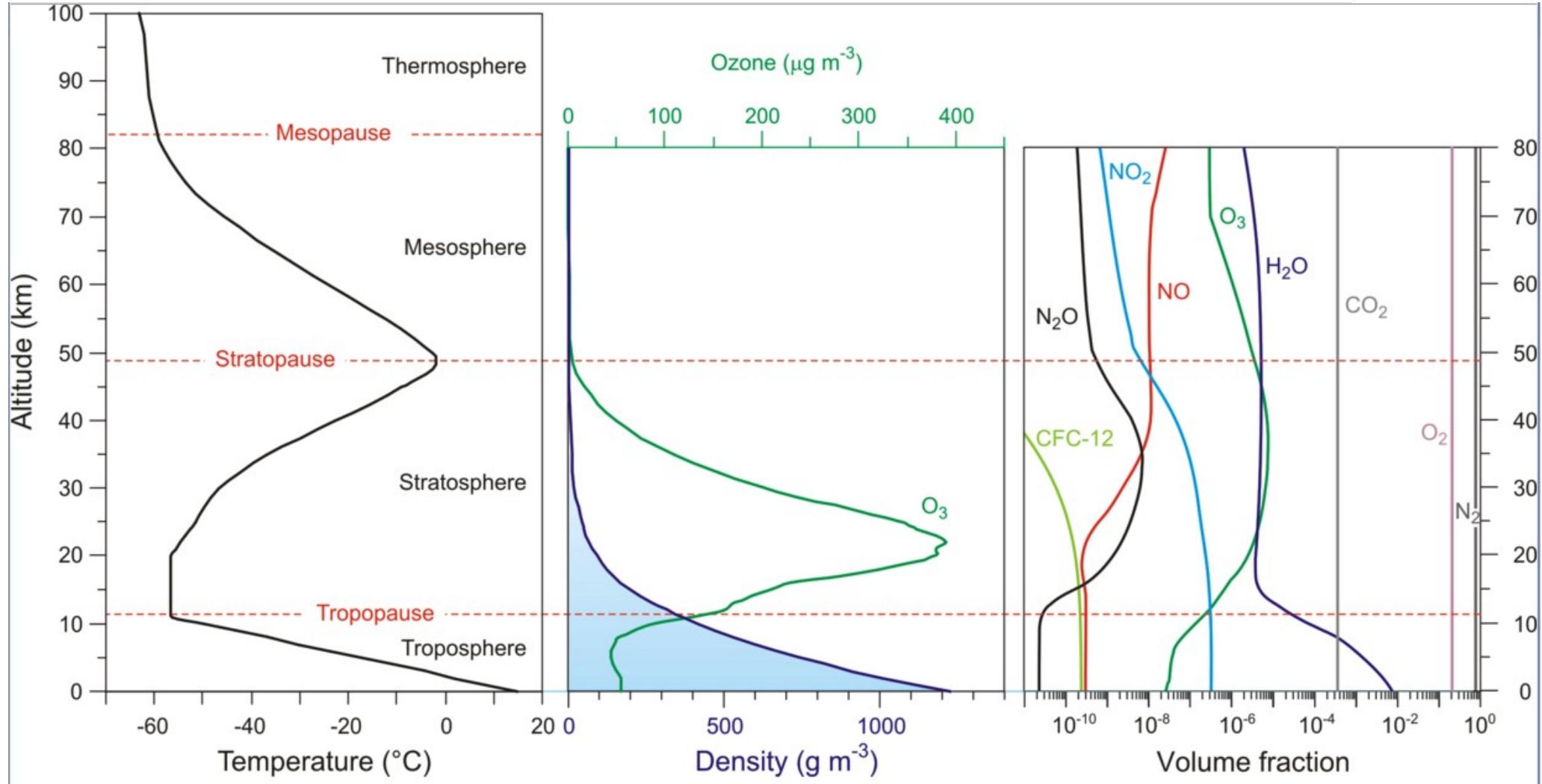


Assorbimento da parte dei gas e dei vapori presenti nell'atmosfera terrestre

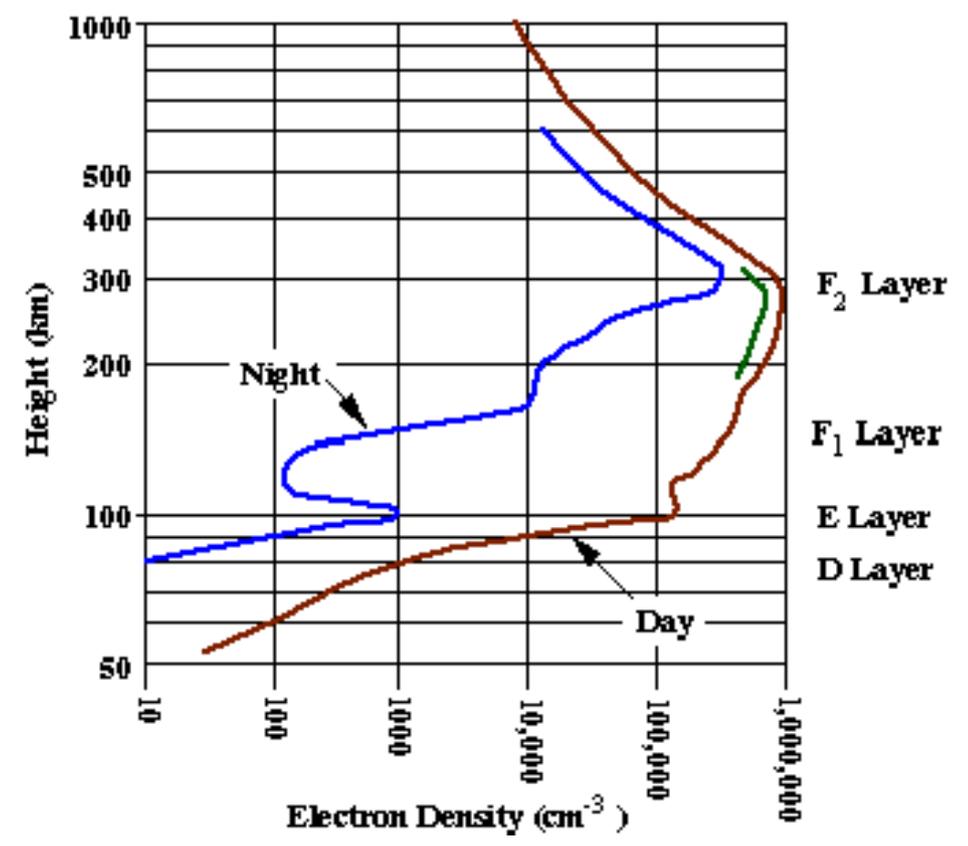
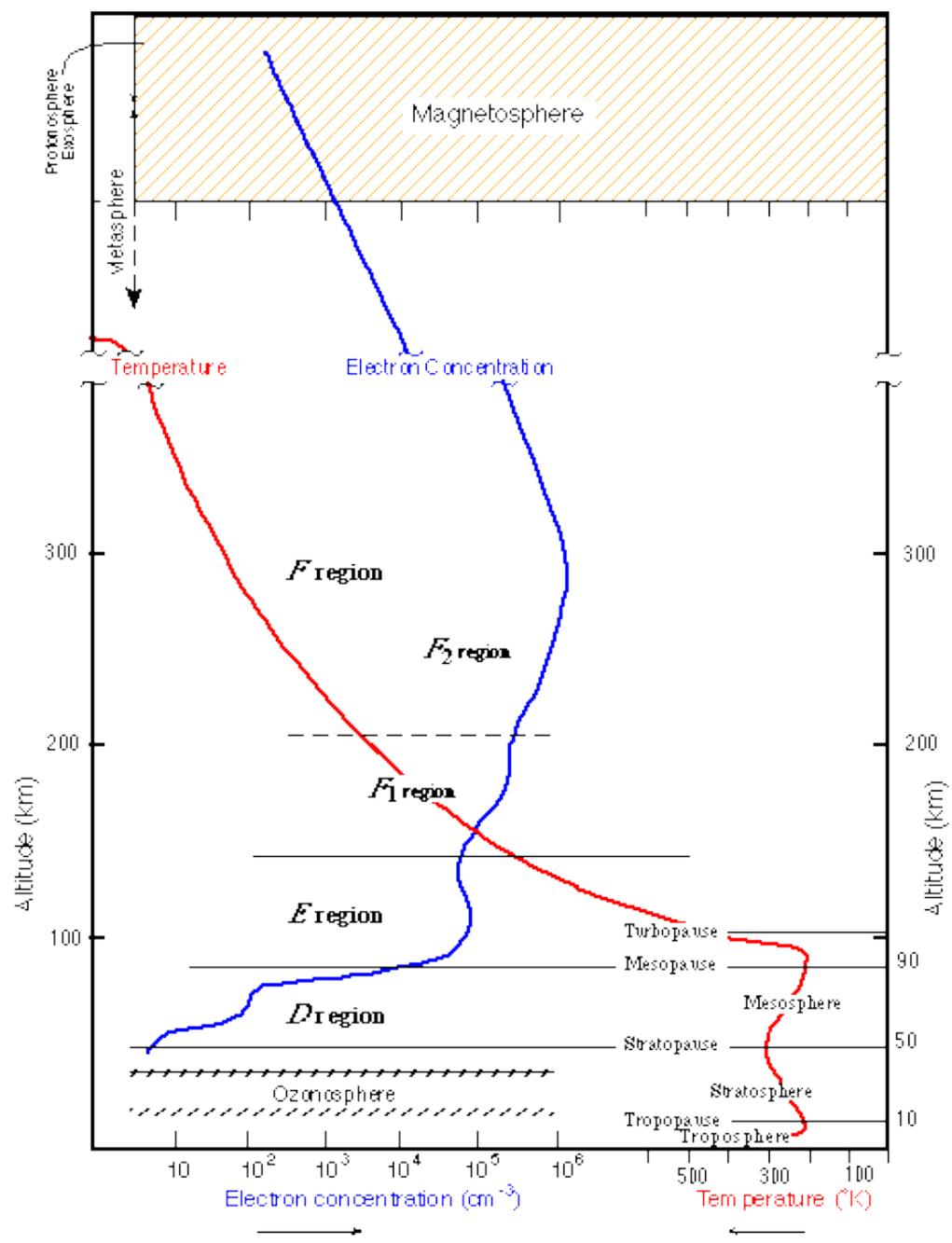
Figura tratta da
Visconti, G. 2001
Fundamentals of
Physics and Chemistry
of the Atmosphere.
Springer-Verlag Berlin.

Figure 3.10 The function λB_λ , measured for the Earth (*solid line*) and calculated for a black body at different temperatures (*dotted lines*). The gases responsible for the main absorption features are indicated

Fenomenologia essenziale – da tenere sempre ben presente



Cariche elettriche libere nell'atmosfera terrestre: la ionosfera



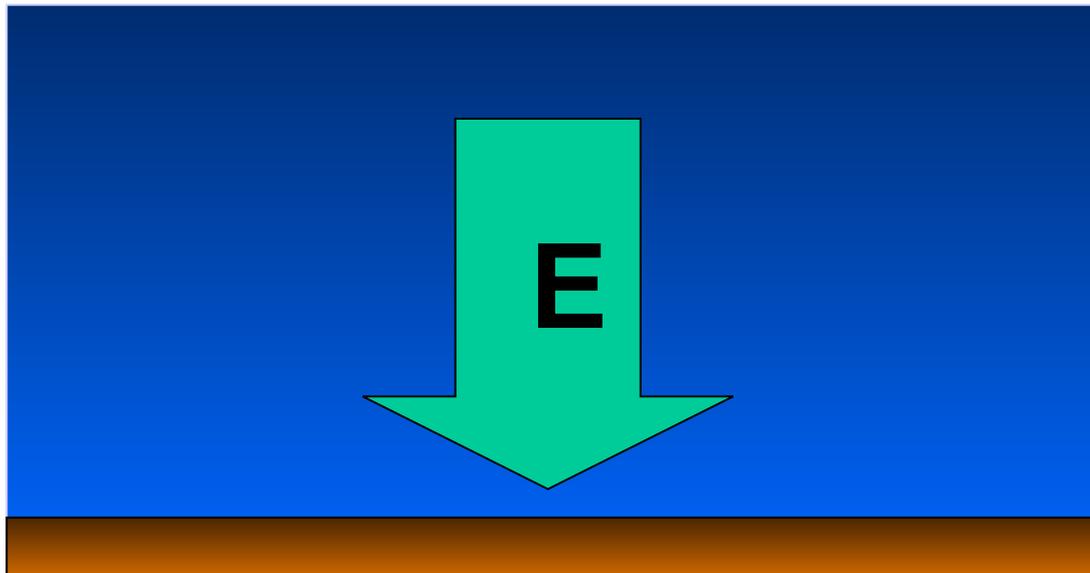
La concentrazione delle cariche libere (elettroni) varia con la quota, la latitudine, la longitudine e nel tempo. Ci sono variazioni diurne (giorno/notte), variazioni stagionali e variazioni decennali (ciclo solare).

Il campo elettrico terrestre

Esiste un campo elettrico che al livello del suolo punta verso il basso e vale
 $\sim 120 \text{ Vm}^{-1}$

Beccaria, Franklin, Lemonnier, Richman (XVIII secolo)

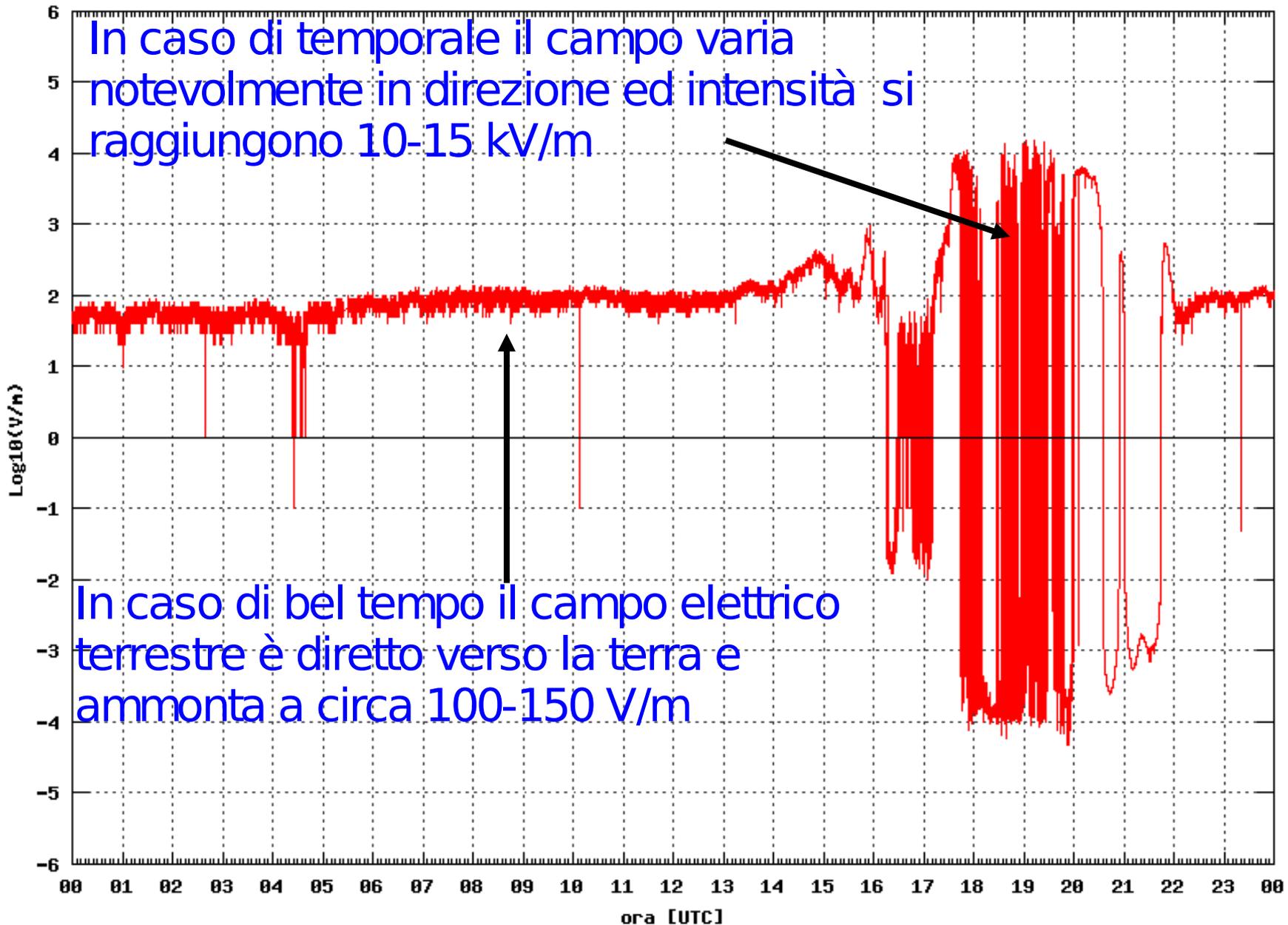
Non esiste un modello universalmente accettato che ne spieghi l'esistenza



In condizioni di tempo buono il campo punta verso il basso ed è stato misurato in moltissimi luoghi sulla superficie del nostro pianeta

Variazioni del campo elettrico terrestre nei pressi della superficie della Terra

Campo Elettrico Terrestre: Ziracco lat 46.060N lon 13.312E 17/07/2003



Cause della variazione del campo elettrico terrestre

- **Il capo elettrico terrestre ha intensità variabile nel tempo**

- **Il campo elettrico terrestre è funzione di:**

- a) meccanismi di separazione delle cariche

- b) conducibilità dell'aria

- **a) e b)** e dipendono da cause:

Naturali

- radiazione solare
 - temporali
 - eruzioni vulcaniche

.....

Artificiali

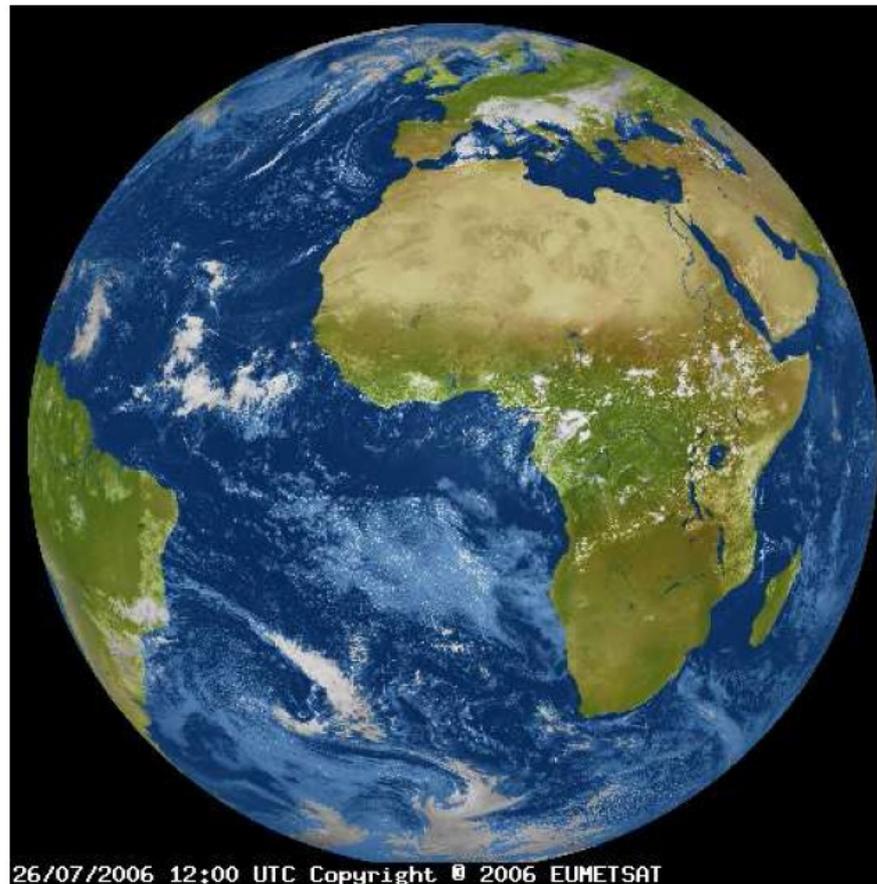
- inquinamento chimico
 - inquinamento particellare
 - inquinamento radioattivo
 - inquinamento elettromagnetico

.....

Circolazione planetaria generale

Per circolazione planetaria generale si intende il movimento medio, sulla scala di giorni o mesi delle masse d'aria, con particolare riguardo alla troposfera

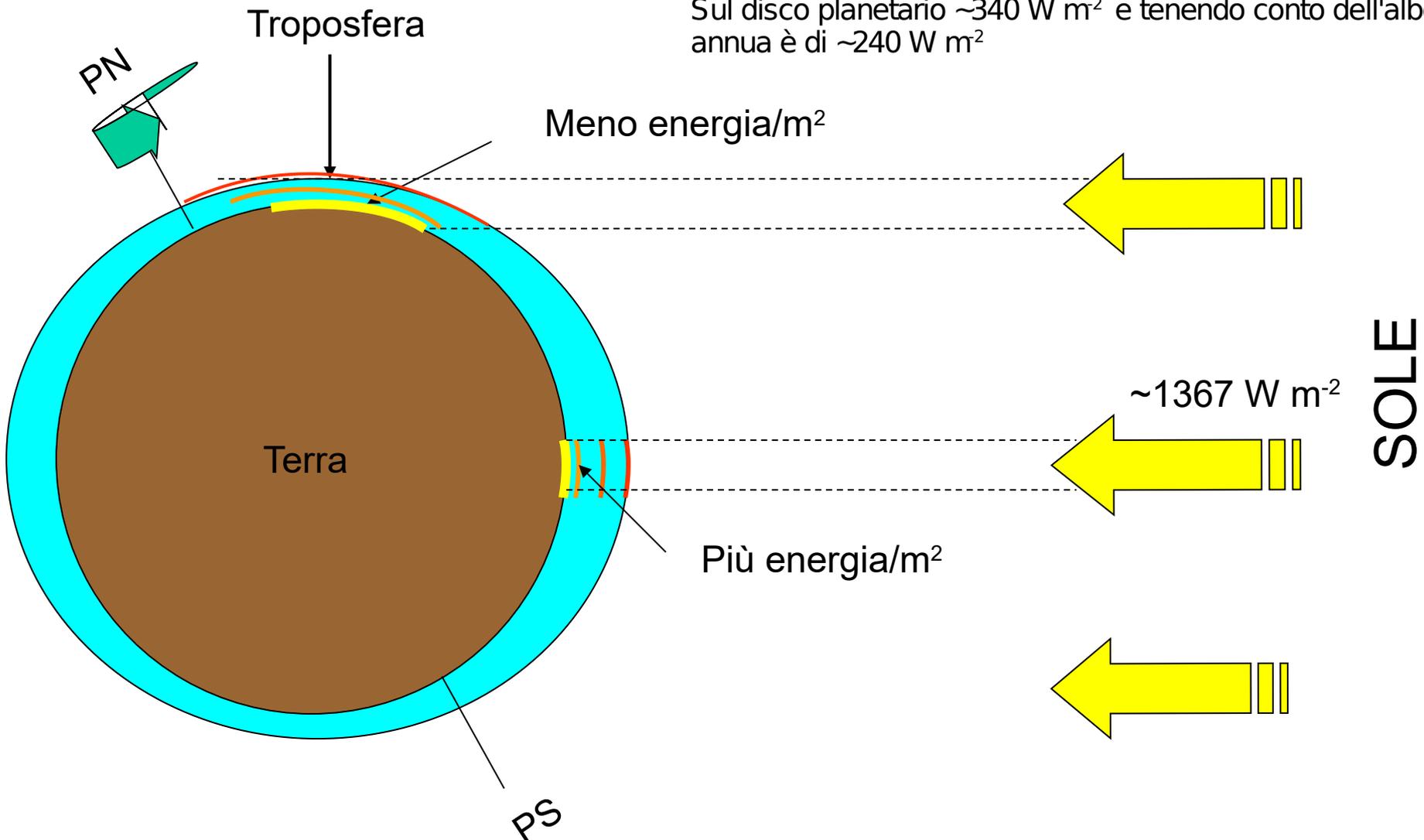
Scopo della circolazione generale è quello di riequilibrare gli eccessi energetici dovuti alle differenze di irraggiamento solare presenti tra zone equatoriali e polari.



La forzante dei moti atmosferici

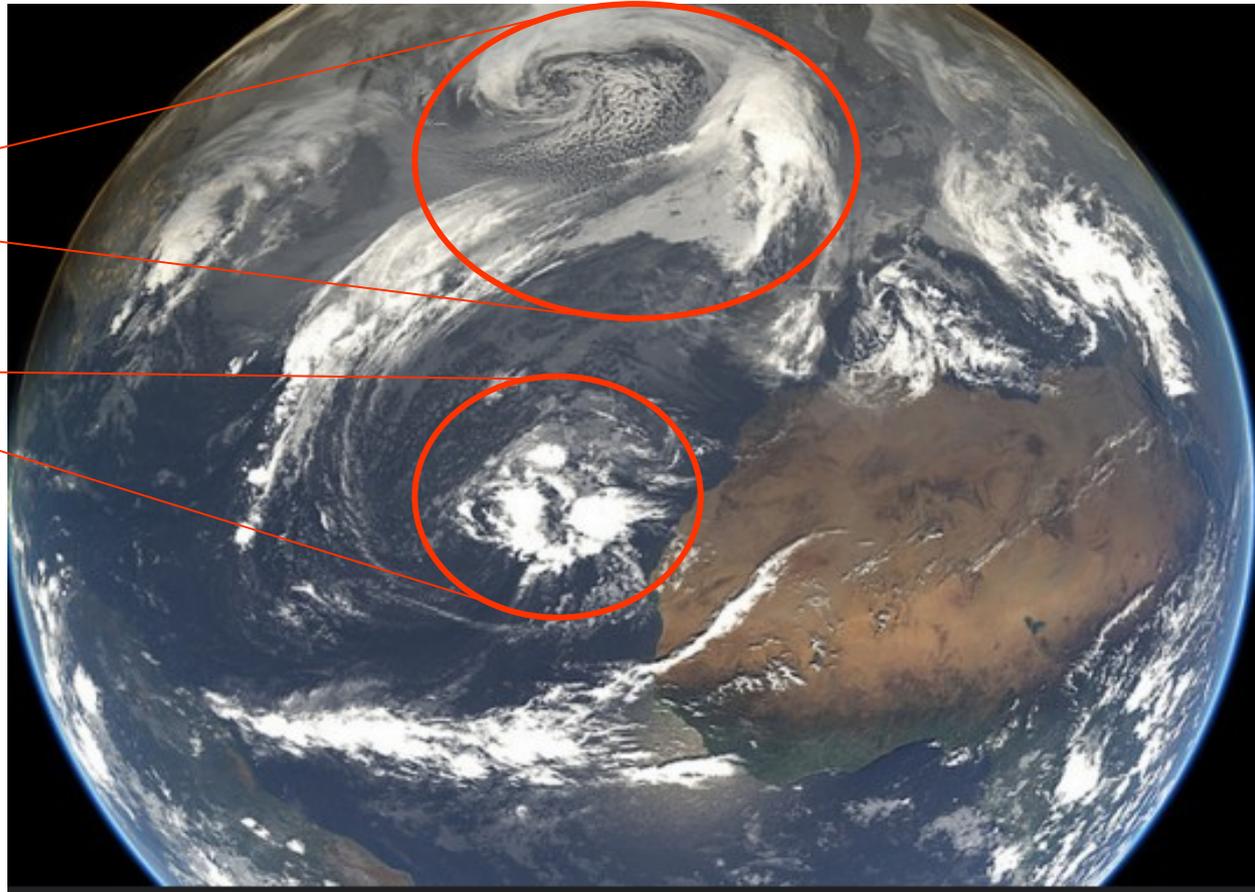
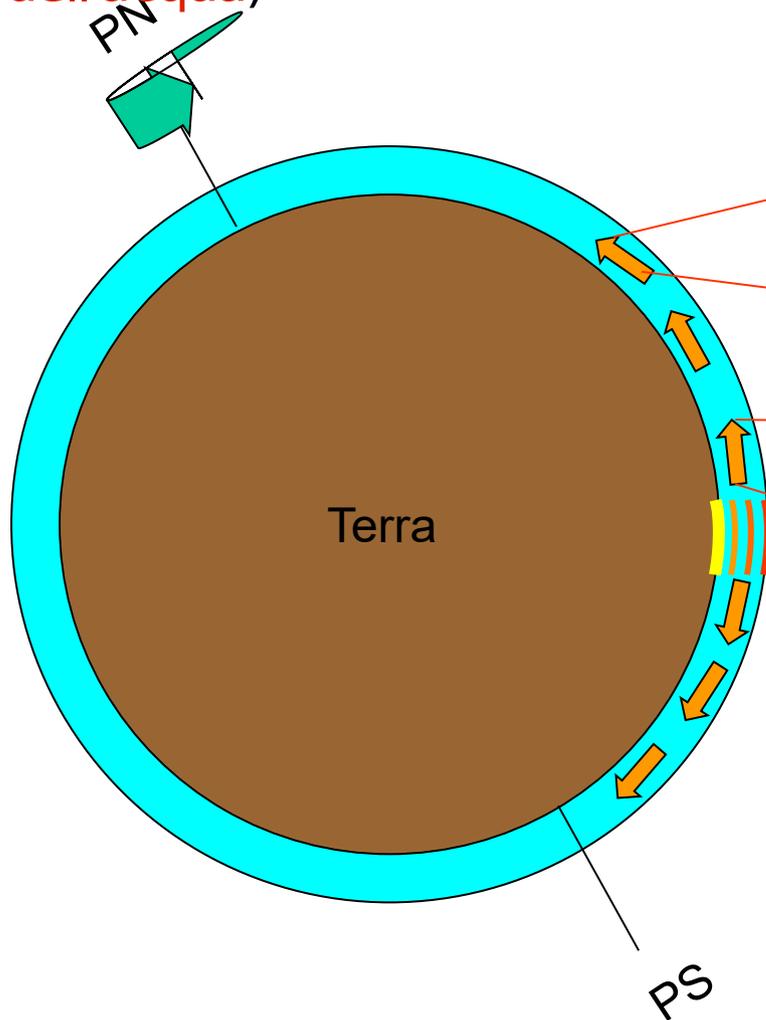
A livello planetario l'energia proveniente dal sole viene ripartita in modo non omogeneo sulla superficie terrestre e nella troposfera

Sul disco planetario $\sim 340 \text{ W m}^{-2}$ e tenendo conto dell'albedo, la media annua è di $\sim 240 \text{ W m}^{-2}$



La redistribuzione dell'energia nella troposfera su scala planeraria

Le perturbazioni atmosferiche sono uno dei veicoli per il trasposto dell'energia dalle zone più calde a quelle più fredde (**ricordare l'energetica dei passaggi di fase dell'acqua**)



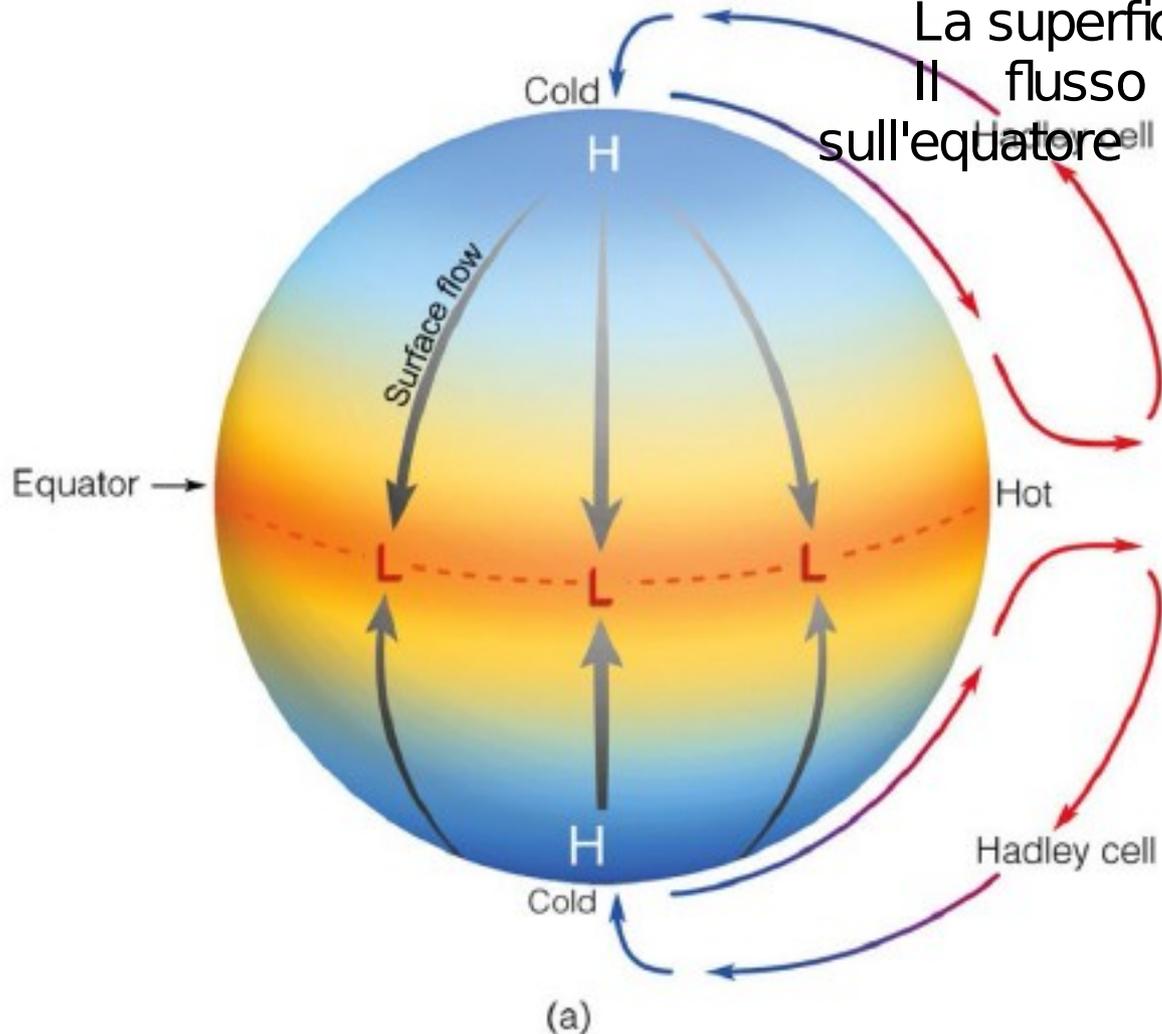
Circolazione planetaria generale a singola cella (Hadley)

Il primo modello semplice è quello di George Hadley:

La Terra non ruota - solo gradienti di pressione

La superficie terrestre è piatta e liscia

Il flusso solare è sempre allo zenit sull'equatore



L'aria all'equatore si riscalda e diventa più leggera di quella delle medie e alte latitudini, quindi sale.

Giungendo in prossimità dei poli, l'aria in quota si è raffreddata, è più densa dell'aria sottostante, quindi scende.

Il tubo di flusso si chiude al suolo per continuità (conservazione della massa)

Circolazione planetaria generale a tre celle

Il superamento del modello di Hadley si ottiene rimuovendo alcune semplificazioni

La Terra ruota attorno ad un asse – si manifestano forze apparenti (**Forza di Coriolis**)

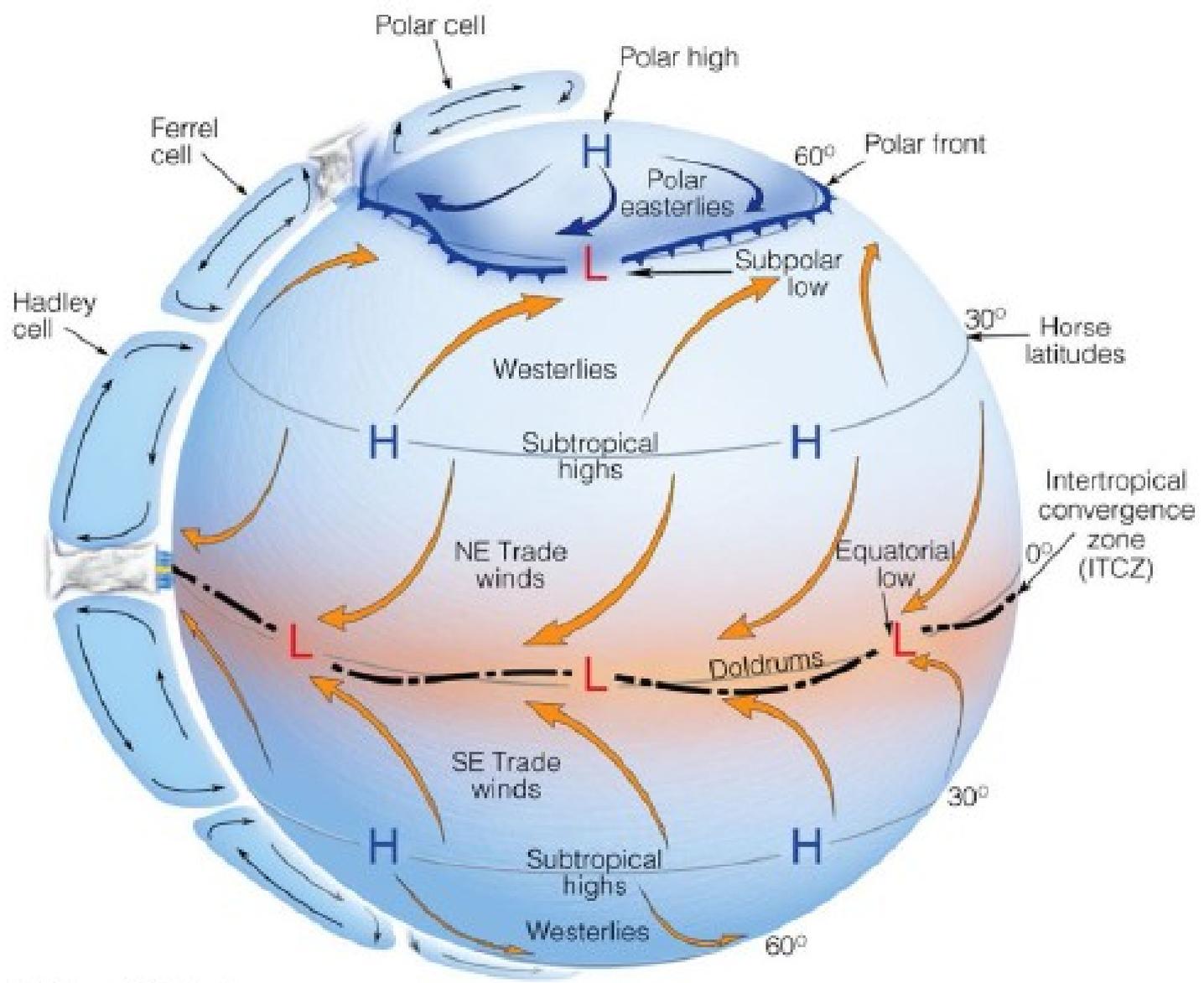
La superficie terrestre è sferica (**andando verso i poli si riducono i volumi**)
- a 30° lat la densità dell'aria in quota è tale che scende verso il suolo e forma le **subtropical highs** (**zone desertiche**) al suolo le masse d'aria si muovono:

verso l'equatore (**trade winds**)
verso i poli (**westerlies**)

Dai poli verso l'equatore l'aria converge incontrando i westerlies alle medie latitudini

Il flusso solare è sempre allo zenit sull'equatore

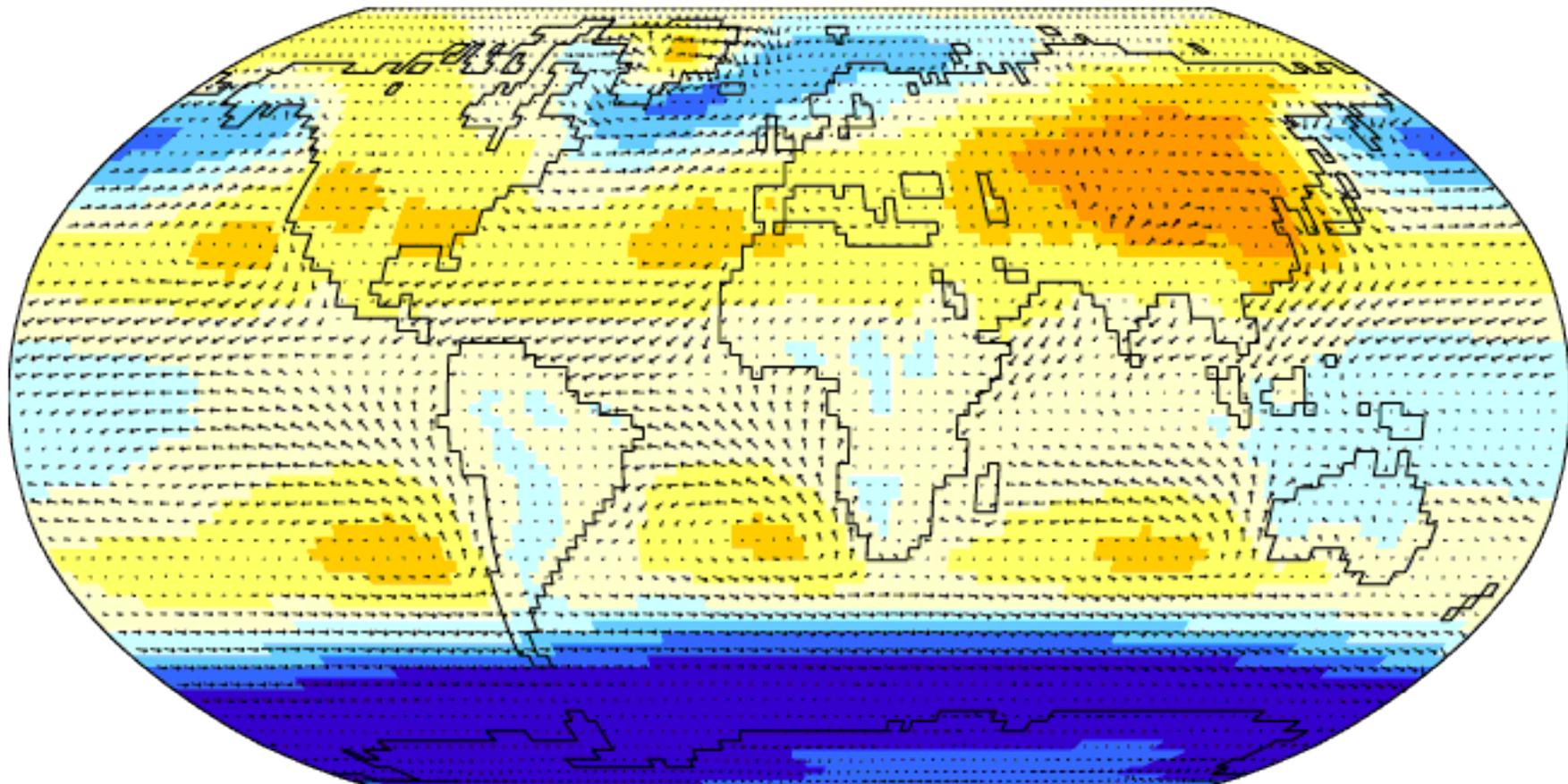
Circolazione planetaria generale a tre celle (schema I)



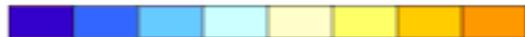
Circolazione planetaria generale e campo barico alla superficie del pianeta

Sea-Level Pressure and Surface Winds

Dec



995 1000 1005 1010 1015 1020 1025 mb



1 2 4 8 16 32 m/sec

Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

Definizione di fronte atmosferico

Come conseguenza della diversa distribuzione energetica, nella troposfera ci sono delle aree in cui sono presenti dei forti gradienti:

- Gradienti di temperatura
- Gradienti di pressione
- Gradienti di umidità

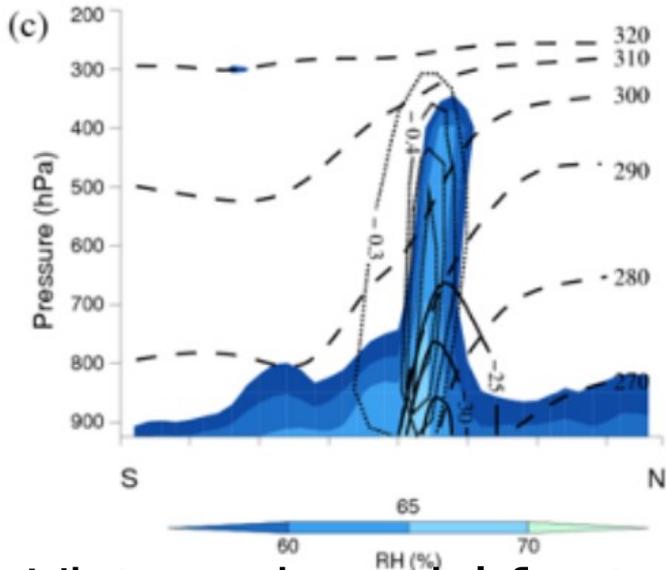
gradienti di densità

Il concetto di fronte si è sviluppato a partire dall'esperienza osservativa.



“Un fronte atmosferico è una regione della troposfera in cui è presente un forte gradiente dei principali campi atmosferici”

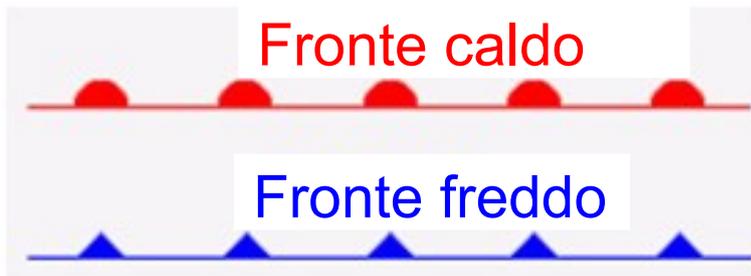
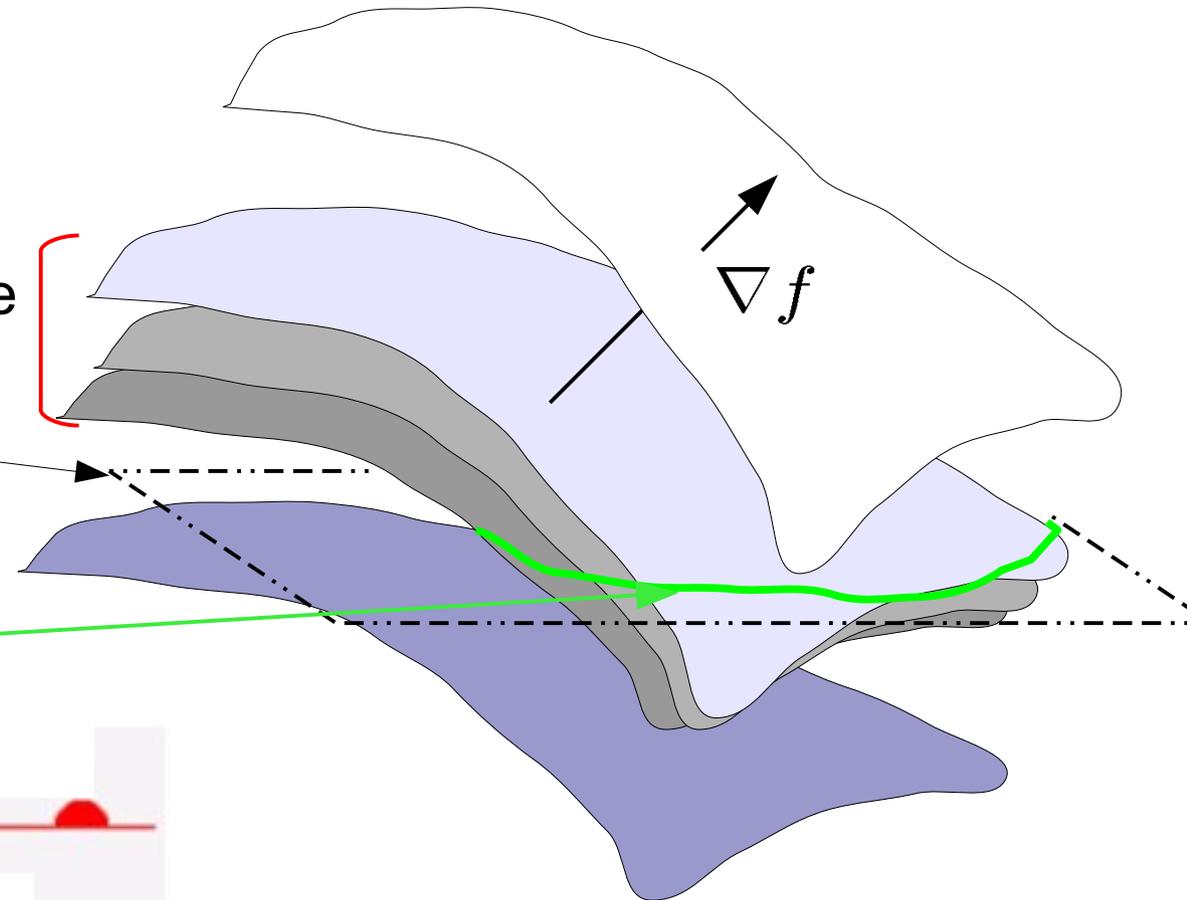
Il fronte atmosferico dalla definizione 3D alla linea frontale



L'intersezione del fronte con un'altra superficie:

- superficie isobarica
 - superficie terrestre
- genera **la linea del fronte**

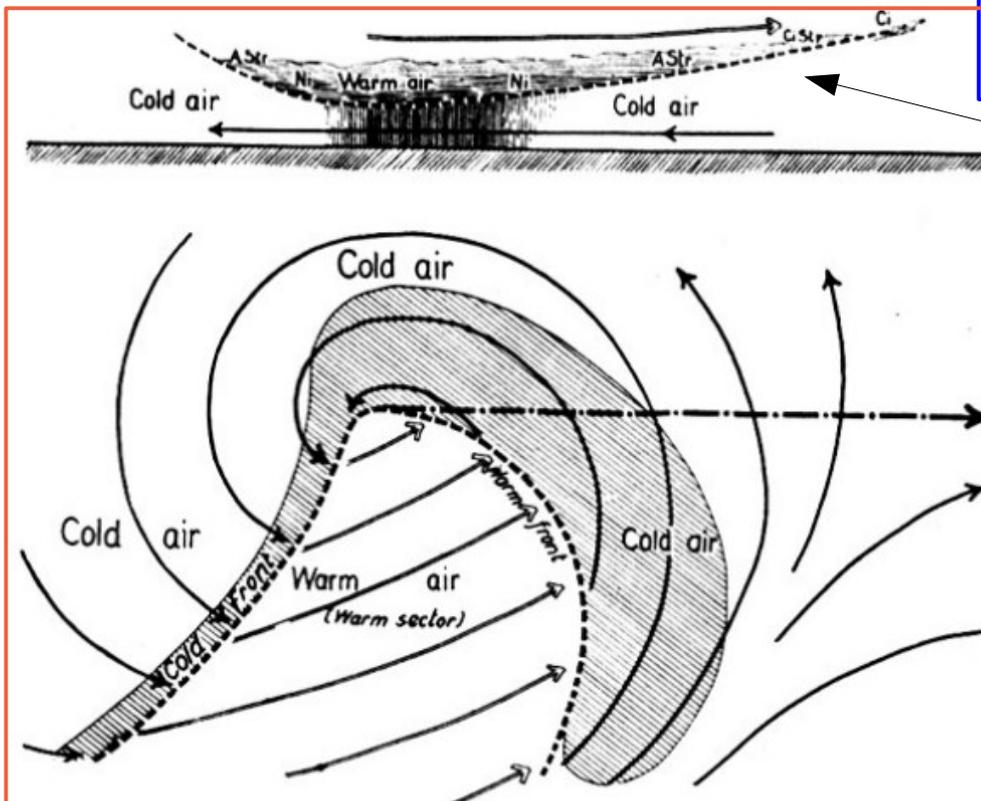
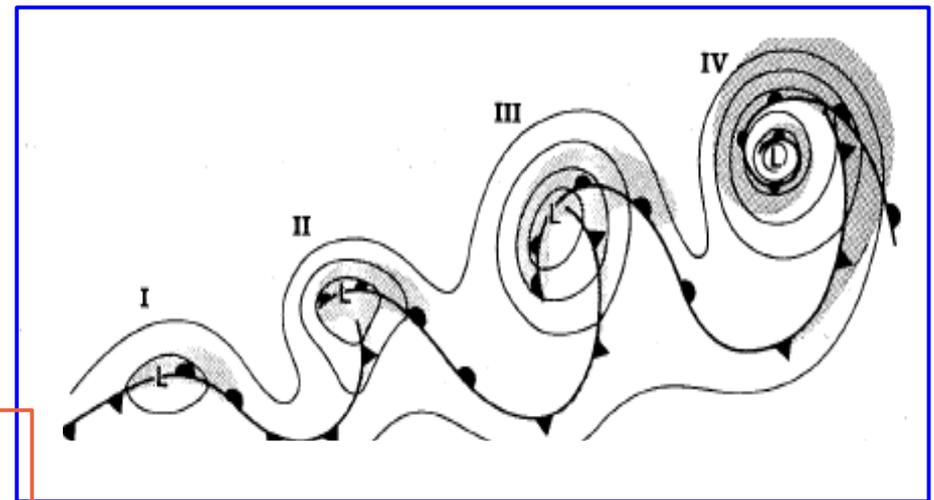
Fronte



Esempi di fronte atmosferico

Un disturbo baroclinico si sviluppa in un ciclone extra-tropicale con fronte caldo e fronte freddo

Evoluzione dei fronti in un
ciclone extratropicale



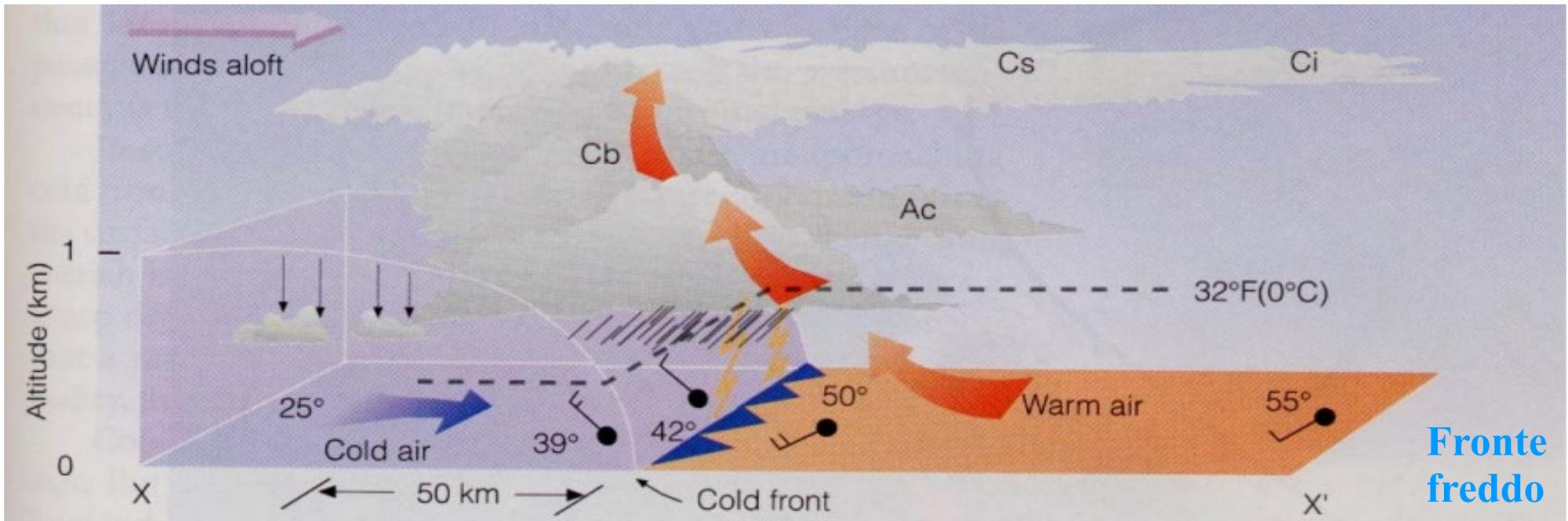
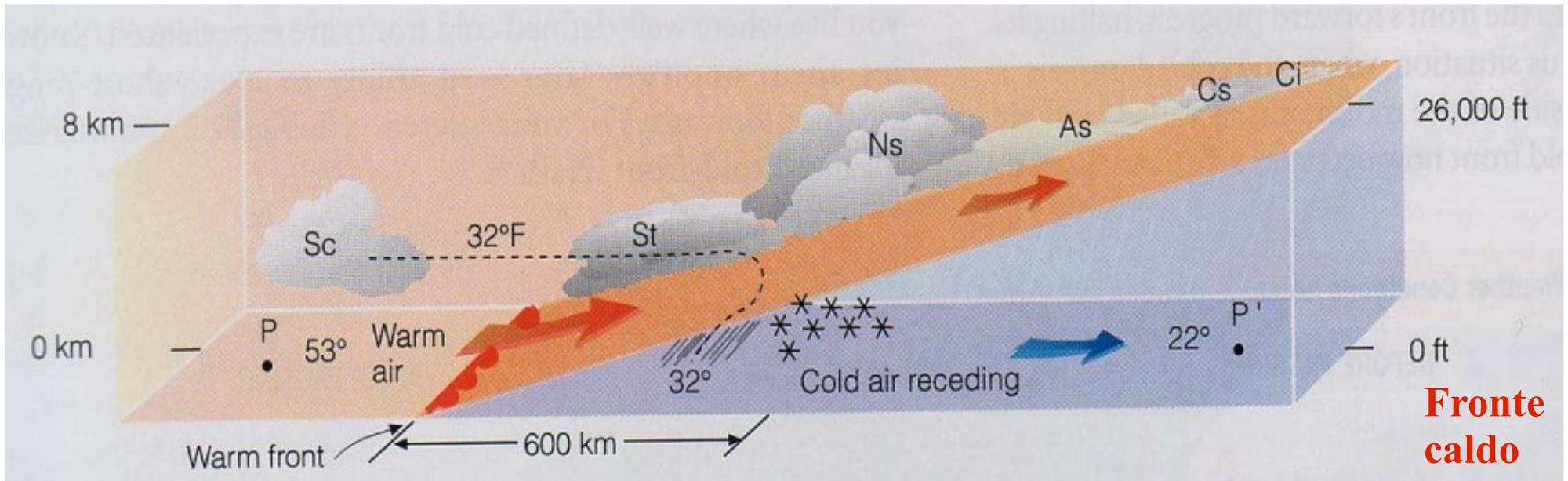
Tipi di nubi

Settori caldo e freddo di un
ciclone extratropicale

Sezione verticale del fronte caldo e del fronte freddo

Temperature in gradi Fahrenheit

$$^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) / 1,8$$



Le principali strutture dinamiche presenti in atmosfera – visione in verticale

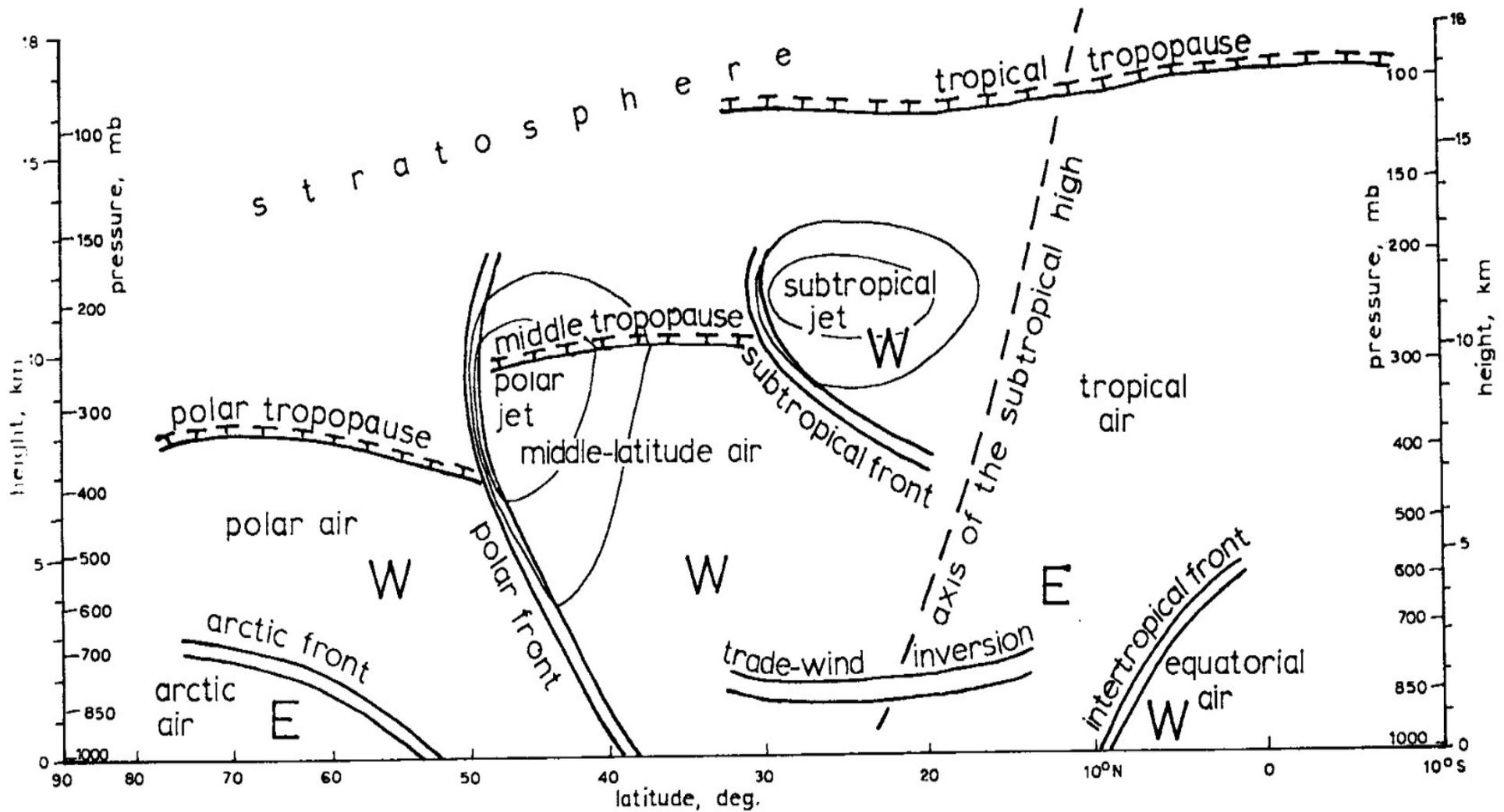


Figura tratta da Weather analysis, 1994, Djuric D., Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall, 304 pp.

Le principali strutture dinamiche presenti in atmosfera – visione areale

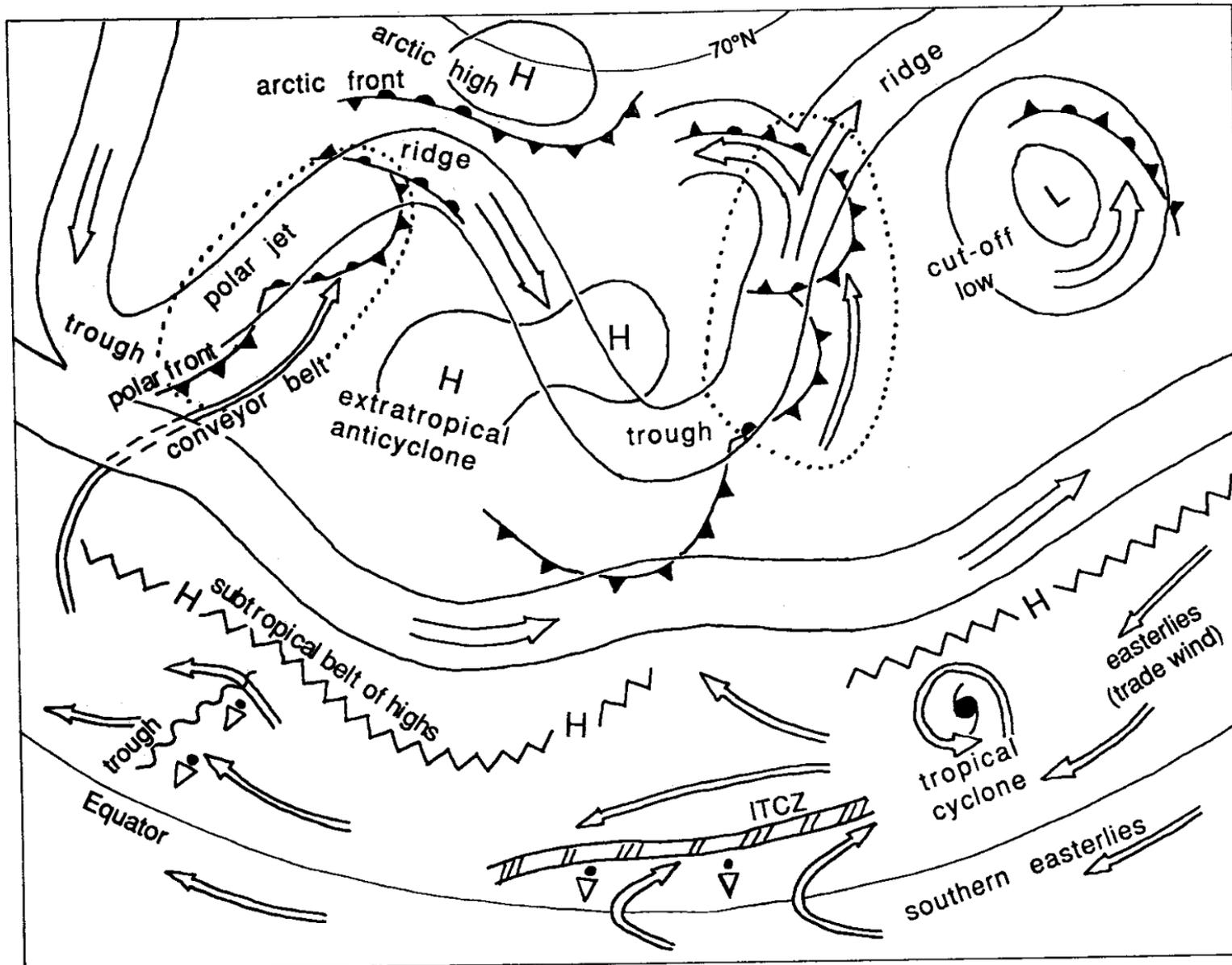
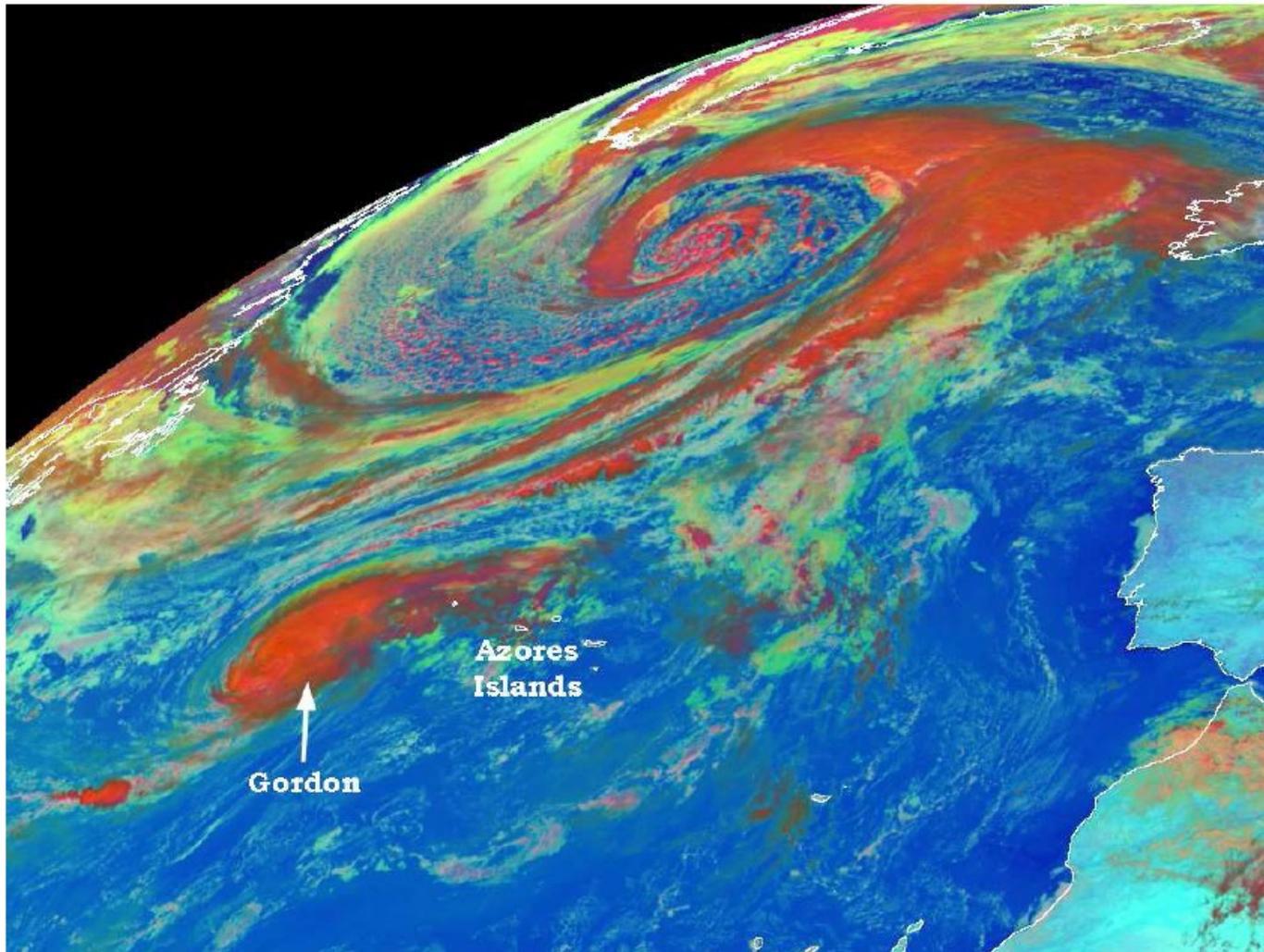


Figura tratta da Weather analysis, 1994, Djuric D., Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall, 304 pp.

Strutture atmosferiche alla scala sinottica



Nella troposfera si manifestano vortici a diverse scale spaziali. Lo scopo ultimo di questi vortici è quello di trasportare quanto più efficacemente energia contribuendo a mantenere il sistema Terra in equilibrio termico e dinamico.

FIGURE 14. The tropical cyclone Gordon seen from METEOSAT on September 19, 2006 12 UTC. Compare it with the extratropical cyclone present in the Northern Atlantic. Sizes, time-life, trajectories and evolution are different because their dynamics is different, copyright 2006 EU-METSAT

Alcuni suggerimenti su come studiare e prepararsi all'esame: obiettivi formativi

D1. Conoscenza e capacità di comprensione

Le informazioni ed i metodi d'indagine acquisiti durante il corso permetteranno la comprensione dei legami intimi esistenti tra i principi fisici fondamentali e i processi atmosferici alle diverse scale spazio-temporali, raggiungendo un livello di approfondimento adeguato ad individuare le criticità che determinano le questioni ancora aperte dell'approccio fisico alla descrizione e alla previsione dei fenomeni atmosferici e all'evoluzione del clima terrestre.

D2. Conoscenza e capacità di comprensione applicate

La conoscenza e l'applicazione degli strumenti matematici utilizzati durante il corso, assieme alle indicazioni sull'efficacia dell'approccio computazionale per superare i limiti dell'uso dei soli metodi analitici, consentiranno lo sviluppo di modelli quantitativi dei fenomeni atmosferici a diverse scale spaziali e temporali, con livelli di approssimazione e dettaglio crescente, in funzione del livello di accuratezza richiesto, il quale viene messo in relazione all'aderenza del modello con realtà, sulla base delle misure e delle osservazioni disponibili.

D3. Autonomia di giudizio

Il metodo di acquisizione delle informazioni e dei concetti utilizzato durante il corso ha l'obiettivo di stimolare l'approccio critico all'apprendimento di nuova conoscenza. Nello specifico, sarà esercitata la ricerca delle eventuali incongruenze concettuali presenti all'interno dei modelli appresi e della aderenza dei risultati prodotti con le evidenze sperimentali. Anche la rivisitazione del percorso storico, che ha portato ai fondamentali della fisica dell'atmosfera e allo sviluppo di modelli consolidati di processi atmosferici, contribuirà a maturare un punto di vista libero da preconcetti e disposto alla formulazione di giudizi autonomi.

D4. Abilità comunicative

Seguendo il corso, si avrà modo di apprendere l'importanza dell'esposizione e della sua forma nella condivisione dei risultati scientifici e nella manifestazione delle proprie convinzioni nel contesto della comunità scientifica e di un pubblico non specialistico. I concetti di rilevanza della prospettiva da adottare e di contenuto informativo, per trasmettere efficacemente il sapere acquisito, faranno parte del bagaglio formativo dello studente.

D5. Capacità di apprendere

Al termine del corso, le conoscenze acquisite e il metodo di indagine sperimentato, analizzando i molteplici modelli sviluppati, permetteranno allo studente di mutuare i medesimi approcci verso indagini autonome su argomenti individuati secondo la propria convinzione personale dell'importanza scientifica dell'investigazione o dell'opportunità del completamento della propria formazione. In tale contesto saranno parte del bagaglio metodologico acquisto anche le valutazioni aspettative/sostenibilità del percorso di apprendimento potenzialmente perseguibile.

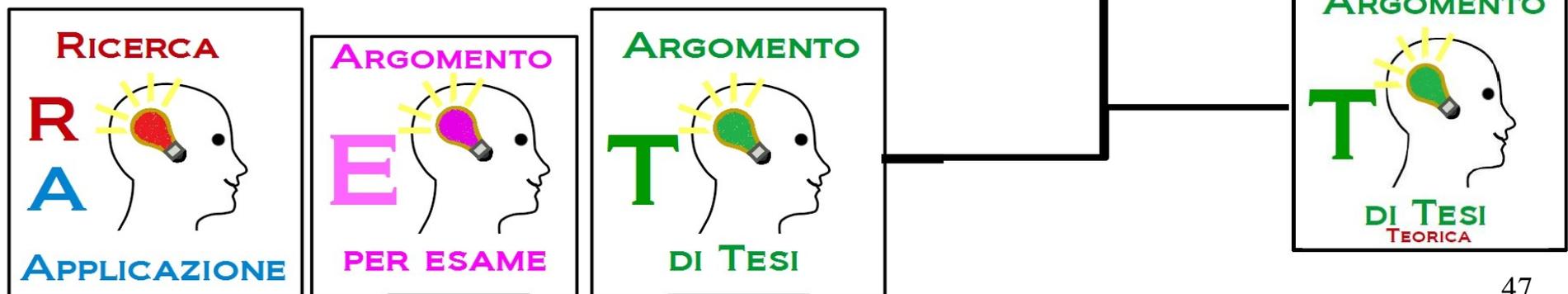
Alcuni suggerimenti su come studiare e prepararsi all'esame: svolgimento esame

L'esame è orale ed inizia con l'esposizione di un argomento a scelta dello studente che riguarda un approfondimento o una riflessione maturata a partire da un argomento trattato a lezione.

L'argomento va comunicato almeno una settimana prima dell'esame al docente per l'approvazione (dgjaiotti@units.it). la presentazione può avere una durata massima di 15 minuti.

Il resto dell'esame consiste in domande su tutto il programma trattato a lezione.

Nelle diapositive utilizzate per le lezioni, sono presenti delle icone che hanno lo scopo di richiamare l'attenzione dello studente



Bibliografia

Perché dedicarsi allo studio dell'atmosfera terrestre

[1] Four golden lessons for young researchers, 2003, Weinberg S., Nature vol 426, Nov, 26 2003, page 389.

Caratteristiche generali dell'atmosfera terrestre

[1] Weather analysis, 1994, Djuric D., Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall, 304 pp. - disponibile nella Biblioteca Tecnico Scientifica (Collocazione BS/04./M/0017). Fare riferimento alle pagine 3 - 9.

[2] Principles of Atmospheric Physics and Chemistry, 1995, Goody R. M., Oxford, University Press - 324 pp disponibile all'ICTP (551.51 GOO). Fare riferimento alle pagine: 1 - 7.

[3] Fundamentals of physics and chemistry of the atmosphere, 2001, Visconti G. - Berlin, Springer-Verlag - 593 pp disponibile all'ICTP (551.51 VIS). Fare riferimento alle pagine: 49 - 52, 500 - 505.

[4] Atmosphere, ocean, and climate dynamics: an introductory text, 2008, Marshal J e Plumb A. R., Academic Press, 319 pp. (collocazione BST BS/04./M/0014. Fare riferimento al capitolo 1.

[5] Climate Change 2007 Synthesis Report, An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Fourth Assessment Report. 2007, IPCC, IPCC Plenary XXVII (Valencia, Spain, 12-17 November 2007).