

# FISICA DELL'ATMOSFERA

L'atmosfera è l' "involucro" gassoso di un corpo celeste, confinato a causa dell'attrazione gravitazionale.

La Fisica dell'atmosfera si interessa di tutti i fenomeni fisici che caratterizzano il sistema atmosfera.

L'atmosfera è una parte di un sistema molto complesso, il "sistema Terra" che comprende anche l'idrosfera, la criosfera, la biosfera e litosfera.

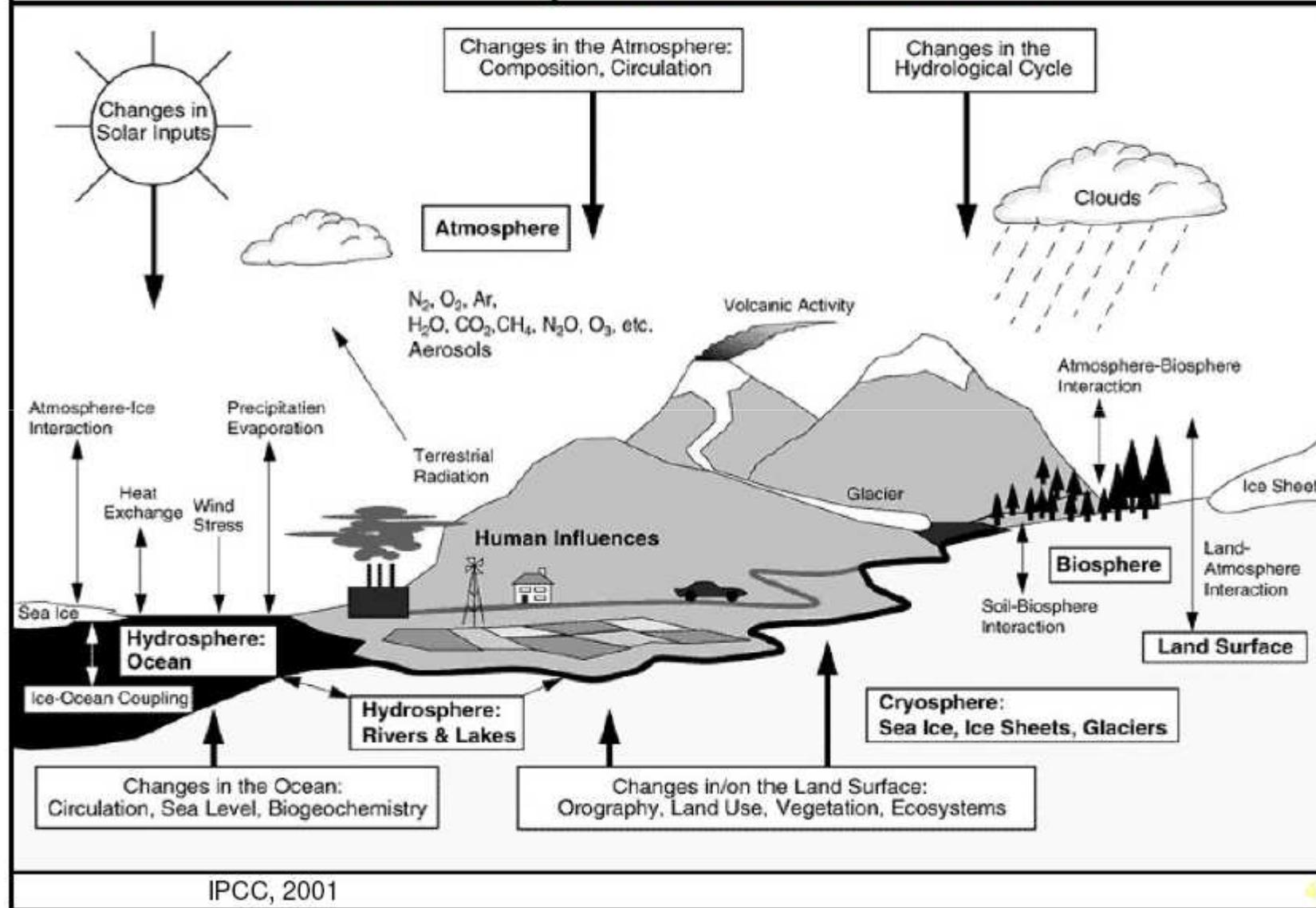
Di conseguenza la fisica dell'atmosfera è parte dell'Earth System Sciences.



Ci sono molteplici aspetti della fisica che rientrano nella scienza dell'atmosfera:

- Termodinamica (transizioni di fase, processi adiabatici, ...)
- Meccanica quantistica (interazioni radiazione-materia, processi chimici)
- Idrodinamica (equazioni del moto di un fluido)
- Meccanica classica (sistemi inerziali, forze apparenti)
- Fenomeni di trasporto (diffusione e turbolenza)

# Earth system sciences



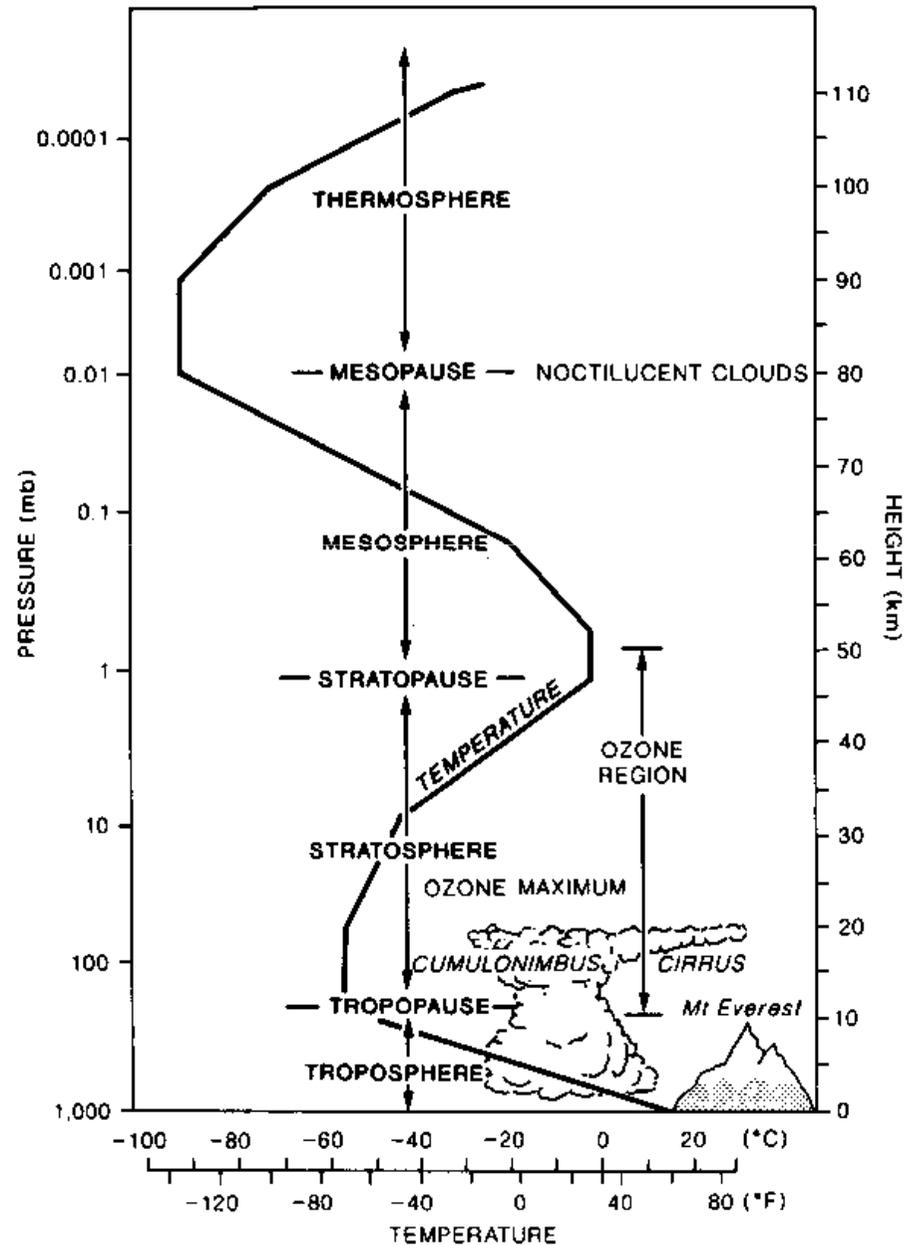
# STRUTTURA dell'ATMOSFERA

Classificazione in base a  $dT/dz$

Omosfera o turbosfera:  $z < 100$  km

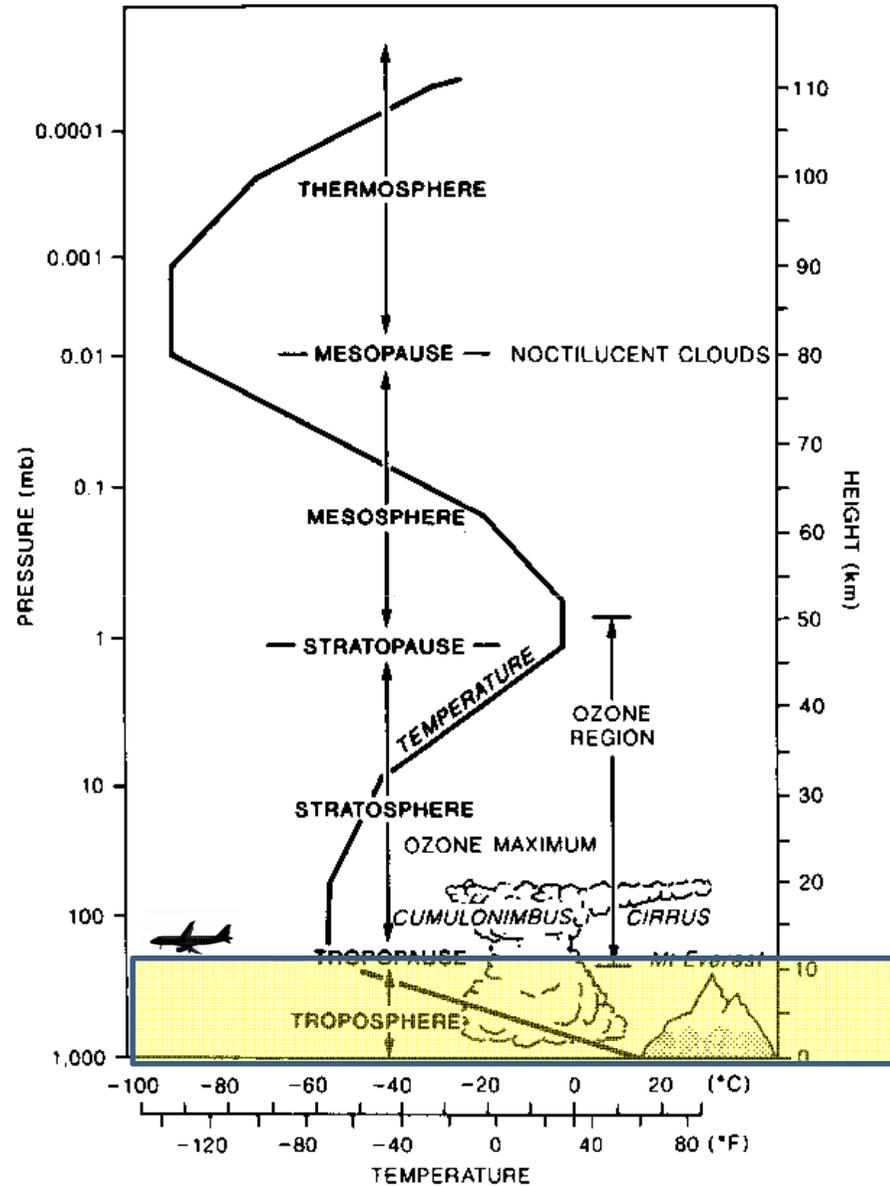
Eterosfera:  $z > 100$  km

- Troposfera
- Stratosfera
- Mesosfera
- Termosfera



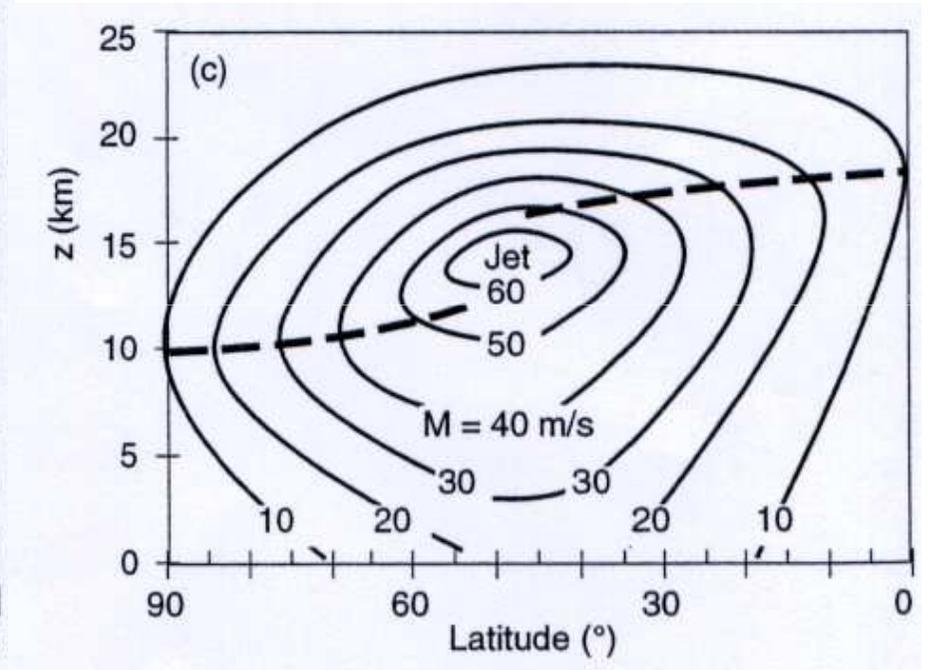
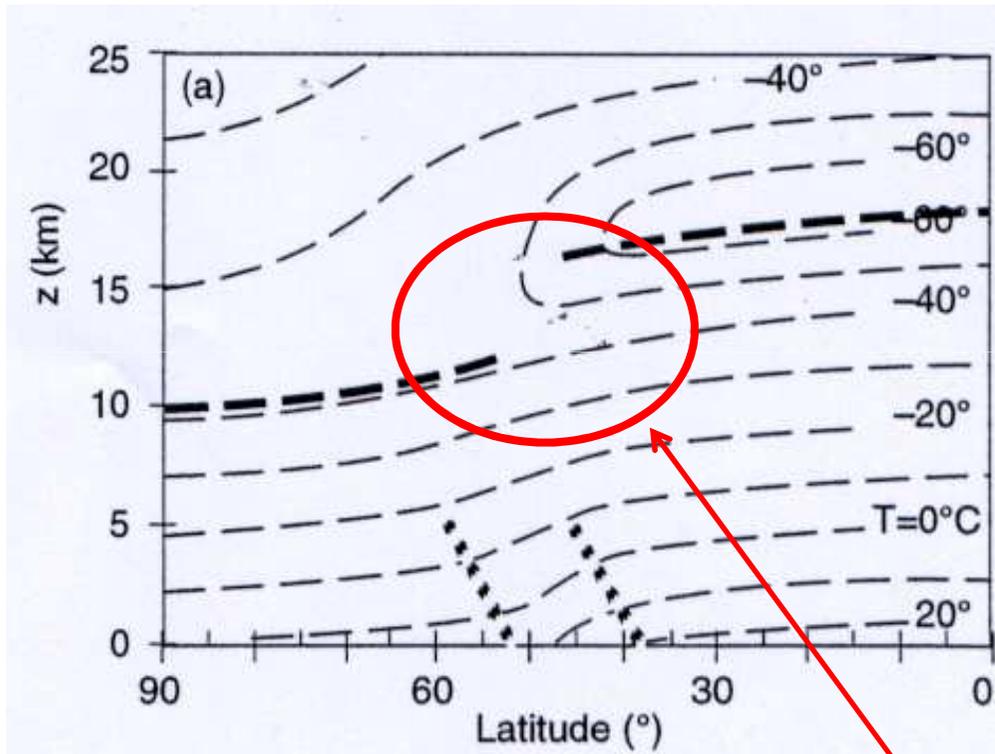
# TROPOSFERA

- Spessore  $\approx 10$  km
- $dT/dz \approx 6.5$  °C/1km (mediamente)
- inversioni termiche
- 80% massa atmosfera
- Quasi tutto il vapore acqueo
- Sede dei fenomeni meteo
- Aerosol, tempo di residenza basso
- Estensione verticale fz.ne latitudine
- Contiene il PBL



# TROPOSFERA

- Estensione verticale: 7-8 km (poli); 10-12 km (medie latitudini); 16-18 km (tropici)
- Limitata al top da inversione termica (tropopausa) (anvil dei Cb)



-Tropopausa caratterizzata da una discontinuità in corrispondenza della quale si sviluppa il jet stream

Notare la variazione di quota stagionale della tropopausa

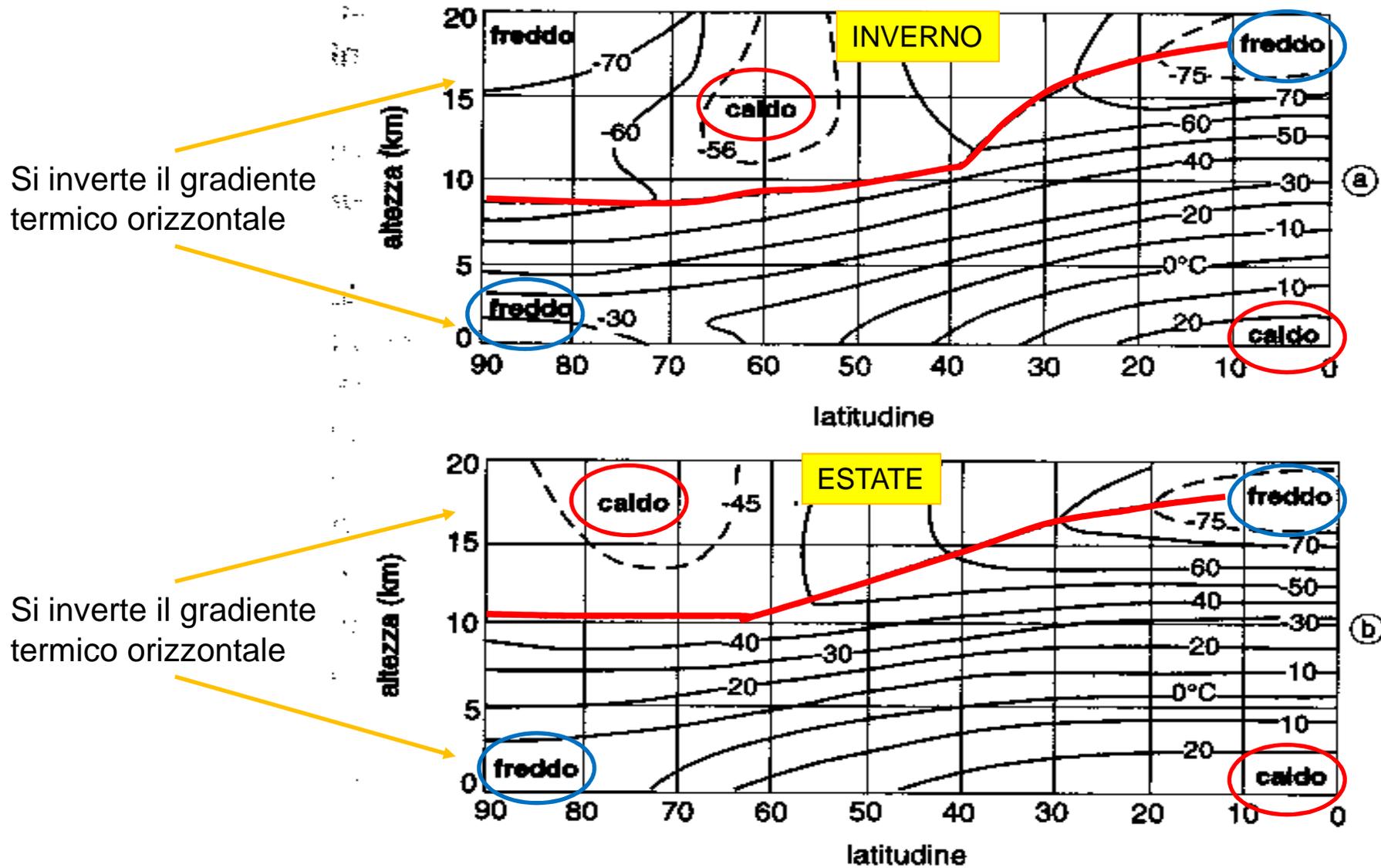


Figura 2.5 – Discontinuità termiche in corrispondenza della tropopausa in inverno (a) e in estate (b).

# PLANET BOUNDARY LAYER (PBL)

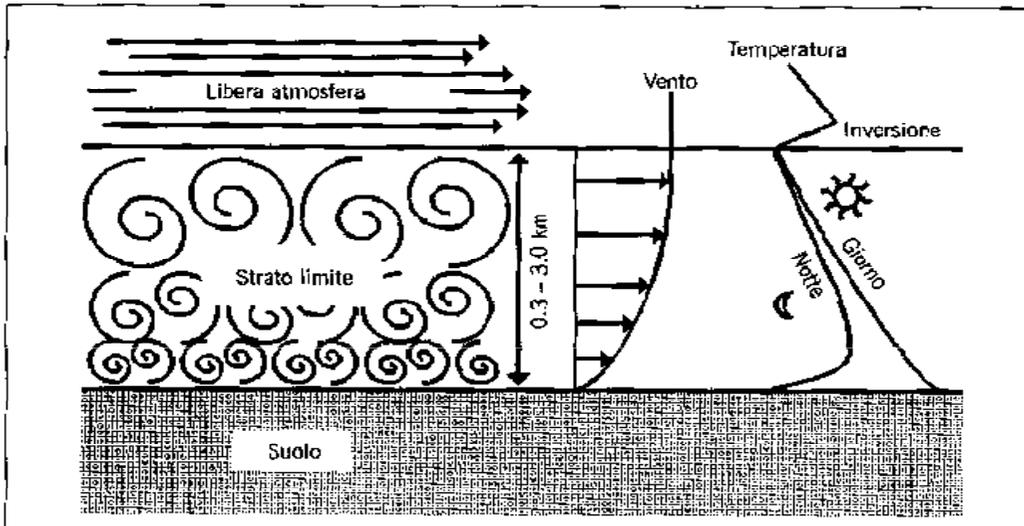
Il PBL è lo strato di atmosfera vicino alla superficie terrestre che risente della presenza del suolo e che risponde al forcing esercitato dalla superficie con tempi di scala dell'ordine di un'ora o meno

Forcing: attrito, evaporazione/traspirazione, trasferimento di calore, emissione di inquinanti, modificazioni del flusso

PBL

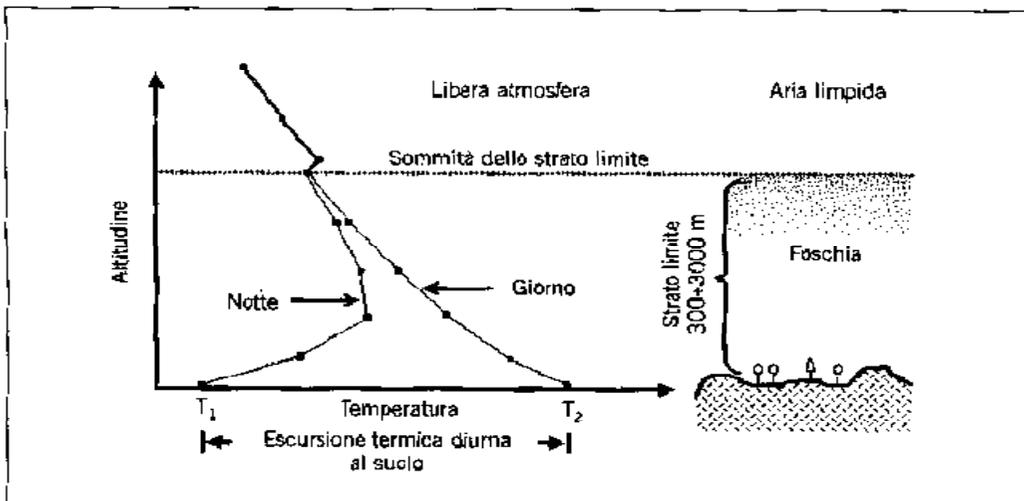
Laminar BL

Turbulent Surface Layer (SL)



**Figura 5.2**

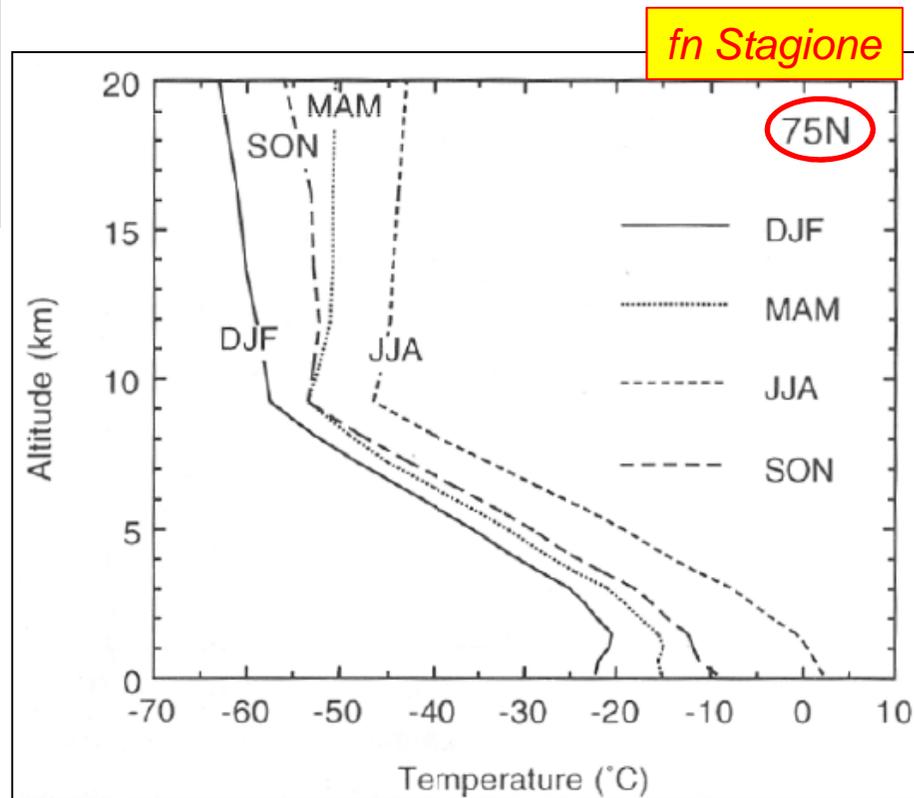
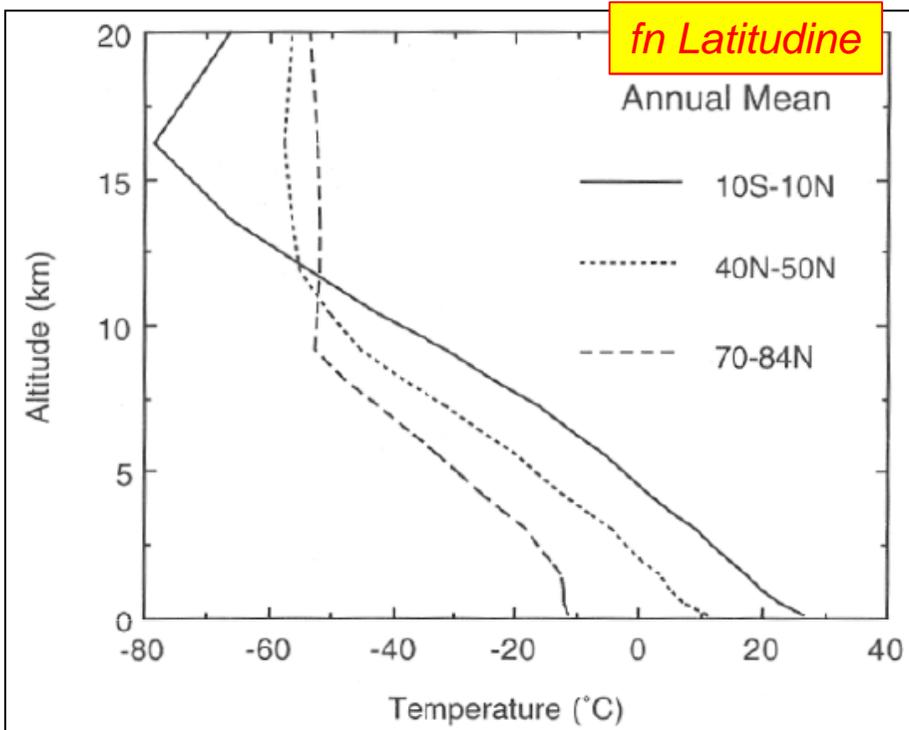
Lo strato limite dell'atmosfera che va dal suolo fino a 0.3-3.0 km di quota. Essc è caratterizzato da un aumento della velocità del vento con la quota e da una grande escursione diurna della temperatura.



**Figura 5.3**

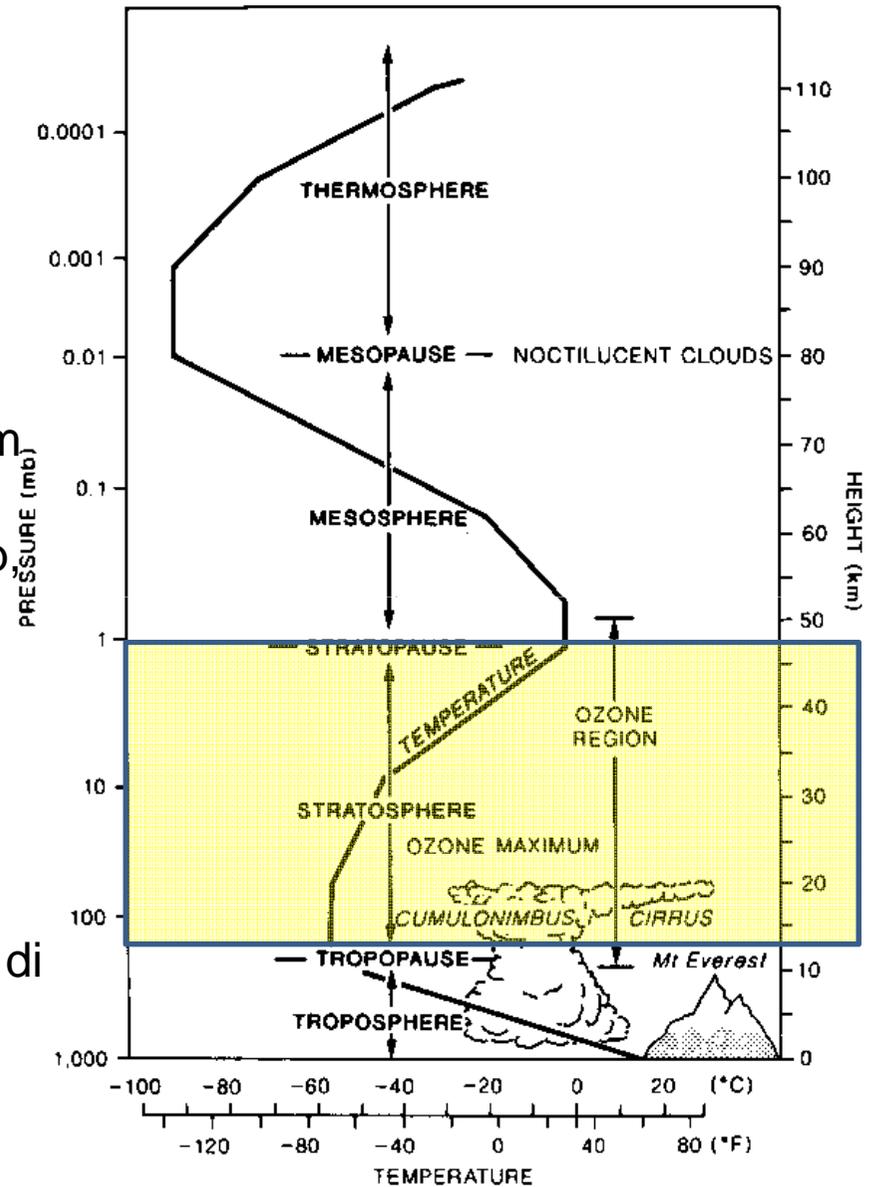
Escursione diurna della temperatura nello strato limite. In condizioni di cielo sereno o poco nuvoloso l'escursione diurna della temperatura è tanto minore quanto più si allontana dal suolo e praticamente zero oltre la quota della sommità dello strato limite (nella libera atmosfera). Sulle vette montane l'escursione diurna è molto piccola perché i moti atmosferici determinano un ricambio d'aria con un ambiente privo d'escursione.

# VARIAZIONI DEL PROFILO DI TEMPERATURA IN TROPOSFERA



# STRATOSFERA

- T costante (10 km tropopausa) poi aumenta
- $dT/dz > 0 \rightarrow$  mixing inibito
- Contiene quasi tutto l'Ozono, max tra 15-35 km
- $O_3$  assorbe radiazione uv, riscaldamento al top,  $T \approx 0^\circ C$
- Assorbimento uv – reazioni di equilibrio
- T min in basso ( $-50 \div -70^\circ C$ )
- Il 99.9% della massa dell'atmosfera si trova al di sotto della stratopausa



## STRATOSFERA

- Circolazione zonale (Estate E - Inverno W)
  - Inversione delle correnti
  - Strat warming
- 
- Brusche variazioni di concentrazione di vapore e ozono tra troposfera e stratosfera
  - Tempi di residenza lunghi (tracce di eruzioni o esperimenti nucleari)

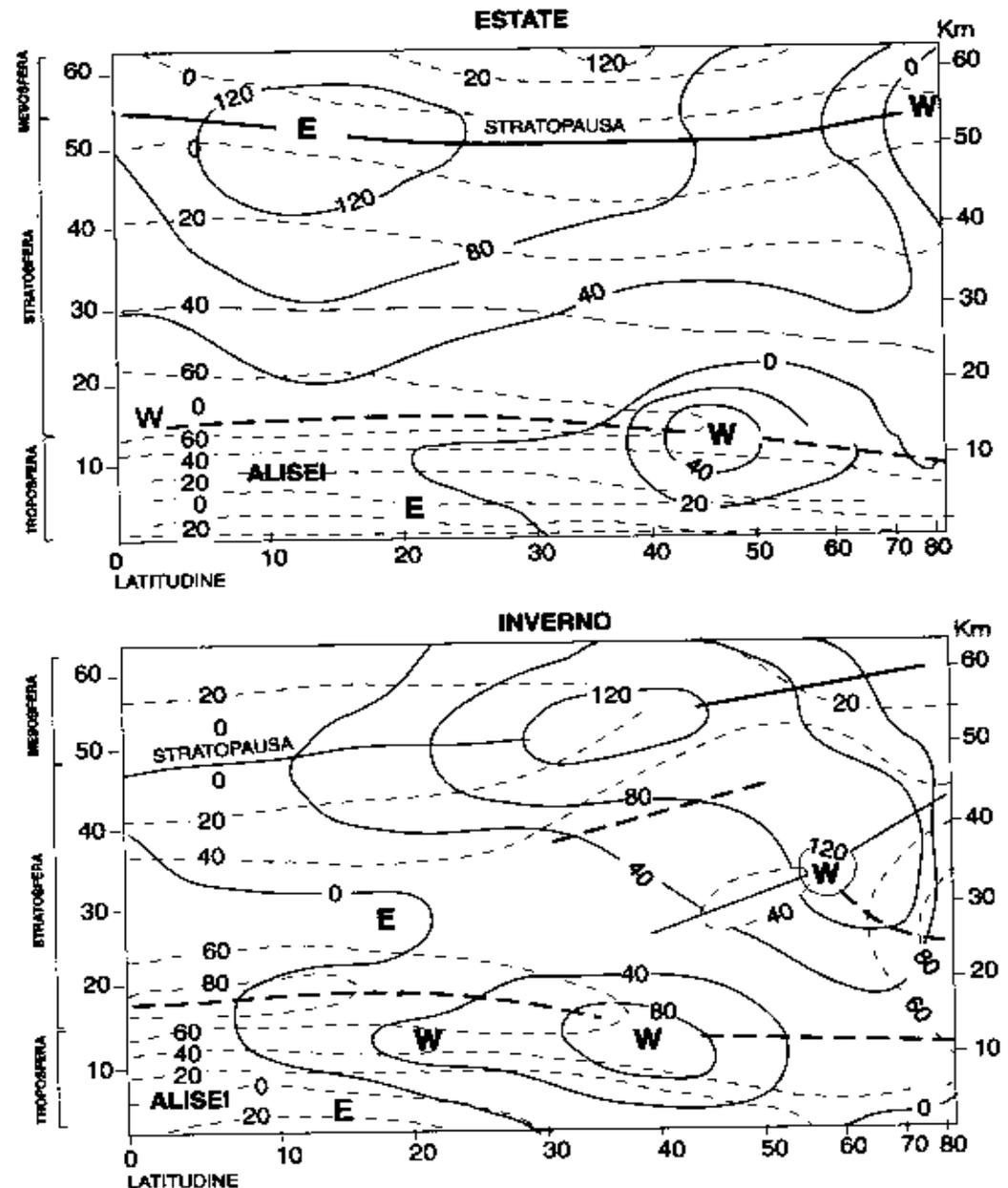


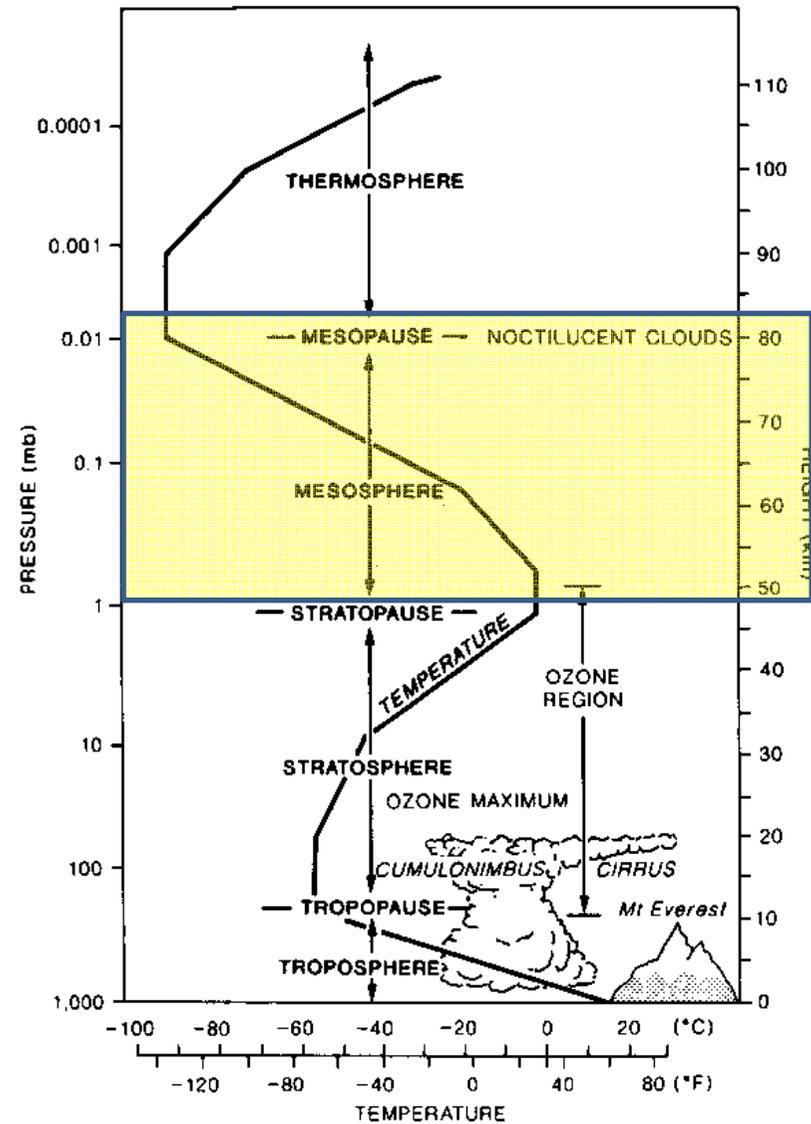
Figura 7.11 – Inversione nella direzione dei venti stratosferici dall'estate all'inverno. W = provenienza da ovest; E = provenienza da est.

Nacreous cloud (nubi di madre perla): nubi stratosferiche (regioni polari)



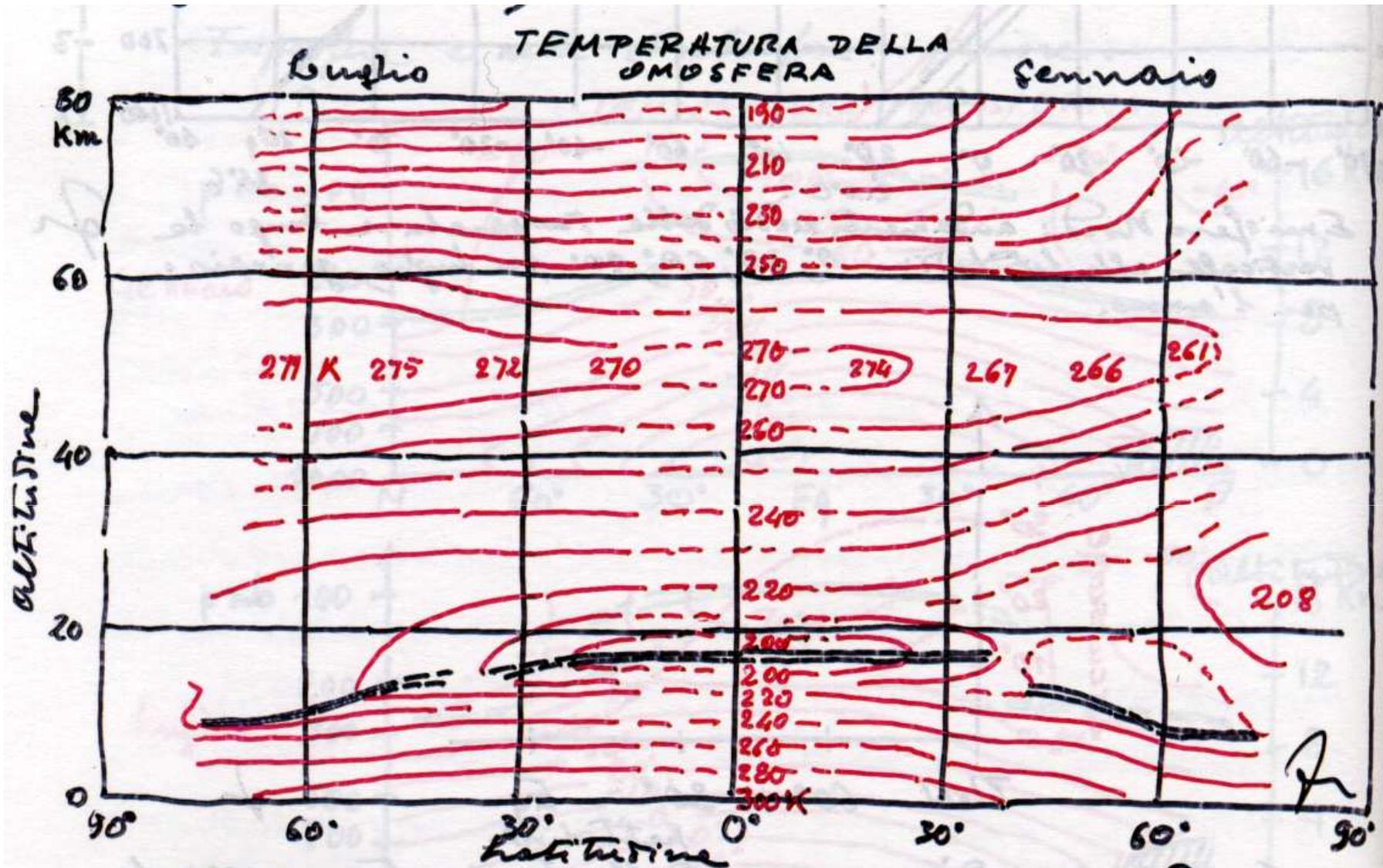
# MESOSFERA

- Stratopausa, max T
- Mesosfera = media atmosfera, fino a circa 80 km
- T cala con la quota:  $dT/dz < 0$
- Min T alla mesopausa  $\approx -130^{\circ}\text{C}$
- Riscaldamento da strato di ozono
- Favorito rimescolamento verticale
- Moti convettivi, tracce di vapore -> nubi nottilucenti
- Mesopausa: T aumenta per assorbimento da parte di  $\text{O}_2$  e  $\text{O}_3$



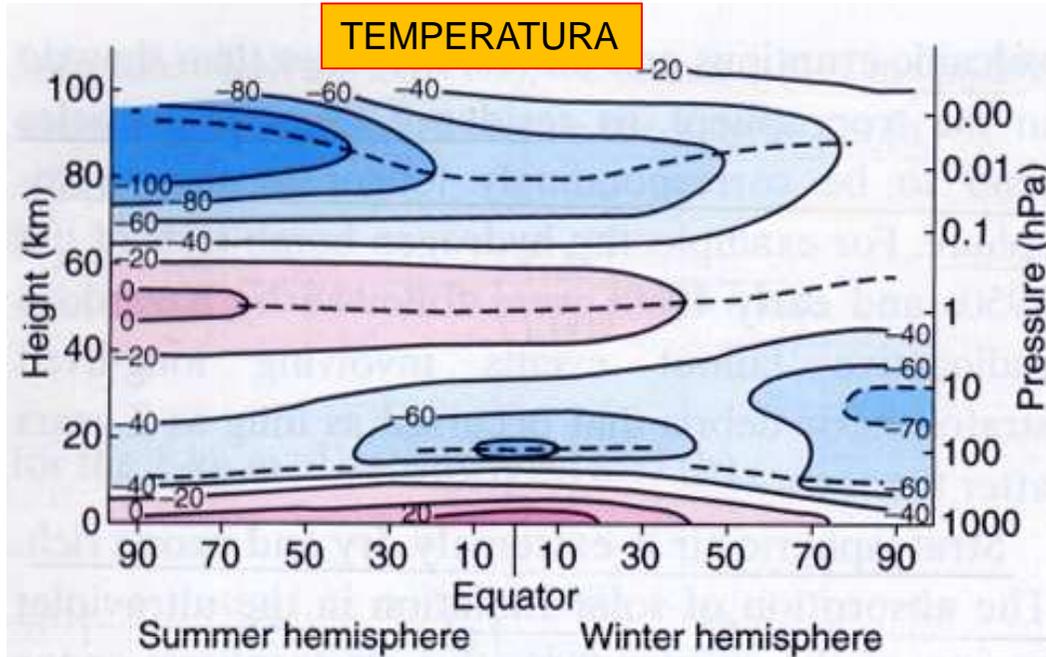
Nubi nottilucenti in mesosfera (zone polari)





Tentativo U.S.A. di modello standard per l'andamento della temperatura per tutta l'atmosfera (T in K)

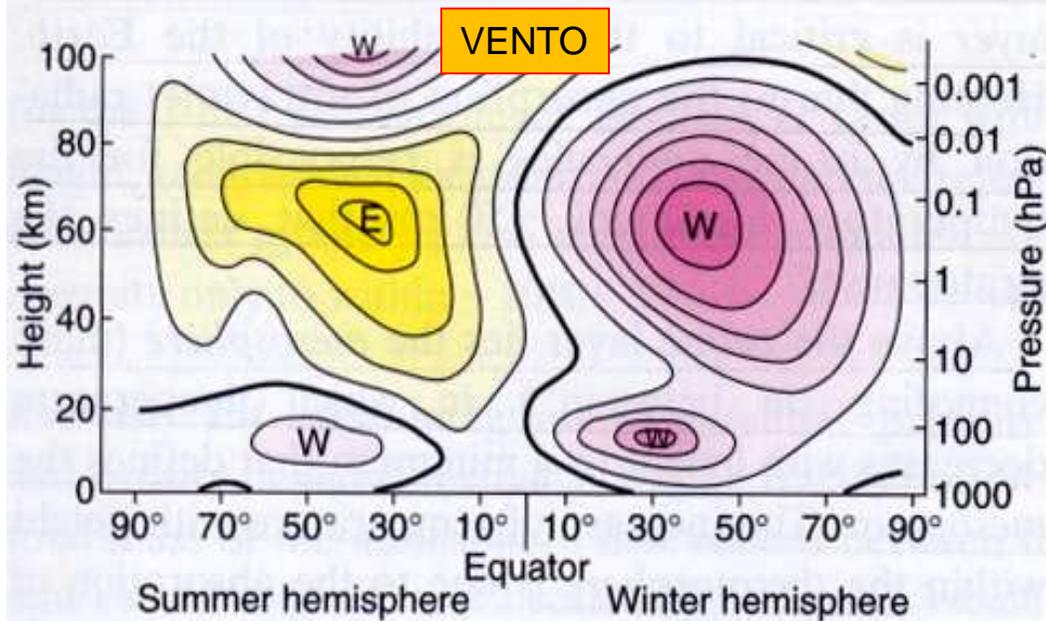
# Visione complessiva dello stato medio (climatologico) della omosfera



## Troposfera:

- T cala con la latitudine (max gradiente in inverno)
- tropopausa (quota e discontinuità, più fredda all'equatore)
- jet stream (max e più a sud in inverno)

## Stratopausa e mesopausa

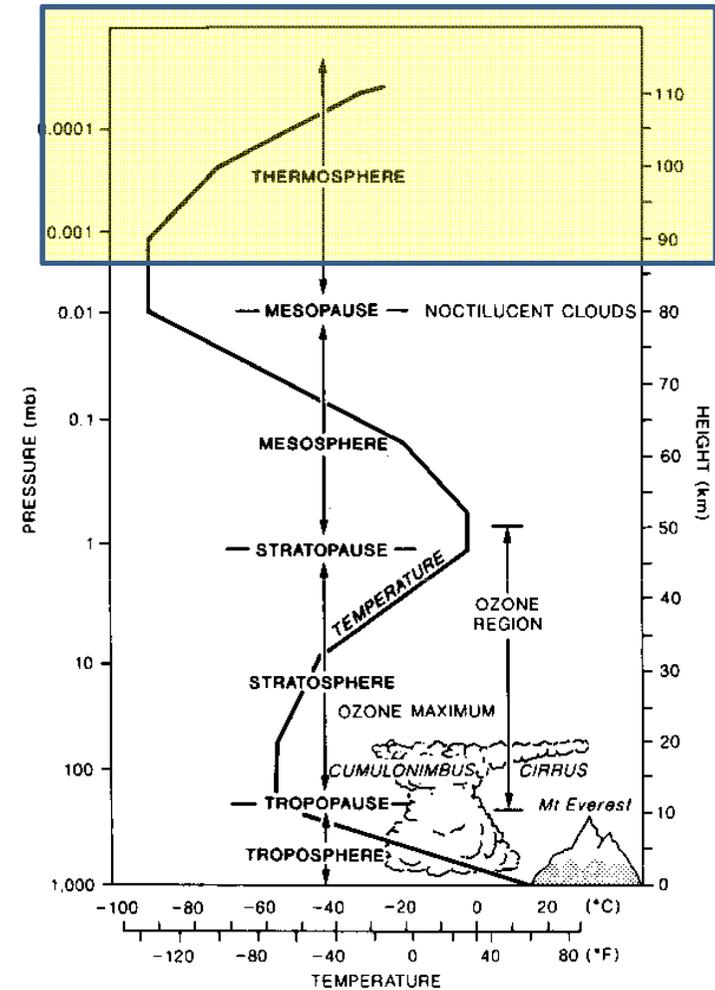


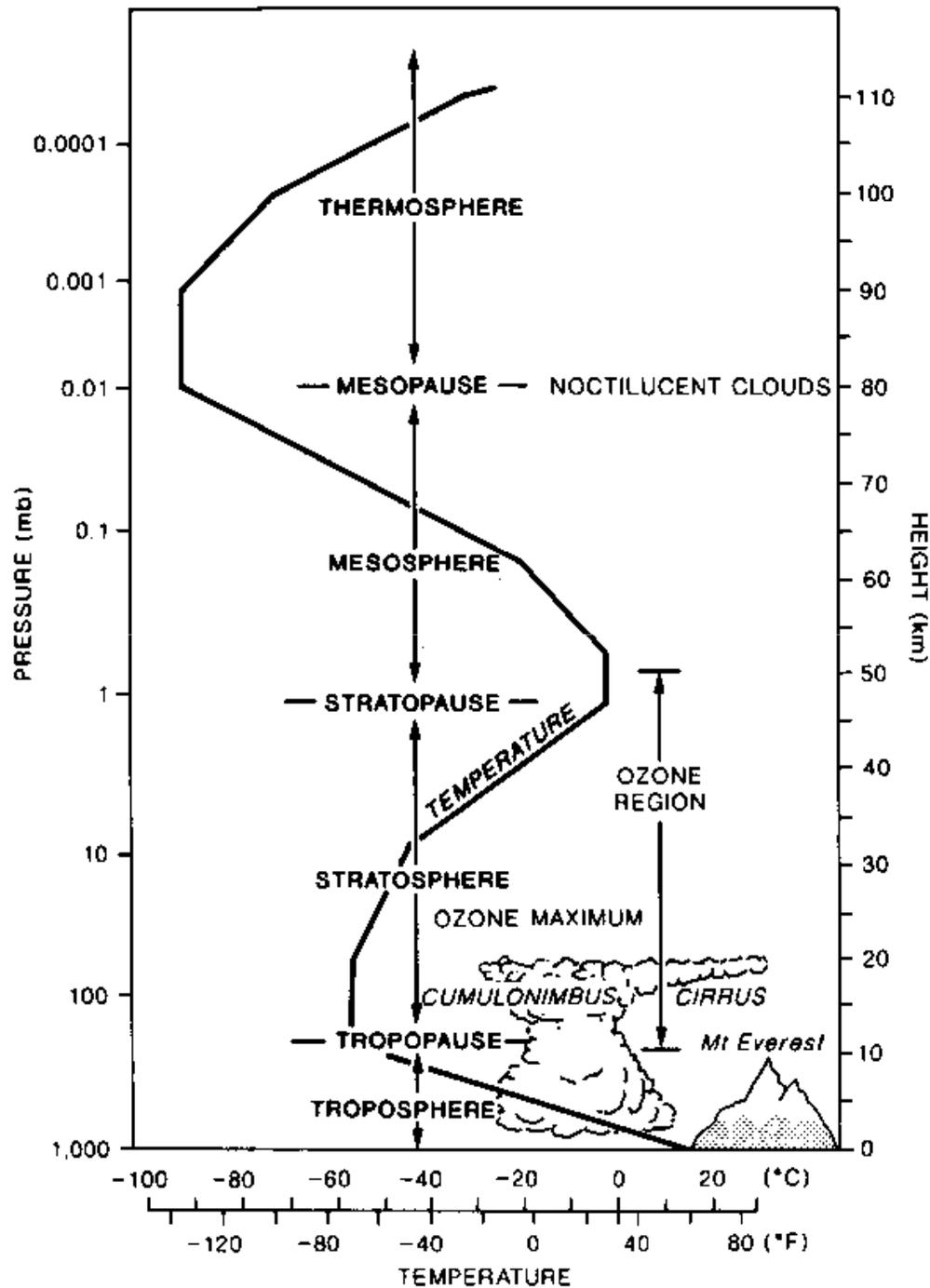
## Jet stream

- troposferico (sempre da ovest)
- mesosferico (si inverte stagionalmente)
- correnti zonali in stratosfera con inversione stagionale

# TERMOSFERA

- Eterosfera
- Si estende per molte centinaia di km
- Fluttuazioni giornaliere di T notevoli
- T varia a causa dell'attività solare
- T aumenta per assorbimento da parte di  $N_2$  e  $O_2$  (fotodissociazione)
- Ionizzazione, aurora boreale
- Sopra ai 200 km ossigeno atomico

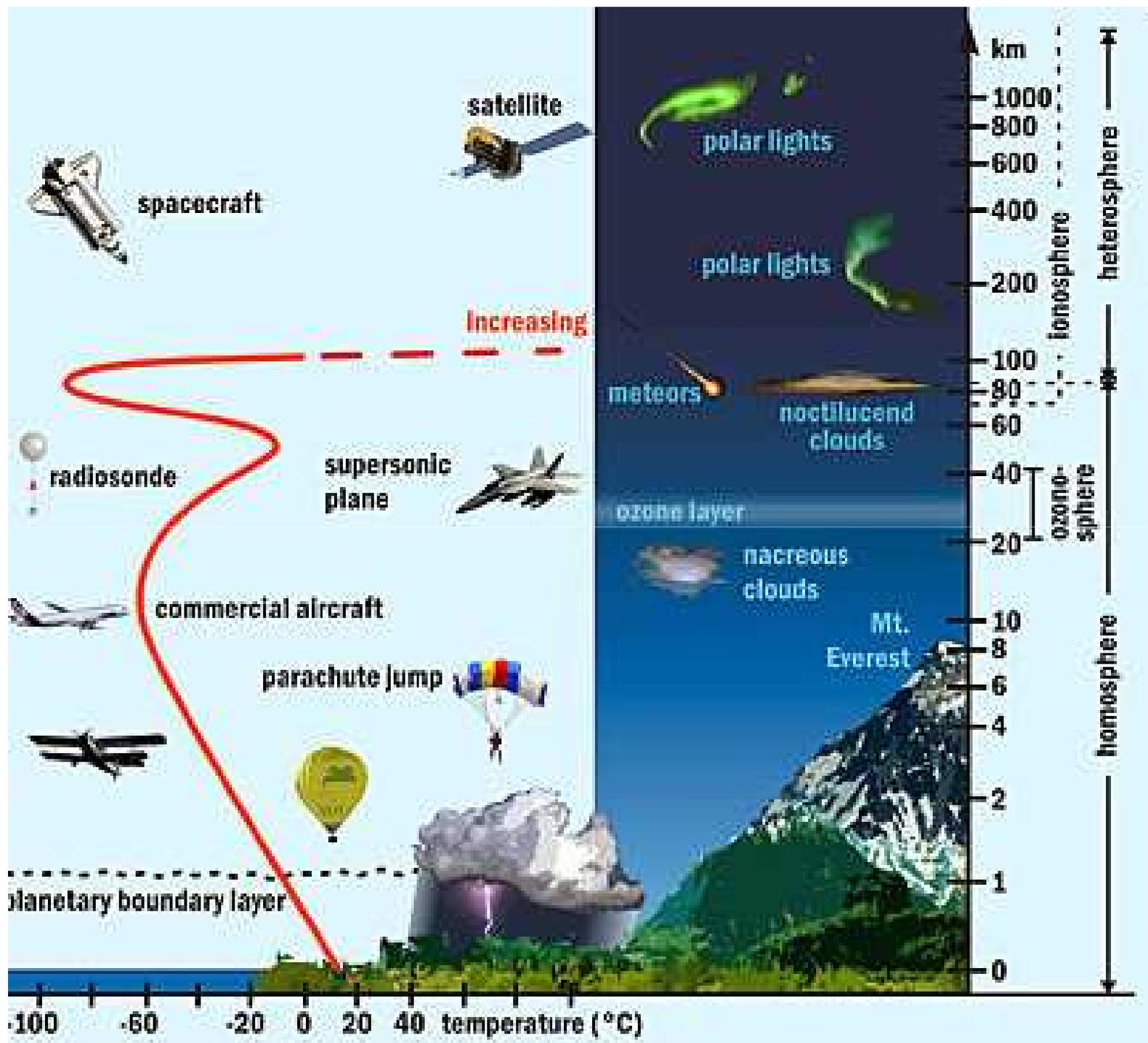




Riscaldamento in alto: ossigeno e azoto assorbono radiazione solare

Riscaldamento nel mezzo: l'ozono assorbe la radiazione uv

Riscaldamento in basso: la superficie terrestre e gli oceani assorbono la radiazione solare



## MASSA DELL'ATMOSFERA

In ogni punto della superficie terrestre l'atmosfera esercita una forza verso il basso dovuta all'attrazione gravitazionale. Tale forza (peso) per unità di volume di aria di densità  $\rho$ :

$$F = \rho g$$

dove  $g$  è l'accelerazione di gravità

Integrando in verticale su tutta l'atmosfera si ottiene la pressione al suolo:

$$p_s = \int_0^{\infty} \rho g dz$$

Se si considera  $g \approx \text{costante} = g_0 = 9.807 \text{ m/s}^2$

$$p_s = g_0 \int_0^{\infty} \rho dz = m g_0$$

$m$  = massa (integrata verticalmente per unità di area)

## STRUTTURA VERTICALE

La pressione e la densità dell'aria decrescono quasi esponenzialmente con la quota

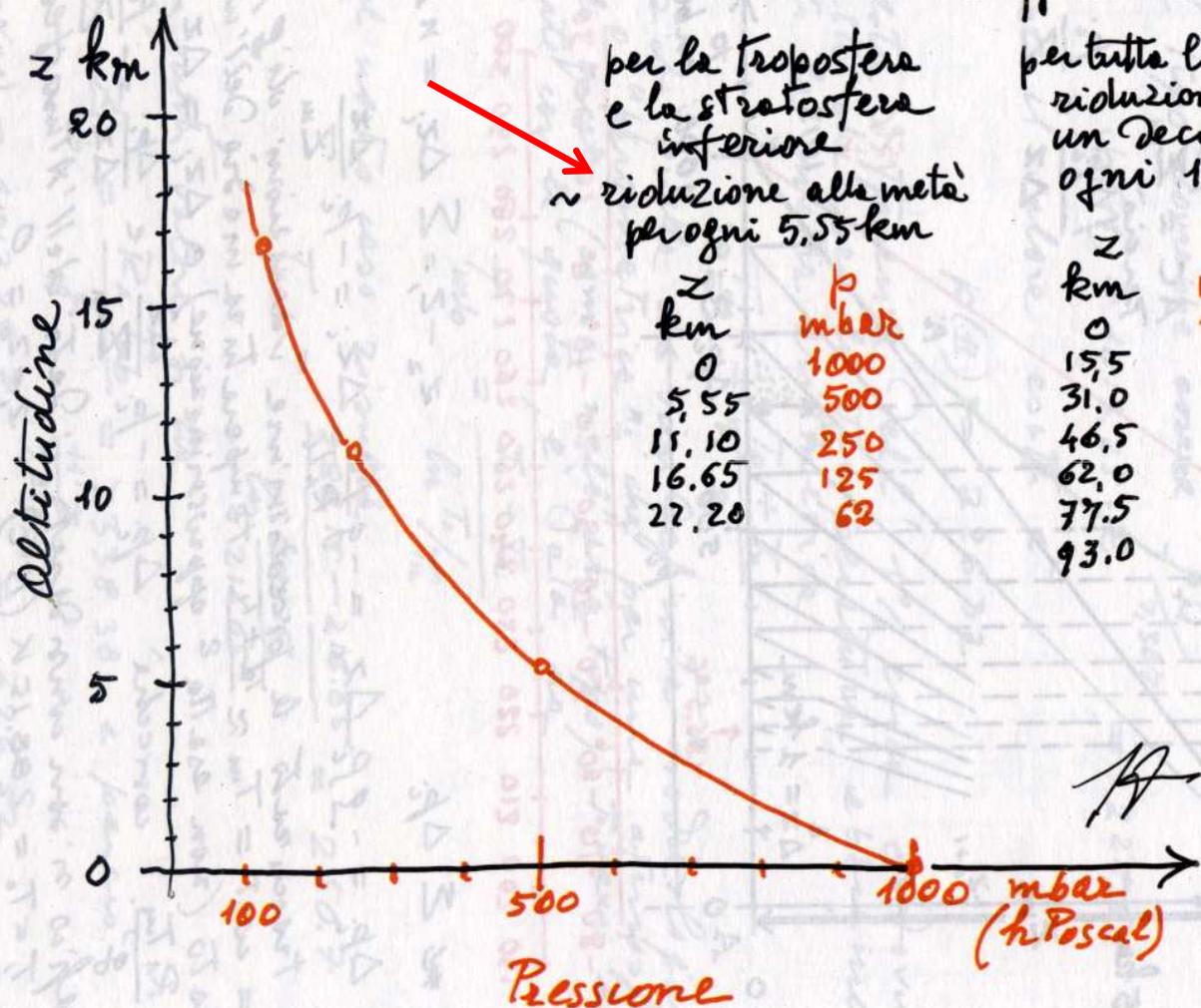
$$p \approx p_0 e^{-z/H} \quad \text{dove } H = \text{altezza di scala} = \text{e-folding depth}$$

$$\ln \frac{p}{p_0} \approx -\frac{z}{H} \quad \text{per stimare l'altezza dei livelli di pressione}$$

Quota (o meglio altitudine) km s.l.m.	Densità (grossolanamente approssimata) densità kg/m <sup>3</sup>	Pressione millibar (ettoPascal)
0	1	1000
15,5	0,1	100
31,0	0,01	10
46,5	0,001	1
62,0	0,0001	0,1
77,5	0,00001	0,01
93,0	0,000001	0,001

# La pressione in quota

## Andamento approssimativo



per la troposfera  
e la stratosfera  
inferiore  
~ riduzione alla metà  
per ogni 5,55 km

z km	p mbar
0	1000
5,55	500
11,10	250
16,65	125
22,20	62

per tutta l'atmosfera  
riduzione ad  
un decimo  
ogni 15,5 km

z km	p mbar
0	1000
15,5	100
31,0	10
46,5	1
62,0	0,1
77,5	0,01
93,0	0,001

## Esatto in Atmosfera Tipo

z km	p mbar
0	1013,25
10	265,00
20	55,29
30	11,97
40	2,971
50	0,7993
60	0,2246
70	0,0521
80	0,0136
90	0,00364
100	0,0003007

Fig

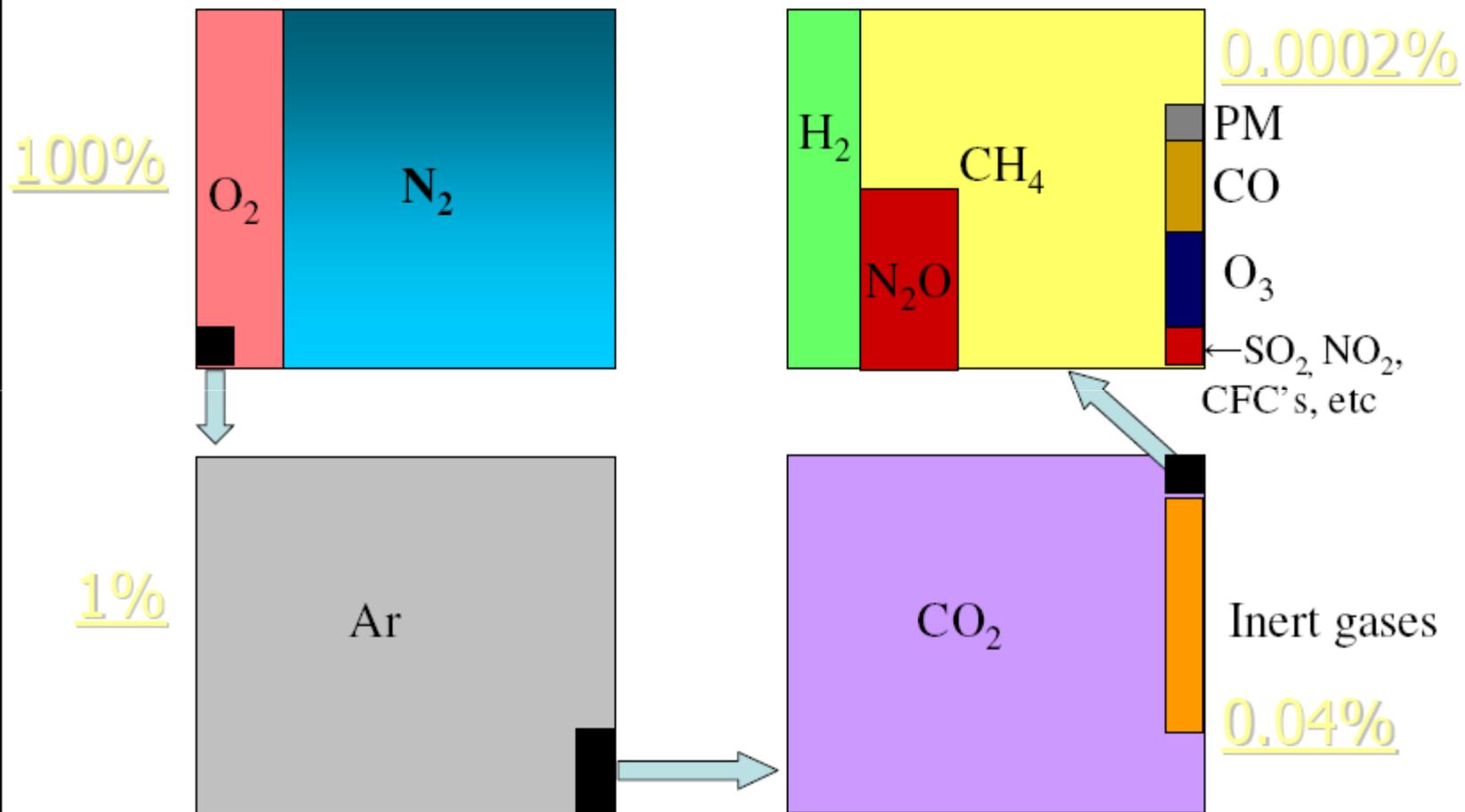
# COMPOSIZIONE DELL'ATMOSFERA

Constituent <sup>a</sup>	Molecular weight	Fractional concentration by volume	
Nitrogen (N <sub>2</sub> )	28.013	78.08%	} 99.9% in volume
Oxygen (O <sub>2</sub> )	32.000	20.95%	
Argon (Ar)	39.95	0.93%	
<b>Water vapor (H<sub>2</sub>O)</b>	18.02	0-5%	
<b>Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>)</b>	44.01	380 ppm	
Neon (Ne)	20.18	18 ppm	
Helium (He)	4.00	5 ppm	
<b>Methane (CH<sub>4</sub>)</b>	16.04	1.75 ppm	
Krypton (Kr)	83.80	1 ppm	
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	2.02	0.5 ppm	
<b>Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O)</b>	56.03	0.3 ppm	
<b>Ozone (O<sub>3</sub>)</b>	48.00	0-0.1 ppm	

<sup>a</sup> So called *greenhouse gases* are indicated by bold-faced type. For more detailed information on minor constituents, see Table 5.1.

- Aria (aggregato di elementi), peso molecolare M=28.9

# Composition of terrestrial atmosphere



- Composizione costante in bassa atmosfera (ommosfera), calo dei componenti pesanti in alta atmosfera (eterosfera)

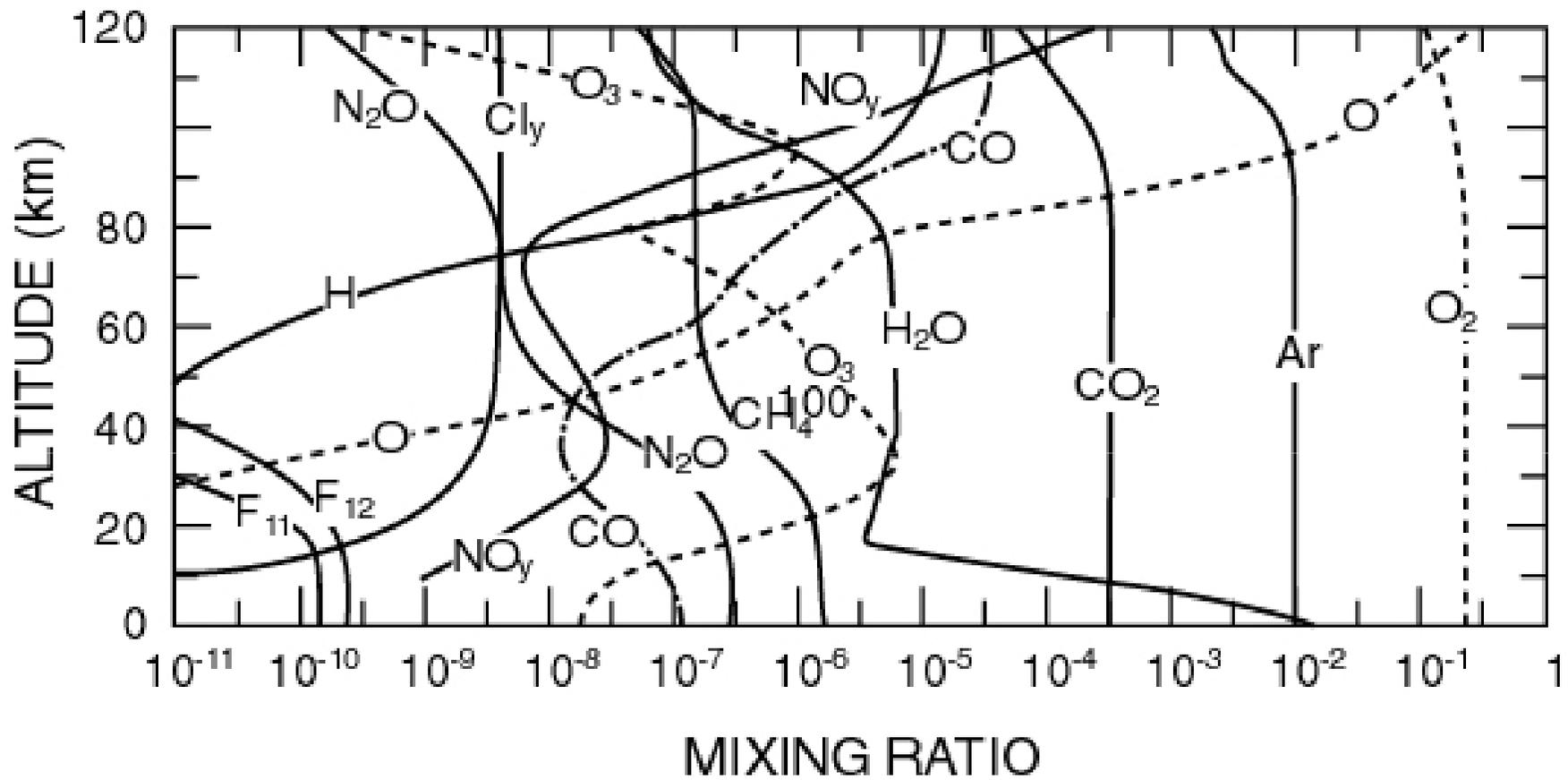
$$p_i(z) = p_{i0} e^{-z/H_i} \quad \text{PRESSIONE PARZIALE}$$

$$H_i = \frac{R^* T}{M_i g}$$

$M_i$  = peso molecolare

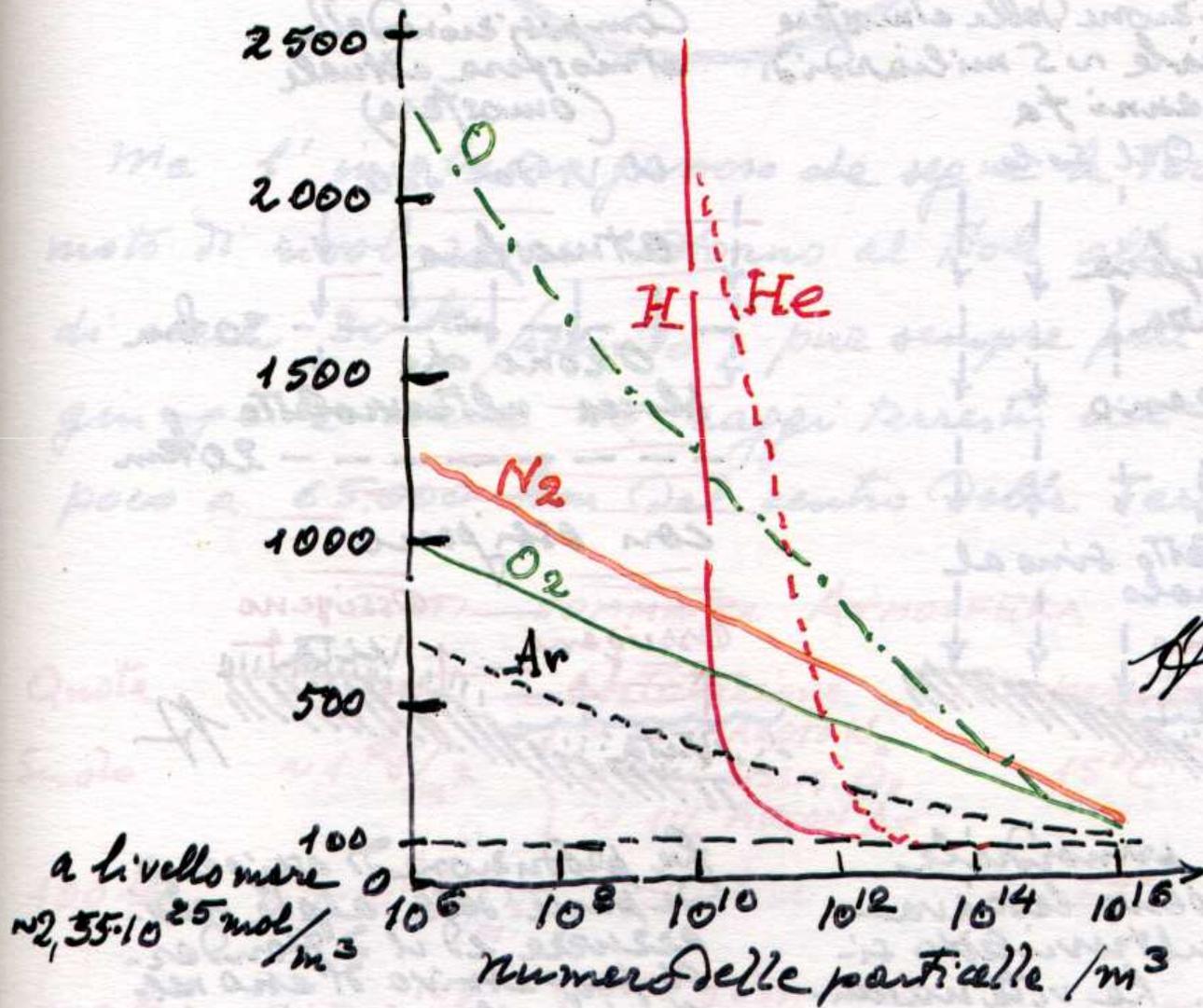
- Tempo di residenza  $\tau = \frac{m}{F}$   $m$  = massa totale del gas  
 $F$  = afflusso/deflusso medio

$\tau$  milioni di anni per i gas nobili  
 mesi/anni per i gas semi-permanenti (CO, CH<sub>2</sub>)  
 giorni per i gas variabili (chimicamente attivi o legati al ciclo dell'acqua)



©1995 Oxford University Press  
Goody, 1995

# Andamento composizione ETEROSFERA



Fig

## **AZOTO N<sub>2</sub>**

- Elemento più abbondante in atmosfera 78%
- Sorgenti: piante, foglie e sostanze animali in decomposizione, rocce, eruzioni vulcaniche, attività antropiche
- Legame molecolare forte, stabile, no reazioni: si accumula
- Fissazione dell'azoto nel suolo importante per la biosfera

## **OSSIGENO O<sub>2</sub>**

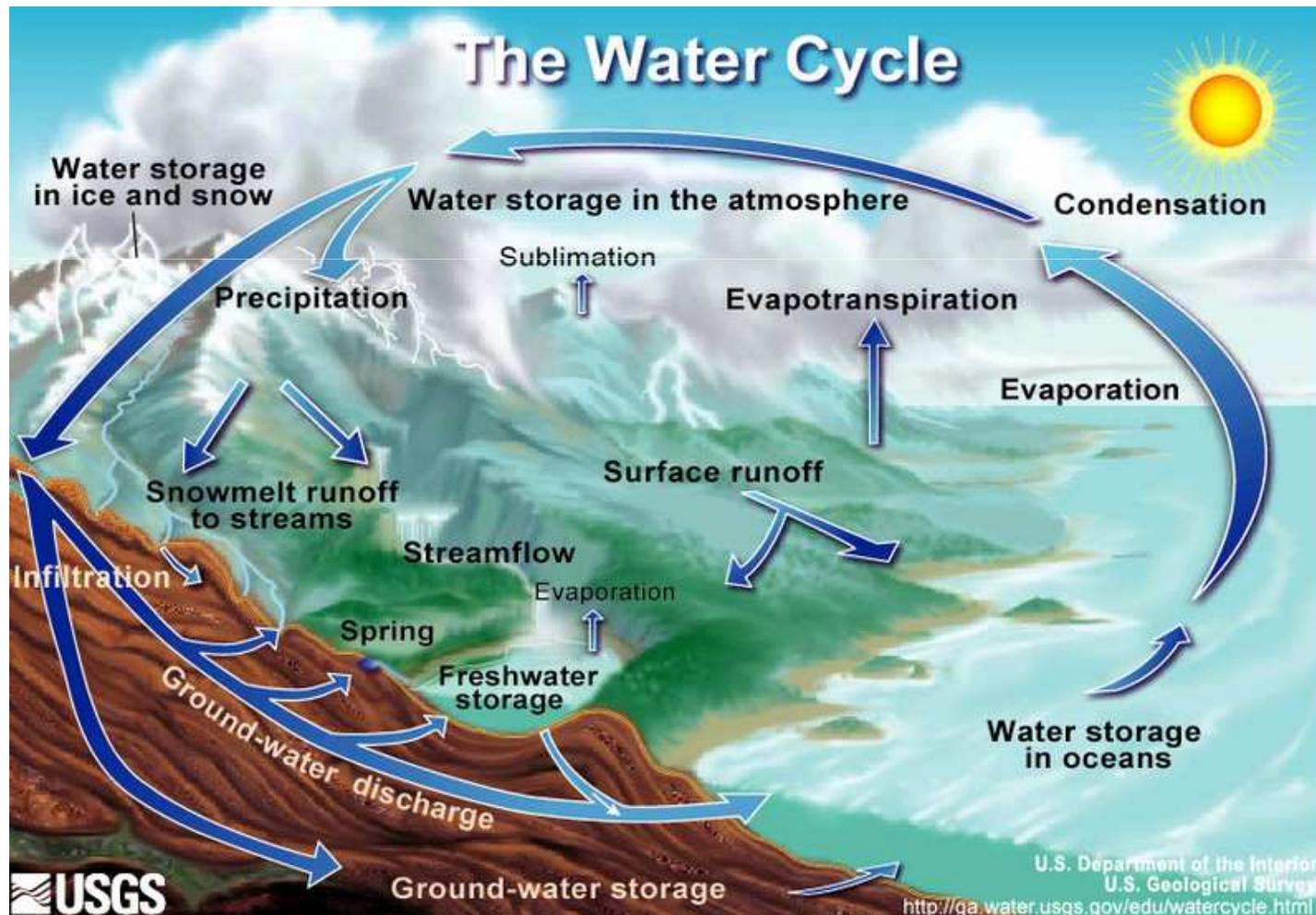
- Elemento più abbondante del pianeta (21% atmosfera, 86% oceani, 50% crosta terrestre)
- Quantità costante nonostante le reazioni e l'utilizzo
- Consumato nella respirazione e nella combustione
- Coinvolto nella fotosintesi  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{fotoni} \rightarrow \text{CH}_2\text{O} + \text{O}_2$   
visibile      zuccheri
- Tempo di residenza 5000 anni >> mixing time → praticamente costante in troposfera. Ma il tempo di residenza << di quello di Ar e Azoto

## **ARGON <sup>40</sup>Ar**

- 0.92% gas nobile più abbondante
- Sorgente: decadimento del <sup>40</sup>K (tempo di dimezzamento ~ 10<sup>9</sup> anni → concentrazione pressoché costante!)
- Inerte

## VAPORE ACQUEO

- 0.25% in massa, fortemente variabile da 10 ppm al 5% in volume (3 ordini di grand.)
- Mediamente 1% in volume
- Ciclo idrologico
- Quasi esclusivamente in troposfera, solo tracce penetrano in stratosfera
- Sorgenti: evaporazione, traspirazione, trasferimento dal mixing turbolento
- E' il gas serra più abbondante ed importante in atmosfera



## ELEMENTI MINORITARI

- Molecole contenenti atomi di carbonio, azoto, zolfo precedentemente incorporati nelle cellule di organismi viventi
- Sorgenti: combustione di vegetali o combustibili fossili, emissione dalle piante, decomposizione di piante e animali
- Rimossi per ossidazione (OH) o dilavamento

Variazioni di concentrazione regolate da:

- Radiazione solare che innesca/catalizza le reazioni chimiche
- Esseri viventi (attraverso respirazione/fotosintesi)
- Eruzioni vulcaniche, esalazioni terrestri
- Attività antropica

Tra questi abbiamo i GAS SERRA, composti dell'azoto, aerosols

## ◇◇ 2.5.2 I GAS SERRA

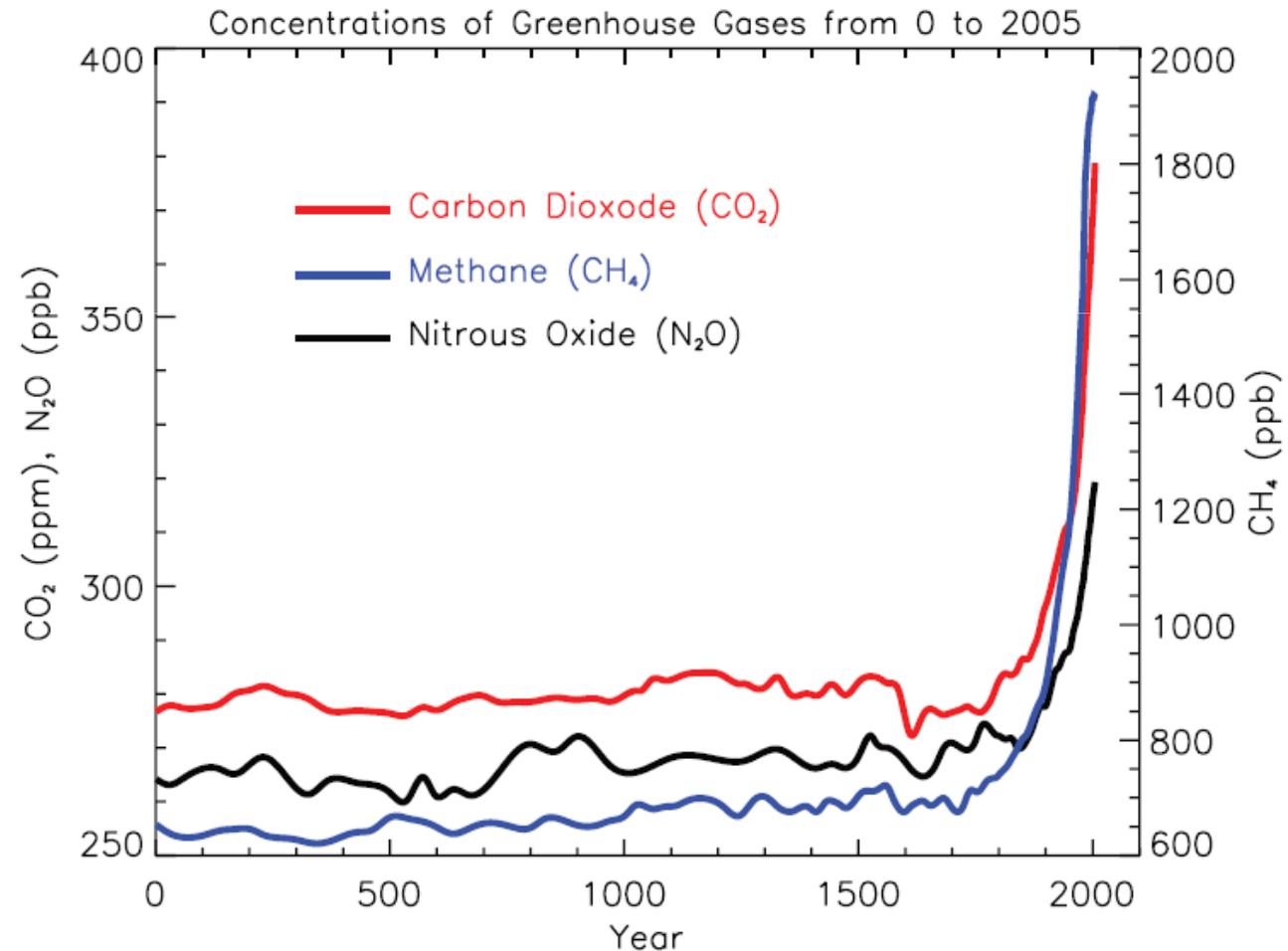
Vengono denominati gas serra le sostanze che hanno come caratteristica principale quella di intercettare e, poi, rimettere parte della radiazione infrarossa persa dal sistema Terra-atmosfera mediante irraggiamento.

Gas	Concentrazione prima del 1750 (in ppm)	Concentrazione attuale (in ppm)	Tempo di residenza in atmosfera	Forzante radiativa (W/m <sup>2</sup> )
Biossido di carbonio (CO <sub>2</sub> )	280	370,3	Variabile	1,46
Metano (CH <sub>4</sub> )	0,722/0,680	1,842/1,729	8,4/12 anni	0,48
Protossido d'azoto (N <sub>2</sub> O)	0,270	0,316/0,315	114 anni	0,15
Ozono troposferico (O <sub>3</sub> )	0,025	0,05	qualche ora	0,35
CFC-11 (CCl <sub>3</sub> F)	Zero	0,000262/259	45 anni	
CFC-12 (CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> )	Zero	0,000546/539	100 anni	
CFC-113 (C <sub>2</sub> Cl <sub>3</sub> F <sub>3</sub> )	Zero	0,000082	85 anni	
Tetracloruro di carbonio (CCl <sub>4</sub> )	Zero	0,000097/95	35 anni	
Metilcloroformio (CH <sub>3</sub> CCl <sub>3</sub> )	Zero	0,000047/46	4,8 anni	#0,34
HCFC-22 (CHClF <sub>2</sub> )	Zero	0,000146	11,9 anni	
HFC-23 (CHF <sub>3</sub> )	Zero	0,000014	260 anni	
Esaffluoroetano (C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> )	Zero	0,000003	10.000 anni	
Esaffluoruro di zolfo (SF <sub>6</sub> )	Zero	0,0000047	3200 anni	0,002
SF <sub>5</sub> CF <sub>3</sub>	Zero	0,00000012	~ 3200 anni	< 0,0001

Tabella 2.8 – Caratteristiche salienti dei gas serra.

- Gas serra → effetto serra
- Presenti in atmosfera in concentrazioni alquanto basse → il contributo delle emissioni prodotte dall'attività antropica può essere rilevante (specialmente nelle regioni dove c'è poco vapore acqueo...)
- E' ormai accertato che la concentrazione dei gas serra è in aumento a causa dell'uso combustibili fossili e combustione biomasse

IPCC Report (2007)



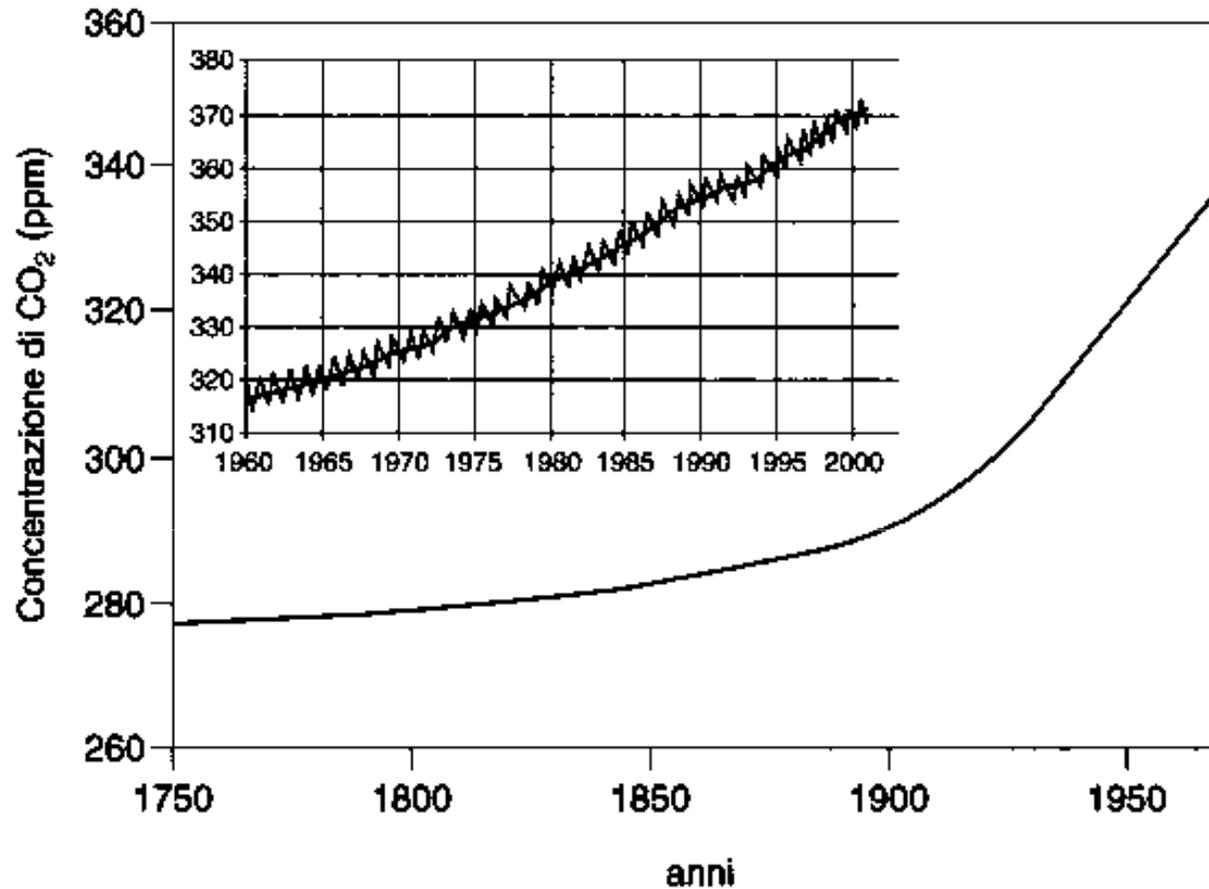
# Impatto delle sorgenti antropiche sulla concentrazione dei gas minoritari

Sources	SO <sub>2</sub> [Tg(S) year <sup>-1</sup> ]	NH <sub>3</sub> [Tg(N) year <sup>-1</sup> ]	N <sub>2</sub> O [Tg(N) year <sup>-1</sup> ]	CH <sub>4</sub> [Tg(CH <sub>4</sub> ) year <sup>-1</sup> ]	CO [Tg(CO) year <sup>-1</sup> ]	NO <sub>x</sub> [Tg(N) year <sup>-1</sup> ]	NMHC [Tg(C) year <sup>-1</sup> ]	
<b>Natural</b>								
Vegetation		5.1			100 (60-160)		400 (230-1150)	
Wetlands				115 (55-150)				
Wild animals		2.5						
Termites				20 (10-50)				
Oceans	25 <sup>b</sup>	7.0	3 (1-5)	10 (5-50)	50 (20-200)		50 (20-150)	
Soils			6 (3.3-9.7)			7 (5-12)		
Lightning						5 (2-20)		
Volcanoes	10 (7-10)							
Other	7.5 <sup>c</sup>			15 (10-40)		1.5 (0-5.7) <sup>d</sup>		
<b>Total natural</b>	<b>42.5</b>	<b>14.6</b>	<b>9 (4-15)</b>	<b>160 (80-290)</b>	<b>150 (80-360)</b>	<b>13.5 (7-38)</b>	<b>450 (250-1300)</b>	
<b>Anthropogenic</b>								
Fossil fuels related	<ul style="list-style-type: none"> <li>Natural gas</li> <li>Coal mines</li> <li>Petroleum industry</li> <li>Coal combustion</li> <li>Energy use</li> <li>Aircraft</li> </ul>	75 <sup>e</sup>		40 (25-50)				
				30 (15-45)				
				15 (5-30)				
				? (1-30)				
						500 (300-900)	22 (20-24)	70 (60-100)
							0.5 (0.2-1)	
Biospheric carbon	<ul style="list-style-type: none"> <li>Enteric fermentation</li> <li>Rice paddies</li> <li>Biomass burning</li> <li>Landfills</li> <li>Animal waste</li> <li>Domestic sewage</li> </ul>	3		85 (65-100)				
				60 (20-100)				
				40 (20-80)	500 (400-700)	8 (3-13)	40 (30-90)	
				40 (20-70)				
				22				
Fertilizer		6.4						
Cultivated soils			3.5 (1.8-5.3)					
Cattle and feedlots			0.4 (0.2-0.5)					
Industrial sources			1.3 (0.7-1.8)					
<b>Total anthropogenic</b>	<b>78</b>	<b>30.4</b>	<b>5.7 (3-9)</b>	<b>360 (206-615)</b>	<b>1000 (700-1600)</b>	<b>30.5 (23-38)</b>	<b>110 (90-190)</b>	

## **ANIDRIDE CARBONICA CO<sub>2</sub>**

- Sorgenti: respirazione piante, decomposizione di detriti organici, combustione, evaporazione oceani, eruzioni vulcaniche, attività antropica
- Assorbita da oceani, fotosintesi
- Variazioni legate a: deforestazione e assorbimento oceani
- Feedbacks: oceani a T alte, vapore acqueo, nubi
  - feedback positivo → destabilizza il sistema climatico
    - piccoli forcing iniziali possono evolvere in grandi effetti
  - feedback negativo → stabilizza il sistema climatico
    - grandi forcing iniziali possono essere soppressi
- Riserve: oceani, combustibili fossili, suolo (carbone attivo), vegetazione
- Fluttuazioni di CO<sub>2</sub>

# FLUTTUAZIONI DI CO<sub>2</sub>



**Novembre 2009: 387 ppm**

Figura 2.30 - Concentrazione di CO<sub>2</sub> misurata a Mauna Loa (Hawaii).

Ultimo millennio: costante fino al XIX sec (280 ppm), poi aumento fino a 380 ppm (35%)  
Fluttuazioni annuali legate all'attività delle piante

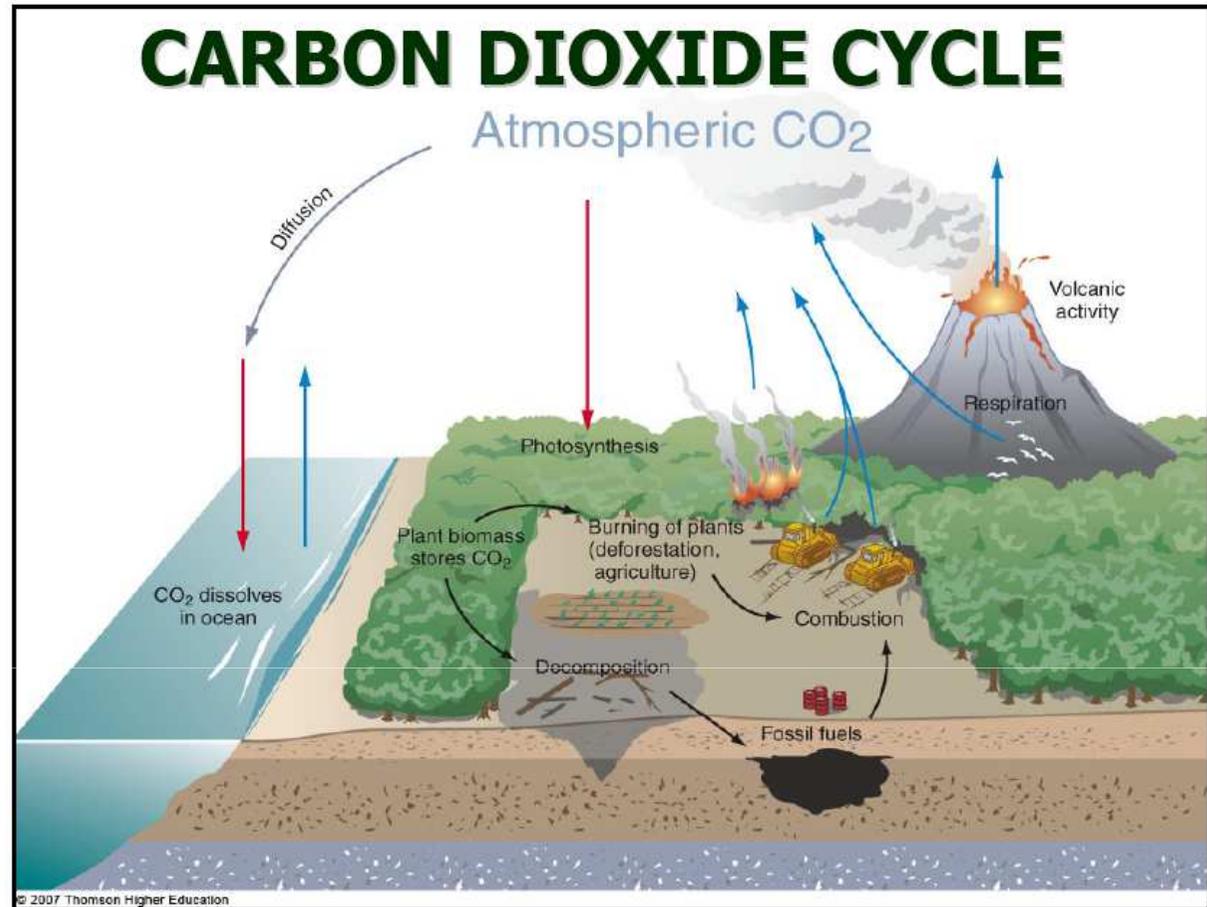
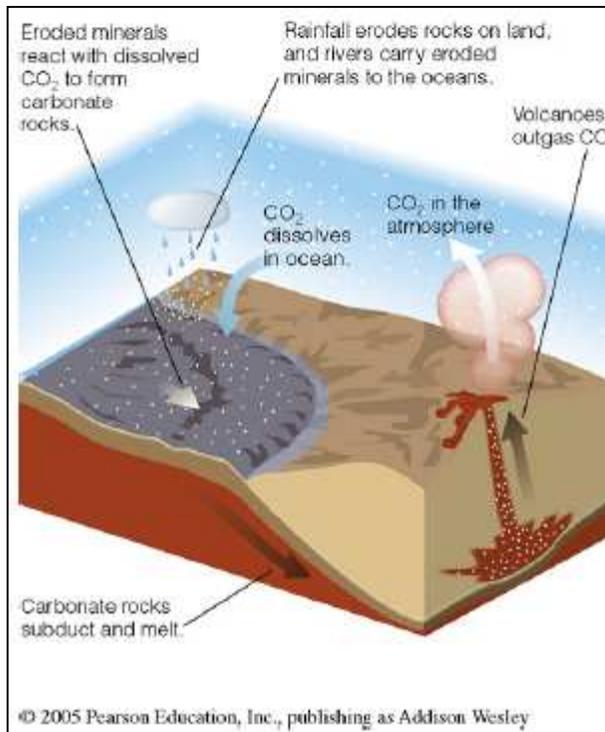
# CICLO DELLA CO<sub>2</sub>

Le eruzioni vulcaniche emettono CO<sub>2</sub> in atmosfera.

La CO<sub>2</sub> si dissolve negli oceani.

L'erosione delle rocce e il trasporto dei fiumi porta minerali agli oceani.

I minerali si combinano con la CO<sub>2</sub> dissolta negli oceani generando rocce carbonatiche (calcare) sul fondale.

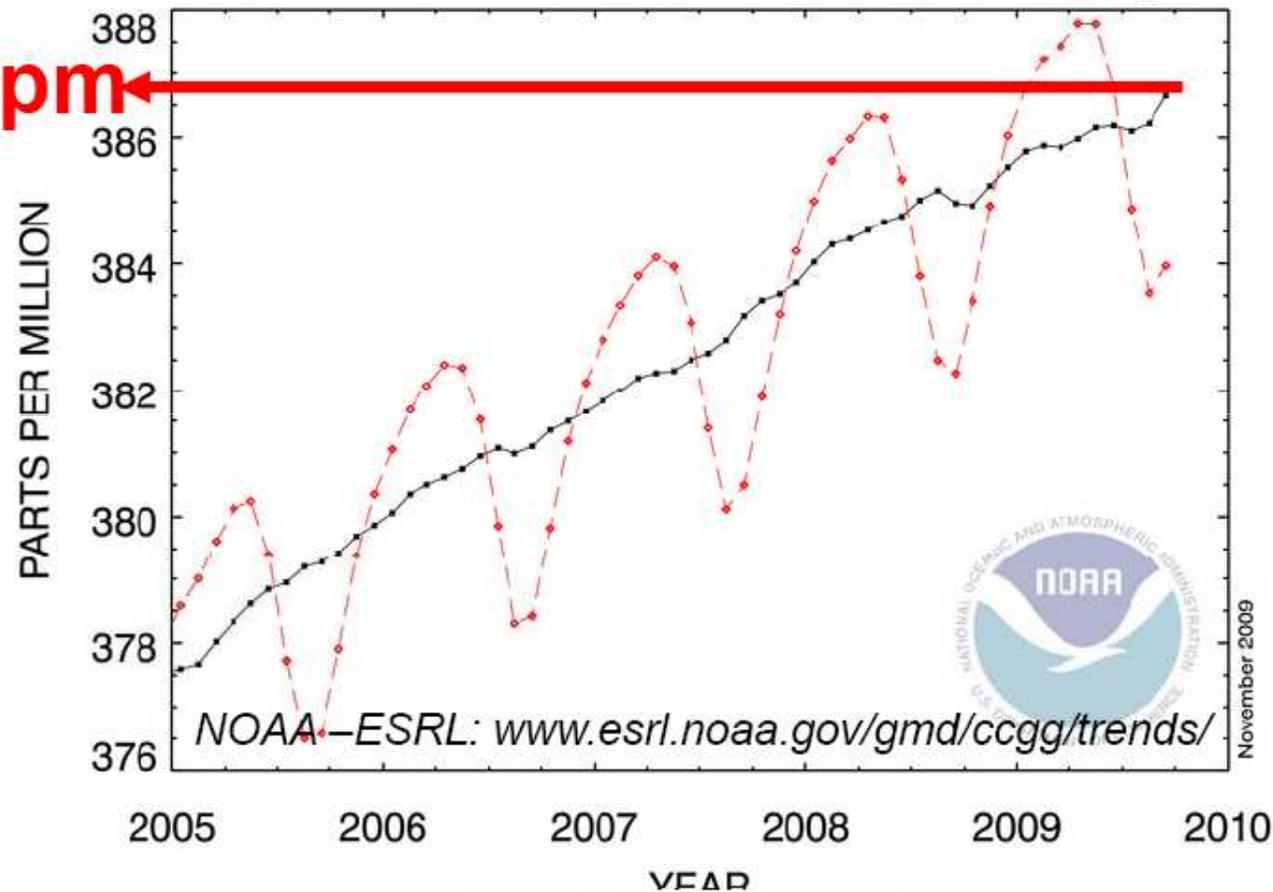


Il movimento dei continenti (tettonica) porta queste rocce nelle zone di subsidenza, dove vengono spinte nel mantello.

Nel mantello le rocce si liquefanno e la CO<sub>2</sub> viene liberata e può tornare in atmosfera.

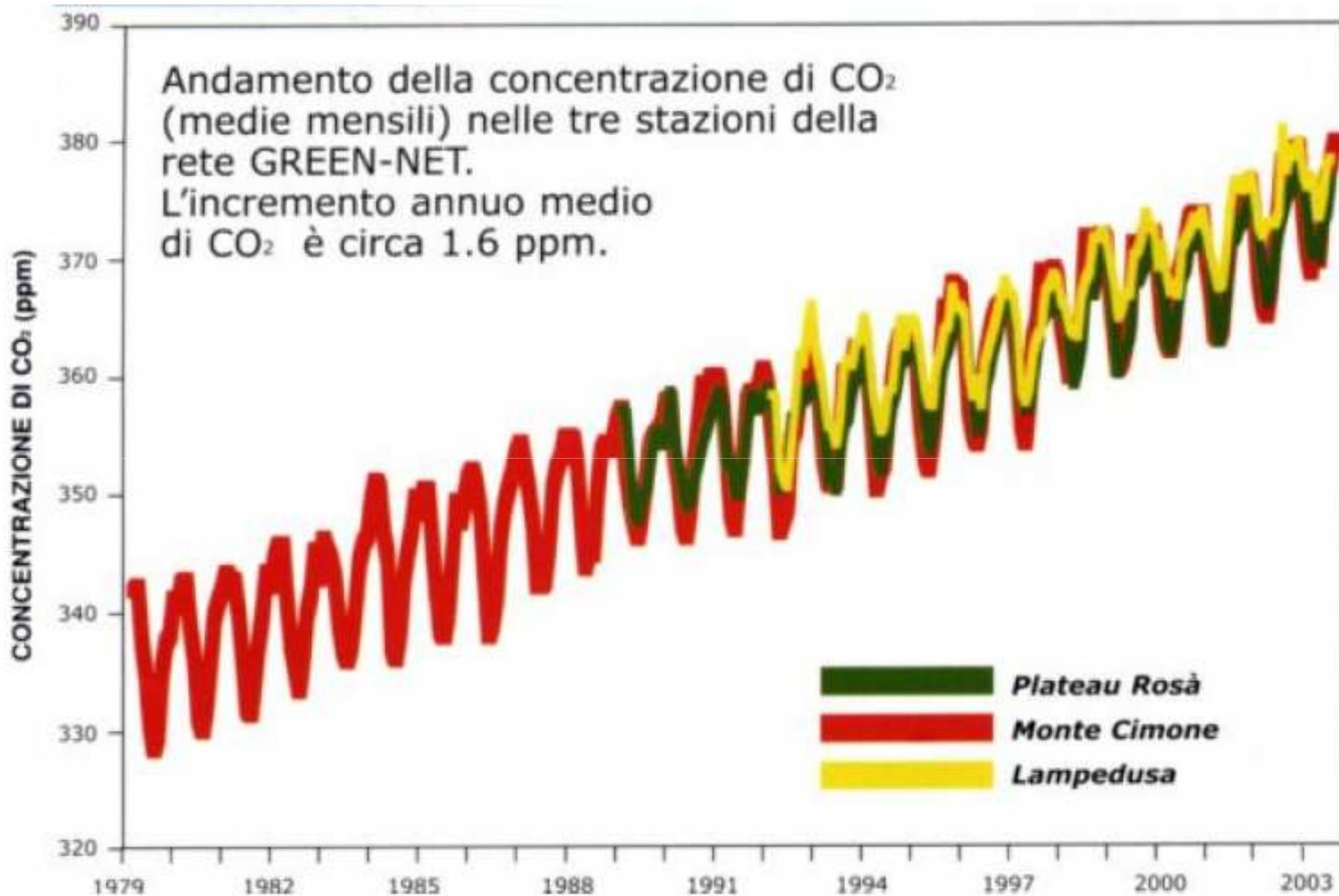
# GENNAIO 2005 – NOVEMBRE 2009: concentrazione mensile globale di CO<sub>2</sub>

387 ppm ←



**Earth System Research Laboratory**  
Global Monitoring Division

## Andamento concentrazione CO<sub>2</sub> in Italia

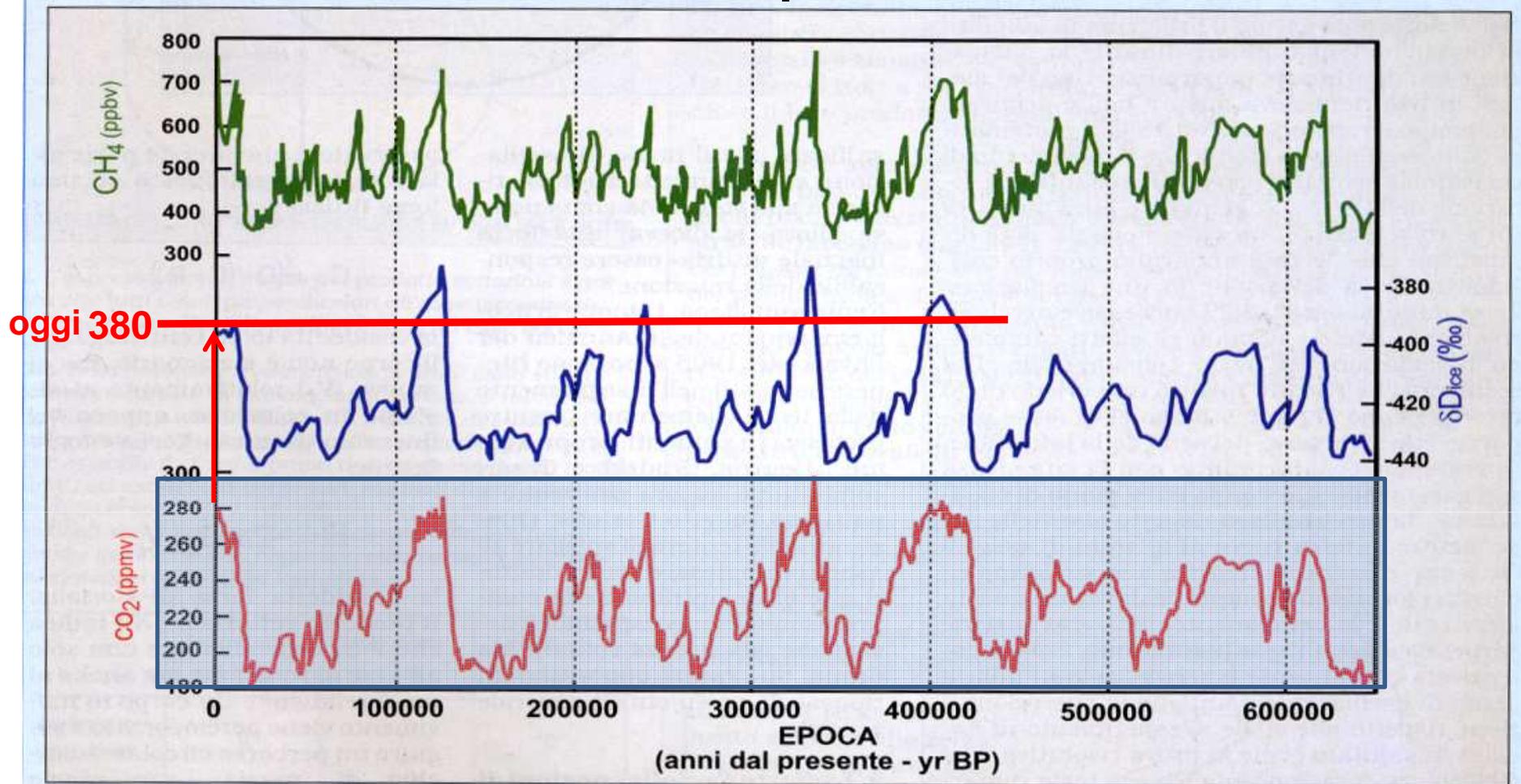


# EPICA Experiment

*DOME C*  
*Plateau Antartico 3233m*



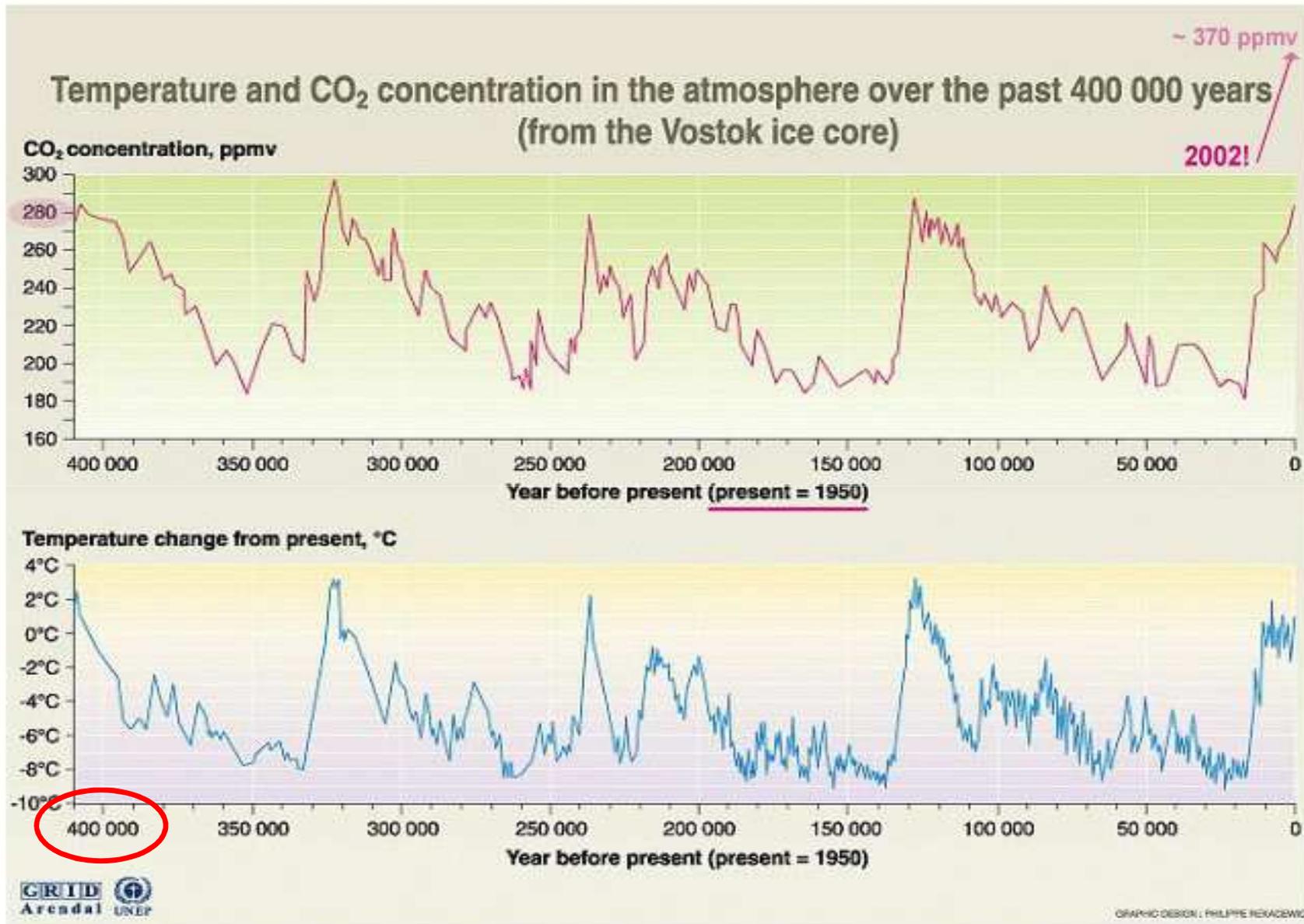
# EPICA Experiment



21. Andamento della concentrazione di metano (linea verde), anidride carbonica (linea rossa) e del rapporto isotopico del deuterio (linea blu) negli ultimi 650.000 anni, ricostruito dall'analisi della carota glaciale EPICA-EDC Dome C. I picchi del rapporto isotopico del Deuterio corrispondono alle fasi interglaciali e mostrano come l'entità del riscaldamento interglaciale sia più pronunciata nei primi 400.000 anni dal presente (parte sinistra della figura) mentre la variabilità sembra attenuarsi nelle fasi precedenti, più antiche (Adattato da: SIEGENTHALER & al., 2005).

Carotaggio (EPICA) 650000 anni: periodicità di 100000 anni (cicli glaciali)  
Attuale concentrazione: 380 ppmv. Mai sopra ai 300 ppmv prima dell'età industriale  
Correlazione con la T: causa ed effetto?

# CAROTAGGIO A VOSTOK (Antartide)



Source: J.R. Petit, J. Jouzel, et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core in Antarctica, *Nature* 399 (3/June), pp 429-436, 1998.

(Note: 2002 information added to diagram)

## METANO CH<sub>4</sub>

- Sorgenti: decadimento di materiale organico, risaie, fermentazione enterica nel bestiame, combustione biomasse, estrazione carbone e petrolio
- Variabilità delle sorgenti, difficile valutare contributo antropico (2/3 probabilmente)
- Rimosso per reazione con OH
- Fluttuazioni: picchi nelle ere interglaciali. Raramente > 0.7 ppm. Dopo il 1750 aumento costante fino agli attuali 1.73 ppm. Dal 1982 calato il trend
- Grande capacità "serra" 25 volte superiore alla CO<sub>2</sub>



35-40% delle  
emissioni  
antropiche di CH<sub>4</sub>

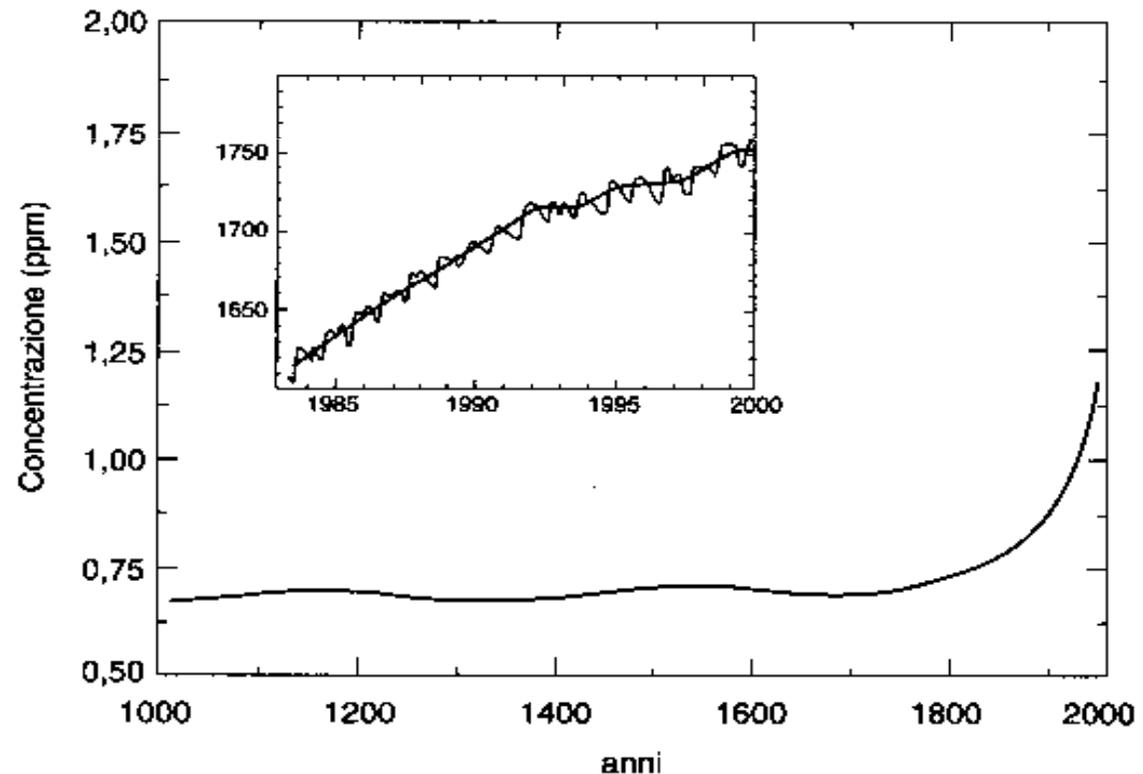


Figura 2.32 – Evoluzione nella concentrazione in atmosfera di CH<sub>4</sub>.

## **PROTOSSIDO DI AZOTO N<sub>2</sub>O**

- Emissioni nell'emisfero nord
- Concentrazione costante in troposfera
- Sorgenti: attività batterica nel suolo, attività antropica (combustibili fossili e fertilizzanti azotati), combustione di biomasse

## **OZONO O<sub>3</sub>**

- Concentrazione variabile, max in stratosfera tra i 15-35 km
- In troposfera a causa di inquinanti e alte T (smog fotochimico)
- 0.01 ppm pericoloso

# BUCO DELL'OZONO

L'Ozono si misura come contenuto colonnare sopra a un punto della terra e l'unità di misura è la Dobson Unit DU

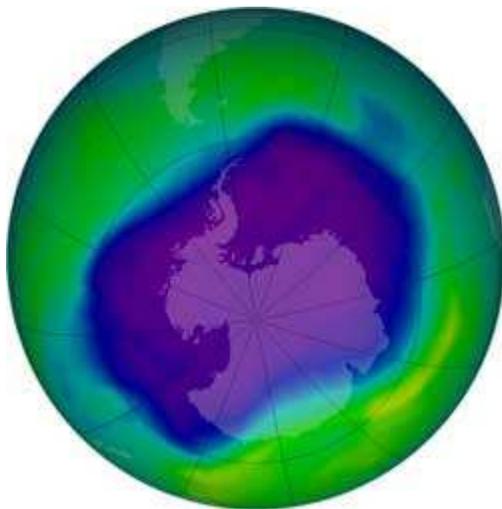
Si è osservato un marcato calo dell'Ozono colonnare in primavera/estate sul continente antartico rispetto agli anni '70

Media globale di Ozono 300 DU

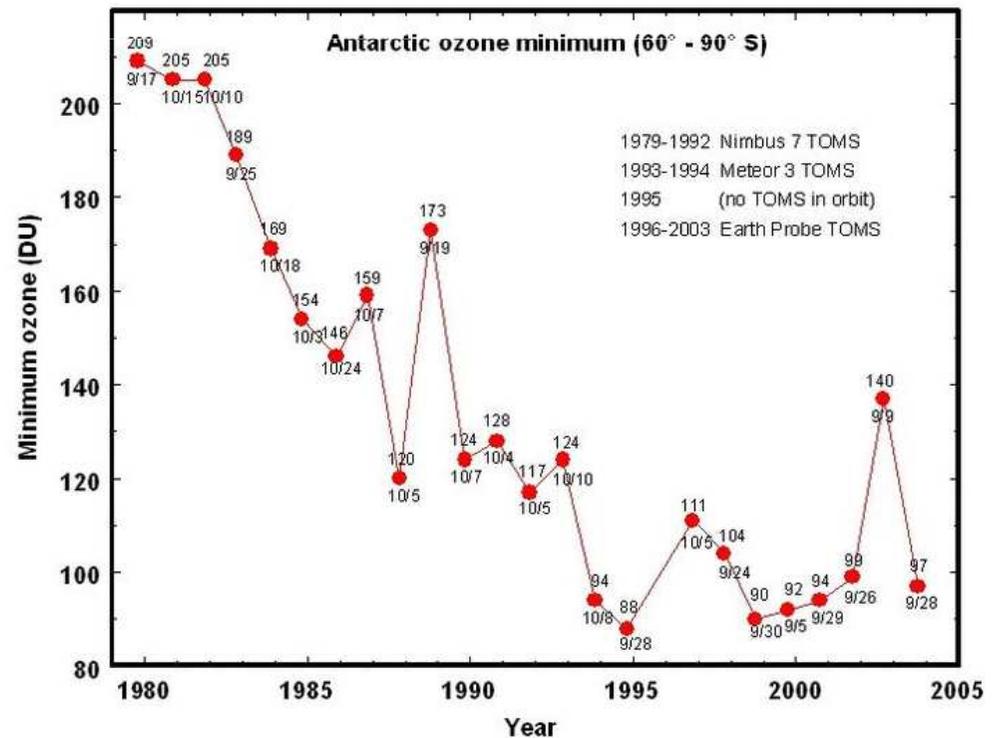
Prima del 1980 raramente si è scesi sotto 200 DU

Recentemente 100 DU è diventato un valore comune

Il picco nel 2002 è dovuto a temperature insolitamente alte nella stratosfera antartica



24 Settembre 2006

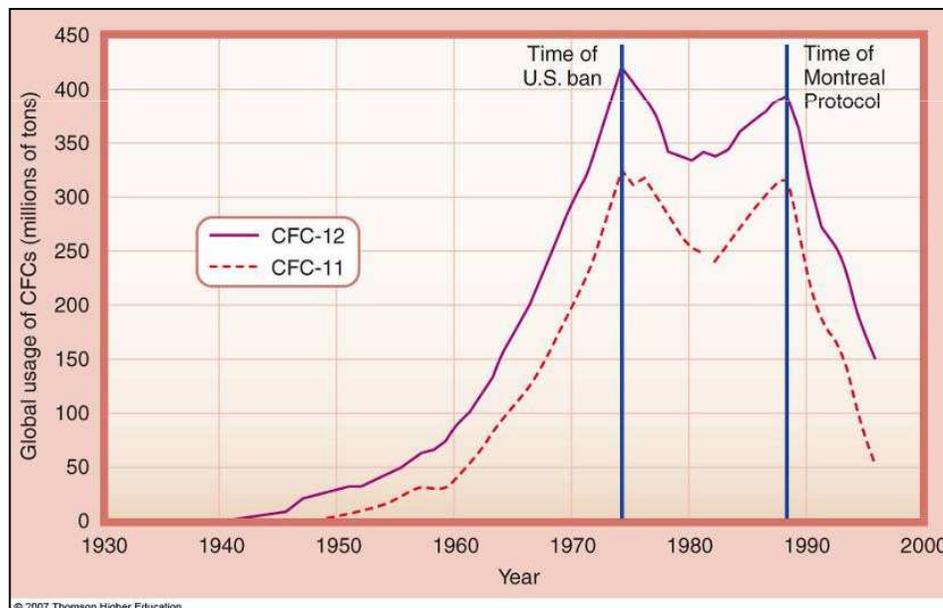


Principali responsabili del buco dell'Ozono sono i CFC (Cloro-Fluoro-Carburi). Una volta in atmosfera il Cloro è in grado di distruggere l'Ozono

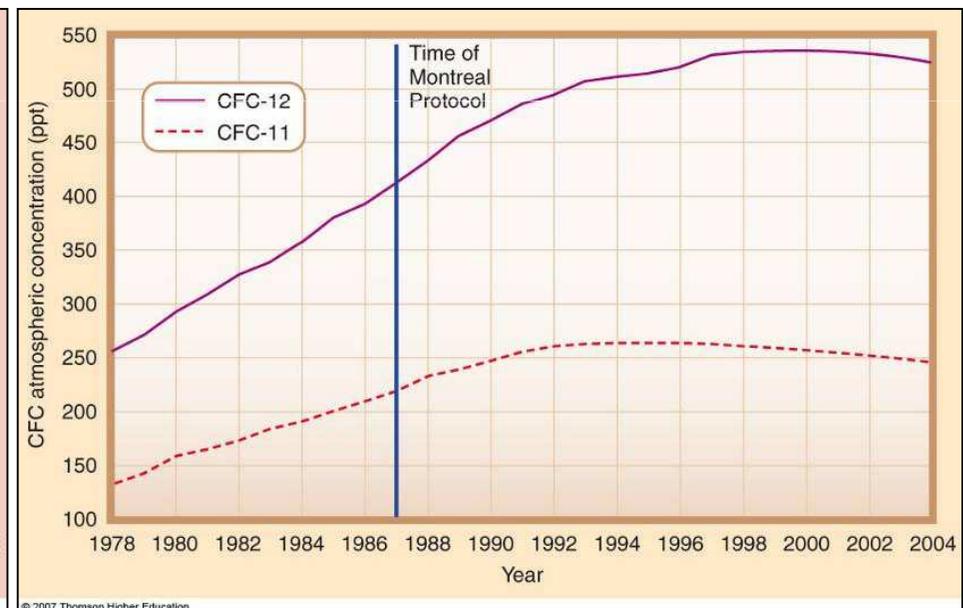


Un singolo atomo di Cloro può continuare a distruggere Ozono anche per due anni

Il Protocollo di Montreal (1987, in vigore dal 1989) ha messo la bando le sostanze responsabili del buco dell'Ozono (CFC)



Produzione globale di CFC



Concentrazione globale di CFC

Tempo di residenza !!!

**Confronto vapore acqueo – gas serra:**

tempo di residenza, equilibrio per il vapore su scale climatiche, complessità del contributo (effetto serra, nubi), debole impatto antropico sul vapore

## COMPOSTI DELL'AZOTO (NO e NO<sub>2</sub>)

- Sorgente primaria: combustione ad alta T di combustibili fossili, 40% trasporti
- Sorgenti secondarie: naturali (fulmini, incendi, eruzioni)
- Nella combustione prevale il monossido di azoto (NO), ma si equilibra in atmosfera con il biossido
- Rimossi per ossidazione in acido nitrico e nitrati, nuclei di condensazione, piogge acide
- NO<sub>x</sub> entrano nella formazione di ozono troposferico e PM10 secondario

# AEROSOL

- Definizione: sostanze liquide o solide di dimensioni  $>$  dimensioni molecolari e  $v_c \sim 0$
- Emessi da sorgenti dirette (aerosol primario), formati in atmosfera (aerosol secondario) a partire da gas precursori che condensano/reagiscono
- Classificazione (dimensioni) : nuclei di Aitken, grandi, giganti
- Sorgenti naturali: emissione da parte di animali e piante (semi, pollini, ecc), erosione suolo, spray marino, eruzioni, incendi, polveri cosmiche, reazioni fra gas
- Sorgenti antropiche (20%): combustione (combustibili fossili, biomasse), processi industriali, trasporti, polvere (strade e campi arati)
- Rimozione: deposizione secca o umida
- Nuclei di condensazione
- Concentrazione legata al numero sorgenti: max sui centri urbani, cala con la quota, bassa sugli oceani

## - Esempi:

Aria continentale pulita: 3000 particelle/cm<sup>3</sup>

Aria continentale inquinata: 50000

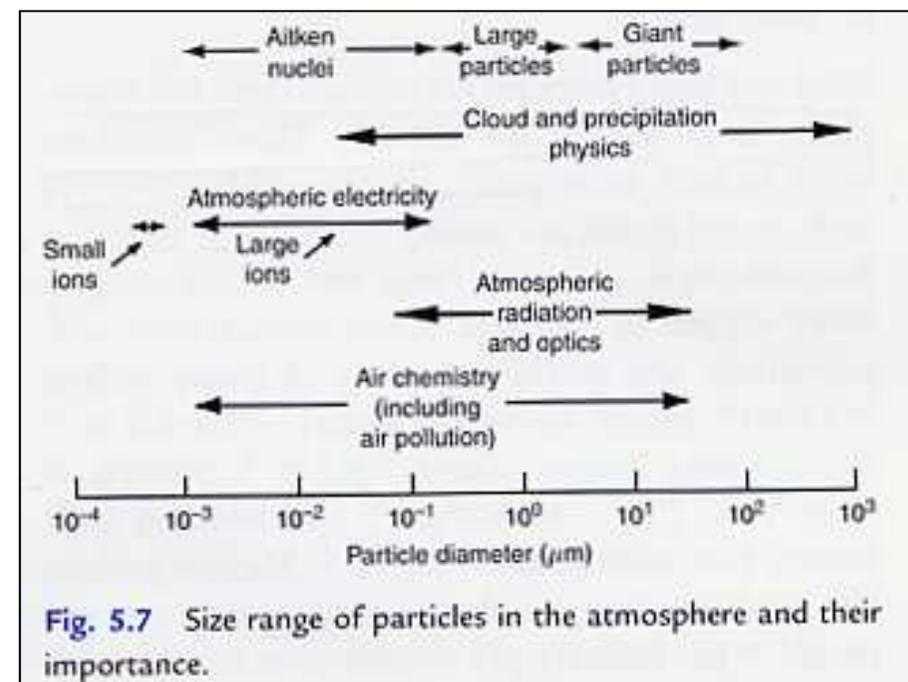
Aria urbana: 160000

Plateau Antartico: 43

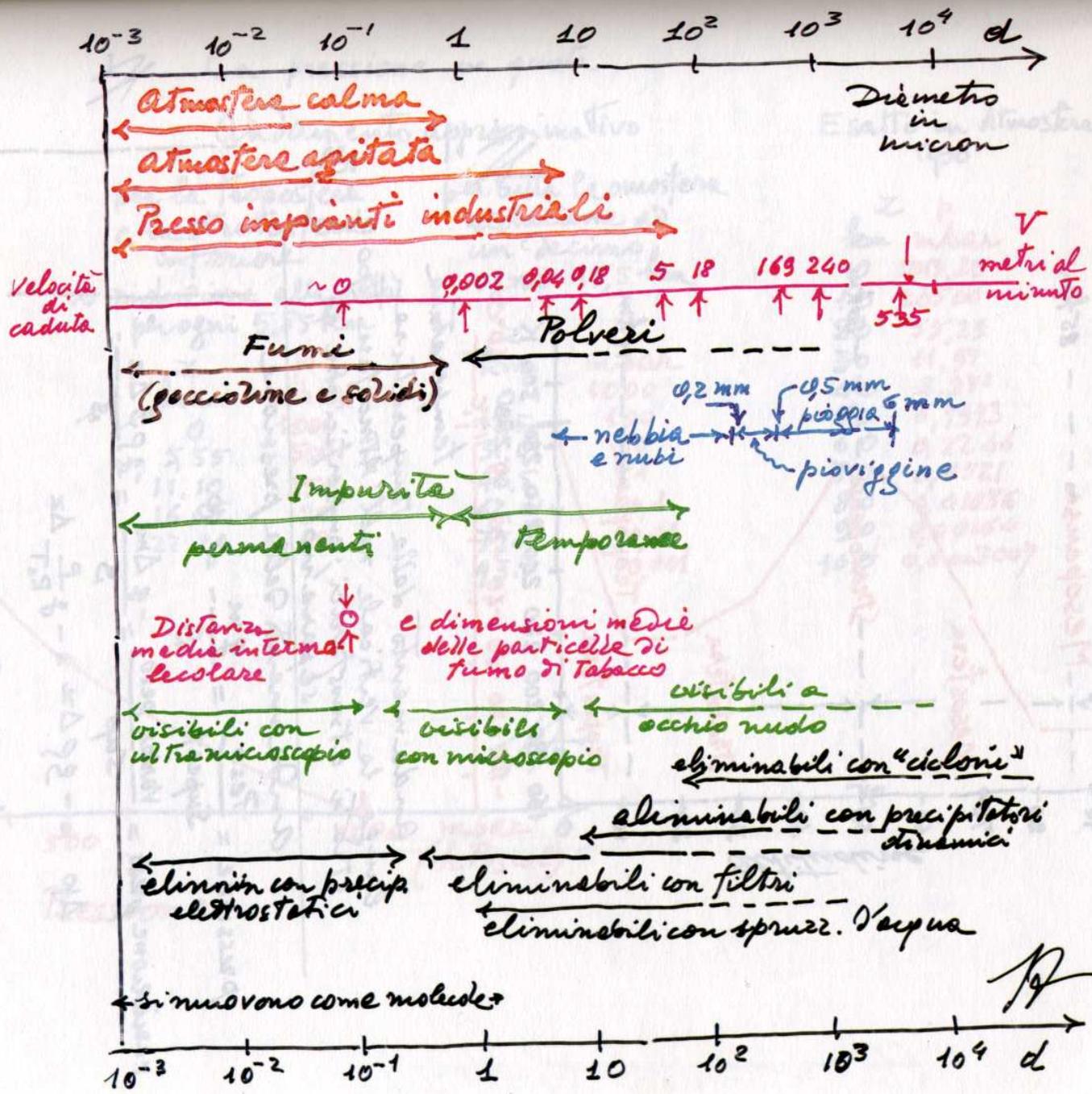
Aria desertica: 23000

Aria marina: 1000-3000

Impatto sul clima: diretto ed indiretto  
complessivamente forcing negativo



Caratteristiche delle particelle che si possono trovare sospese nell'atmosfera (pulviscolo, gocce e goccioline d'acqua e d'altri liquidi)



*[Handwritten signature]*

# Scale spazio-temporali dei fenomeni atmosferici

Table 9.1 Scales of horizontal motion in the atmosphere

Larger than	Scale	Name
20,000 km		Planetary scale
2,000 km		Synoptic scale
200 km	Meso- $\alpha$	} Mesoscale
20 km	Meso- $\beta$	
2 km	Meso- $\gamma$	
200 m	Micro- $\alpha$	Boundary-layer turbulence
20 m	Micro- $\beta$	Surface-layer turbulence
2 m	Micro- $\gamma$	Inertial subrange turbulence
2 mm	Micro- $\delta$	Fine-scale turbulence
Air molecules	Molecular	Viscous dissipation subrange

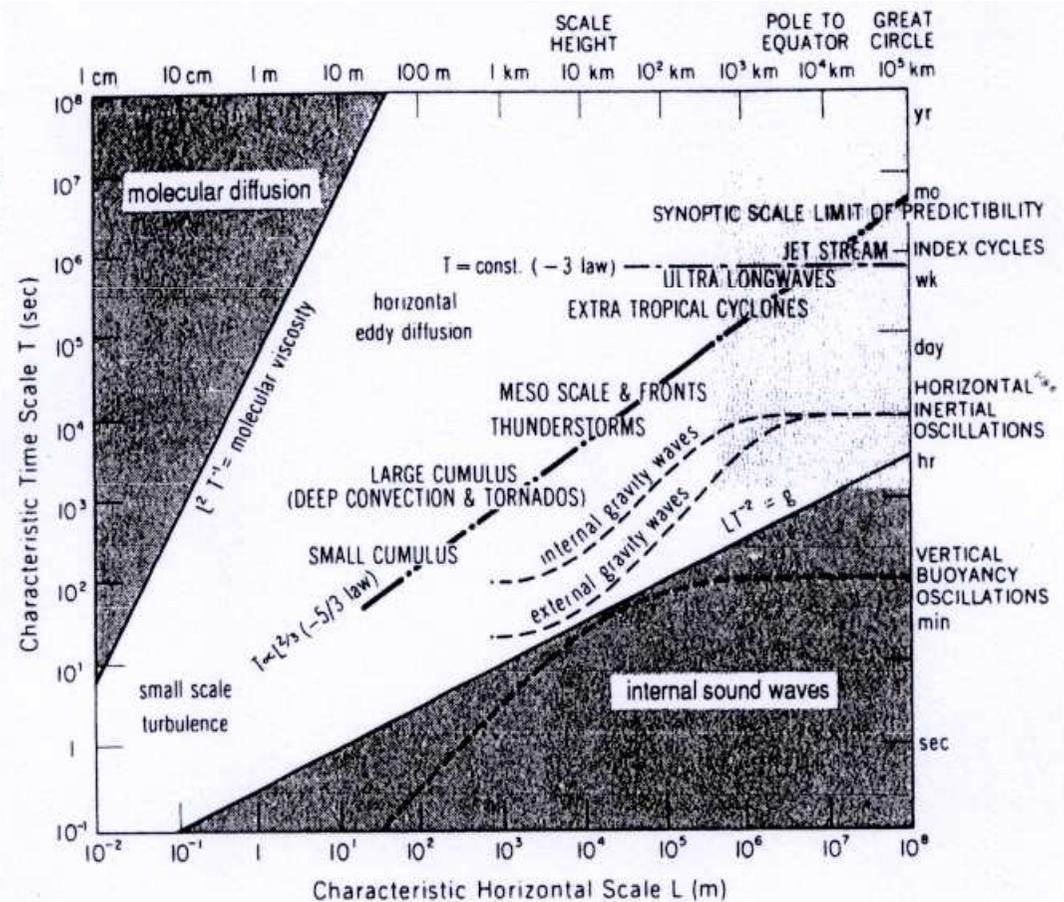


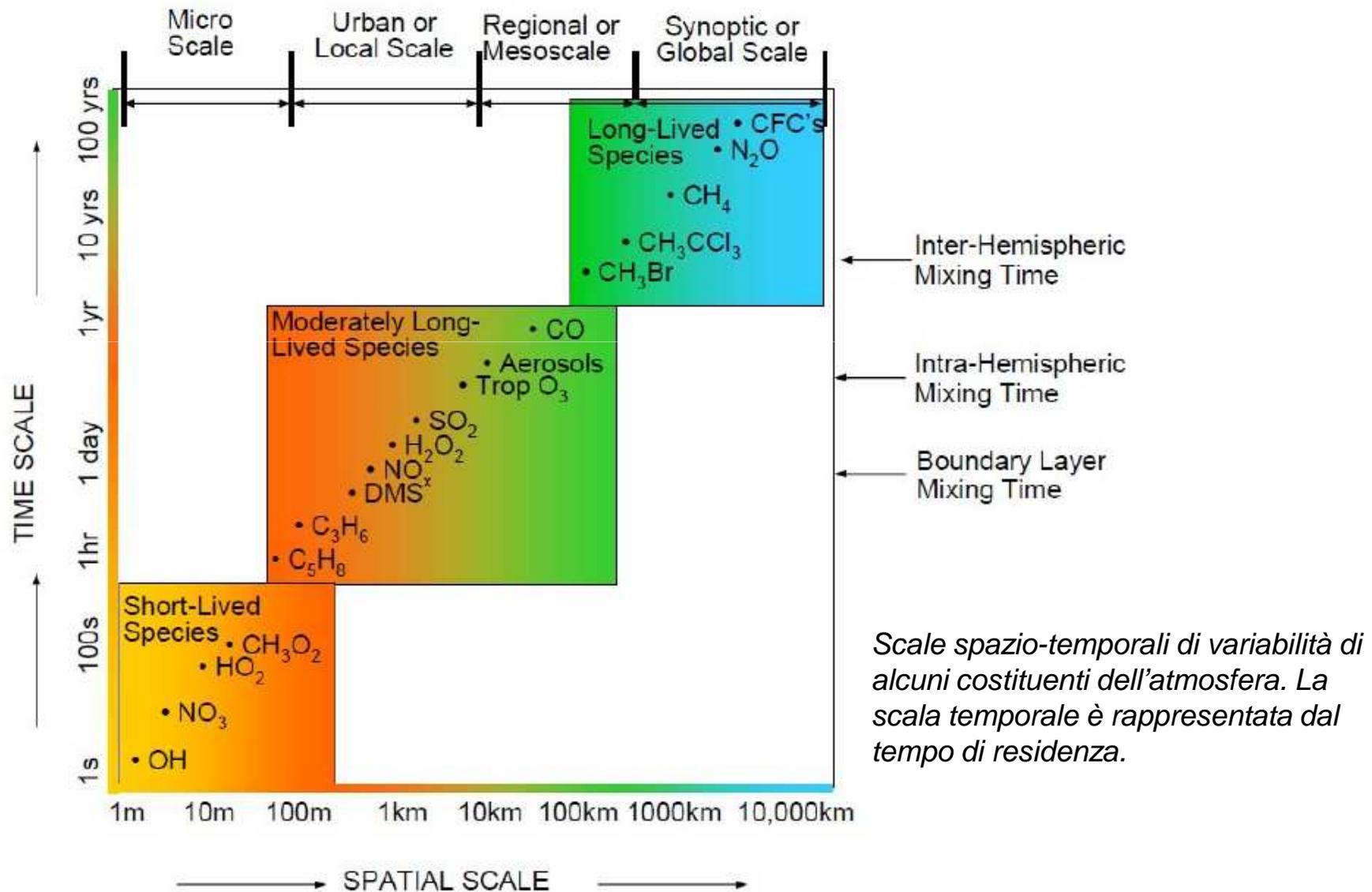
Fig. 6.2 Diagram showing the space and time scales of phenomena in the atmosphere. Light shading represents approximately scales that can be resolved in climate models. [From Smagorinsky (1974).]

Table 1.1 *Atmospheric scale definitions. (Adapted after Thunis and Bornstein 1996.)*

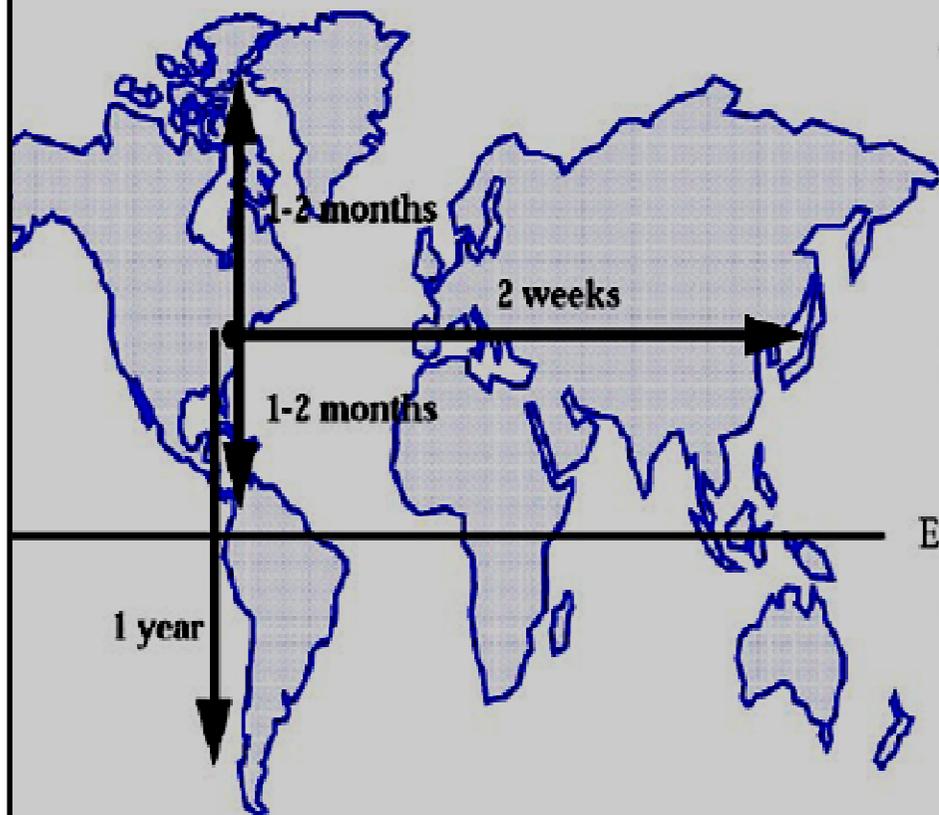
Horizontal Scale	Lifetime	Stull (1988)	Pielke (2002)	Orlanski (1975)	Thunis and Bornstein (1996)	Atmospheric Phenomena
10 000 km	1 month	Macro	Synoptic Regional	Macro- $\alpha$	Macro- $\alpha$	General circulation, long waves
				Macro- $\beta$	Macro- $\beta$	Synoptic cyclones
2000 km	1 week	Macro	Regional	Meso- $\alpha$	Macro- $\gamma$	Fronts, hurricanes, tropical storms, short cyclone waves, mesoscale convective complexes
200 km	1 day			Meso- $\beta$	Meso- $\beta$	Mesocyclones, mesohighs, supercells, squall lines, inertia-gravity waves, cloud clusters, low-level jets, thunderstorm groups, mountain waves, sea breezes
20 km	1 h	Meso	Meso	Meso- $\gamma$	Meso- $\gamma$	Thunderstorms, cumulonimbi, clear-air turbulence, heat island, macrobursts
2 km				Micro- $\alpha$	Meso- $\delta$	Cumulus, tornadoes, microbursts, hydraulic jumps
200 m	30 min	Micro	Micro	Micro- $\beta$	Micro- $\beta$	Plumes, wakes, waterspouts, dust devils
20 m	1 min			Micro- $\gamma$	Micro- $\delta$	Turbulence, sound waves
2 m	1 s	Micro- $\delta$				

tempo di residenza breve → variazioni di concentrazione su scale spaziali piccole  
 → presenti solo in prossimità delle sorgenti

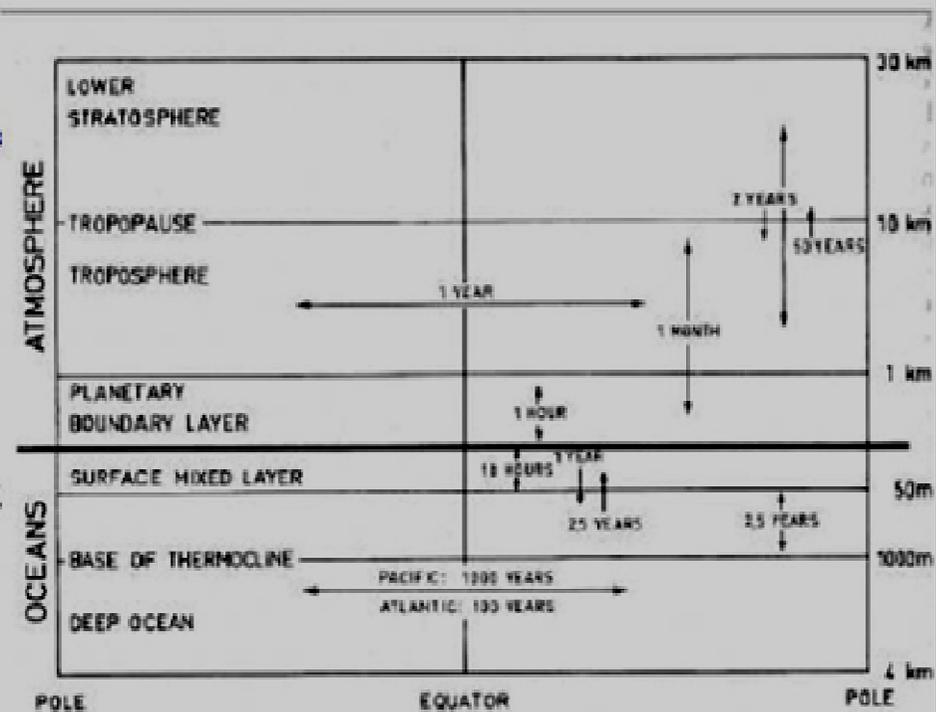
tempo di residenza lungo → concentrazioni più uniformi, circolazione globale



# Characteristic transport times



Jacob, 1999



Jacobson et al., 2000