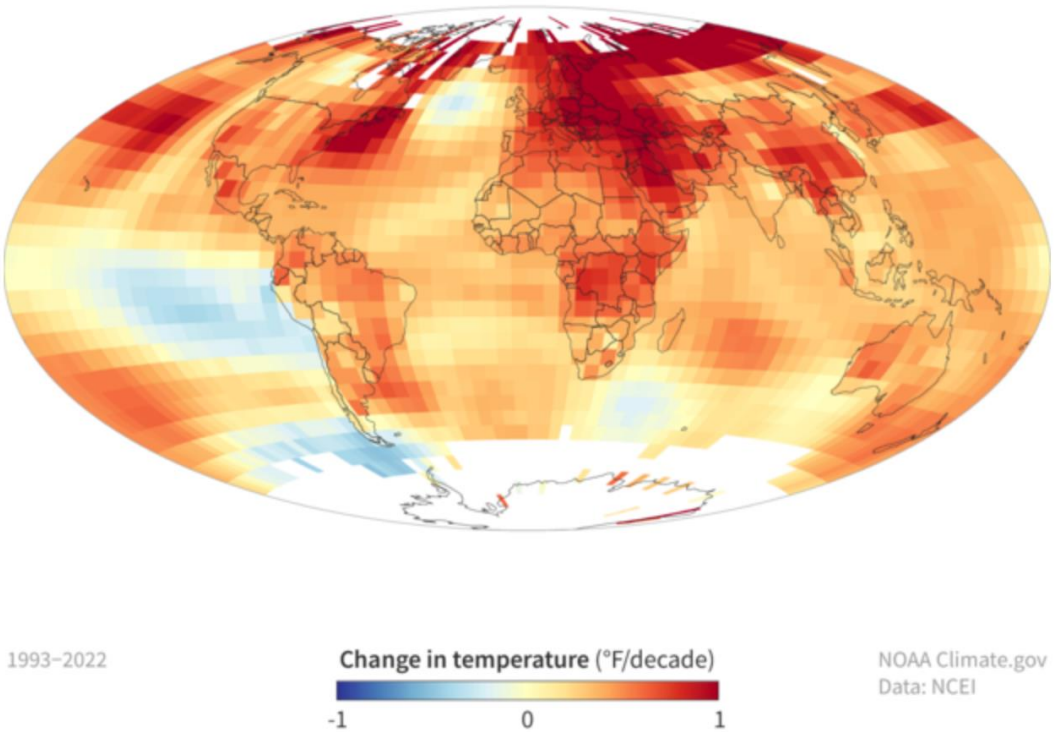
Fisica dell'atmosfera e dispersione degli inquinanti



x 5/9 → K

<u>Introduzione</u>: composizione dell'atmosfera, principali sostanze inquinanti e loro effetti su salute ed ambiente

http://www.ge.infn.it/~prati

Riferimenti Bibliografici

John H. Seinfeld and Spyros N. Pandis, Atmospheric chemistry and physics: from aor pollution to climate change

(Biblioteca UNIGE)

John H. Seinfeld, Atmospheric chemistry and physics of air pollution

(Biblioteca UNIGE)

Hanwant B. Singh, Composition, Chemistry, and climate of the Atmosphere

(Biblioteca UNIGE)

William C. Hinds, Aerosol Technology, Wiley & Sons Inc

(INFN – labfisa)

EU Directive 2008/50/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe

D. L.vo 155/2010, Supplemento ordinario G.U., n. 216 del 15/9/10 serie generale

Composizione dell'atmosfera

TABLE 1.1. Atmospheric Gases

Gas	Average Concentration ppm	Approximate Residence Time[b]	Cycle	Status
Ar	9340	—	No cycle	Accumulation during earth's history
Ne	18	—		
Kr	1.1	—		
Xe	0.09	—		
N_2	780,840	10^6 yr	Biological and microbiological	?
O_2	209,460	10 yr		
CH_4	1.65	7 yr	Biogenic and chemical	Quasi-steady state or equilibrium (H_2O, CO_2?)
CO_2	332	15 yr	Anthropogenic and biogenic	
CO	0.05–0.2[a]	65 days	Anthropogenic and chemical	
H_2	0.58	10 yr	Biogenic and chemical	
N_2O	0.33	10 yr	Biogenic and chemical	
SO_2	10^{-5}–10^{-4}	40 days	Anthropogenic and chemical	
NH_3	10^{-4}–10^{-3}	20 days	Biogenic, chemical, rainout	
$NO + NO_2$	10^{-6}–10^{-2}	1 day	Anthropogenic, chemical, lightning	
O_3	10^{-2}–10^{-1}	?	Chemical	
HNO_3	10^{-5}–10^{-3}	1 day	Chemical, rainout	
H_2O	Variable	10 days	Physico-chemical	
He	5.2	10 yr		

[a]Species with a range of concentrations indicated are those classed as air pollutants.
[b]Subsequently we will discuss how atmospheric residence times are determined.

L'atmosfera è una miscela di gas: (N_2: 78.08%, O_2: 20.95%, Ar: 0.934%, CO_2: 0.033%,...).

La sua composizione, grazie al ciclo dell'ossigeno è rimasta sostanzialmente costante fino all'inizio dell'era industriale.

Il ciclo dell'ossigeno

L'Ossigeno viene continuamente "consumato" nei processi di combustione (tra cui la respirazione):

$$C + O_2 \rightarrow CO_2$$

Ma il processo della fotosintesi clorofilliana e la dissociazione del vapore acqueo da parte dei raggi ultravioletti, lo libera nuovamente in atmosfera:

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

$$2H_2O + \gamma_{uv} \rightarrow O_2 + 2H_2$$

L'immissione massiccia di CO_2 in atmosfera (e processi quali la deforestazione) stanno però modificando il rapporto "naturale" tra CO_2 e O_2 in atmosfera. E' un fenomeno recente (150-200 anni) e dagli esiti non completamente compresi.

CO_2 e CH_4in atmosfera

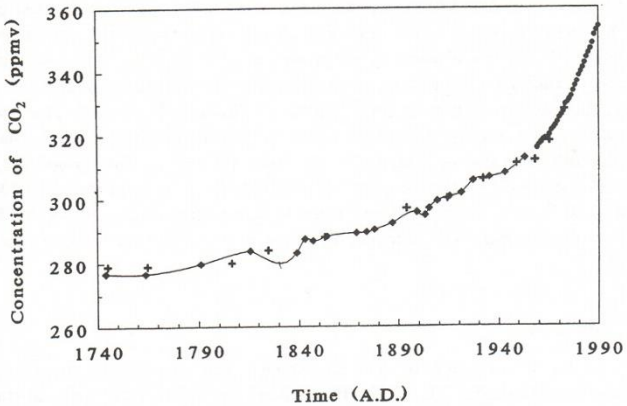


FIGURE 3.3. Concentration of CO_2 over the last 250 years: ×, Neftel et al. (1985); ◆, Fredli et al. (1986); ●, current. (Data from Friedli et al., 1986.)

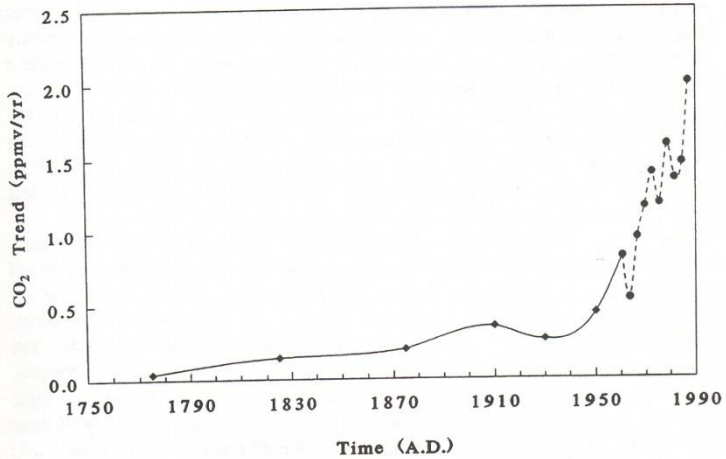


FIGURE 3.4. Trends of CO_2 during the last two centuries (using the data shown in Figure 3.3). The trends were calculated, using linear regression, over 50-year (non-overlapping) periods between 1750 and 1900, over 10 year periods between 1900 and 1960, and over 3 year periods between 1959 and 1988. The calculated trends are placed at the middle of the span of the data in each calculation. These time scales are determined by the amounts of data available.

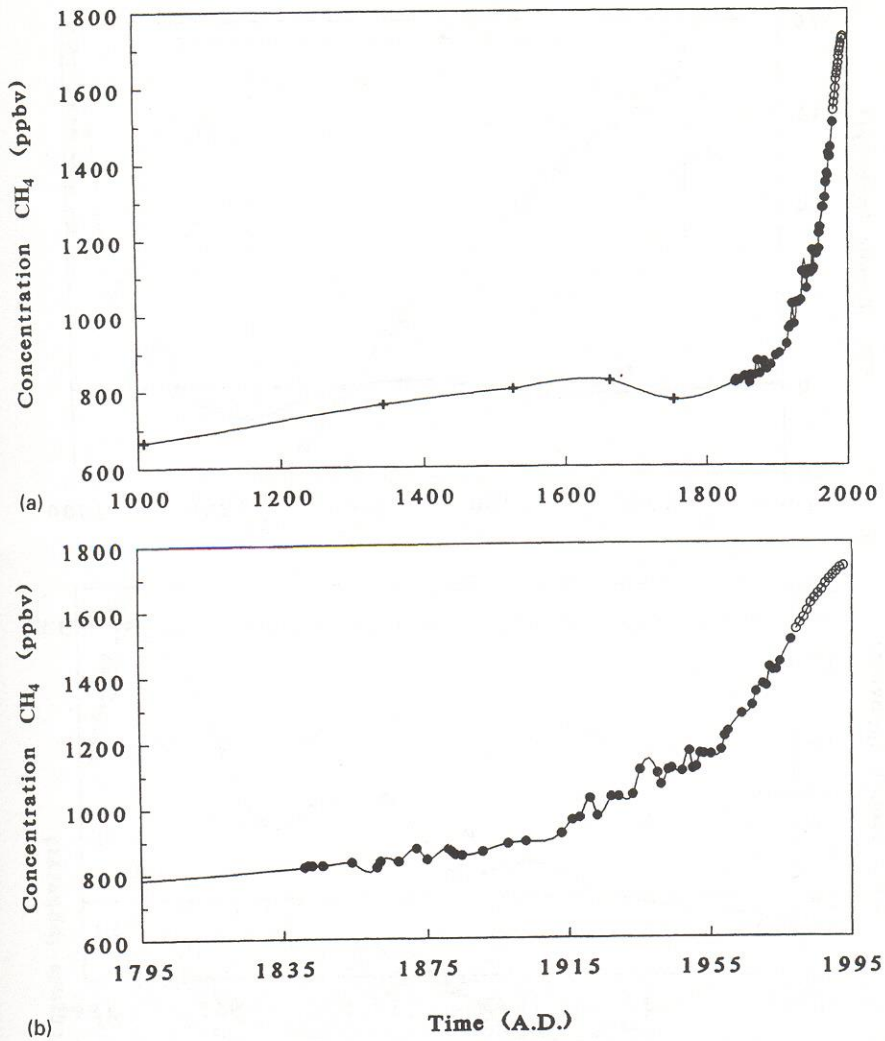
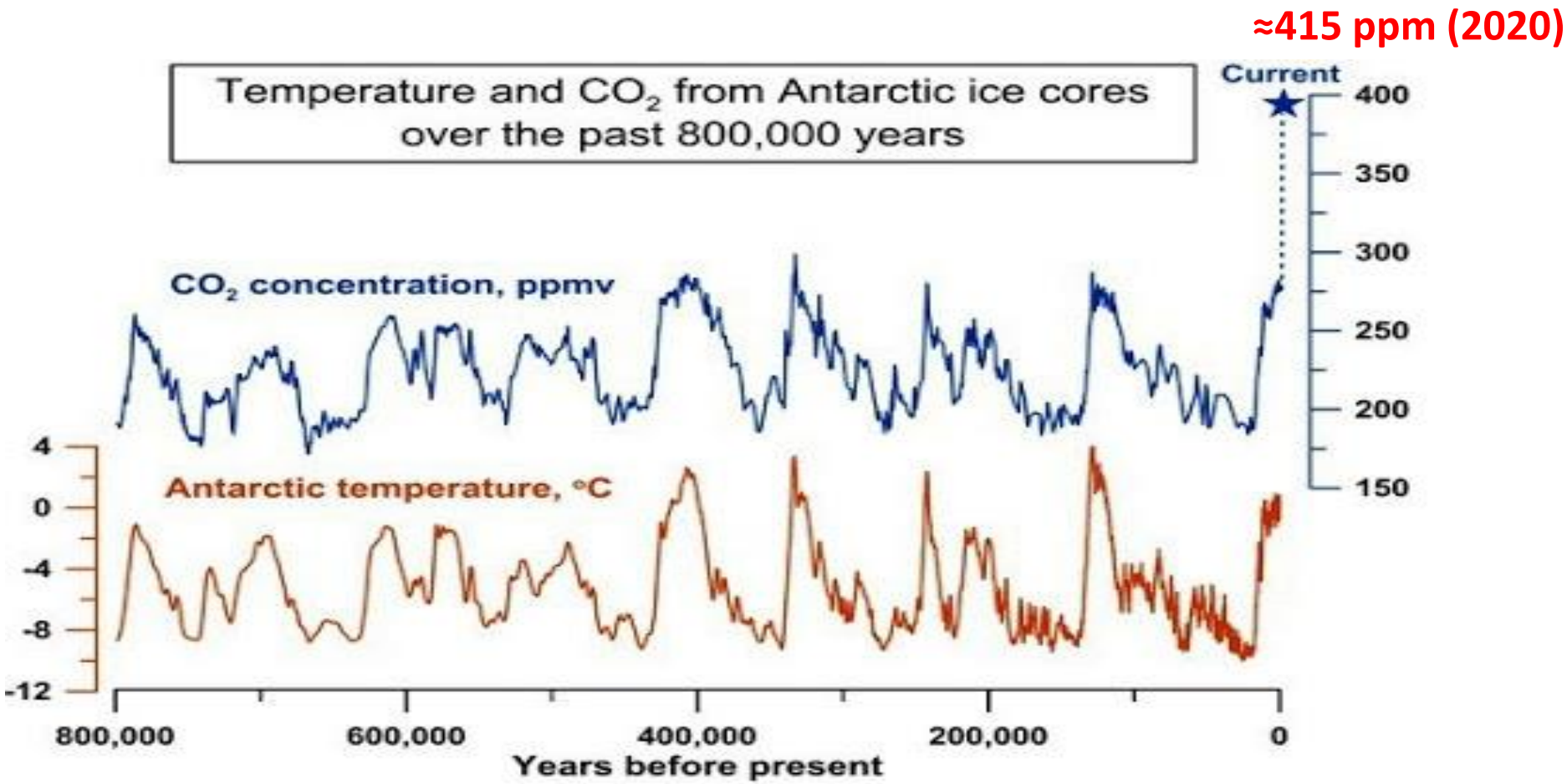
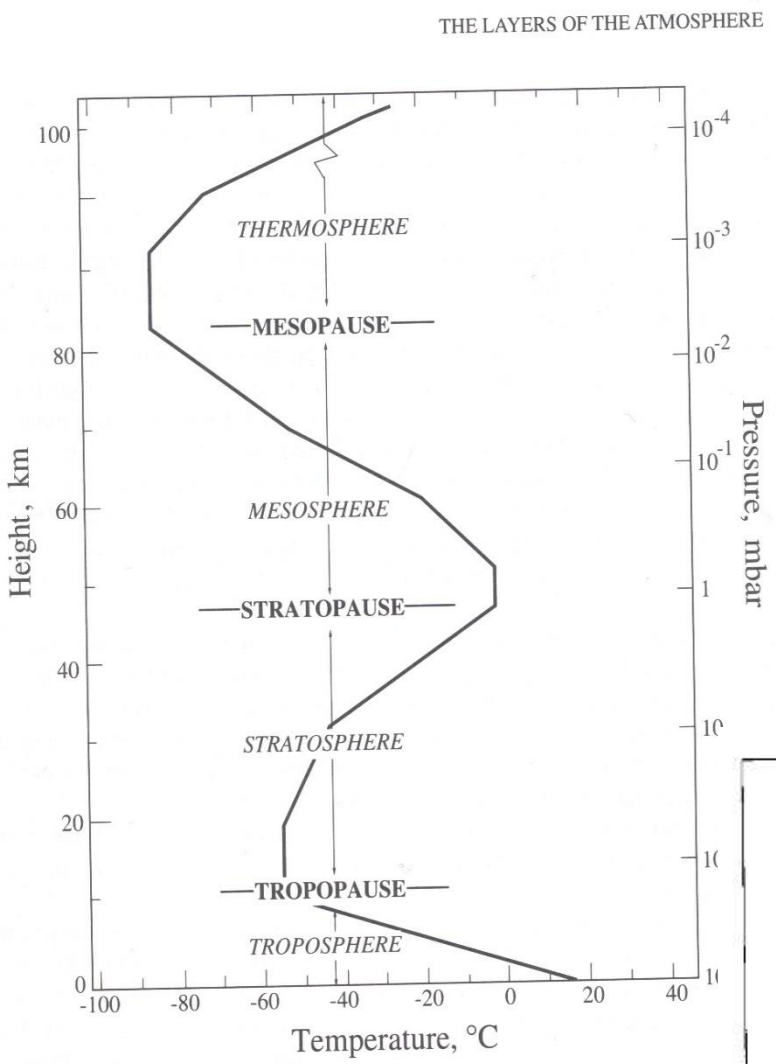


FIGURE 3.5. Concentrations of methane (a) over the last 1000 years and (b) over the last 200 years. Data of Ethridge et al. (1992) (●) and Rasmussen and Khalil (1984) (+) are from ice core samples. Data of Khalil and Rasmussen (○) are global averages from weekly flask samples collected at various latitudes.

Può trattarsi di un fenomeno «naturale» ?



Andamento della temperatura vs. altitudine



La troposfera è la sede di quasi tutti i fenomeni atmosferici: l'andamento della temperatura della quota è dovuta allo scambio termico con il suolo con possibilità di inversioni termiche in alcune situazioni (e.g. notti invernali). Inoltre c'è il raffreddamento dovuto alla espansione di una «particella» di aria che sale.

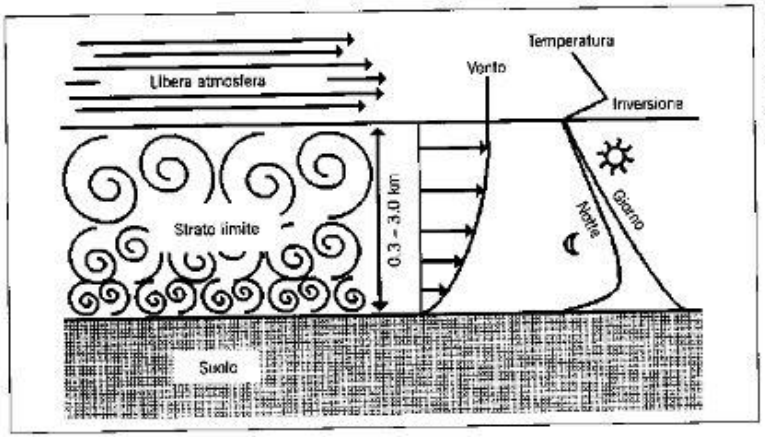
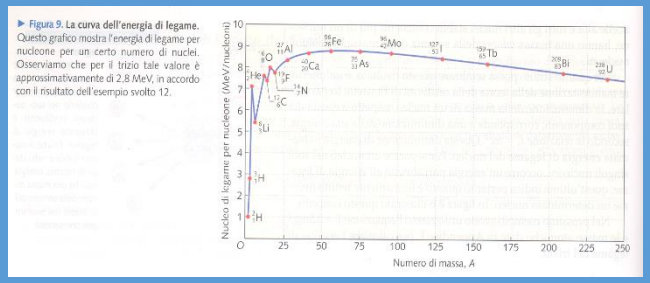


Figura 5.2
Lo strato limite dell'atmosfera che va dal suolo fino a 0.3-3.0 km di quota. Esso è caratterizzato da un aumento della velocità del vento con la quota e da una grande escursione diurna della temperatura.

H burning: il meccanismo che produce energia per la maggior parte della vita di una stella (e del Sole)

$$4p \rightarrow {}^{4}He + 2e^{+} + 2\nu_e + 26.73\ MeV$$

pp chain



$p + p \rightarrow d + e^{+} + \nu_e$

$d + p \rightarrow {}^{3}He + \gamma$

84.7 %

13.8 %

${}^{3}He + {}^{3}He \rightarrow \alpha + 2p$

${}^{3}He + {}^{4}He \rightarrow {}^{7}Be + \gamma$

13.78 %

0.02 %

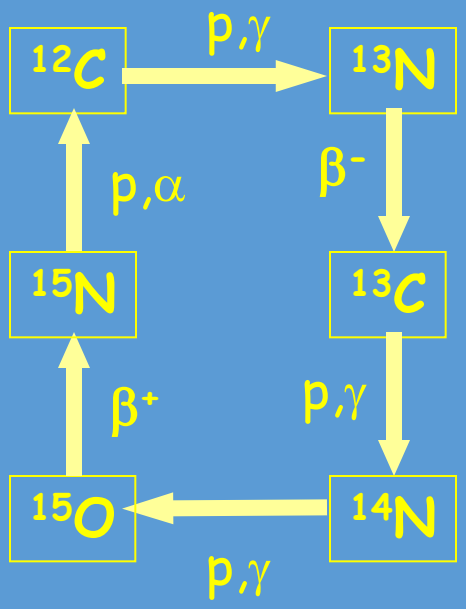
${}^{7}Be + e^{-} \rightarrow {}^{7}Li + \gamma + \nu_e$

${}^{7}Be + p \rightarrow {}^{8}B + \gamma$

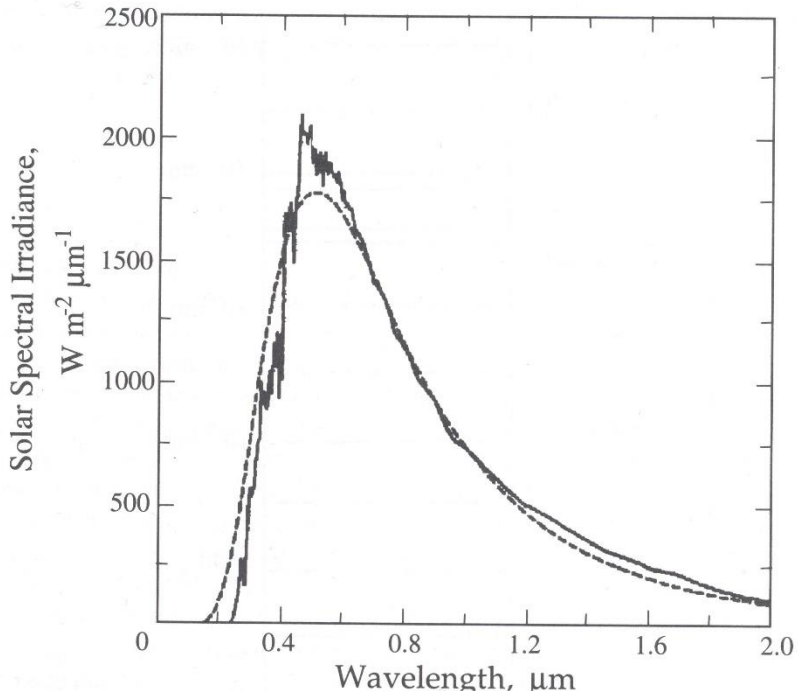
${}^{7}Li + p \rightarrow \alpha + \alpha$

${}^{8}B \rightarrow 2\alpha + e^{+} + \nu_e$

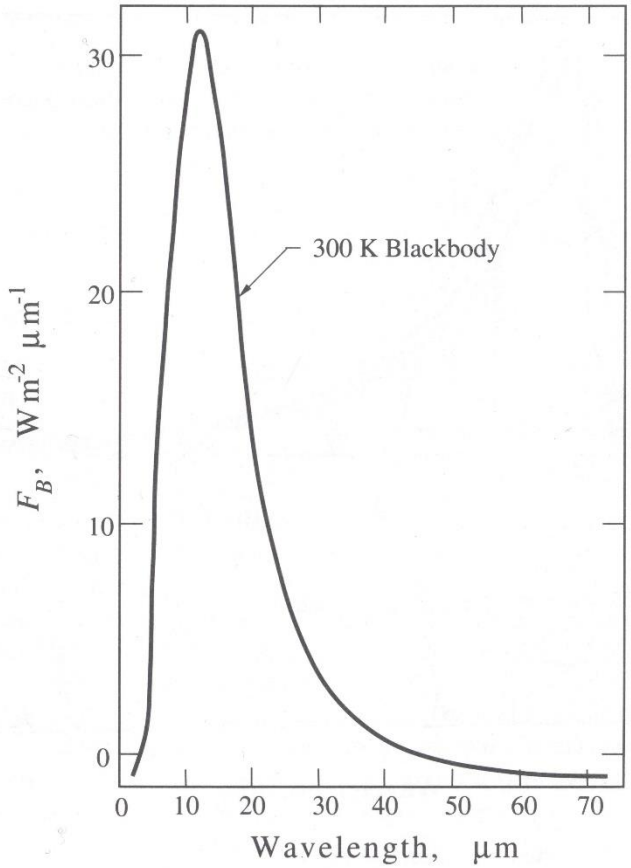
CNO cycle



Radiazione di corpo nero solare e terrestre



Spettro della radiazione <u>solare</u> alla parte superiore dell'atmosfera e spettro di corpo nero a T = 5777 K



Spettro di corpo nero a T = 300 K, circa quella della superficie <u>terrestre</u>

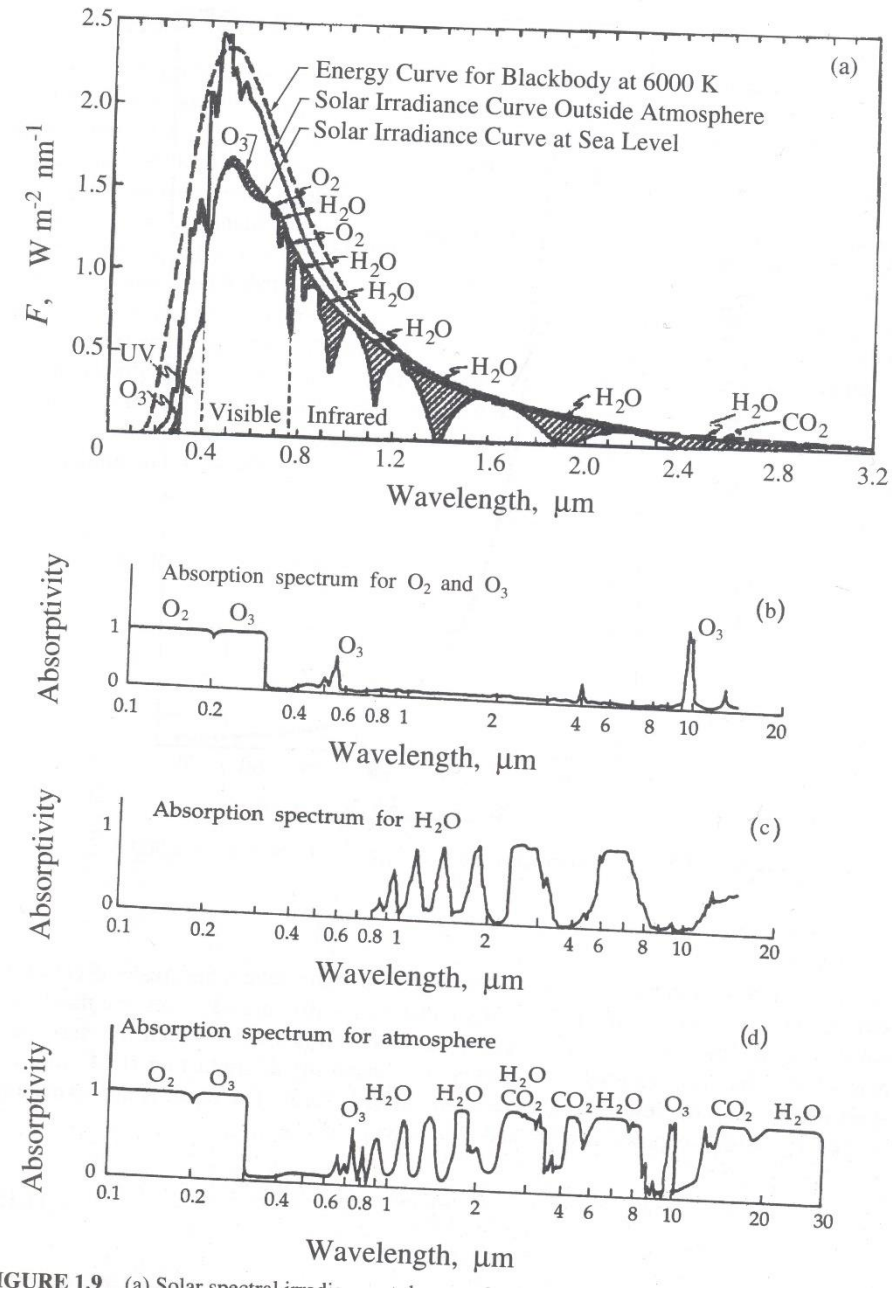


FIGURE 1.9 (a) Solar spectral irradi

Assorbimento della radiazione solare in atmosfera

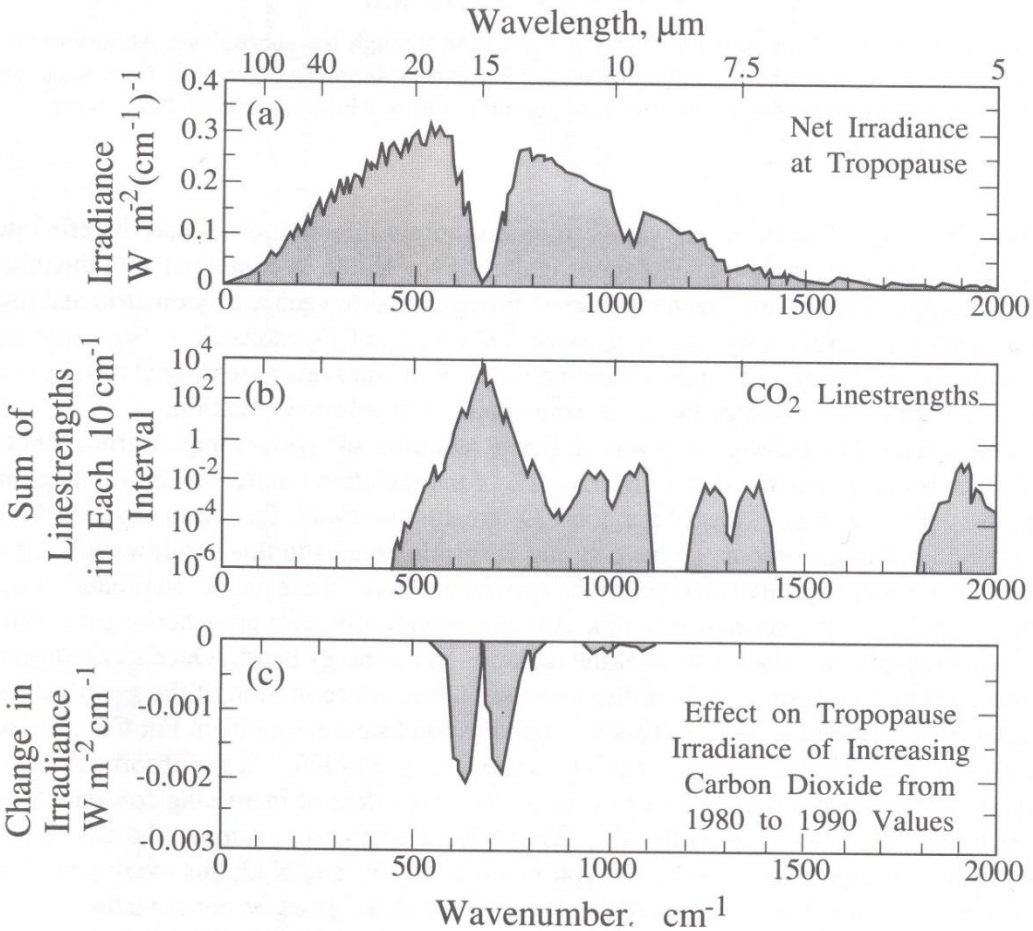
Circa il 40% dell'energia del Sole è concentrata tra 400 e 700 nm…e tra 300 e 800 nm l'atmosfera è praticamente trasparente

Attenuazione radiazione solare, altitudine e componenti dell'atmosfera

TABLE 1.2 Attenuation of Solar Radiation by the Atmosphere as a Function of Altitude

Wavelength Regions									Altitude
0.12 to 0.20 μm	0.20 to 0.29 μm	0.29 to 0.32 μm	0.32 to 0.35 μm	0.35 to 0.55 μm	0.55 to 0.9 μm	0.9 to 2.5 μm	2.5 to 7 μm	7 to 20 μm	
O_2 Absorbs almost completely		Solar irradiation intensity approximates extra-atmospheric; attenuation by scattering increases markedly toward shorter wavelengths.							Above 60 km
	0.20 to 0.21 μm absorption by O_2; absorption by O_3 appreciable	O_3 absorption not important					Energy small	Energy very small	60 km to 33 km
	No radiation penetrates below about 11 km	O_3 absorption attenuates more than loss by scattering	O_3 absorption significantly attenuates radiation	Irradiation diminished mostly by scattering by permanent gases in atmosphere	H_2O responsible for major absorption; CO_2 absorbs slightly at 2 μm; water vapor (or ice crystals) is found up to about 20 km			Strong O_3 absorption at 9.6 μm; strong CO_2 absorption at 12–17 μm	33 km to 11 km
			Highly variable aerosol responsible for attenuation in regions 0.32 to 0.7 μm		Energy transmitted with small loss down to 2 km	Energy penetrates to sea level only through "windows" at approximately 1.2, 1.6 and 2.2 μm	No significant penetration below 2 km except in "windows" at approximately 3.8 and 4.9 μm	Energy transmitted with moderate loss; many absorption bands due to atmospheric gases	11 km to 2 km
		Appreciable penetration through "clear" atmosphere to sea level: About 7% / About 30%	Penetration through "clear" atmosphere to sea level about 40%	Dust scattering and absorption					2 km to sea level

Attenuazione della radiazione terrestre



Circa l'80% della radiazione IR emessa dal pianeta tra 7 e 13 mm, sfugge nello spazio ma molti gas serra (O_2, CH_4, N_2O, CFC) assorbono fortemente in questo intervallo.

La CO_2, in alcune parti dello spettro è già in concentrazione tale da produrre la saturazione dell'assorbimento e quindi la relazione tra aumento della concentrazione ed attenuazione della radiazione non è lineare. Si stima che il raddoppio degli attuali valori di CO_2 corrisponda ad un aumento del 10% - 20% dell'effetto serra.

Effetti degli inquinanti sul clima

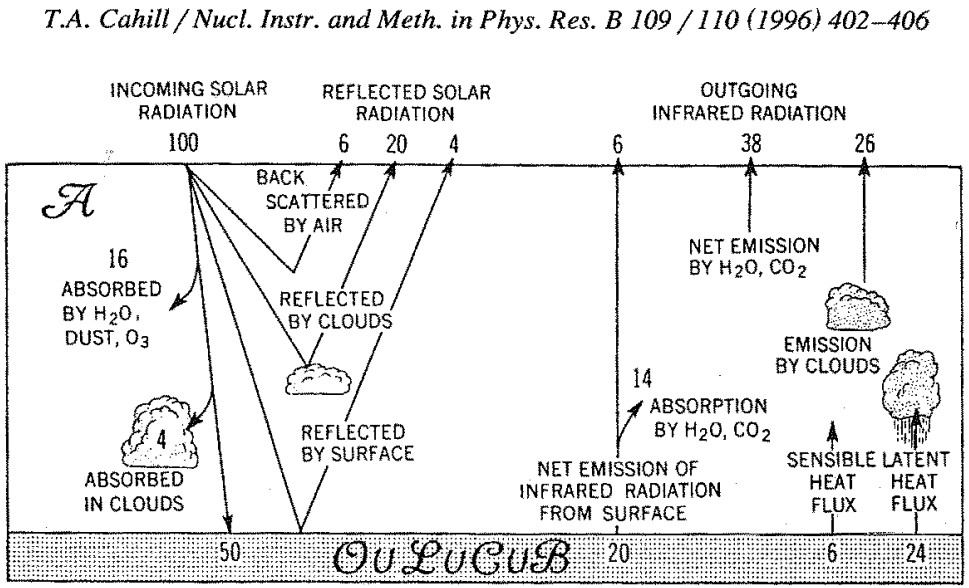


Fig. 1. Schematic diagram of the global radiation budget in the climatic system. A value of 100 units is assigned to the incoming flux of solar energy. $\mathscr{A}$ denotes the atmosphere while $\mathscr{OuLuCuB}$ refers to the union of the oceans, land, cryosphere and biosphere [1].

Il 30% della radiazione solare viene riflessa da suolo ed atmosfera, il 70% assorbita: la CO_2 *(et al.)* in atmosfera assorbe parte della radiazione infrarossa emessa dalla crosta terrestre "intrappolandola" (Effetto serra).

L'effetto serra in sé è molto positivo…

Terra: escursione termica ≈ poche decine di Celsius

Luna: di giorno +150 °C, di notte – 150 °C

Marte: di giorno +20 °C, di notte – 140 °C

Mercurio: di giorno + 427 °C, di notte – 173 °C

L'effetto Serra -1 *(secondo Fourier)*

Alla distanza dal Sole pari a quella media dell'orbita terrestre (i.e 1 «solar unit», il flusso di energia integrato su tutte le lunghezze d'onda è pari 1370 W m^{-2} (attraverso una superficie perpendicolare al flusso di radiazione.

Tale grandezza viene chiamata costante solare, S_0 e risulta, nelle ultime decadi, costante entro lo 0.1%.

La sezione del pianeta è πR^2 e l'energia viene distribuita sulla superficie terrestre $= 4\pi R^2$. Quindi per unità di superficie la potenza incidente è :

$$W_{us} = S_0 (\pi R^2 / 4 \pi R^{2)} = S_0/4 = 343 \text{ W m}^{-2}$$

L'albedo planetario, Rp, è la frazione di W_{us} che viene riflessa dalla superficie e risulta essere Rp ~ 0.3 e quindi:

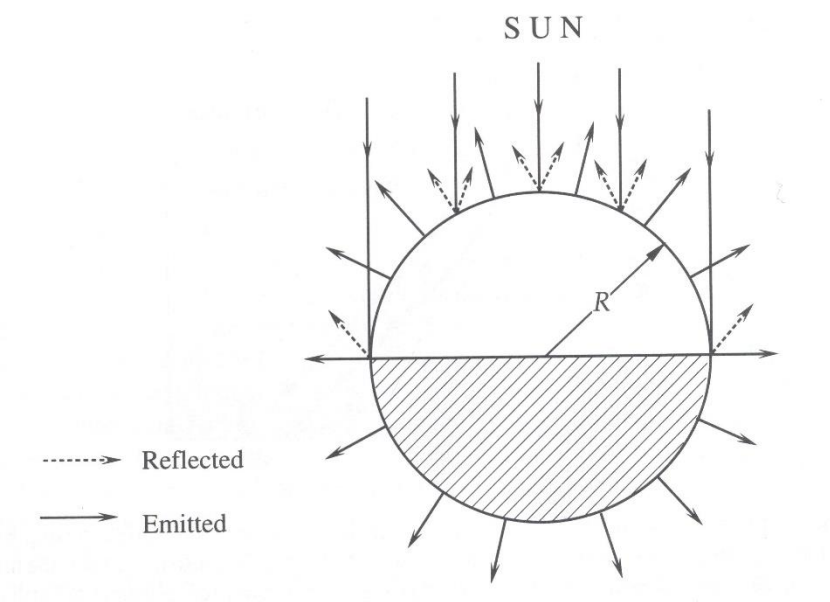
$$W_{abs} = (1 - R_p) W_{us} = 240 \text{ W m}^{-2}$$

L'effetto Serra -2

La temperatura di equilibrio del pianeta si può calcolare semplicemente imponendo che $W_{abs} = W_{irr}$ ovvero che:

$$S_0/4\,(1 - R_p) = \sigma T^4 \rightarrow T_e = [S_0\,(1 - R_p)\,/4\sigma]^{1/4} \sim 255\ K$$

Con cielo completamente terso si stima che $R_p \approx 0.15 \rightarrow T_e \sim 268\ K$



L'eq del bilancio termico prevede

$\Delta T_e = 0.5\ K$ per $\Delta S_0 = 10\ Wm^{-2}$

e/o

$\Delta R = 0.005$ (attorno a 0.3)

L'effetto Serra - 3

Ma la temperatura media al suolo risulta decisamente più alta ($T \approx 288$ K)

Fourier ha quindi perfezionato il «modello» ipotizzando che una frazione, b, della potenza emessa dal pianeta sia trattenuta in atmosfera:

$$W'_{irr}(1-b) + W_{atm} = W_{abs} \quad \text{con} \quad W'_{irr}(1-b) + W_{atm} = W_{irr}$$

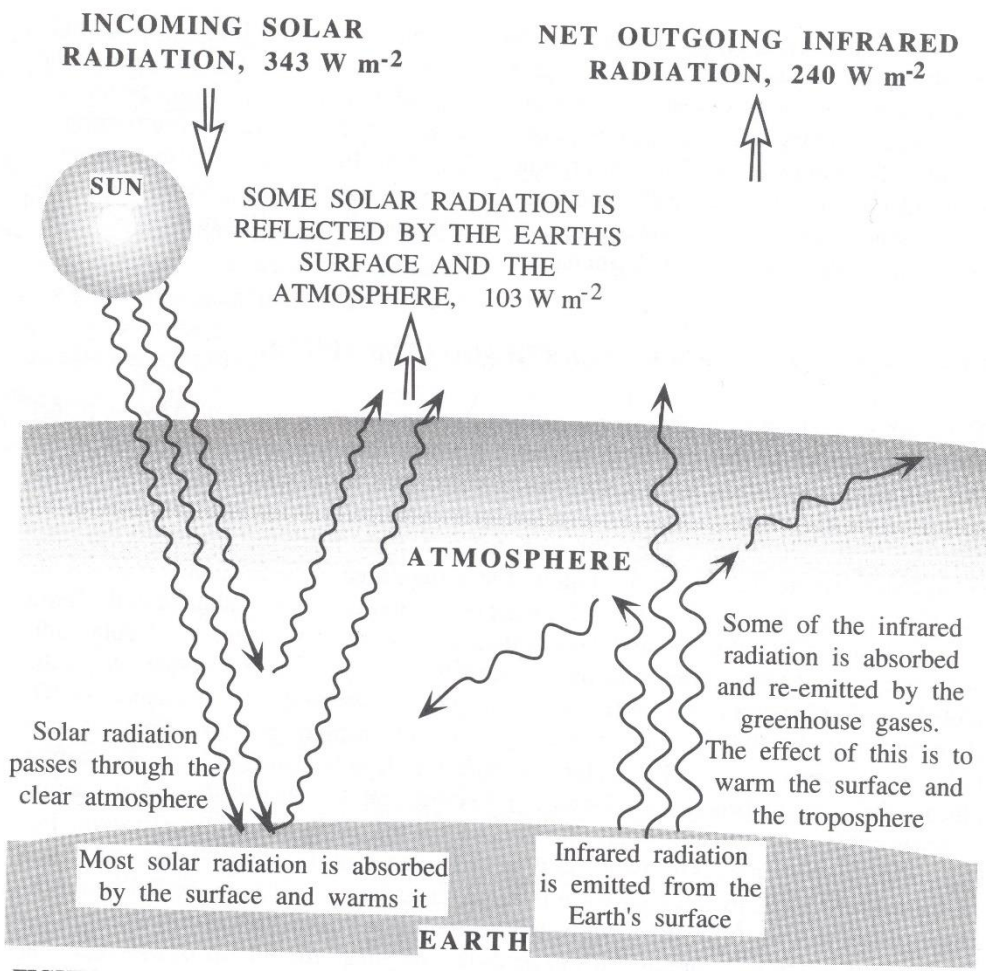
Perché l'atmosfera rimanga in equilibrio termico deve disperdere per irraggiamento la potenza W_{atm} che si può immaginare sia dispersa in parti uguali verso lo spazio e verso il pianeta ovvero:

$$W_{atm}^{\rightarrow ext} = \tfrac{1}{2}(bW'_{irr}) \rightarrow W'_{irr}(1-b) + \tfrac{1}{2}(bW'_{irr}) = W_{abs}$$

Ne segue che $W'_{irr} > W_{irr}$ e naturalmente $W'_{irr} = \sigma(T_e')^4$

Risulta appunto $\langle T_e' \rangle \approx 288$ K da cui $W'_{irr} = 390$ W m^{-2} e **b ≈ 0.77**

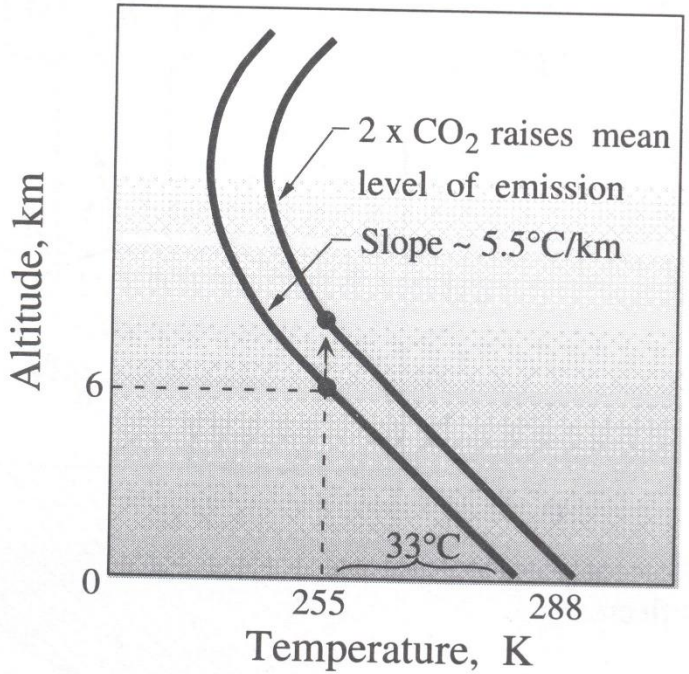
L'effetto Serra -3



La superficie del pianeta emette circa 390 W m^{-2}, quantità maggiore di quanto emesso dalla superficie dell'atmosfera <u>in condizioni di equilibrio</u> (i.e 240 W m^{-2}): la differenza è la quota assorbita dai costituenti dell'atmosfera (nuvole, vapor d'acqua e gas serra) che si trovano ad una temperatura più bassa di quella della crosta.

L'effetto Serra - 4

Il sistema terra + atmosfera emette circa 240 Wm^{-2} corrispondenti come si è visto a T_e = ~ 255 K. La superficie del pianeta però emette circa 390 Wm^{-2} che corrisponde ad un corpo nero a T = 288 K. La differenza ΔT = 33 K costituisce *l'effetto serra: tuttavia una variazione della concentrazione di CO_2 e altri GHGs porta ad un eccesso di riscaldamento del pianeta*



Da un altro punto di vista un aumento di GHGs comporta un innalzamento dell'altitudine in atmosfera in qui si raggiunge T_e = 255 K ($\Delta h \approx$ 200 m per raddoppio CO_2 da valori pre-industriali) e il pianeta si riscalda, *«effetto coperta».*

L'effetto Serra - 5

In condizioni di equilibrio quindi: $W_{net} = W_{abs} - W_{irr} = 0$. Un qualunque fenomeno che perturba l'equilibrio provoca un:

$\Delta W_{net} = \Delta W_{abs} - \Delta W_{irr}$ → $\Delta T_e = l_0 \Delta W_{net}$

Non considerando effetti di feedback si calcola banalmente che:

$\lambda_0 = (dW_{irr}/dT)^{-1} = 1/4\sigma T^3 = T_e/4W_{irr}$ climate sensitivity factor

Con $\lambda_0 \approx 0.3$ K $(W\ m^{-2})^{-1}$

In realtà una variazione dall'equilibrio comporta dei feedback: e.g. se la temperatura di equilibrio aumenta cresce la frazione di vapore acqueo in atmosfera e quindi la capacità della stessa di assorbire nell'IR con conseguente ulteriore aumento di T.

I cambiamenti climatici globali

Il *global climate change* è indotto da qualunque *forzante* che perturba l'equilibrio è provoca un flusso di energia non nullo alla superficie superiore dell'atmosfera (TOA):

$$- W_{net} = \Delta W_{abs} - \Delta W_{irr} = S_0/4\ (1 - R_p) - \Delta W_{irr}$$

Il forcing primario può essere causato da variazioni di:

S_0 ⟷ variazioni dell'orbita o della energia emessa dal sole

R_p ⟷ variazione albedo (deforestazione, agricoltura, urbanizzazione, aerosol e in misura minore gas quali O_3 che assorbono la radiazione solare incidente)

W_{irr} ⟷ variazione concentrazione GHGs e in misura minore di aerosol

Inquinanti atmosferici

Si possono catalogare in base alla loro composizione chimica:

composti dello Zolfo (S)

composti dell'Azoto (N)

composti del Carbone (C)

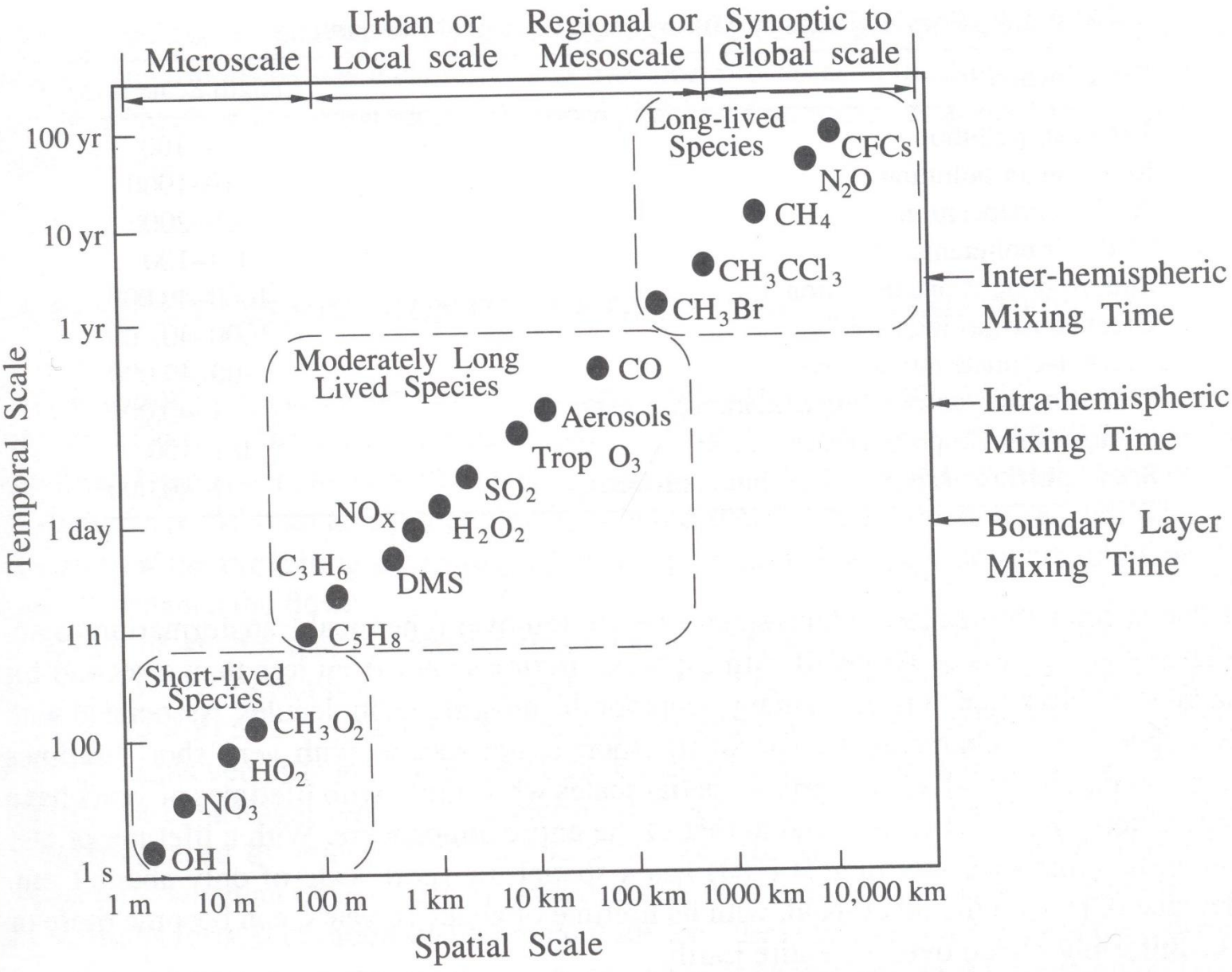
composti degli alogeni (F, Cl, Br, I)

sostanze tossiche (Pb, Cr, Hg, Ni, As, Cd, metalli in genere)

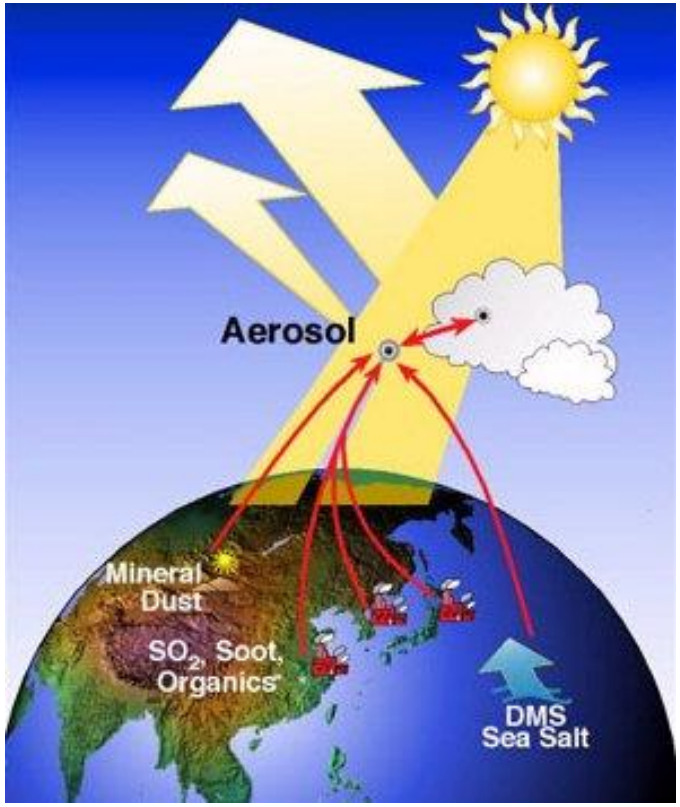
isotopi radioattivi

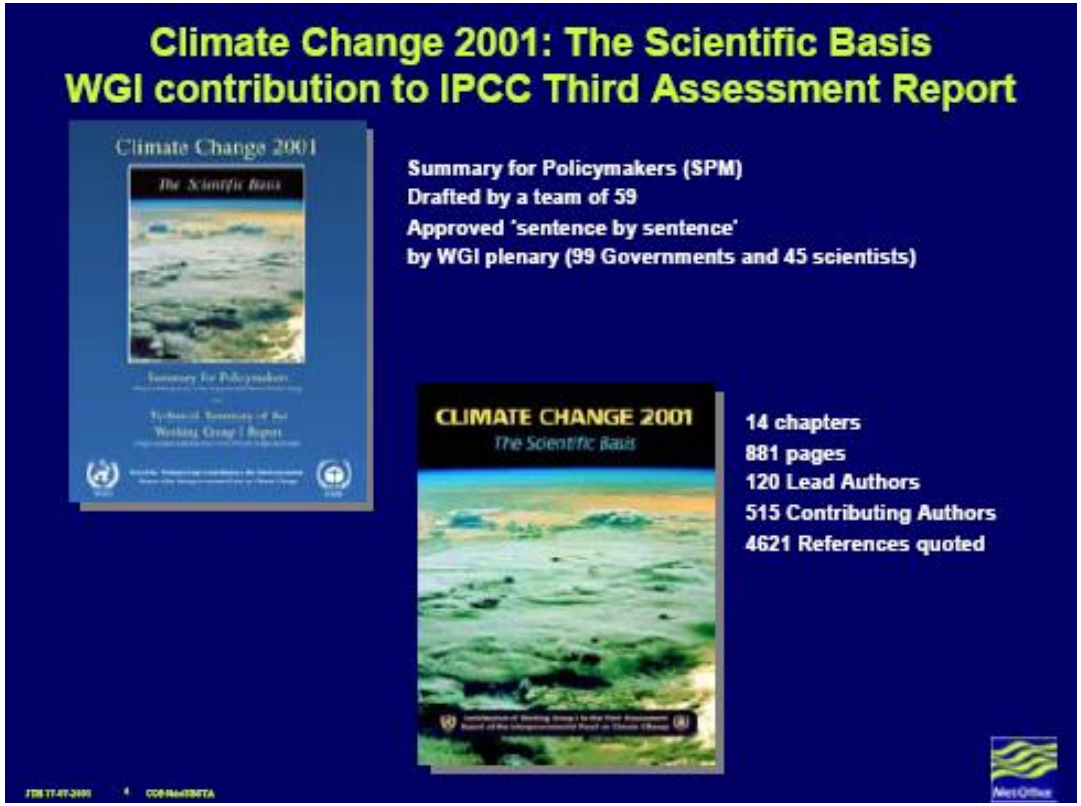
Queste sostanze possono essere presenti sotto forma di gas o di particolato (o aerosol). Si distingue anche tra inquinanti ***primari*** (emessi direttamente da particolari sorgenti: SO_x, NO_x, CO_x) e ***secondari*** che si formano in atmosfera tramite reazioni chimiche con i suoi componenti naturali (O_3, piogge acide: HS, etc)

Tempo di residenza componenti dell'atmosfera

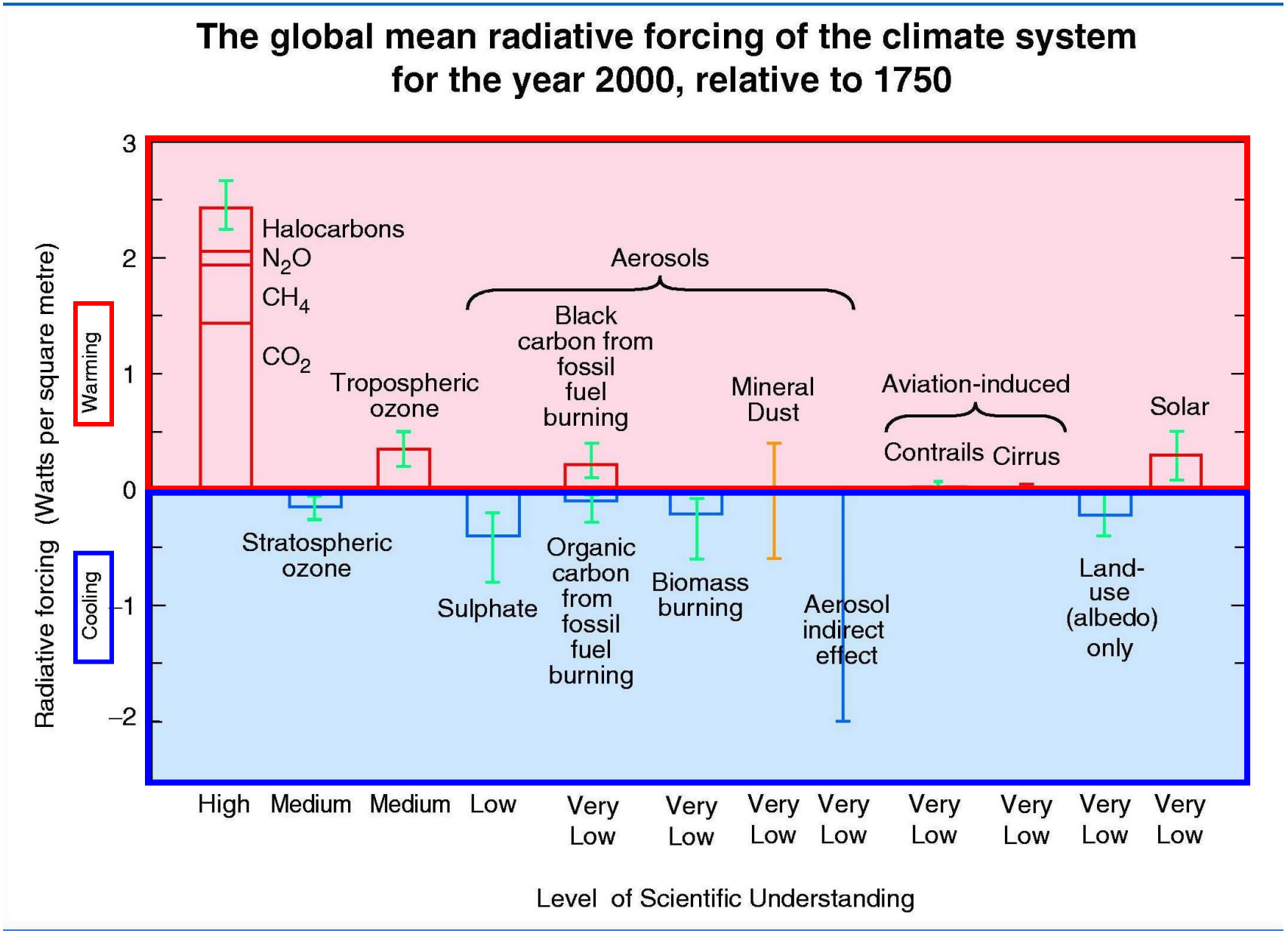


Il ruolo degli aerosol atmosferici nel Global Change



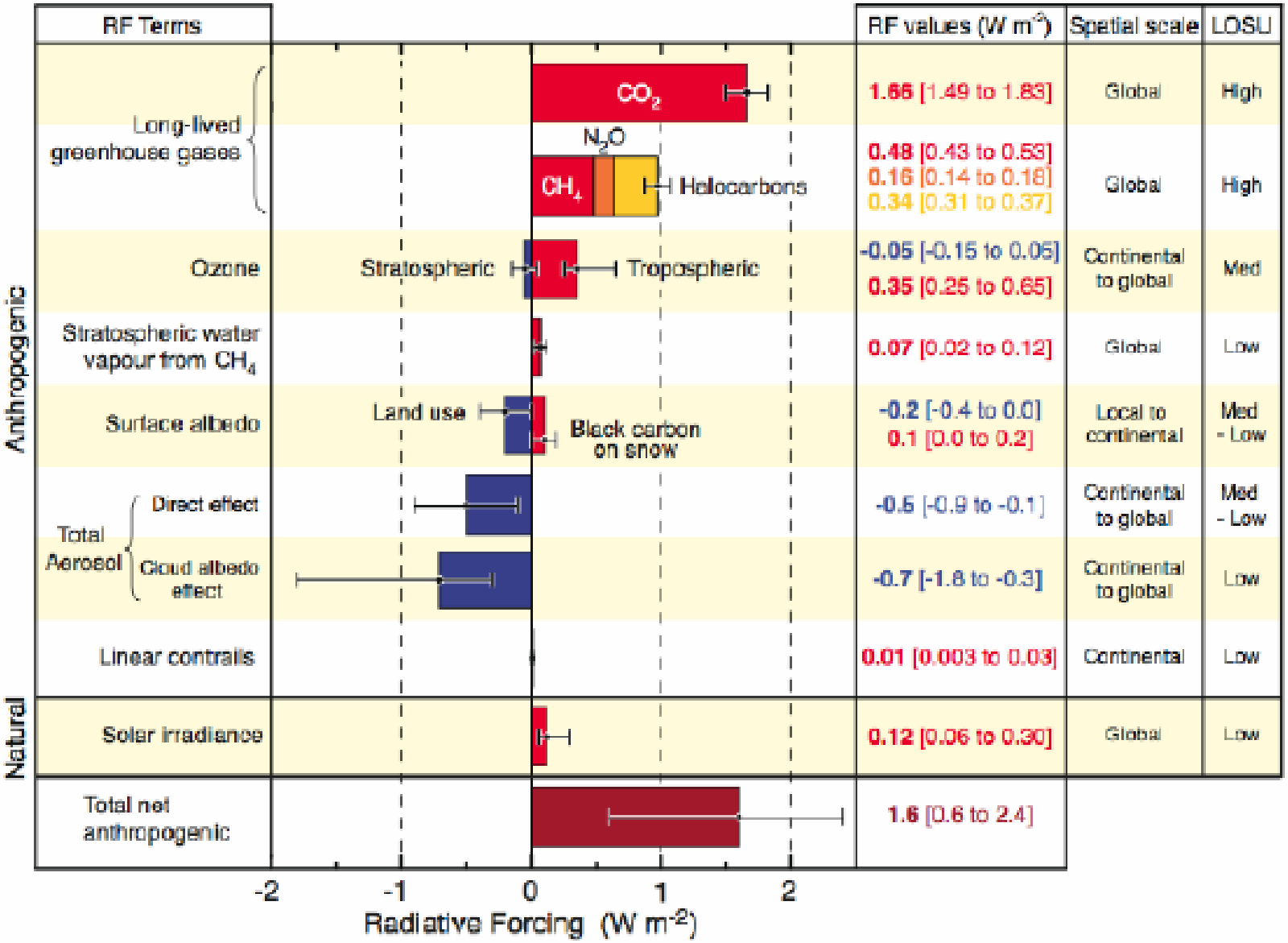


IPCC:Intergovernmental Panel for Climate Change



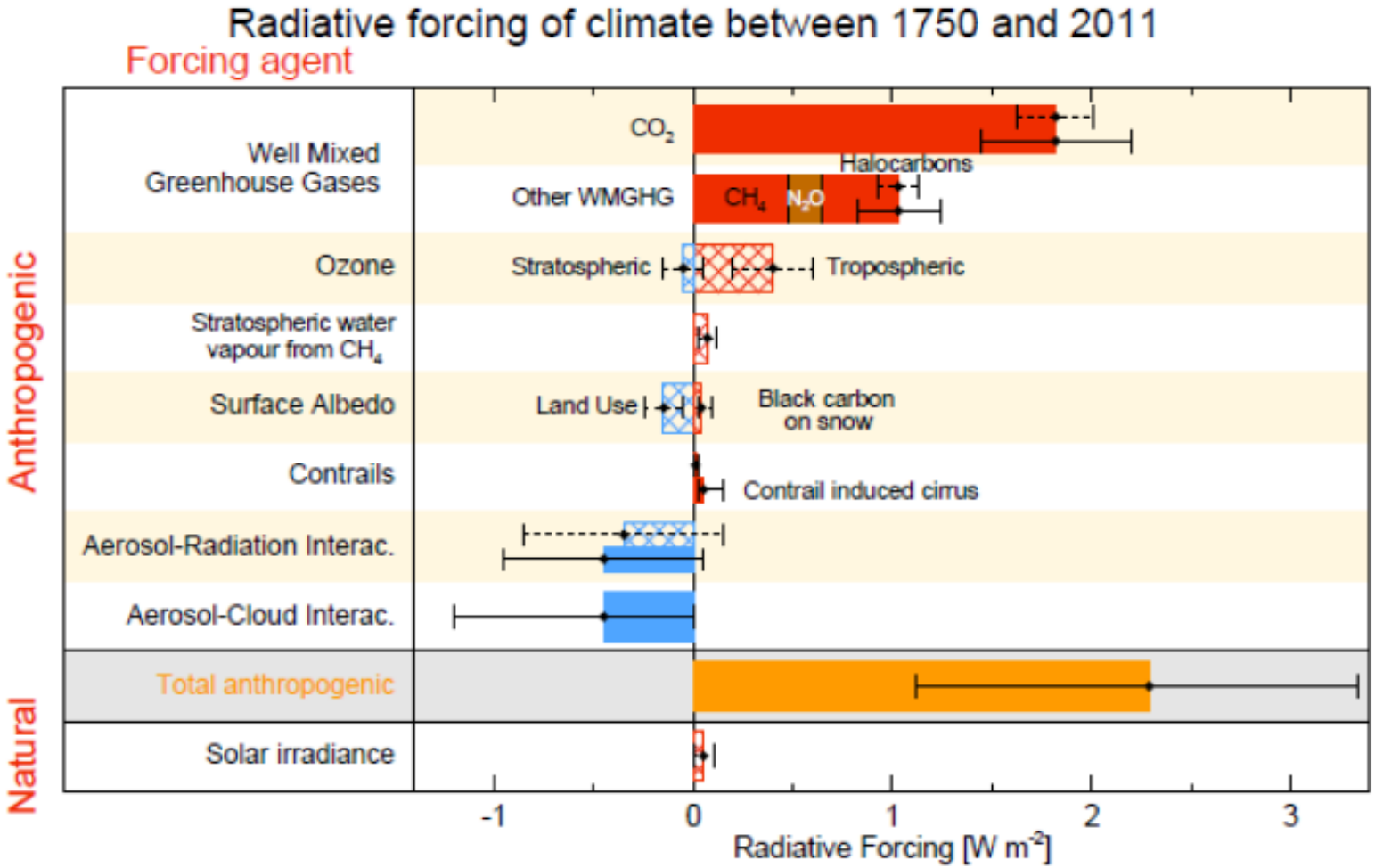
IPCC Report, 2001

Radiative Forcing Components

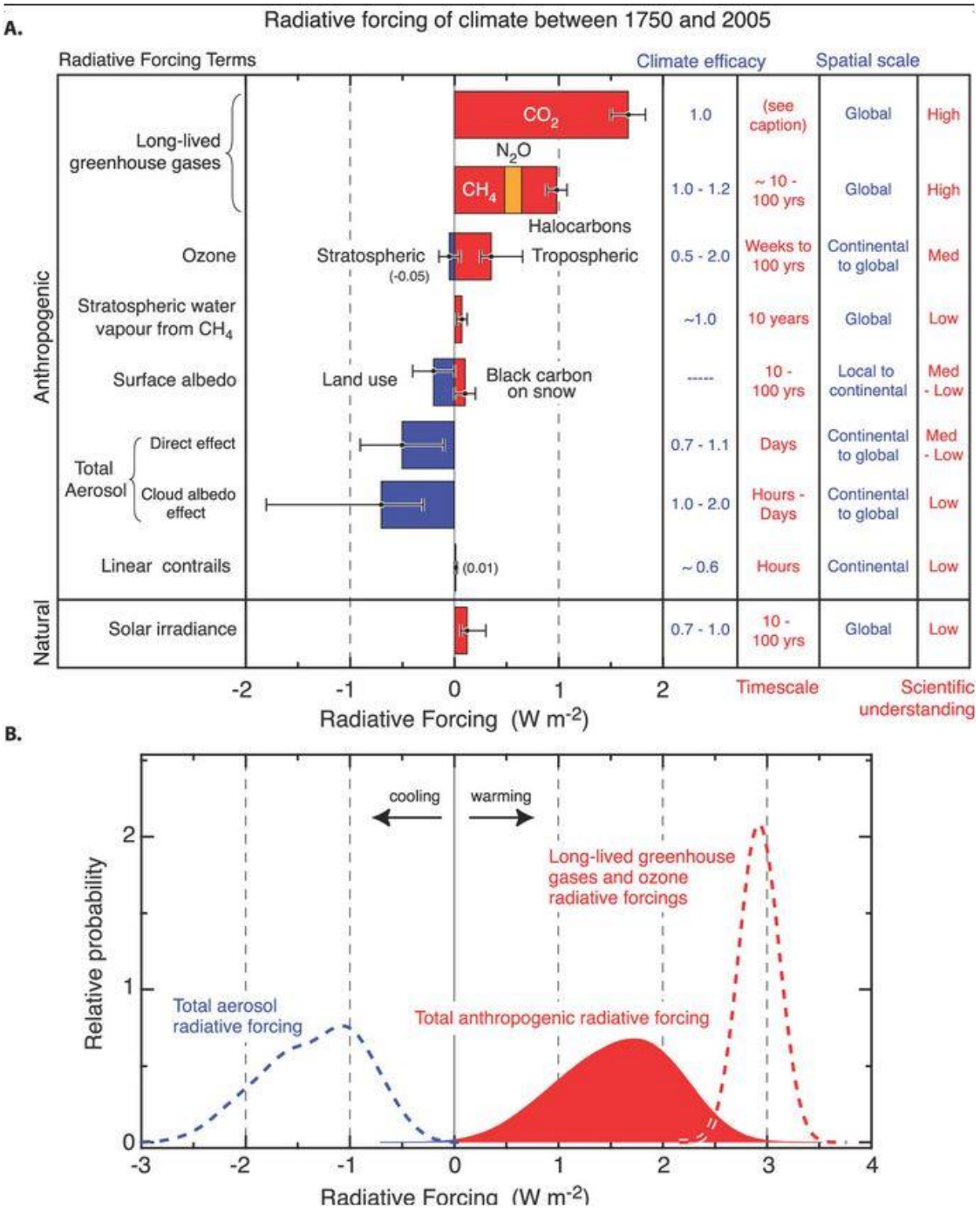


©IPCC 2007: WG1-AR4

Rapporto IPCC 2013



IPCC Report (issued 2014)



IPCC VI (2022/ 2023)

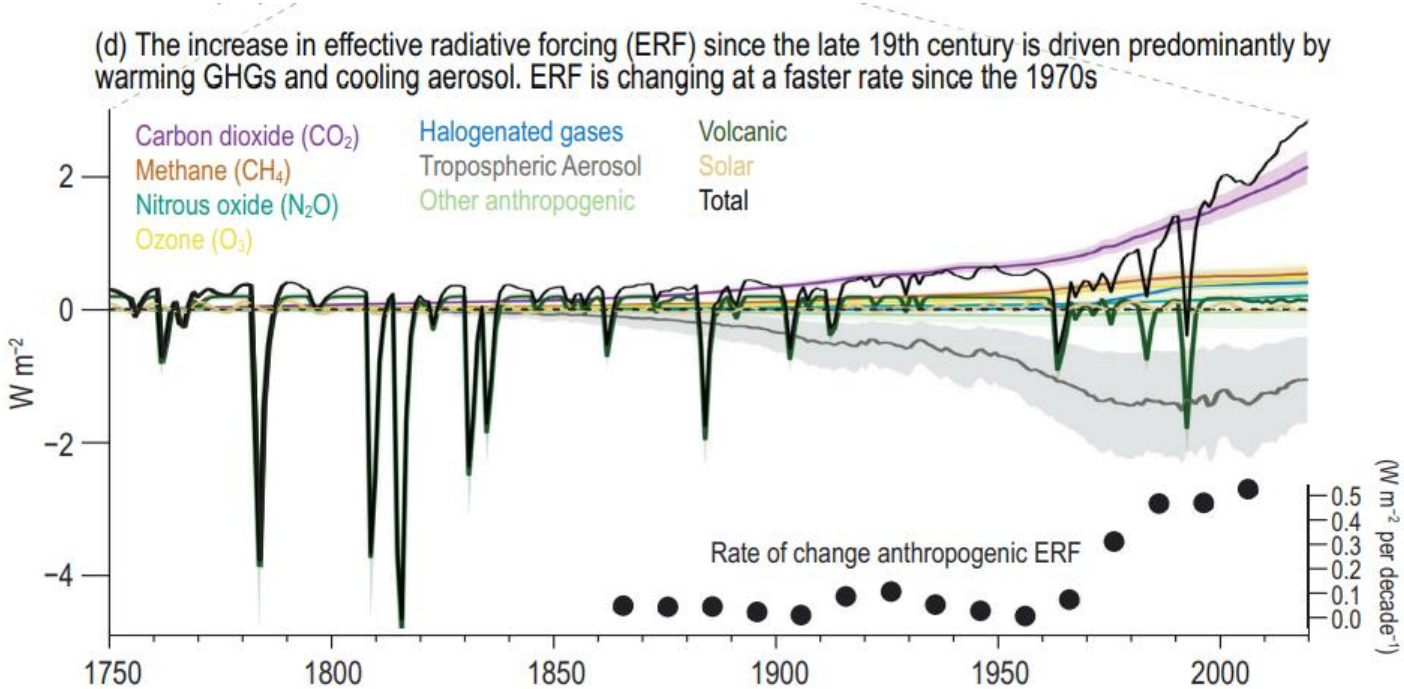
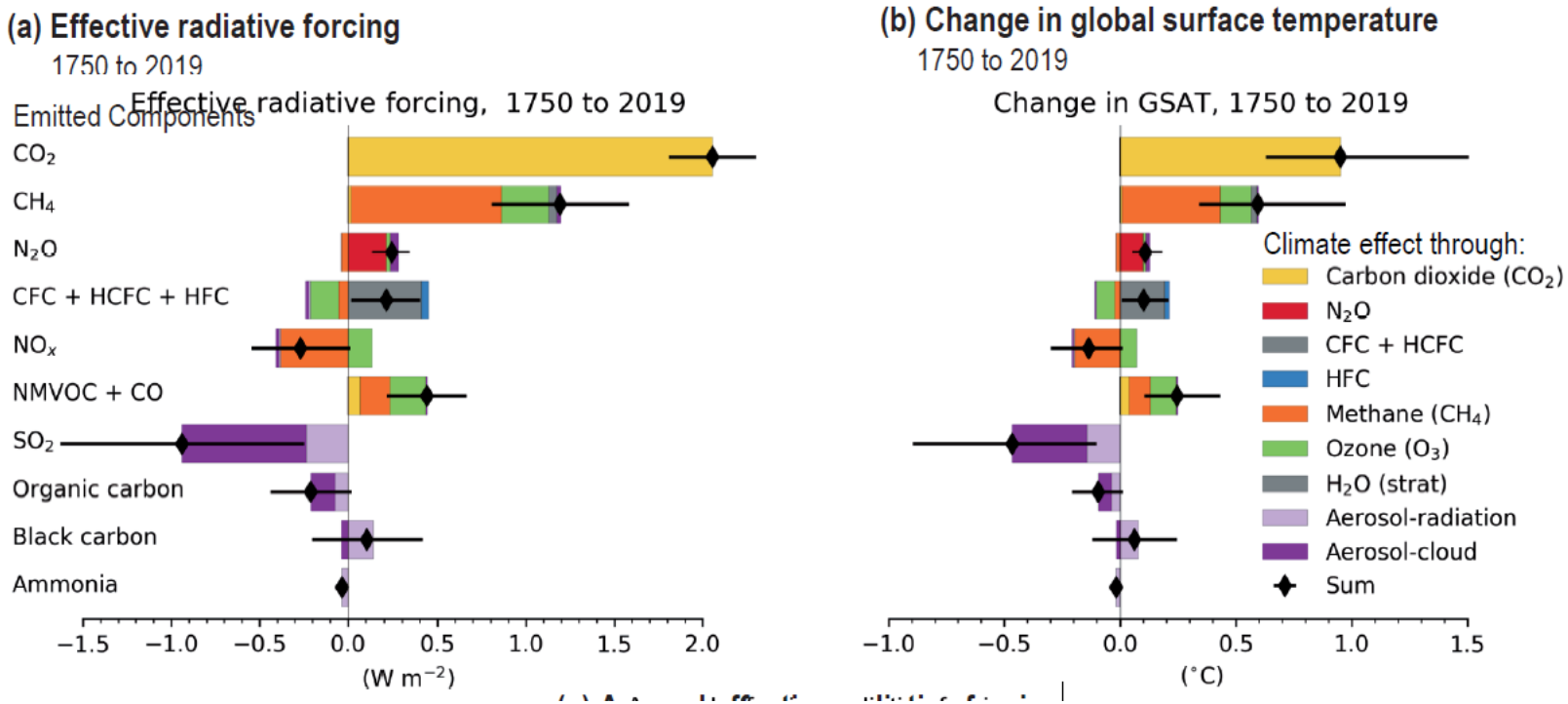


Figure TS.9 | Changes in well-mixed greenhouse gas (WMGHG) concentrations and effective radiative forcing (EFR). *The intent of this figure is to show that the changes of the main drivers of climate system over the industrial period are exceptional in a long-term context.* **(a)** Changes in carbon dioxide (CO_2) from proxy records over the past 3.5 million years. **(b)** Changes in all three WMGHGs from ice core records over the Common Era. **(c)** Directly observed WMGHG changes since the mid-20th century. **(d)** Evolution of ERF and components since 1750. Further details on data sources and processing are available in the associated FAIR data table. {2.2, Figures 2.3, 2.4 and 2.10}

IPCC VI (2022/ 2023)



Il particolato atmosferico

Il particolato atmosferico (particulate matter) è qualunque sostanza (con l'eccezione dell'H_2O) liquida o solida che si trovi in atmosfera con dimensioni microscopiche ma maggiori di quella di una molecola (2 Å).

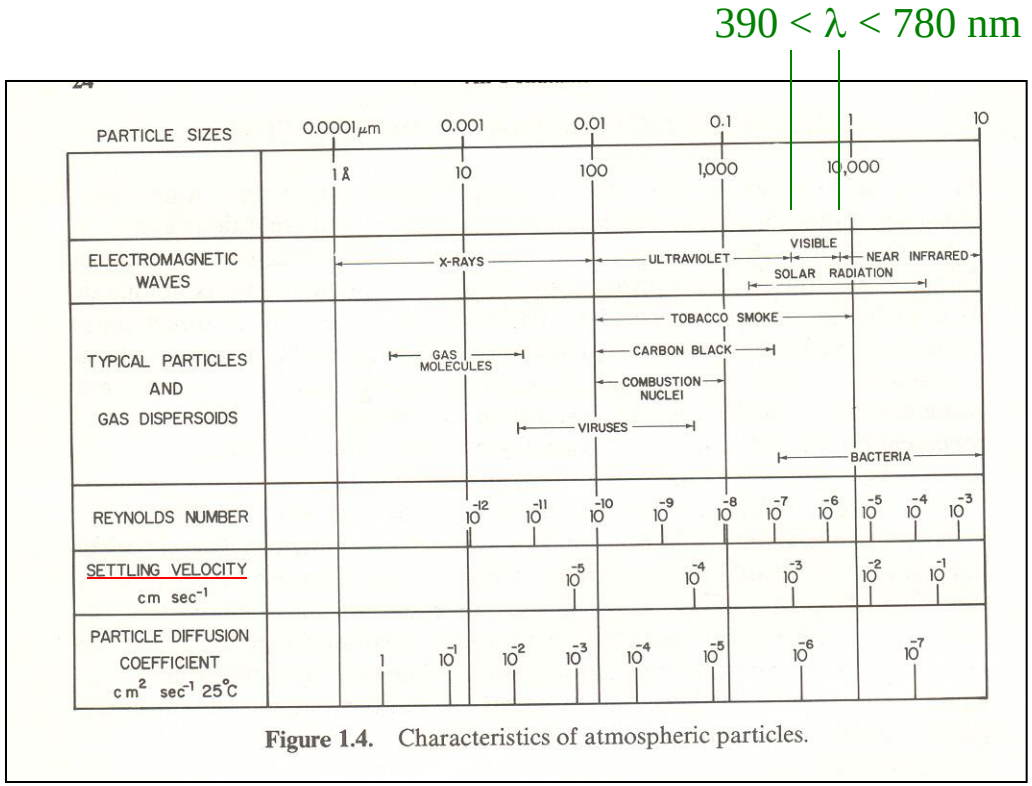
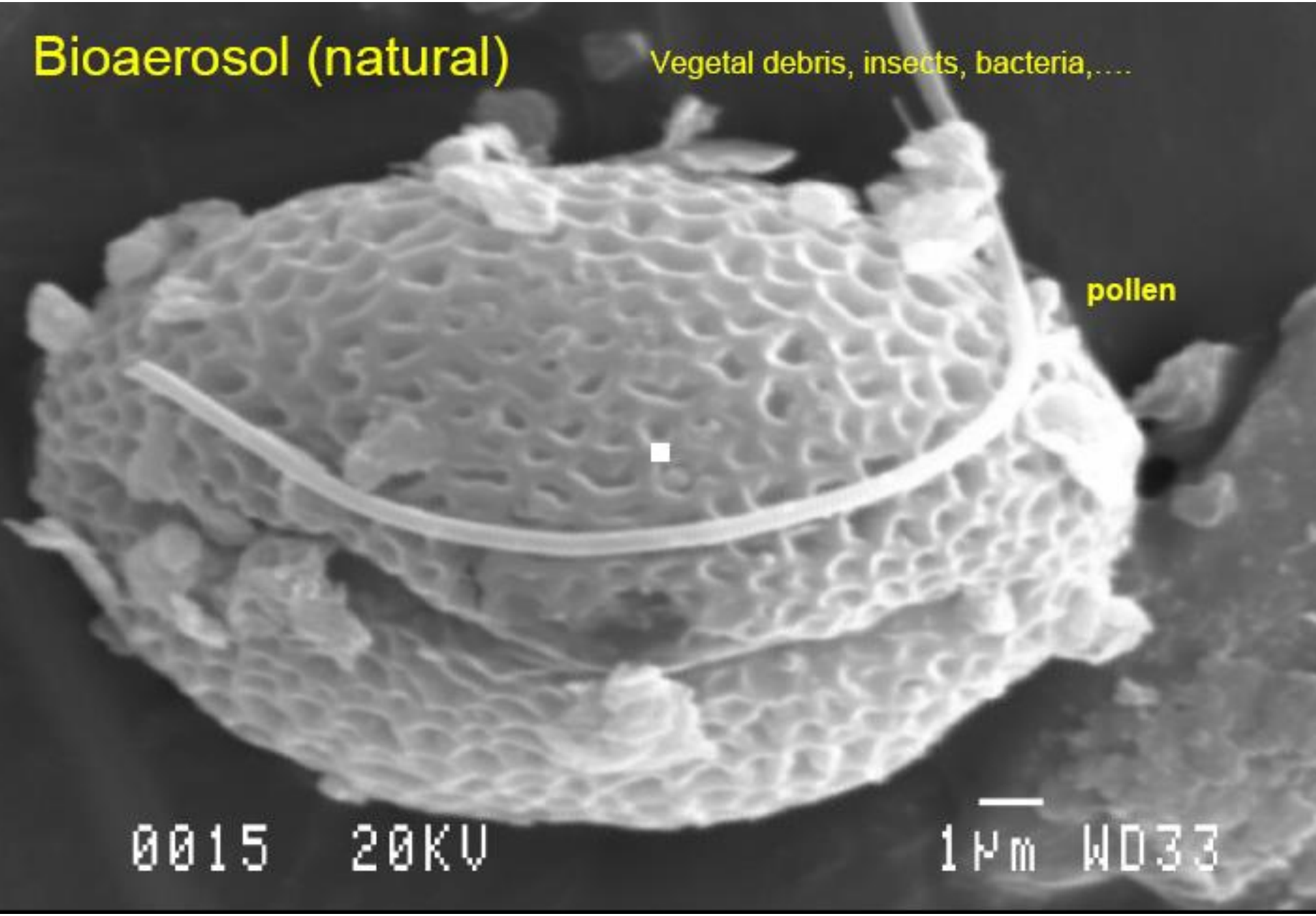
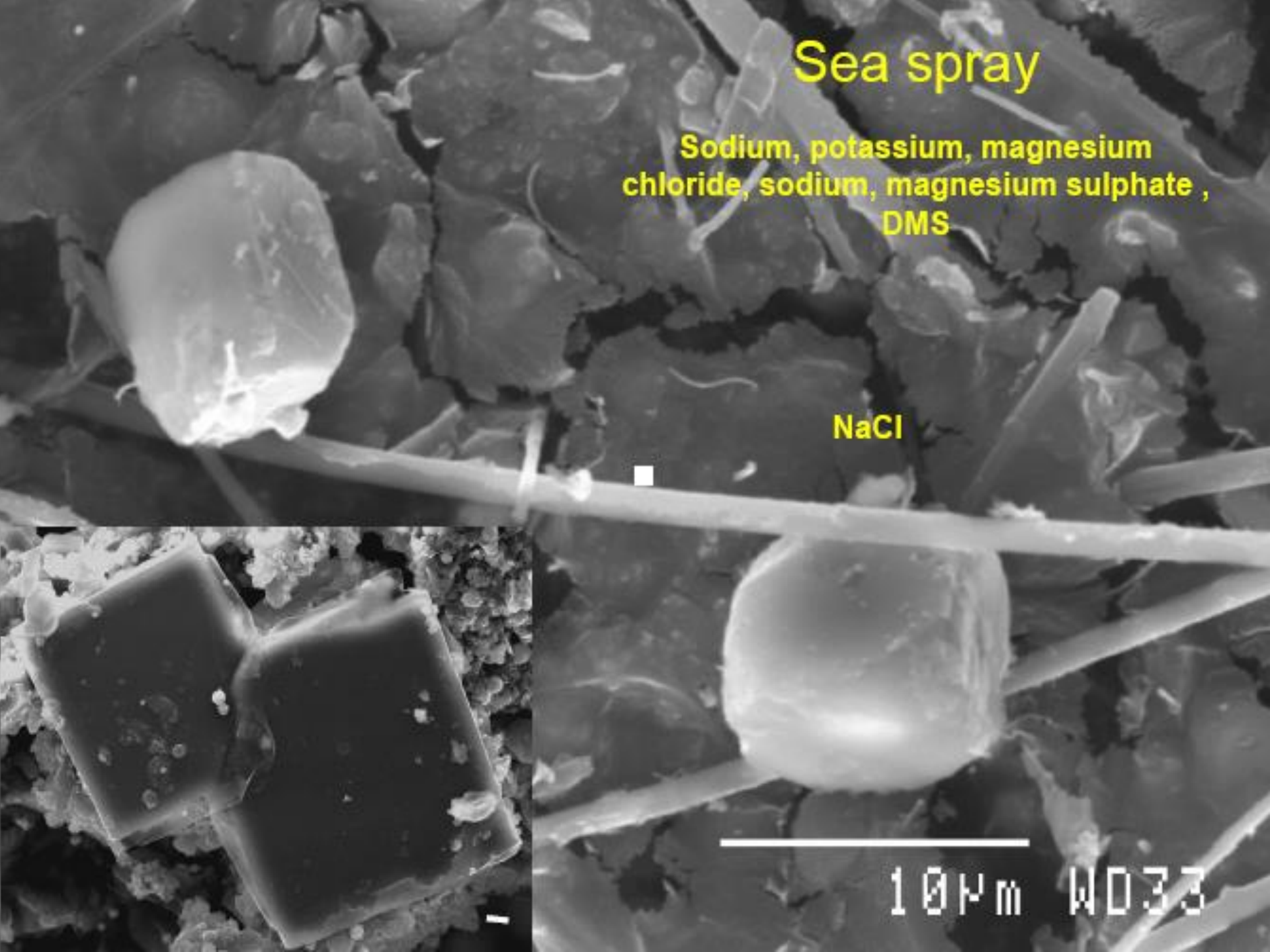
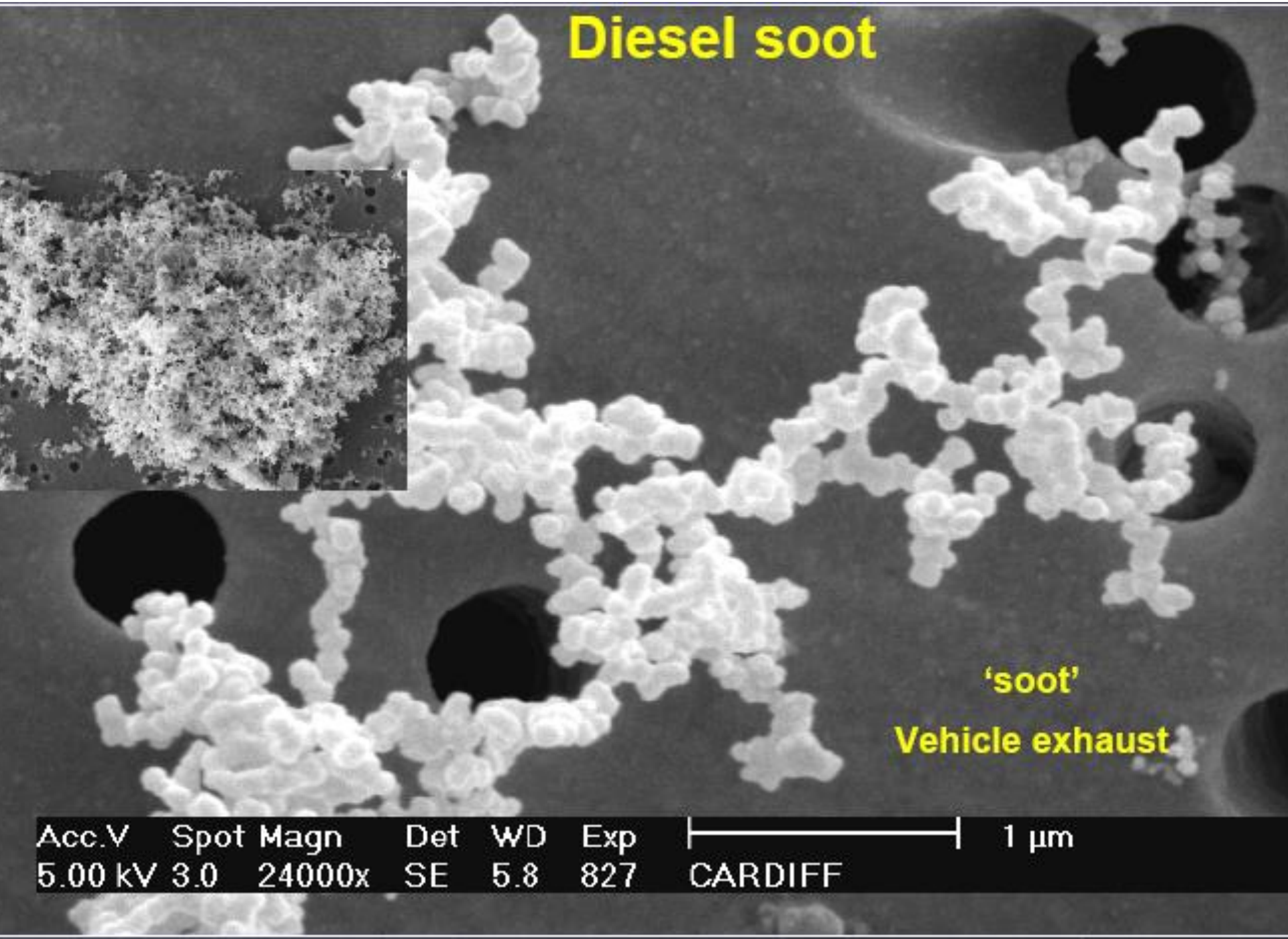


Figure 1.4. Characteristics of atmospheric particles.

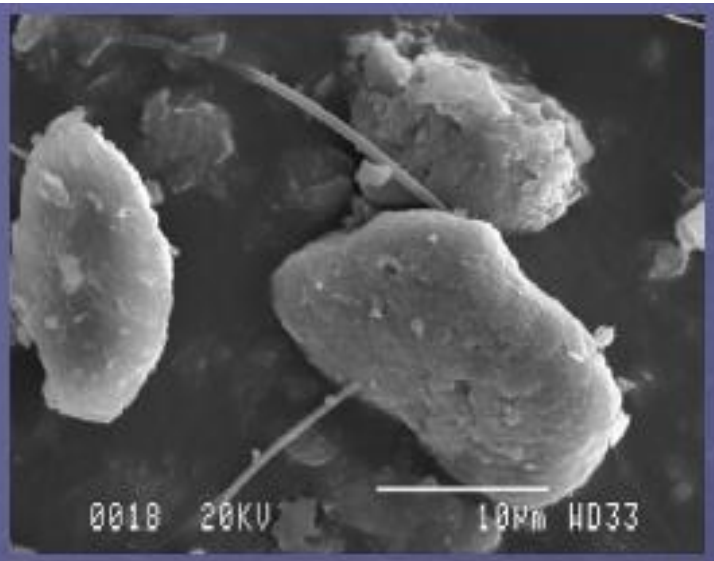
Viene prodotto ed immesso in atmosfera da alcune particolari "sorgenti" ma si forma anche per fenomeni di condensazione di gas. E' una quantità molto più complessa di un gas e per essere caratterizzata deve essere descritta in termini di <u>concentrazione, composizione chimica, granulometria, fase (solida o liquida) e morfologia</u>.


Bioaerosol (natural)
Vegetal debris, insects, bacteria,….
pollen
0015 20KV
1µm WD33

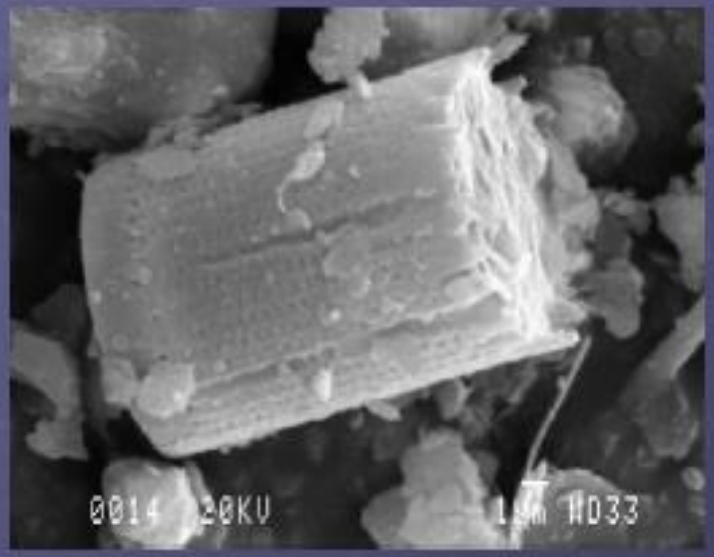

Sea spray
Sodium, potassium, magnesium chloride, sodium, magnesium sulphate , DMS
NaCl
10µm WD33

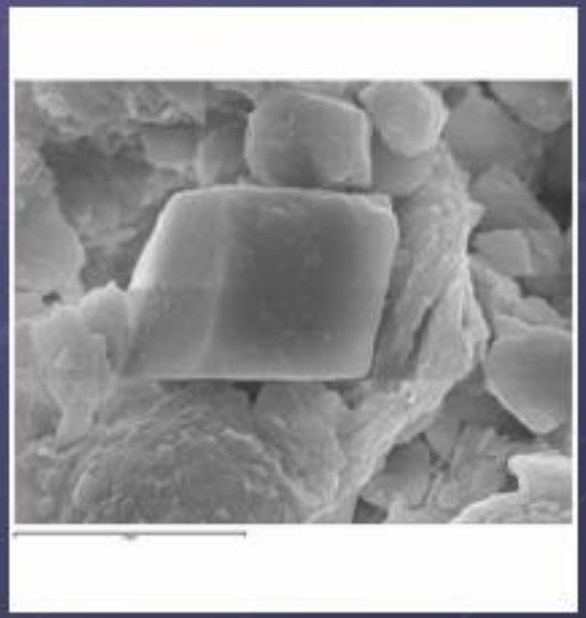

Diesel soot
'soot'
Vehicle exhaust
Acc.V Spot Magn Det WD Exp
5.00 kV 3.0 24000x SE 5.8 827
1 µm
CARDIFF

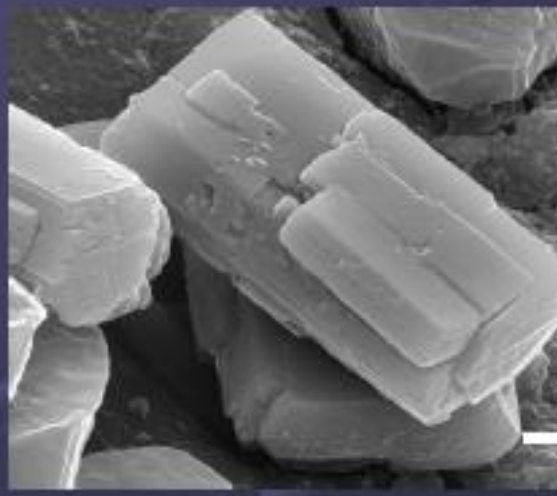
Fossil fuel combustion
'char'
Fuel oil power plant
Sl, S, Fe
NaCl
0011 20KV
10µm WD33



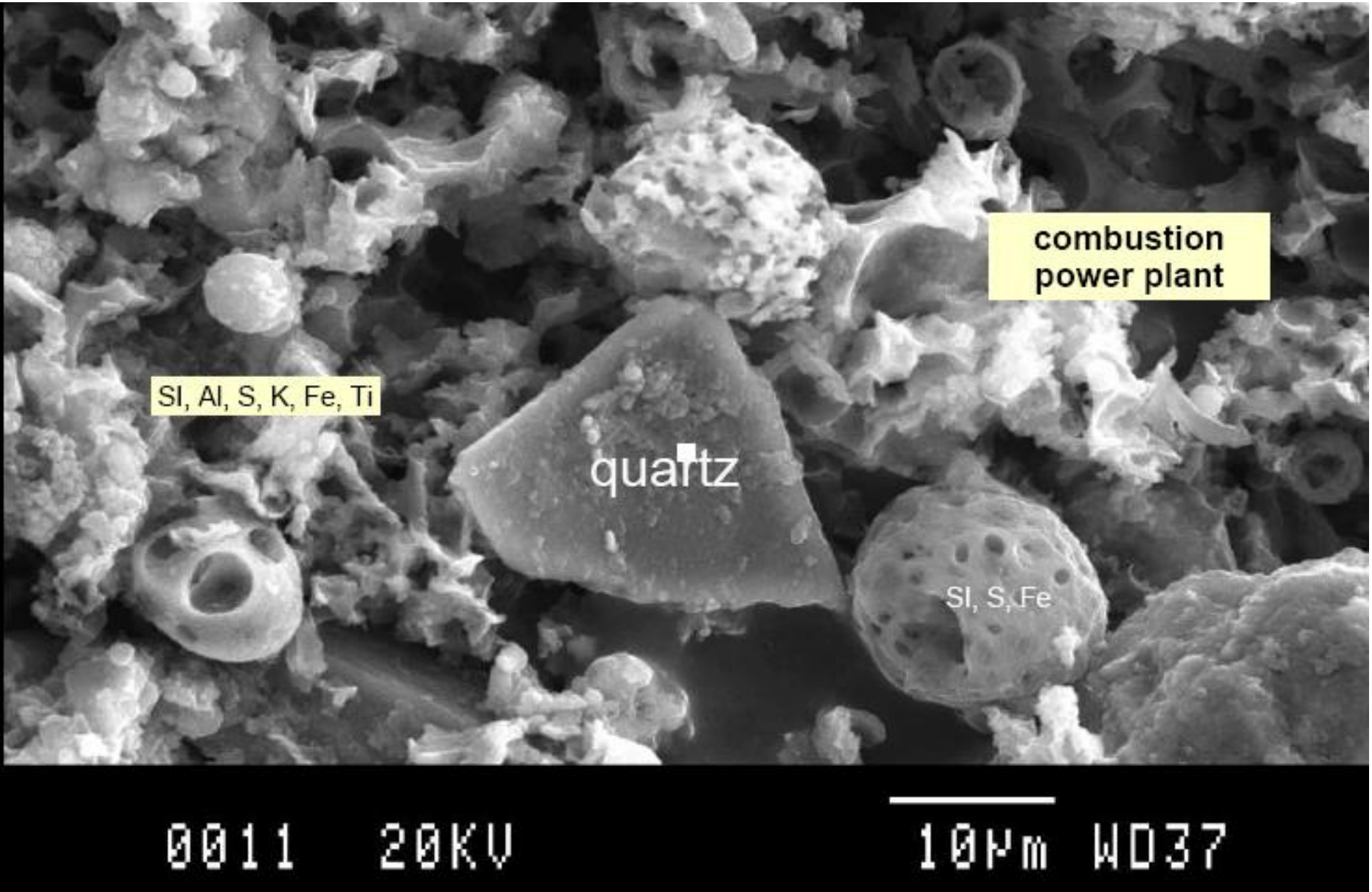
Quart
Clay minerals (kaolinite, Illite, Chlorite, ((Paligorskite, Smectite))
Feldespars
Other silicate minerals (talc, pirophillite,….)
Carbonate minerals (calciea, dolomite)
Phosphates, oxides, gypsum,….







Nella realtà le cose sono più complicate….



Terminologia sul particolato

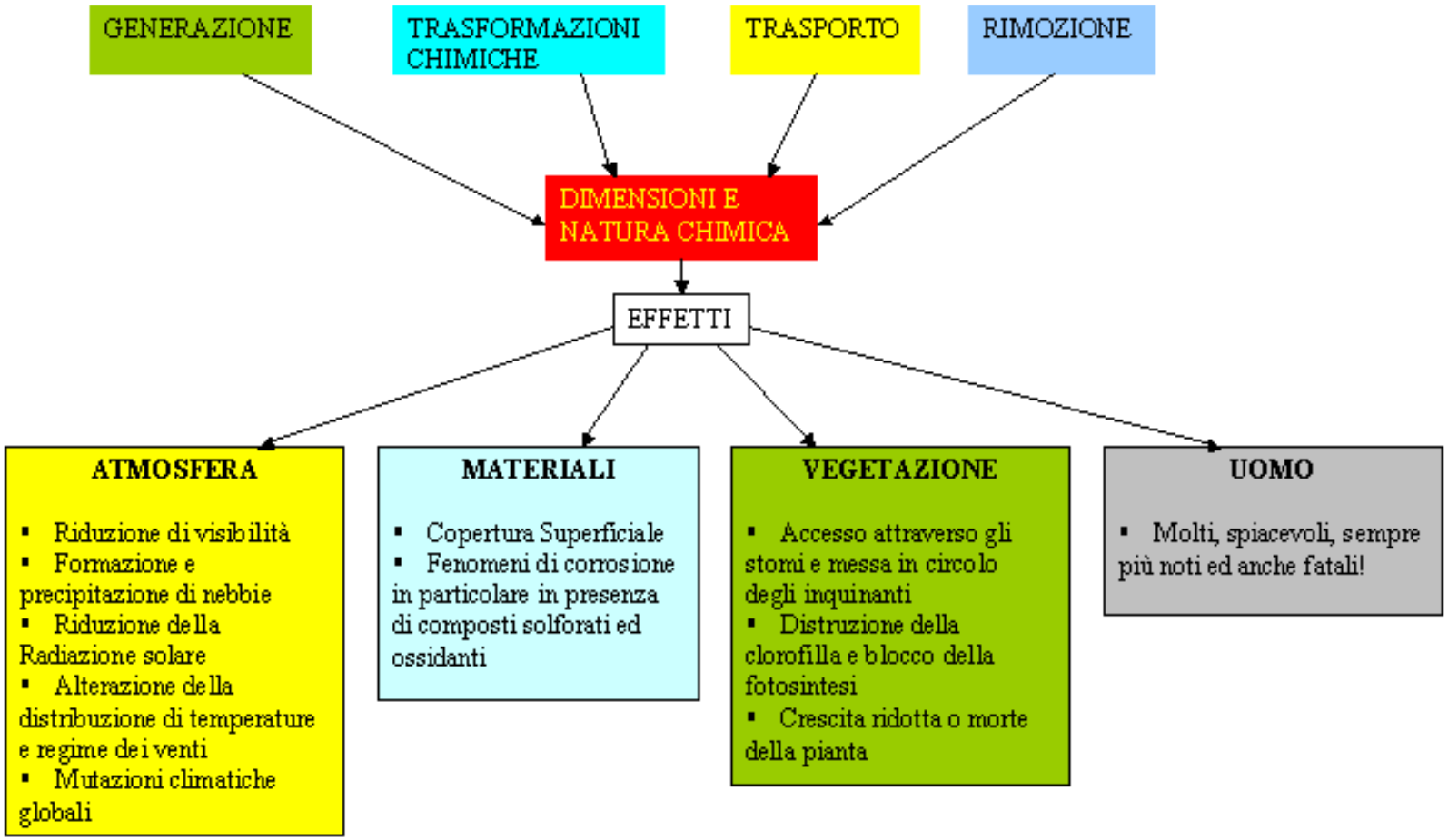
TABLE 1.8. Terminology Relating to Atmospheric Particles

Aerosols, aerocolloids, aerodisperse systems	Tiny particles dispersed in gases.
Dusts	Suspensions of solid particles produced by mechanical disintegration of material such as crushing, grinding, and blasting. $D_p > 1.0\ \mu m$
Fog	A loose term applied to visible aerosols in which the dispersed phase is liquid. Usually, a dispersion of water or ice.
Fume	The solid particles generated by condensation from the vapor state, generally after volatilization from melted substances, and often accompanied by a chemical reaction such as oxidation. Often the material involved is noxious. $D_p < 1\ \mu m$
Hazes	An aerosol that impedes vision and may consist of a combination of water droplets, pollutants, and dust. $D_p < 1\ \mu m$
Mists	Liquid, usually water in the form of particles suspended in the atmosphere at or near the surface of the earth; small water droplets floating or falling, approaching the form of rain, and sometimes distinguished from fog as being more transparent or as having particles perceptibly moving downward. $D_p > 1\ \mu m$
Particle	An aerosol particle may consist of a single continuous unit of solid or liquid containing many molecules held together by intermolecular forces and primarily larger than molecular dimensions ($>0.001\ \mu m$). A particle may also be considered to consist of two or more such unit structures held together by interparticle adhesive forces such that it behaves as a single unit in suspension or upon deposit.
Smog	A term derived from smoke and fog, applied to extensive contamination by aerosols. Now sometimes used loosely for any contamination of the air.
Smoke	Small gas-borne particles resulting from incomplete combustion, consisting predominantly of carbon and other combustible material, and present in sufficient quantity to be observable independently of the presence of other solids. $D_p \geq 0.01\ \mu m$
Soot	Agglomerations of particles of carbon impregnated with "tar," formed in the incomplete combustion of carbonaceous material.

Riflette la complessità e la variabilità del particolato

Nota: nei media si parla frequentemente di "polveri sottili"

Processi legati al PM



Effetti degli inquinanti gassosi sulla salute

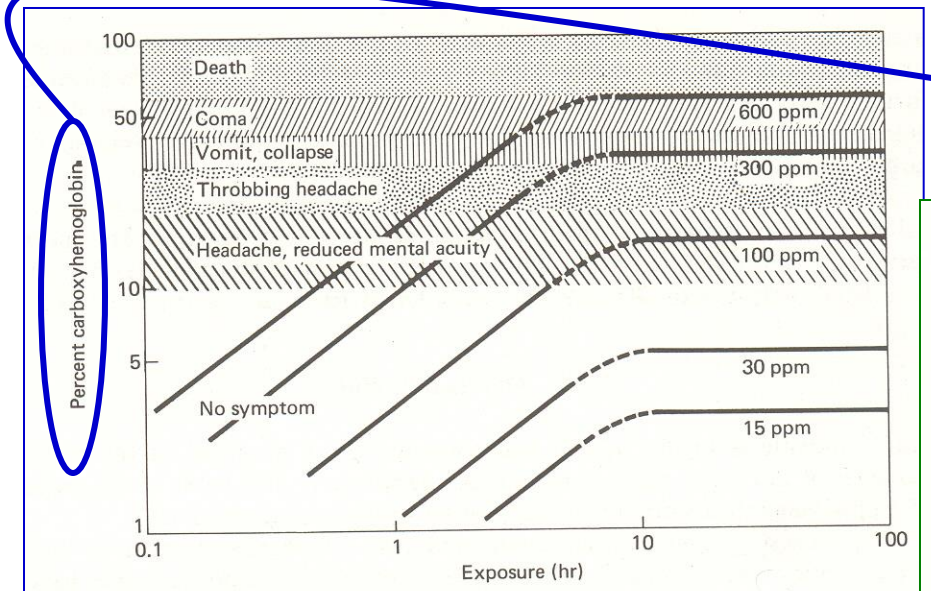


Figure 2.1. Effects of exposure to CO on man.

Si forma nel sangue per interazione tra CO ed emoglobina

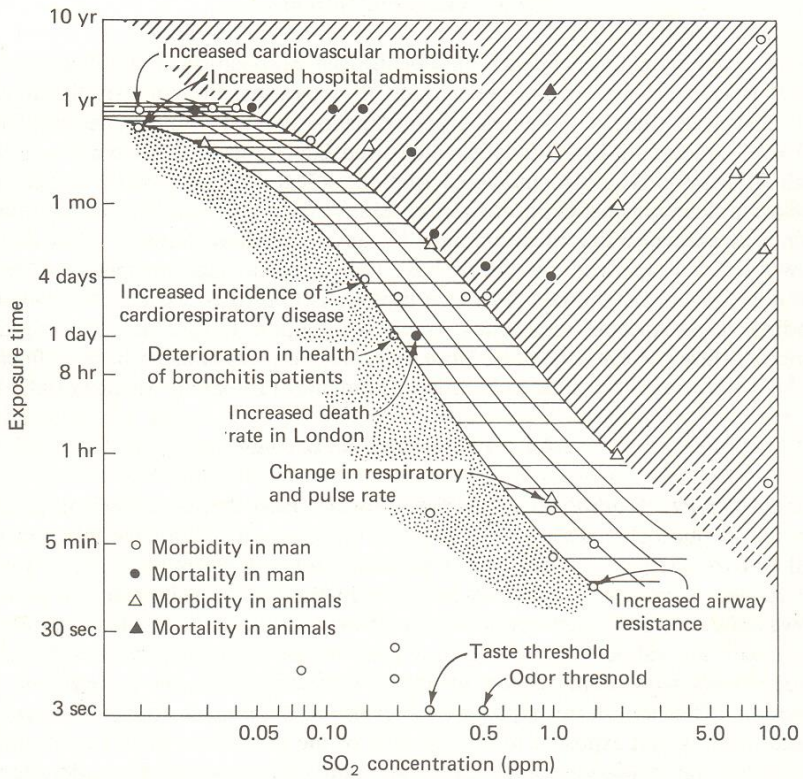
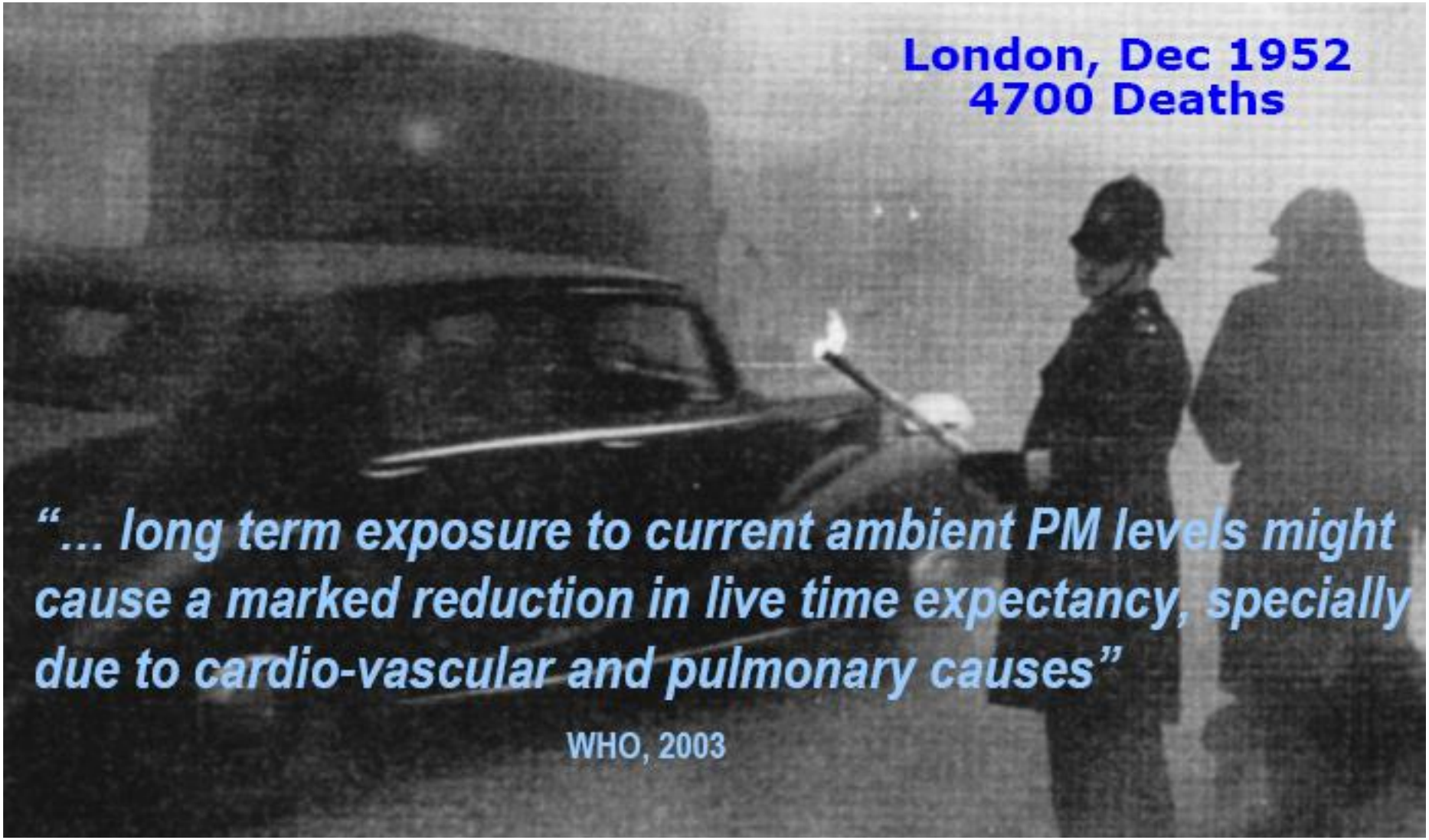


Figure 2.2. Health effects due to various exposures to SO_2. Shaded area represents the range of exposures where excess deaths have been reported. Speckled area represents the range of exposures where health effects are suspected (Williamson, 1973).

C'è innanzitutto un problema sanitario legato alle sostanze nocive all'uomo e agli animali. In diversi casi è nota la relazione tra esposizione ed effetto

PM e salute


London, Dec 1952
4700 Deaths
"... long term exposure to current ambient PM levels might cause a marked reduction in live time expectancy, specially due to cardio-vascular and pulmonary causes"
WHO, 2003

Effetti del particolato atmosferico

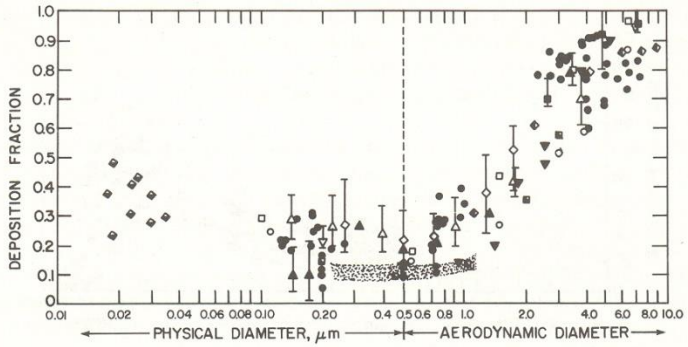


Figure 2.3. Deposition of monodisperse aerosols in the total respiratory tract for mouth breathing as a function of particle diameter. Above 0.5 μm, the diameter refers to aerodynamic diameter (see Chapter 7) and below 0.5 μm to actual physical diameter. The data are individual observations, averages, and ranges as cited by various investigators. (U.S. Environmental Protection Agency, 1982b)

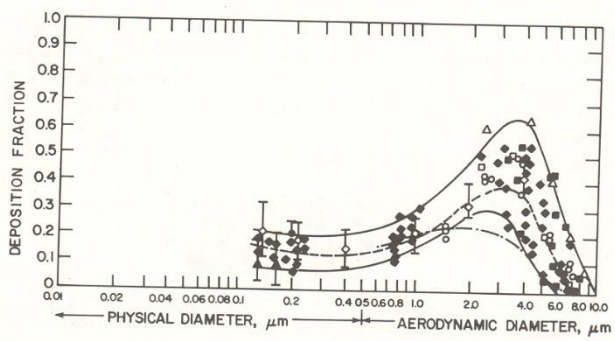
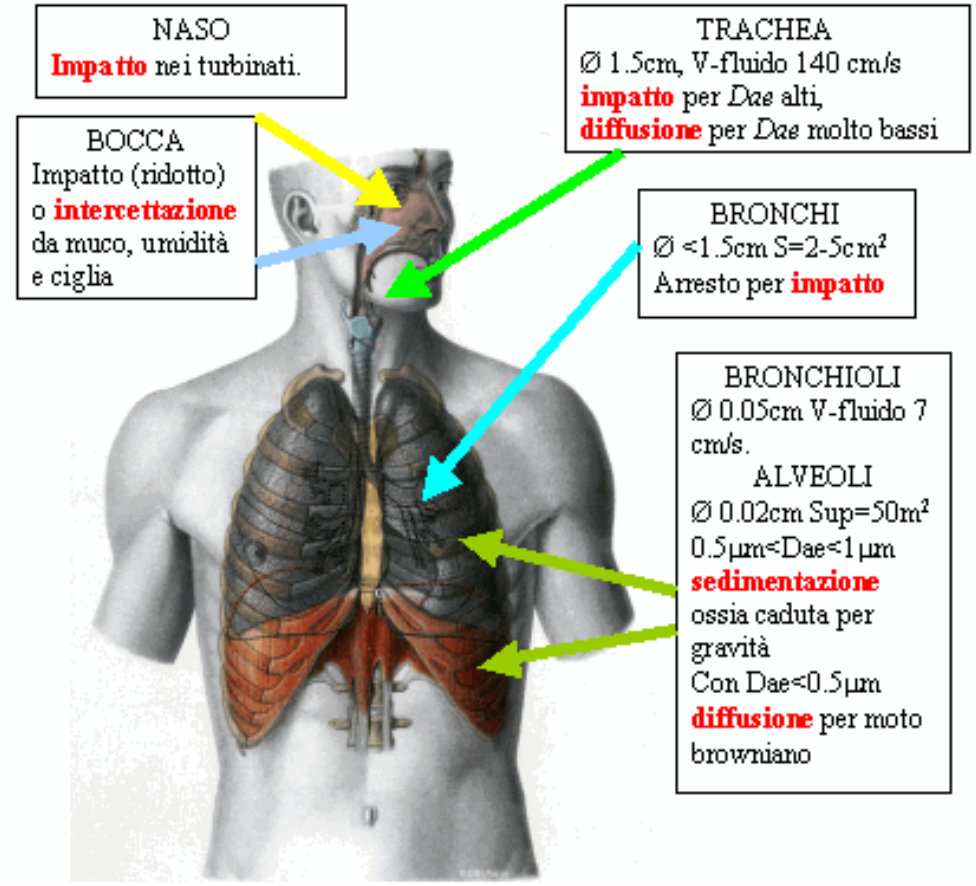


Figure 2.4. Deposition of monodisperse aerosols in the pulmonary region for mouth breathing as a function of particle diameter. Above 0.5 μm, the diameter refers to aerodynamic diameter (see Chapter 7) and below 0.5 μm to the actual physical diameter. The two solid lines represent the approximate ranges of the experimental deposition data. The dashed line is the theoretical deposition model of Yu (1978), and the broken line is an estimate of pulmonary deposition for nose breathing derived by Lippmann (1977). (U.S. Environmental Protection Agency, 1982b)



Riduzione della capacità polmonare

Trasporto di sostanze tossiche nel sangue

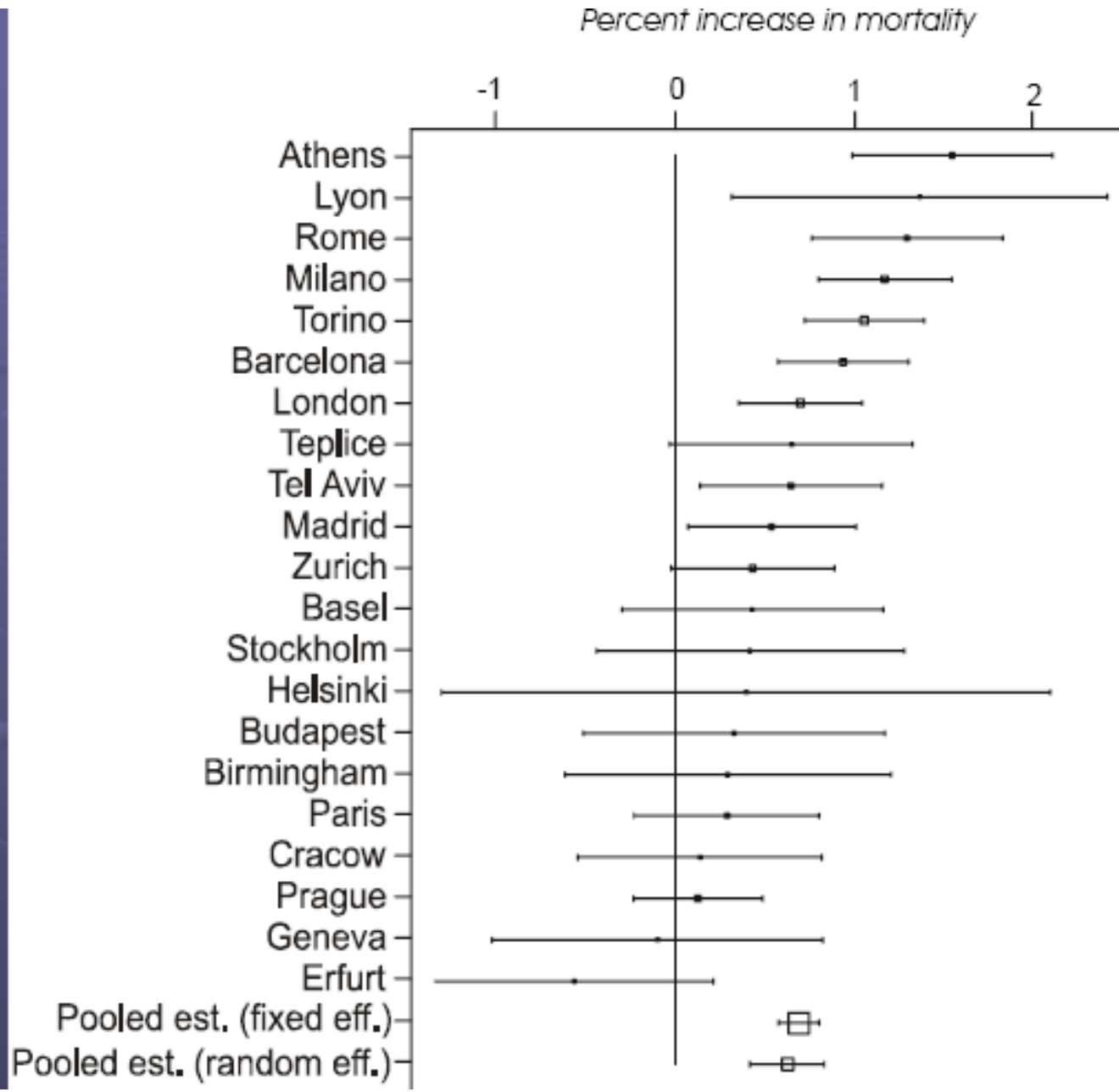
Gli effetti sulla salute del PM sono provati da numerosi, se pur non conclusivi, studi epidemiologici

Cortesía F. Ballester

APHEA2 results

Percent increase in the total daily number of deaths (95% C I) associated with an increase of 10µg/m3 in the levels of PM10 in each city.

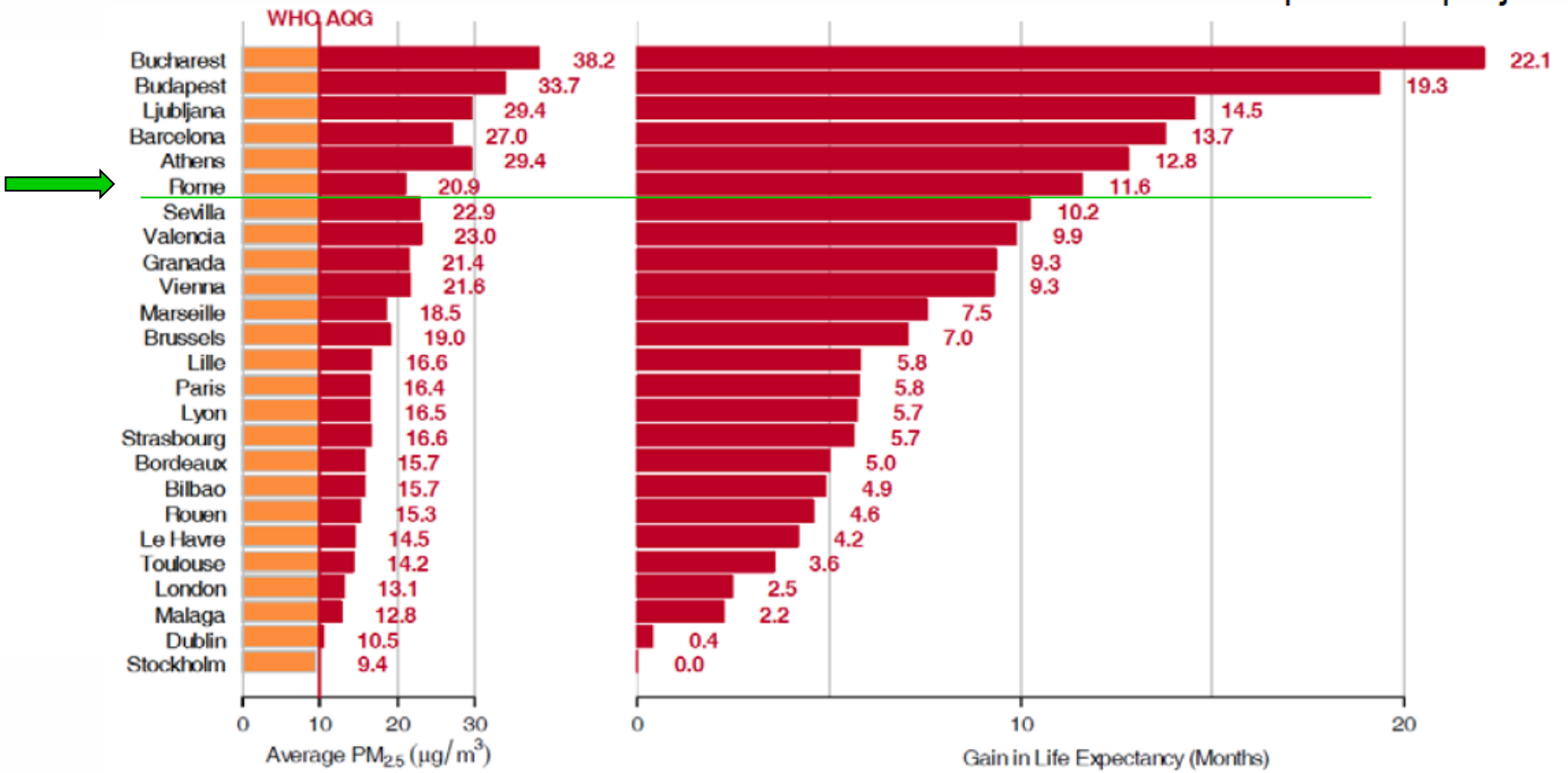
Katsouyanni et al Epidemiology 2001;12:521-531



Perché c'è un limite di legge ?

- Health effects

Source : Aphekom project



I nuovi limiti sono riportati nella tabella seguente:

Norme EU 2024

Inquinante	Periodo di riferimento	Valore limite
PM2,5	1 giorno	25 µg/m3 (non superabile più di 18 volte/anno)
	Anno civile	10 µg/m3
PM10	1 giorno	45 µg/m3 (non superabile più di 18 volte/anno)
	Anno civile	20 µg/m3
Diossido di azoto (NO_2)	1 ora	200 µg/m3 (non superabile più di 3 volte/anno)
	1 giorno	50 µg/m3 (non superabile più di 18 volte/anno)
	Anno civile	20 µg/m3
Diossido di zolfo (SO_2)	1 ora	350 µg/m3 (non superabile più di 3 volte/anno)
	1 giorno	50 µg/m3 (non superabile più di 18 volte/anno)
	Anno civile	20 µg/m3
Benzene	Anno civile	3,4 µg/m3
Monossido di carbonio (CO)	Massima media giornaliera su 8 ore	10 mg/m3
	1 giorno	4 mg/m3 (non superabile più di 18 volte/anno)
	1 ora	30 mg/m3
Piombo (Pb)	Anno civile	0,5 µg/m3
Arsenico (As)	Anno civile	6,0 ng/m3
Cadmio (Cd)	Anno civile	5,0 ng/m3
Nichel (Ni)	Anno civile	20 ng/m3
Benzo(a)pirene	Anno civile	1,0 ng/m3

Nonostante l'abbassamento, **i nuovi valori UE sono ancora più alti di quelli massimi consigliati dall'OMS**. Ad esempio, il limite giornaliero per il PM2.5 in Europa è 25 µg/m3, mentr el'OMS suggerisce al massimo 15. I valori UE per l'NO2 sono doppi rispetto a quelli OMS. Per l'SO2 sono il 150% più alti.

Riduzione della visibilità 1

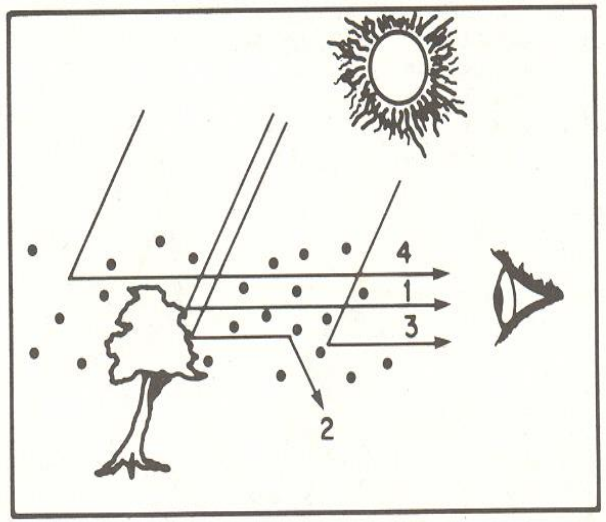


Figure 7.5. Contributions to atmospheric visibility: (1) Residual light from the target reaching the observer. (2) Light from the target scattered out of the observer's line of sight. (3) Airlight from intervening atmosphere scattered into the observer's line of sight. (4) Airlight constituting the horizon sky.

La possibilità di distinguere un oggetto posto ad una distanza x da un osservatore è legato al contrasto cioè al rapporto tra l'intensità luminosa emessa dall'oggetto e quella di fondo

$$C(x) = \frac{I_0(x) - I_b(x)}{I_b(x)}$$

Coeff. Di ESTINZIONE

Se la composizione dell'aria è costante lungo x allora:

$$dC(x) = -b_{ext}\, C(x)dx \;\rightarrow C(x) = C(0)e^{-b_{ext}x}$$

$$b_{ext} = \sigma_a + \sigma_s \;\; ; \sigma_a = \sigma_{ag} + \sigma_{ap} \;\; ; \sigma_s = \sigma_{sg} + \sigma_{sp}$$

Riduzione della visibilità 2

Per un oggetto nero su sfondo bianco usualmente si considera che il contrasto minimo risolvibile dall'occhio umano sia C = 0.02 da cui:

$$x = \frac{3.912}{b_{ext}}$$

E' un caso teorico, il contrasto dipende molto dal colore (dell'oggetto e dello sfondo) e dall'angolo di illuminazione

Per l'aria pura a livello del mare si ha: $b_{ext} = 1.32\ 10^{-6}\ m^{-1}$ (calcolato per $<\lambda> = 520$ nm) e quindi x = 296 km (si trascura la curvatura terrestre). In condizioni più realistiche il termine più importante è solitamente σ_{sp} che dipende molto dalle dimensioni del particolato: ($d > 1\ \mu m$: diffusione in avanti, $0.4 < d < 0.7\ \mu m$: diffusione tra 1° e 45°, $d < 0.1\ \mu m$: diffusione isotropa)

Un esempio

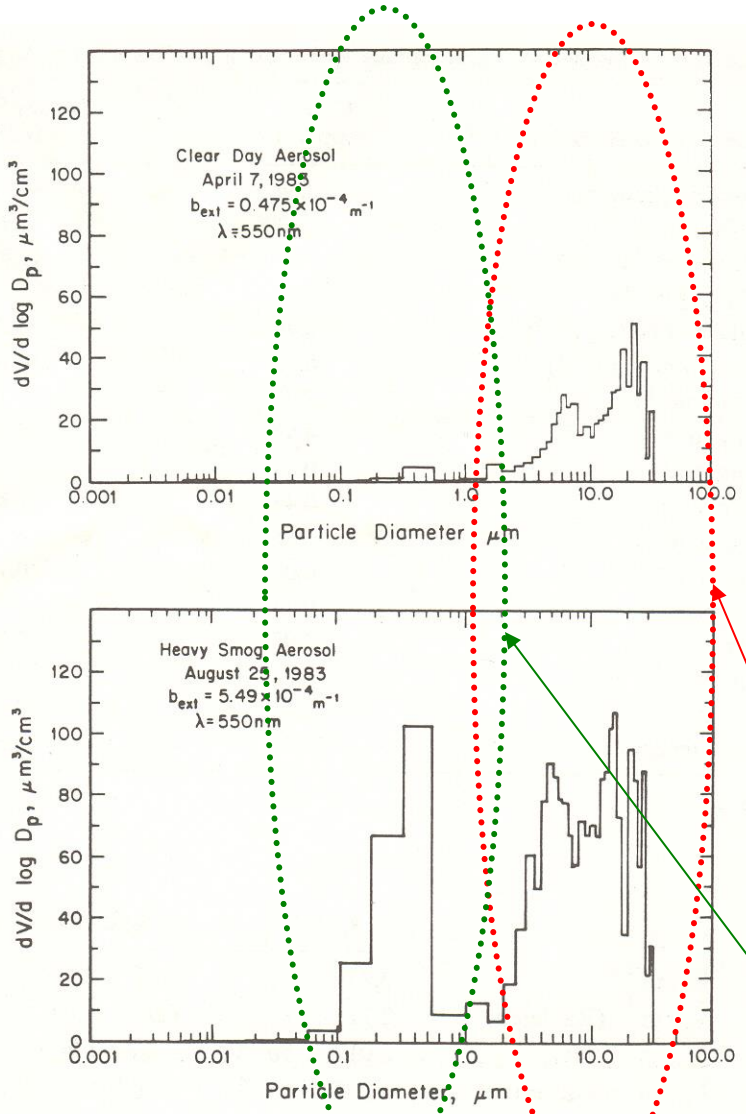


Figure 7.6. Aerosol volume distributions measured on two days in Los Angeles (Larson et al., 1984).

Los Angeles

	7/4/83	25/8/83
σ_{sg}	.111 10^{-4}	.107 10^{-4}
$\sigma_{ag}(NO_2)$	.012 10^{-4}	.030 10^{-4}
σ_{sp}	.259 10^{-4}	4.08 10^{-4}
σ_{ap} (C)	.093 10^{-4}	.787 10^{-4}
b_{ext}	**.475 10^{-4}**	**5.00 10^{-4}**

Aumenta di un fattore ≈ 2

Aumenta di un fattore ≈ 10

Assorbimento della luce

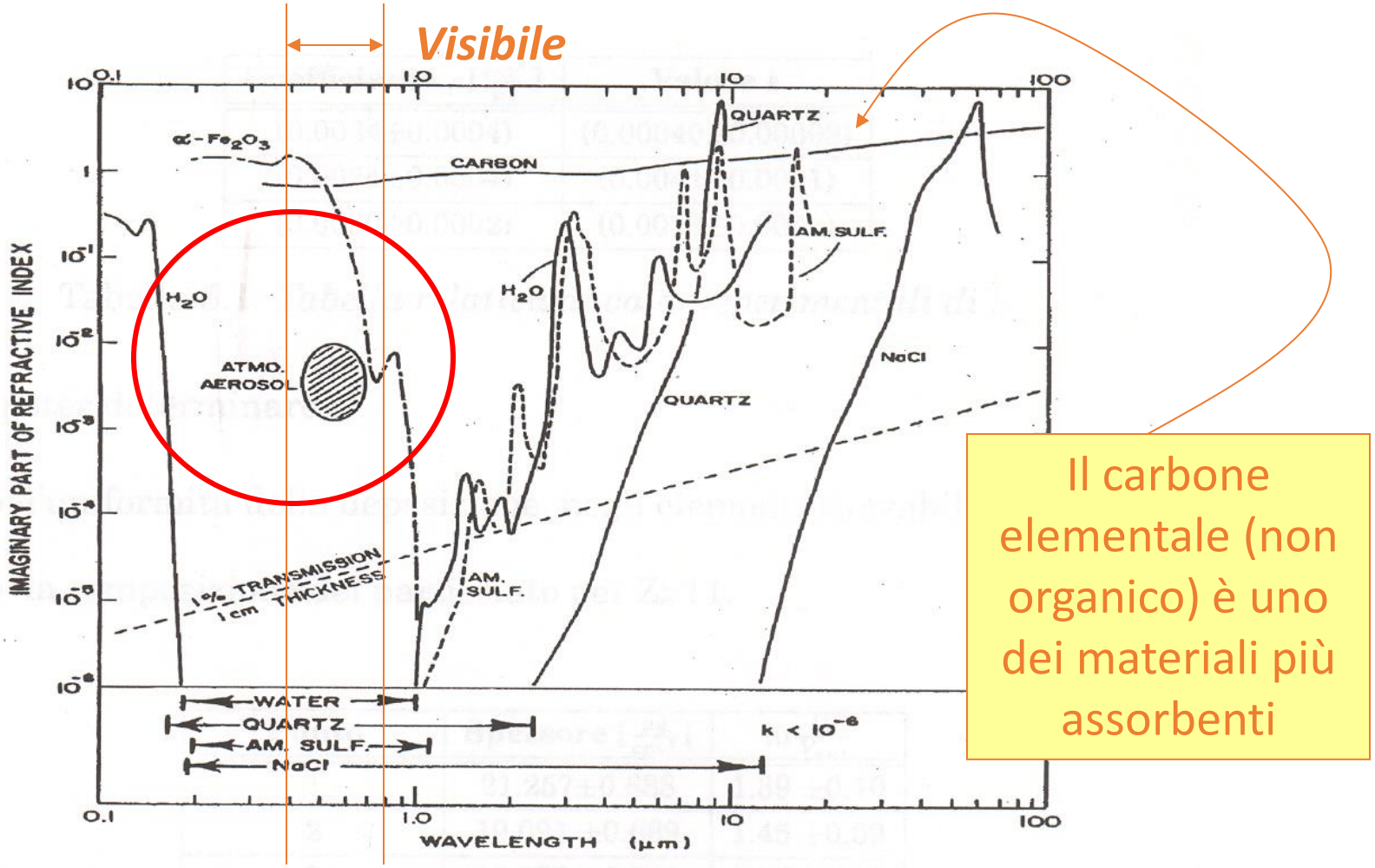
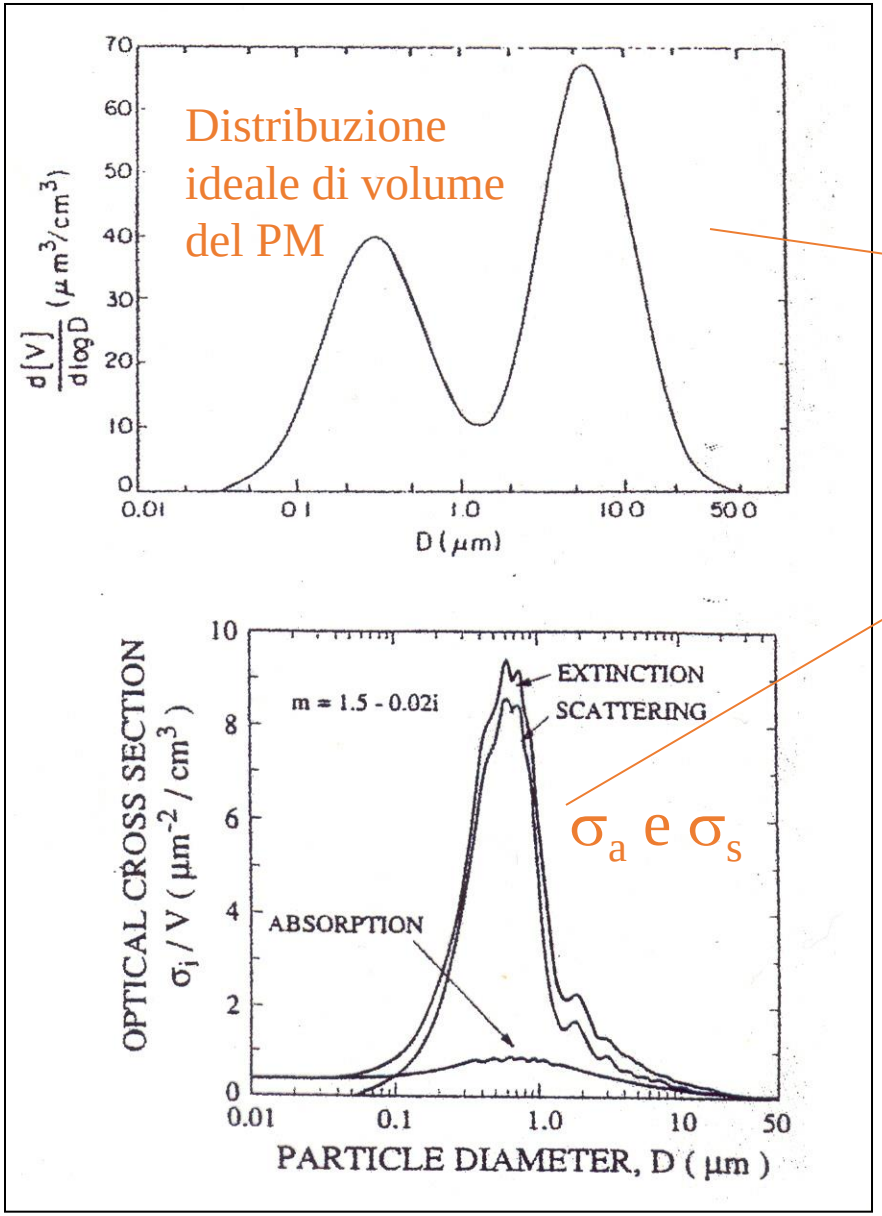
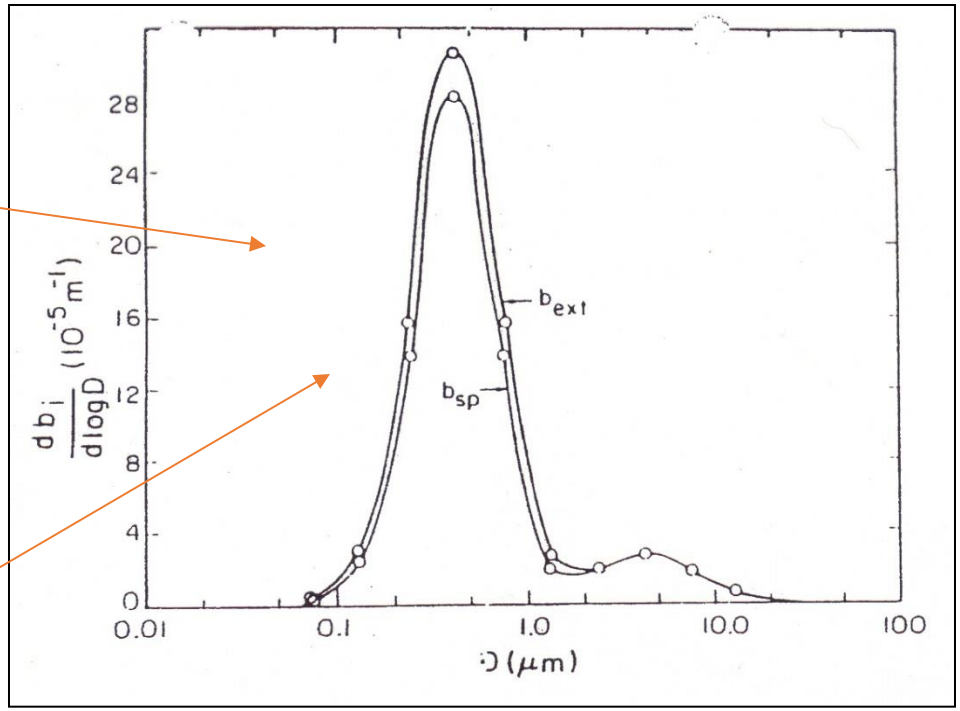


Figura 5.5: *Parte immaginaria dell'indice di rifrazione (relativa all'assorbimento) in funzione della lunghezza d'onda.*

Attenuazione della luce





La frazione granulometrica del PM più importante per gli effetti ottici (visibilità, climate forcing) è quella tra 0.1 e 1-3 μm