

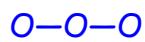
STRATOSFERA e OZONO STRATOSFERICO

A cura dei prof. G.G. Bombi e A. Tapparo
A.A. 2023/24

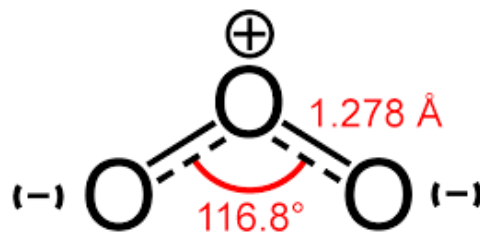
E-learning moodle: <https://stem.elearning.unipd.it/course/view.php?id=8615>

1

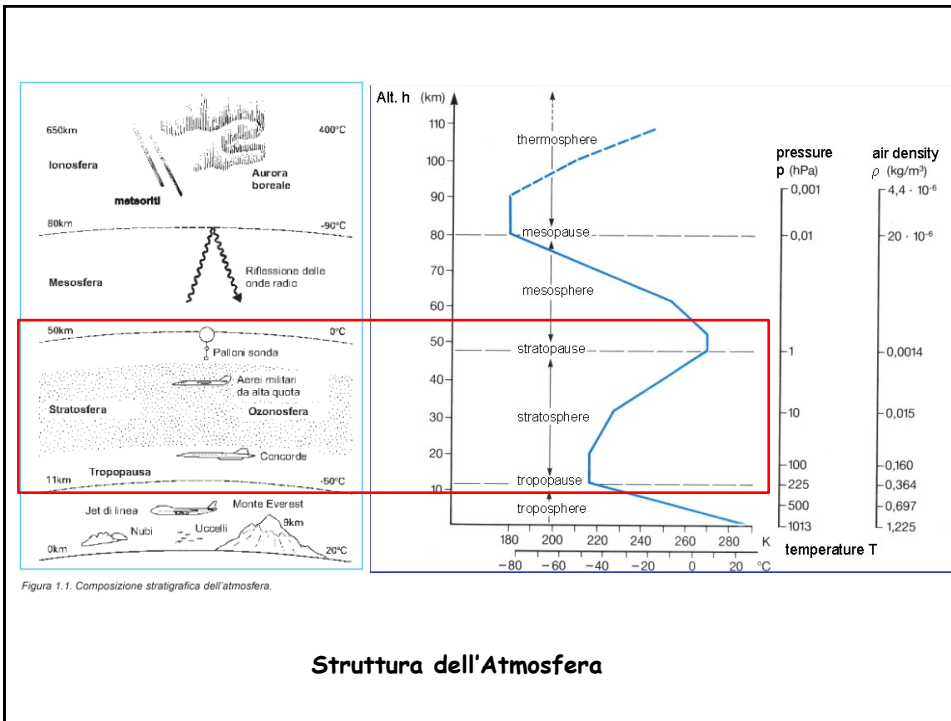
La molecola di
ozono ha la
struttura



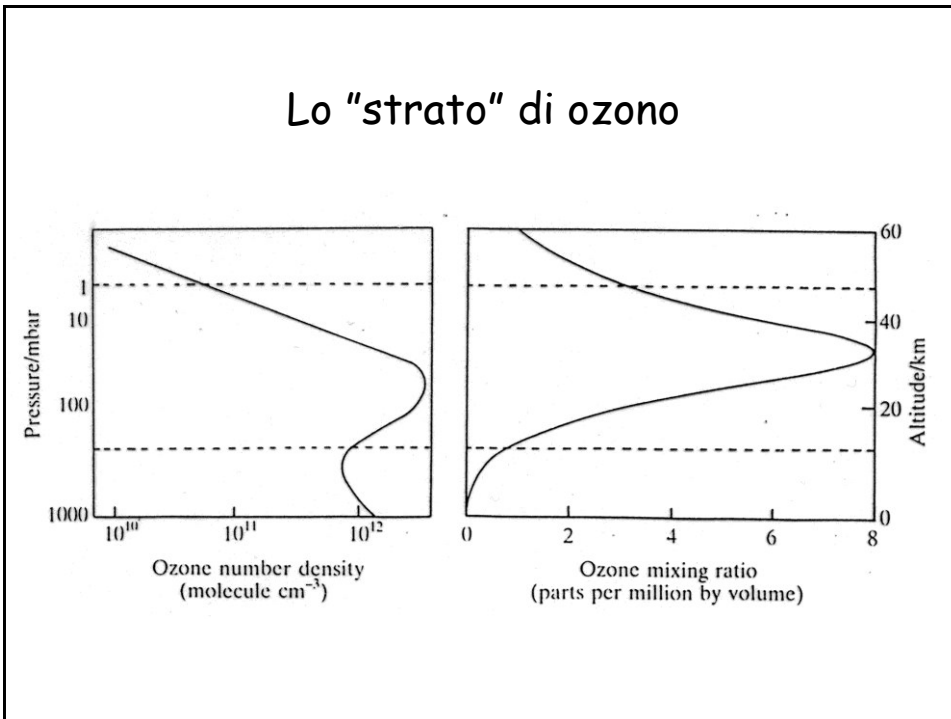
I due legami
formano fra di
loro un angolo di
circa 116°



2

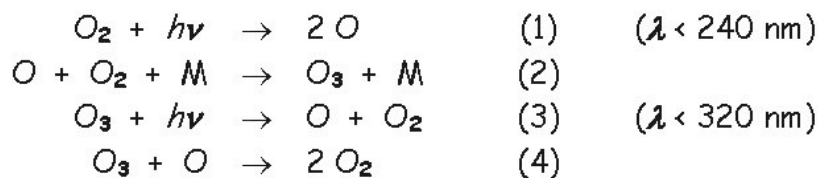


3



4

Il meccanismo di Chapman (1930)



L'ozono O_3 e il monoossigeno O si interconvertono rapidamente per effetto delle reazioni (2) e (3) e vengono designati collettivamente con il nome di "ossigeno dispari", O_x

L'ossigeno dispari viene prodotto dalla reazione (1) e distrutto dalla reazione (4).

5

(per memoria)

Relazione fra energia di un fotone e lunghezza d'onda

$$\lambda \cdot \nu = c \qquad E = h \cdot \nu$$

dove $\lambda \rightarrow$ lunghezza d'onda (in metri)

$\nu \rightarrow$ frequenza (in $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$)

$c \rightarrow$ velocità della luce = $2.9979 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

$E \rightarrow$ energia del fotone (in J)

$h \rightarrow$ costante di Planck = $6.6262 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

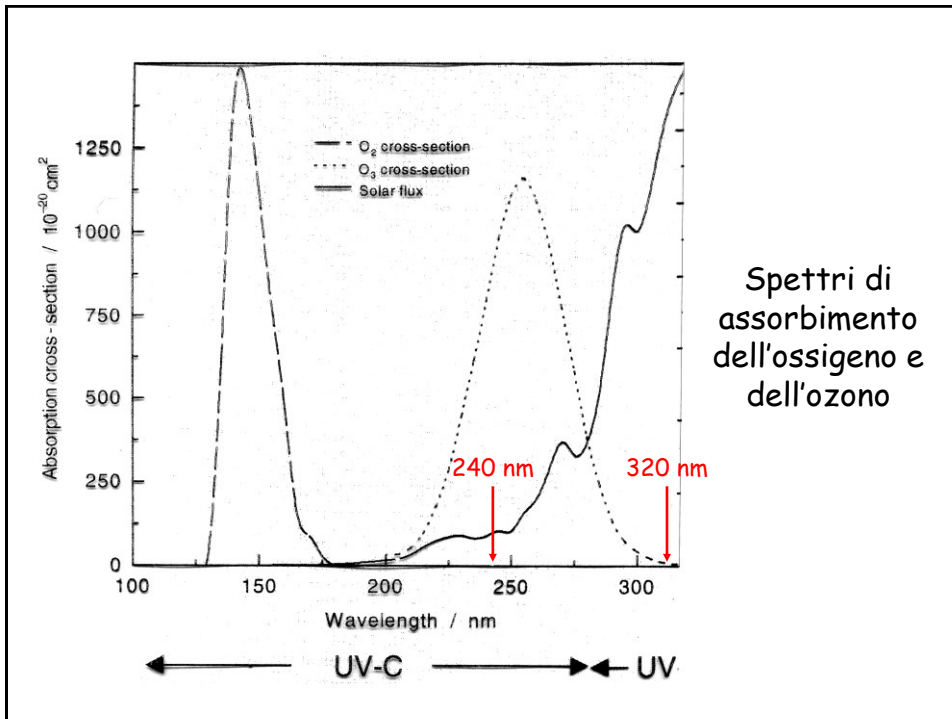
Per esempio: l'energia di dissociazione di O_2 è

$$498.36 \text{ kJ/mol} = 8.2757 \cdot 10^{-25} \text{ J/molecola}$$

A conti fatti, la lunghezza d'onda corrispondente è

$$240.0 \text{ nm}$$

6



7

(per memoria)

Assorbimento della radiazione elettromagnetica
Legge di Lambert-Beer

$$dP = -P \cdot \sigma \cdot n \cdot dx$$

$P \rightarrow$ intensità del fascio incidente
 $dP \rightarrow$ variazione dell'intensità per effetto dell'assorbimento
 $\sigma \rightarrow$ sezione d'urto delle molecole assorbenti (in cm^2)
 (è una misura della probabilità che un fotone venga assorbito)
 $n \rightarrow$ concentrazione della specie assorbente (in molecole / cm^3)
 $dx \rightarrow$ spessore dello strato assorbente infinitesimo

$P \rightarrow \left| \begin{array}{c} | \\ | \\ | \end{array} \right| \rightarrow P - dP$
 dx

8

Considerando uno spessore finito, se la concentrazione della specie assorbente è costante lungo tutto il percorso del fascio, si ottiene per integrazione

$$\ln P = \ln P_0 - \sigma \cdot n \cdot x \quad P = P_0 \cdot e^{-\sigma \cdot n \cdot x}$$

$P_0 \rightarrow$ intensità del fascio incidente

$P \rightarrow$ intensità del fascio trasmesso

$x \rightarrow$ spessore dello strato assorbente



Se la concentrazione non è costante, l'entità dell'assorbimento dipende comunque solo dalla quantità totale di molecole assorbenti presenti lungo il percorso del fascio (in molecole / cm^2).

9

La legge di Lambert-Beer è stata presentata nella forma utilizzata dagli studiosi di chimica dell'atmosfera. I chimici in genere preferiscono esprimerla nella forma

$$\log P = \log P_0 - \varepsilon \cdot C \cdot x \quad P = P_0 \cdot 10^{-\varepsilon \cdot C \cdot x} \quad A = \log \frac{P_0}{P} = \varepsilon \cdot C \cdot x$$

dove

$\varepsilon \rightarrow$ assorbività molare

$C \rightarrow$ concentrazione della specie assorbente (in mol / litro)

$A \rightarrow$ assorbanza

È facile verificare che si ha

$$\varepsilon = 2.615 \cdot 10^{20} \cdot \sigma$$

$$\sigma = 3.824 \cdot 10^{-21} \cdot \varepsilon$$

10

Il valore di σ (e di ε) dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione assorbita e quindi la legge di Beer-Lambert si applica solo a radiazione monocromatica.

Il grafico che rappresenta la dipendenza di σ (o di ε) dalla lunghezza d'onda (o dalla frequenza) della radiazione prende il nome di spettro di assorbimento.

In presenza di più di una specie assorbente, ai termini $\sigma \cdot n$ o $\varepsilon \cdot C$ vanno sostituite le somme

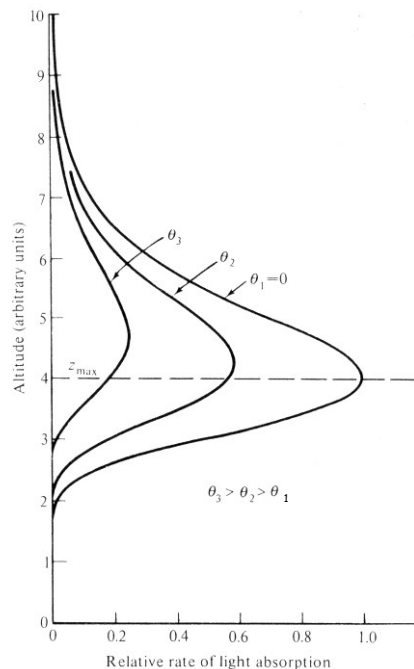
$$\sum_i \sigma_i \cdot n_i \quad \text{e rispettivamente} \quad \sum_i \varepsilon_i \cdot C_i$$

estese a tutte le specie assorbenti.

11

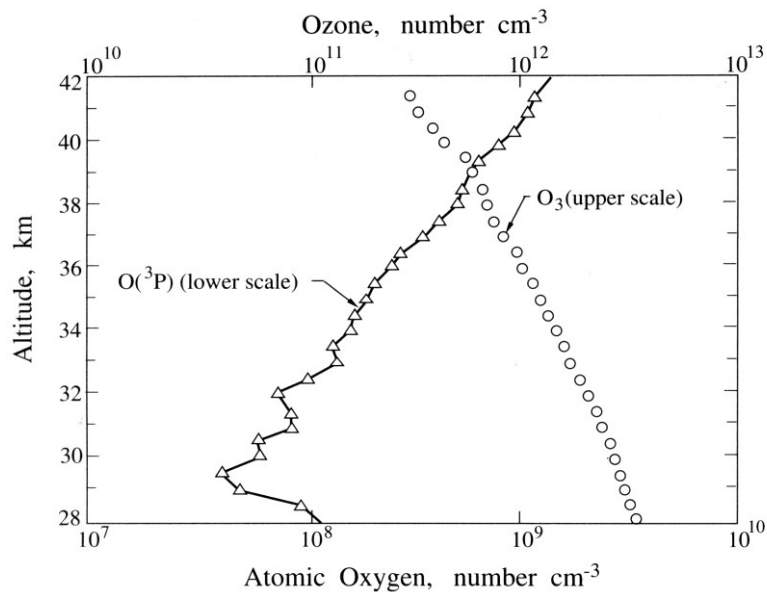
La reazione (1) del meccanismo di Chapman richiede la presenza sia di O_2 (abbondante a quote basse) che di fotoni energetici (abbondanti a quote elevate).

Di conseguenza la velocità di formazione dell'ozono, e quindi la sua concentrazione, è massima ad una quota intermedia.



12

Dipendenza dalla quota della concentrazione di O_3 e di O



13

Unità Dobson (DU)

Lo "spessore dello strato di ozono" è dato dalla quantità di ozono contenuta in un cilindro verticale sovrastante una determinata area della Terra. L'unità di misura potrebbe essere " mol/m^2 " oppure " $molecole/cm^2$ " o altra analoga misura della quantità per unità di superficie.

Per motivi storici si fa spesso uso dell'unità Dobson (DU), che corrisponde allo spessore, espresso in centesimi di mm, che si otterrebbe concentrando tutto l'ozono in uno straterello all'altezza del suolo, a condizioni standard di temperatura e di pressione ($0\text{ }^{\circ}C$ e 1 atm).

A conti fatti si ha anche

$$1\text{ DU} = 2.69 \cdot 10^{16}\text{ molecole}/cm^2 = 4.47 \cdot 10^{-4}\text{ mol}/m^2$$

14

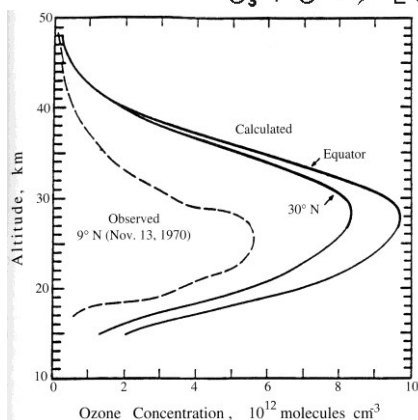
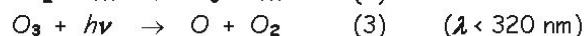
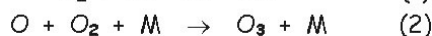
Per curiosità:

Lo spessore medio dello strato di ozono è 300 DU, pari a $300 \cdot 4.47 \cdot 10^{-4} \text{ mol/m}^2 = 0.134 \text{ mol/m}^2$. La superficie della Terra è $510 \cdot 10^6 \text{ km}^2$. Facendo i conti si ricava che la quantità totale di ozono presente nell'atmosfera è $6.84 \cdot 10^{13} \text{ mol}$, pari a $3.28 \cdot 10^{15} \text{ g}$ o $3.28 \cdot 10^9 \text{ t}$.

La quantità totale di gas che costituiscono l'atmosfera è $1.77 \cdot 10^{20} \text{ mol}$, e quindi la concentrazione media dell'ozono è 385 ppb.

15

Vi sono due anomalie riguardo la concentrazione di ozono in stratosfera. **1.** La conc. calcolata sulla base dello schema di Chapman è notevolmente maggiore di quella riscontrata sperimentalmente. Vi è un **assottigliamento dello strato di ozono**



Devono quindi esistere altri processi di eliminazione in aggiunta alla reazione (4) dello schema di Chapman.

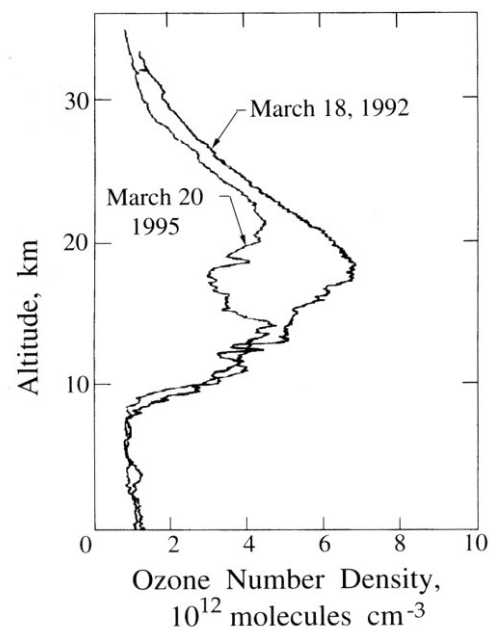
Il primo gruppo di processi (individuato nel 1950) coinvolge i radicali $\cdot\text{H}$, $\cdot\text{OH}$ e $\text{HOO}\cdot$, indicati collettivamente con la sigla HO_x .

16

2. Il "buco dell'ozono": la conc. misurata ai poli ad inizio primavera è notevolmente inferiore a quella osservata negli altri periodi.

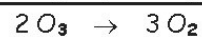
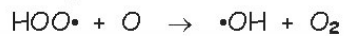
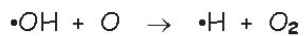
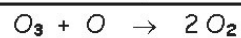
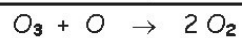
Ad esempio: Isola Spitsbergen, anni 1992 e 1995. I dati sono stati ottenuti con un sensore trasportato da un aerostato.

Latitudine 79° N
Spitsbergen è la maggiore delle Isole Svalbard (Norvegia)



17

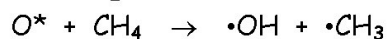
Cicli HO_x



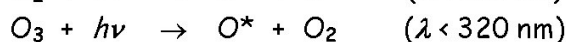
18

Origine del radicale ossidrilico stratosferico

Il radicale ossidrilico si forma per reazione fra monoossigeno eccitato (O^*) e acqua o metano:



A sua volta il monoossigeno eccitato si forma per fotolisi del diossigeno o dell'ozono:

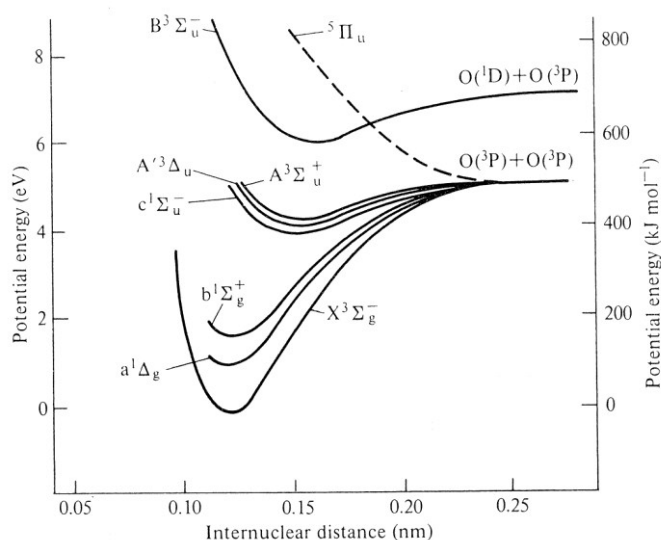


Significato dei simboli:

$O \equiv O(^3P)$	(tripletto)
$O^* \equiv O(^1D)$	(singoletto)

19

Curve di energia potenziale per il diossigeno



20

La concentrazione dell'acqua nella troposfera ha un valore medio dello 0.02%, cioè 200 ppm, con variazioni molto rilevanti (fra il 4% ai tropici e 0.1 ppm nelle regioni polari).

Nella stratosfera la concentrazione è molto più bassa, dell'ordine di 5 o 6 ppm, in conseguenza dell'effetto di "trappola fredda" esercitato dalla tropopausa.

La concentrazione del metano nella troposfera è dell'ordine di 1.7 ppm. Dato che il tempo di vita del metano è dell'ordine di 10 anni, il trasferimento fra troposfera e stratosfera è un fenomeno significativo.

21

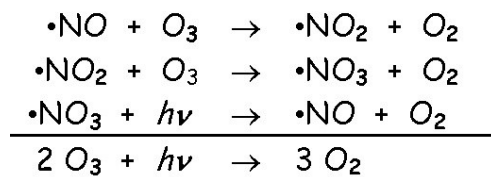
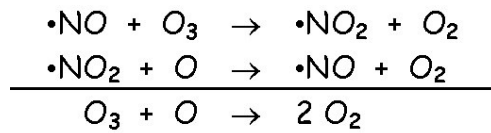
In aggiunta alle reazioni previste dal meccanismo di Chapman ed ai cicli basati su HO_x esistono numerose altre reazioni che possono portare alla distruzione dell'ossigeno dispari.

Fra queste sono significative le reazioni che coinvolgono radicali contenenti azoto (NO_x) e alogeni (ClO_x e BrO_x).

22

Cicli NO_x

Due esempi di cicli catalitici che implicano l'azoto sono:



23

Origine di NO_x stratosferico

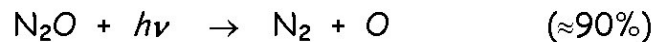
(Ricordiamo che con il simbolo NO_x si indicano collettivamente le due specie $\bullet\text{NO}$ e $\bullet\text{NO}_2$)

La principale fonte naturale di NO_x nella stratosfera è costituita dall'ossido di diazoto (o "protossido di azoto"), N₂O.

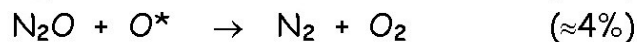
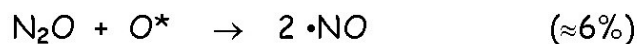
Si tratta di una specie con vita molto lunga (~120 anni), data l'assenza di meccanismi di eliminazione nella troposfera. La concentrazione è dell'ordine di 0.3 ppm.

24

La maggior parte dell'ossido di diazoto che raggiunge la stratosfera subisce un processo di fotolisi:



Il rimanente reagisce con atomi di ossigeno eccitati con formazione di azoto elementare e di NO:



25

Nei primi anni '70 gli Stati Uniti avevano progettato la realizzazione di una flotta di aerei supersonici stratosferici (500 aerei in grado di volare a 20 km di quota). I processi di combustione ad alta temperatura portano alla combinazione diretta di ossigeno ed azoto con formazione di ossido di azoto. Si è calcolato che la quantità di NO_x immessa nella stratosfera sarebbe stata pari alla produzione naturale.

Il progetto è stato abbandonato *anche* per questo motivo. (Ma recentemente l'idea di una flotta di aerei stratosferici è stata ripresa.)

26

Gli europei hanno realizzato il supersonico stratosferico Concorde, ora abbandonato. Fra il 1966 e il 1979 sono stati costruiti 20 esemplari di Concorde (compresi i prototipi).



Il primo volo è avvenuto nel 1969 e la flotta (in tutto 13 aerei, che volavano alla quota di 17 km) è stata in servizio dal 1976 all'ottobre del 2003.

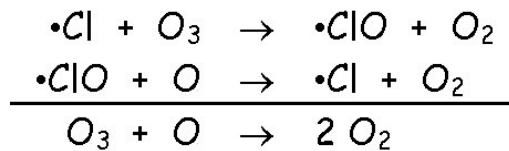
L'incidente del 25 luglio 2000 (Parigi, 113 morti), gli elevati consumi e i costi di manutenzione, sono le cause della dismissione.

Anche se il problema della valutazione del contributo (eventuale) del trasporto aereo alla distruzione dell'ozono è piuttosto complesso, si ritiene che l'apporto di NO_x stratosferico dovuto ai Concorde sia stato nel complesso trascurabile.



27

Ciclo ClO_x



(un ciclo del tutto analogo si ha anche con il bromo al posto del cloro)

28

Origine di ClO_x stratosferico

L'unica fonte naturale significativa di cloro nella stratosfera è costituita dal cloruro di metile, CH₃Cl.

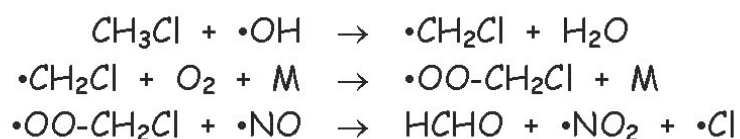
Il cloruro di metile viene prodotto da processi biologici negli oceani ed anche dalla combustione di biomasse; la sua concentrazione nella troposfera è ~0.6 ppb e il suo tempo di vita è ~1.5 anni, sufficientemente elevato perché si abbia un certo trasporto verso la stratosfera.

Due possibili meccanismi di eliminazione: (1) reazione con l'ossidrilico (come nella troposfera) e (2) fotolisi. In entrambi i casi viene rilasciato un atomo di cloro in grado di dare origine al ciclo catalitico considerato.

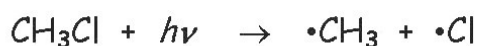
29

Produzione di atomi di cloro a partire dal cloruro di metile

A) reazione con il radicale ossidrilico



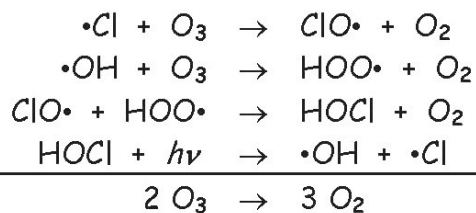
B) fotolisi



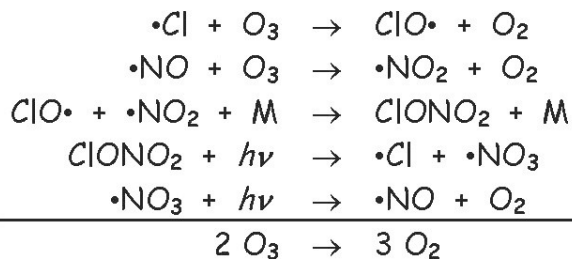
30

Cicli misti

Ciclo HO_x / ClO_x



Ciclo NO_x / ClO_x



31

I cicli catalitici presi in esame possono ripetersi un numero molto elevato di volte. Per esempio, si stima che il ciclo che implica $\cdot\text{Cl}$ e $\cdot\text{ClO}$ si ripeta mediamente circa 10^5 volte prima che una delle due specie attive venga rimossa.

Vi sono due possibilità:

- (a) reazioni che portano all'eliminazione definitiva delle specie attive
- (b) formazione di composti che le "immobilizzano" temporaneamente.

32

Eliminazione definitiva

Per esempio:



Le specie HNO_3 e HCl sono relativamente stabili nella stratosfera e se riescono a raggiungere la troposfera vengono definitivamente eliminate.

33

Immobilizzazione temporanea

Le specie HNO_3 e HCl qualora non raggiungano la troposfera possono riformare specie attive (i radicali $\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{NO}_2$, $\cdot\text{Cl}$), per esempio per effetto di processi di fotolisi.

Tuttavia la loro formazione rallenta la velocità dei cicli catalitici in quanto sottrae ed immobilizza temporaneamente le specie attive. In questo senso, HNO_3 e HCl possono essere considerate "specie di riserva".

Altri esempi importanti di "specie di riserva" sono l'acido ipocloroso, HOCl , e il nitrato di cloro, ClONO_2 .

Se non esistessero queste "specie di riserva" la velocità di distruzione dell'ossigeno dispari sarebbe molto più elevata di quella che effettivamente si osserva.

34

Per esempio

- Un aumento della quantità di N_2O immesso nella stratosfera provoca un aumento della velocità di distruzione dell'ozono per effetto dei cicli NO_x .
- Un aumento della quantità di CH_3Cl immesso nella stratosfera provoca un aumento della velocità di distruzione dell'ozono per effetto del ciclo ClO_x .

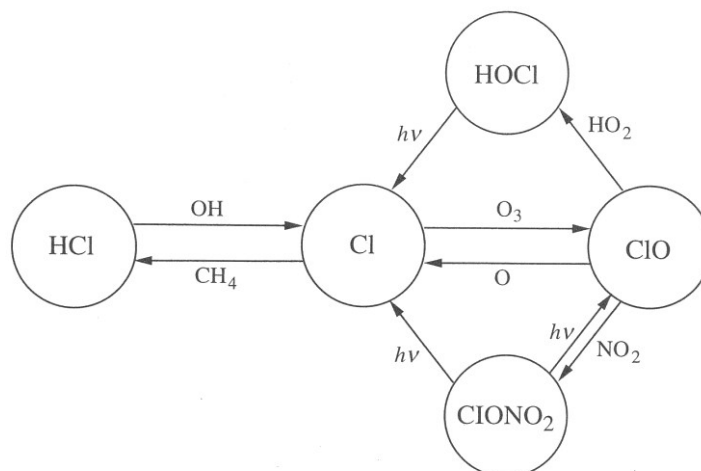
L'effetto di un aumento sia della quantità di N_2O che della quantità di CH_3Cl non è additivo, in quanto la reazione



porta alla formazione della "specie di riserva" $ClONO_2$ e quindi alla sottrazione (temporanea) delle specie reattive.

35

Rappresentazione schematica del ciclo ClO_x (inclusa la formazione di specie di riserva)



36

Fonti antropiche di ClO_x stratosferico

Numerosi composti organici clorurati industriali vengono prodotti in quantità sufficientemente elevata ed hanno una vita sufficientemente lunga da raggiungere la stratosfera. Alcuni esempi:

CH_3Cl	cloruro di metile	(1.5 anni)
CH_2Cl_2	cloruro di metilene	(0.41 anni)
CHCl_3	cloroformio	(0.55 anni)
CCl_4	tetracloruro di carbonio	(42 anni)
$\text{CH}_3\text{-CCl}_3$	metilcloroformio	(5.4 anni)

La fonte di gran lunga più significativa è però costituita dai clorofluorocarburi (CFC).

37

I clorofluorocarburi

Idrocarburi nei quali tutti gli atomi di idrogeno sono stati sostituiti da atomi di cloro e/o di fluoro

Esempi importanti:

CFCl_3	CFC-11	(50 anni)
CF_2Cl_2	CFC-12	(102 anni)
$\text{CF}_2\text{Cl-CFCl}_2$	CFC-113	(85 anni)
$\text{CF}_2\text{Cl-CF}_2\text{Cl}$	CFC-114	(300 anni)

38

Nomenclatura dei clorofluorocarburi e dei composti analoghi

Per i CFC, gli HCFC (idroclorefluorocarburi) e gli HFC (idrofluorocarburi): sommando 90 al numero della sigla si ottiene un numero di tre cifre, *ABC*.

A = numero di atomi di carbonio

B = numero di atomi di idrogeno

C = numero di atomi di fluoro

Nel caso di isomeri, questi vengono contraddistinti con una lettera.

Gli halon (composti contenenti bromo) sono individuati da un numero di quattro cifre, *ABCD*.

A = numero di atomi di carbonio

B = numero di atomi di fluoro

C = numero di atomi di cloro

D = numero di atomi di bromo

39

Il CFC sono stati introdotti nel 1928 (il primo composto commercializzato è stato CCl_2F_2) come fluidi frigoriferi, in sostituzione di NH_3 e di SO_2 .

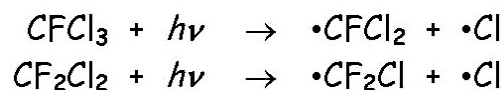
Le proprietà più interessanti sono la grande inerzia chimica, cui conseguono la ininfiammabilità e la completa assenza di tossicità.

Sono stati utilizzati anche come propellenti per aerosol, come solventi per lo sgrassaggio di circuiti stampati, come agenti rigonfianti nella produzione di polimeri espansi.

40

I clorofluorocarburi sono del tutto inerti rispetto ai processi che portano alla ossidazione e quindi alla eliminazione dei composti organici volatili dalla troposfera. Di conseguenza hanno un tempo di vita molto lungo e possono raggiungere la stratosfera.

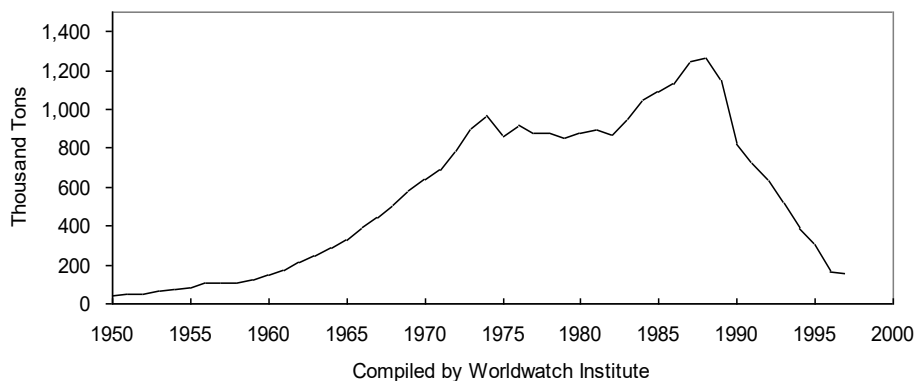
In presenza di radiazione UV di lunghezza d'onda sufficientemente bassa subiscono fotolisi con liberazione di atomi di cloro:



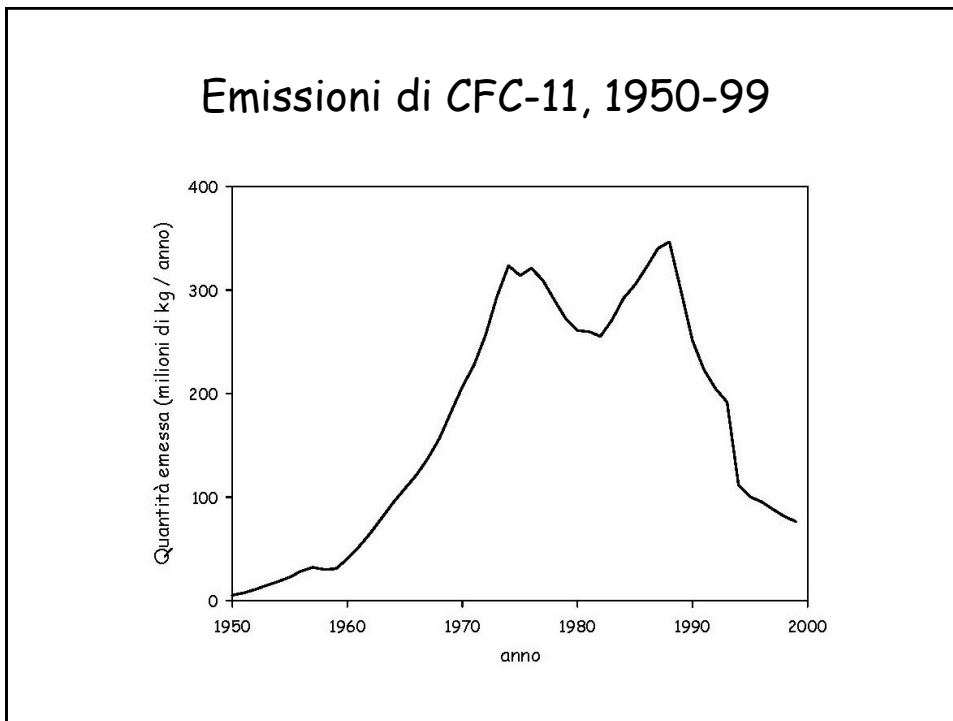
(Gli atomi di cloro che rimangono legati al carbonio vengono rapidamente rilasciati per effetto di altre reazioni.)

41

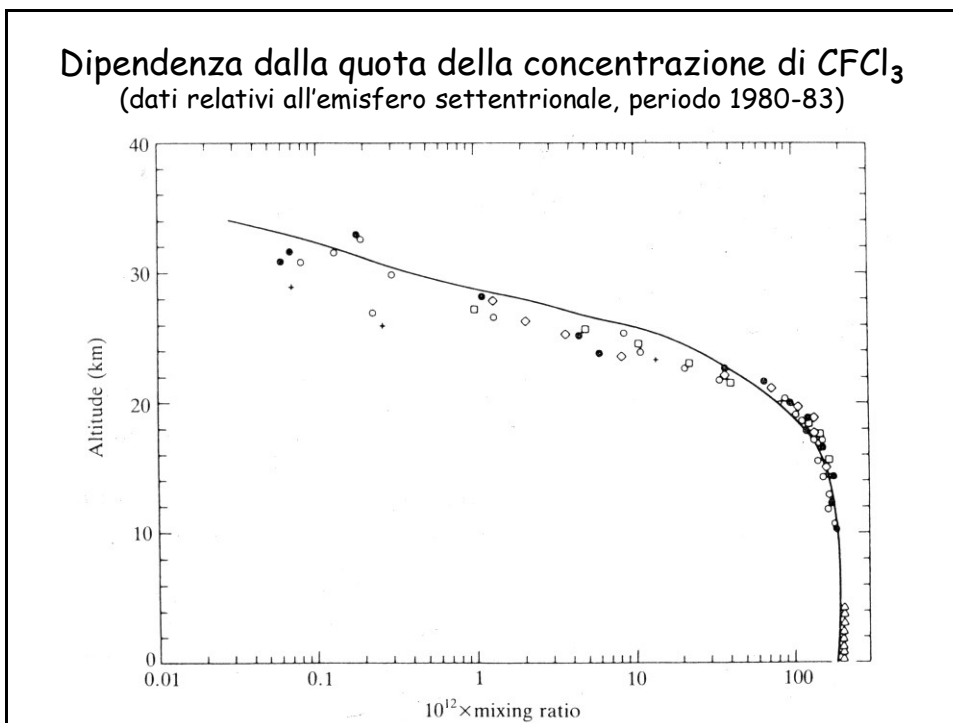
Produzione globale di CFC, 1950-97



42



43



44

La concentrazione di CFCl_3 è praticamente indipendente dalla quota almeno fino all'altezza di 10 km, e poi diminuisce rapidamente (l'andamento per gli altri CFC è simile). Questo fatto è in accordo con l'assenza di meccanismi di eliminazione troposferici.

Le reazioni di fotolisi avvengono anche a quote relativamente basse della stratosfera in quanto la radiazione con lunghezze d'onda comprese nell'intervallo fra 185 e 210 nm (la "finestra" fra le bande di assorbimento dell'ossigeno e dell'ozono) è già sufficientemente energetica.

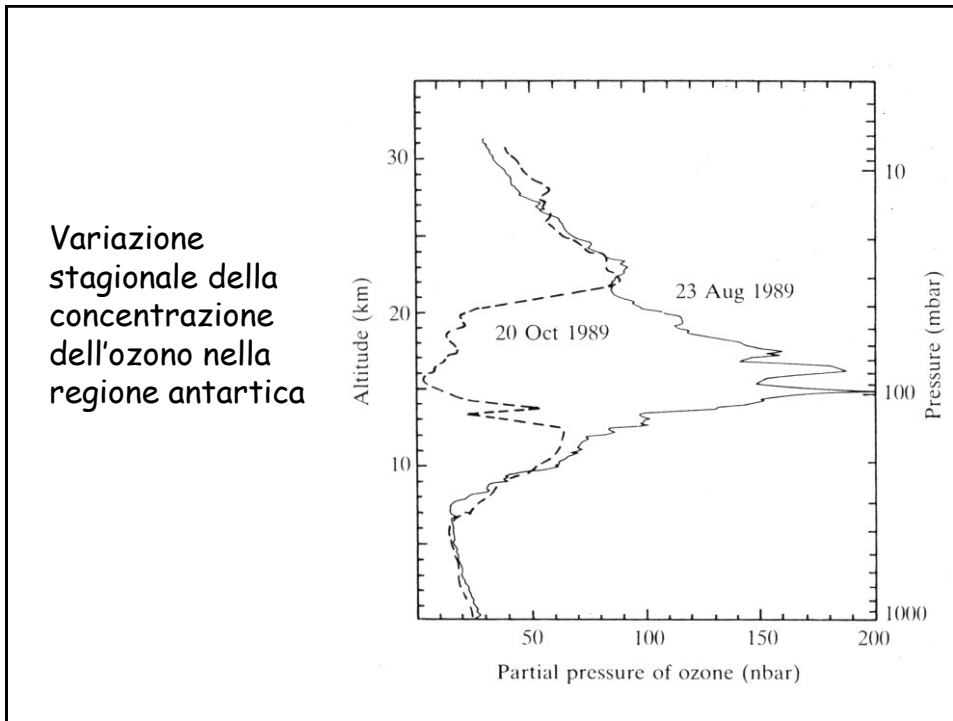
45

L'immissione di CFC nell'ambiente, e quindi nella stratosfera, produce due fenomeni concomitanti:

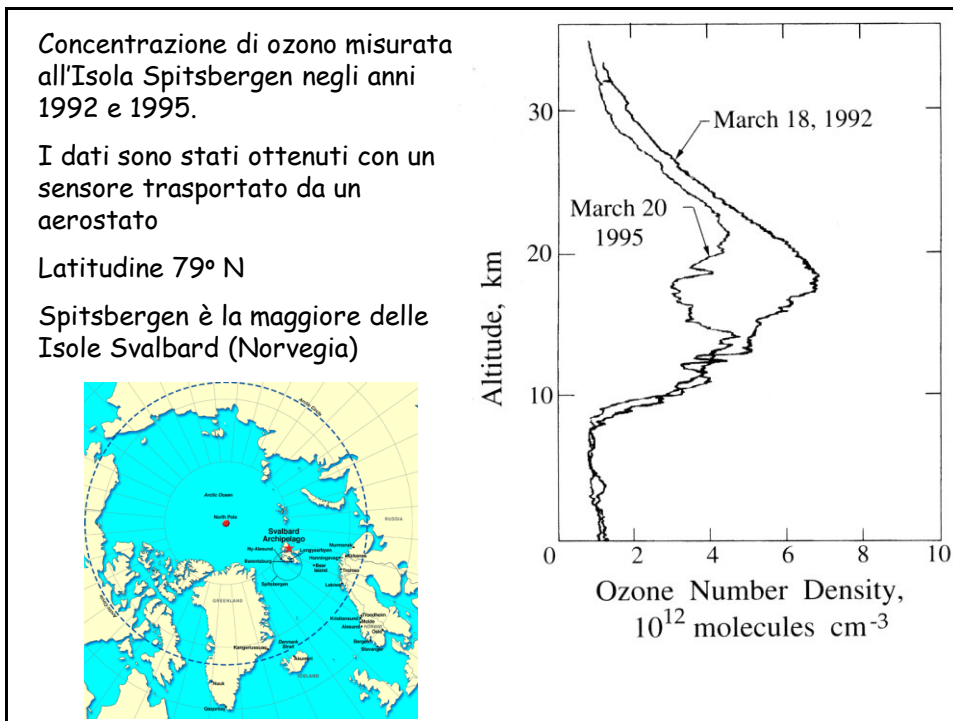
- La diminuzione della quantità totale di ozono ("spessore dello strato di ozono").
- Il "buco nello strato di ozono" sull'Antartide.

Il secondo fenomeno è quello più conosciuto a livello di opinione pubblica, ma è anche il meno significativo dal punto di vista delle conseguenze sulla biosfera!

46



47

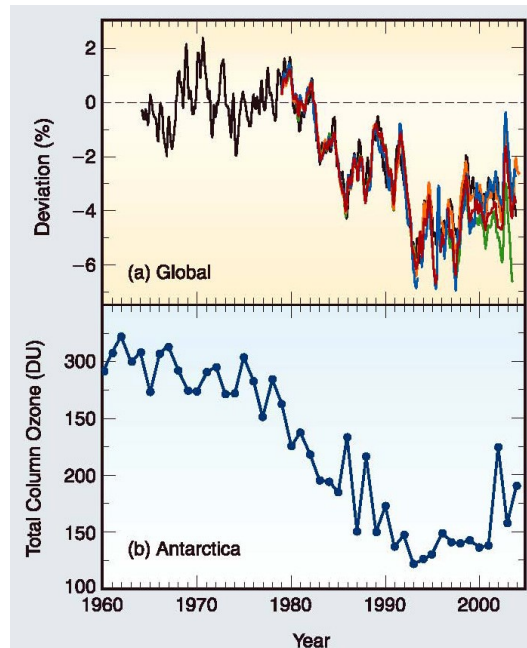


48

Concentrazione dell'ozono atmosferico

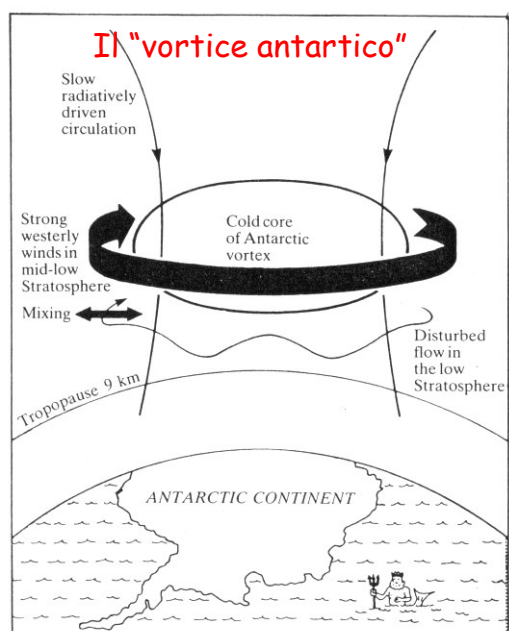
In alto:
concentrazione atmosferica (media globale) ricavata da misure da terra (in nero) e da satellite (in colore), riferita alla media 1964-1980

In basso:
concentrazione media nel mese di ottobre misurata da terra dalla base di Halley in Antartide



49

La formazione del "buco" nello strato di ozono sull'Antartide è dovuta a condizioni meteorologiche molto particolari, che provocano l'isolamento di grandi masse d'aria per più mesi consecutivi.



50

I vortici polari stratosferici

I vortici polari si formano e si consolidano ai poli nella stagione invernale. Elemento essenziale per la formazione e le caratteristiche dei vortici polari è la costituzione geologica della superficie terrestre sottostante.

Hanno una periodicità stagionale: si formano e tendono a consolidarsi in inverno, mentre cominciano a cedere con l'arrivare della primavera, fin quasi a dileguarsi del tutto in estate.

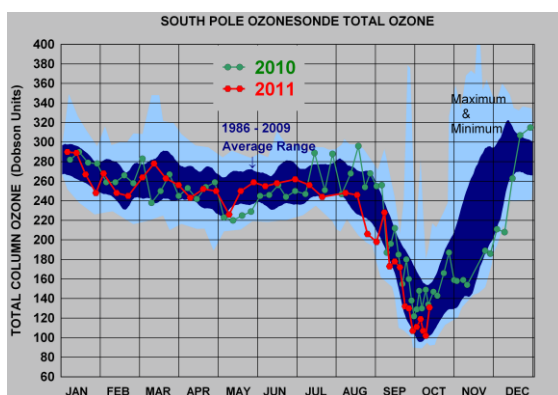
I vortici polari stratosferici sono generati e continuamente alimentati dalle correnti a getto, provenienti dalle superfici geografiche sottostanti le aree interessate dal fenomeno. Questi vortici al polo boreale subiscono le azioni di attrito esercitate dagli oceani e dai continenti. Forze di attrito che sono di gran lunga meno forti al polo sud, dove il vortice può mantenere la sua stabilità quasi indisturbato.

La conoscenza del comportamento e della formazione dei vortici polari riveste un'importanza fondamentale per la fisica dell'atmosfera. Sono infatti ipotizzate correlazioni tra le dinamiche di queste formazioni stratosferiche ed le caratteristiche dello strato di ozono presente nelle latitudini interessate dai fenomeni vorticosi. In particolare si è notato, che più basse sono le temperature rilevate in inverno all'interno di questi vortici e più in primavera, la fascia dell'ozono a queste latitudini subisce un impoverimento.

51

Misure recenti riguardanti la concentrazione di O_3

Gli studi indicano che la riduzione della conc. di ozono nel corso della primavera antartica è un fenomeno che si ripete ogni anno, sebbene con differente intensità

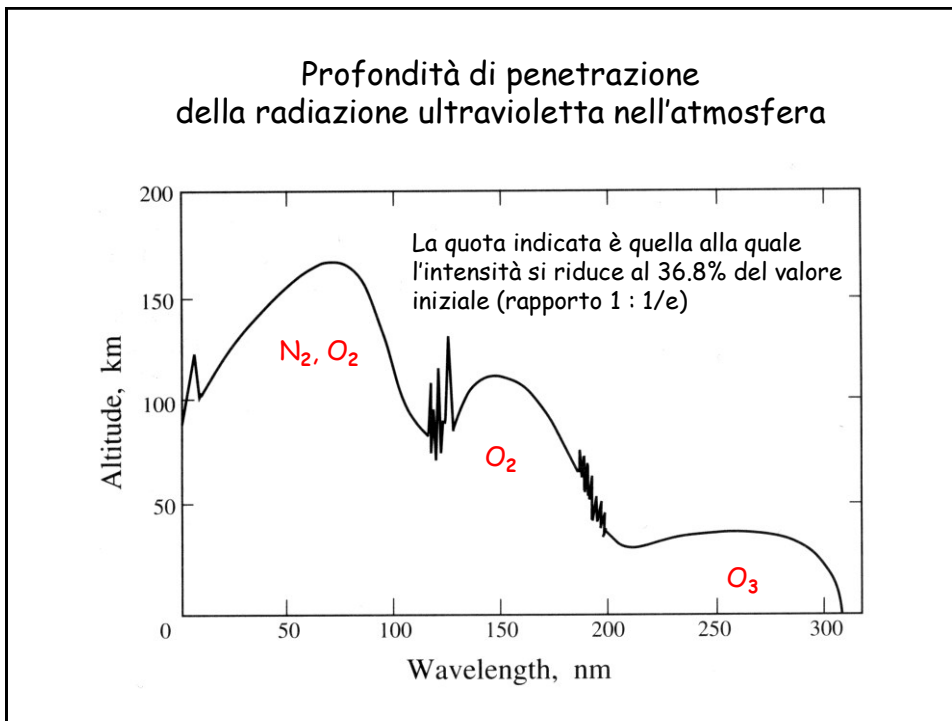


 **NOAA** NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION
UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE

Ozone levels in the atmosphere above the South Pole dropped to a seasonal low of 102 Dobson Units Oct. 9, tied for the 10th lowest in the 26-year record. Every year, an ozone hole forms above the Antarctic for several weeks, because of environmental conditions and the presence of ozone-depleting chemicals.

http://www.noaanews.noaa.gov/stories2011/20111020_ozone.html

52



55

Danni prodotti dalla radiazione UV-B

Alla salute umana:

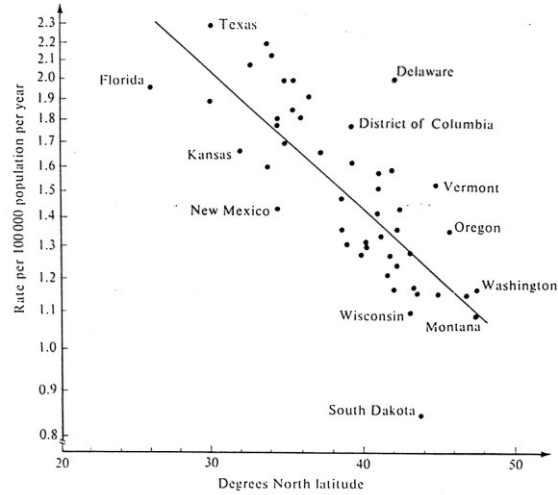
- cancro alla pelle (danni al DNA)
- cataratta
- danni al sistema immunitario

All'ambiente:

- riduzione del fitoplancton oceanico
- danni a coltivazioni sensibili (per esempio la soia)
- danni agli anfibi (rane ecc.)
- aumento della quantità di ozono troposferico

56

Morte per melanoma cutaneo negli Stati Uniti



A conti fatti una diminuzione dello spessore dello strato di ozono del 7% ha lo stesso effetto per quanto riguarda il rischio di contrarre un cancro alla pelle di uno spostamento del luogo di residenza di 130 km verso sud.

57

The Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer

as either adjusted and/or amended in

London 1990
Copenhagen 1992
Vienna 1995
Montreal 1997
Beijing 1999

Il Protocollo di Montreal è un trattato attuativo della Convenzione di Vienna (marzo 1985).

È stato approvato nell'ottobre del 1987 e successivamente modificato e integrato cinque volte. L'ultima modifica è stata apportata nel 1999 a Pechino.



UNEP
Ozone Secretariat
United Nations Environment Programme

58

Cos'è un "protocollo"?

Il termine "protocollo" nel linguaggio della diplomazia designa un documento destinato ad attestare il raggiungimento di un accordo internazionale. Tale documento può costituire un atto a sé stante, non connesso con altri atti internazionali, oppure (come nel caso del "protocollo di Montreal" o del "protocollo di Kyoto") può riguardare un accordo internazionale accessorio a un accordo principale.

Più precisamente, in questi casi si tratta di *protocolli addizionali*, volti a "regolare in modo organico determinate questioni strettamente connesse con la materia dell'accordo principale e in esso soltanto accennate".

59

Cosa prevede il Protocollo di Montreal?

Il protocollo originale prevedeva una progressiva riduzione della produzione di alcuni CFC, ed era stato contestato dai paesi "in via di sviluppo" e anche dall'Unione Sovietica.

Le successive modifiche, oltre ad introdurre delle agevolazioni per i paesi non industrializzati, hanno via via esteso le limitazioni a tutti i CFC (la cui produzione è attualmente cessata in tutti i paesi industrializzati) ed incluso negli elenchi dei composti soggetti a limitazioni anche altri composti dannosi per lo strato di ozono, fra i quali il tetracloruro di carbonio (CCl_4), gli HCFC e gli halon.

60

Composti bromurati

Il bromuro di metile, CH_3Br , è un composto di origine naturale (analogamente al cloruro di metile), ma veniva anche ampiamente utilizzato in agricoltura come "pesticida" ad ampio spettro.

Gli halon (clorobromofluorocarburi) vengono ancora utilizzati come antiincendio, anche se ne è previsto l'abbandono.

Esempi:

H-1301	CF_3Br	(78 anni)
H-1211	CF_2ClBr	(18 anni)

61

Classificazione dei composti "dannosi"

La pericolosità di un composto nei confronti dell'ozono stratosferico viene espressa attraverso il suo "potenziale di riduzione dell'ozono" (ODP, "ozone depletion potential").

Alcuni esempi:

CFC-11	CCl_3F	1.00
CFC-12	CCl_2F_2	0.82
CFC-113	$\text{CCl}_2\text{F}-\text{CClF}_2$	0.90
	CCl_4	1.20
HCFC-22	CHCF_2	0.03
HCFC-123	$\text{CHCl}_2-\text{CF}_3$	0.01
HFC	(tutti)	0

62

I sostituti dei CFC

Si ritiene che l'impiego dei CFC possa essere ridotto almeno del 75%

- attraverso l'adozione di provvedimenti di "conservazione": per esempio, miglioramento della progettazione di frigoriferi e condizionatori; recupero e riciclaggio dei CFC usati.

- attraverso la loro sostituzione con materiali completamente diversi (NIK, "not-in-kind"): per esempio, si possono utilizzare idrocarburi come propellenti e come agenti schiumogeni.

Per il restante 25% si prevede l'utilizzo di analoghi dei CFC contenenti uno o più atomi di idrogeno, gli HCFC e gli HFC.

63

HCFC - idroclorofluorocarburi

Idrocarburi nei quali gli atomi di idrogeno sono stati sostituiti solo in parte da atomi di cloro e/o di fluoro

Esempi importanti:

CHClF_2	HCFC-22	(5.4 anni)
$\text{CHCl}_2\text{-CF}_3$	HCFC-123	(13.3 anni)
CHClF-CF_3	HCFC-124	(1.4 anni)
$\text{CH}_3\text{-CCl}_2\text{F}$	HCFC-141b	(5.9 anni)
$\text{CH}_3\text{-CClF}_2$	HCFC-142b	(9.4 anni)

64

HFC - idrofluorocarburi

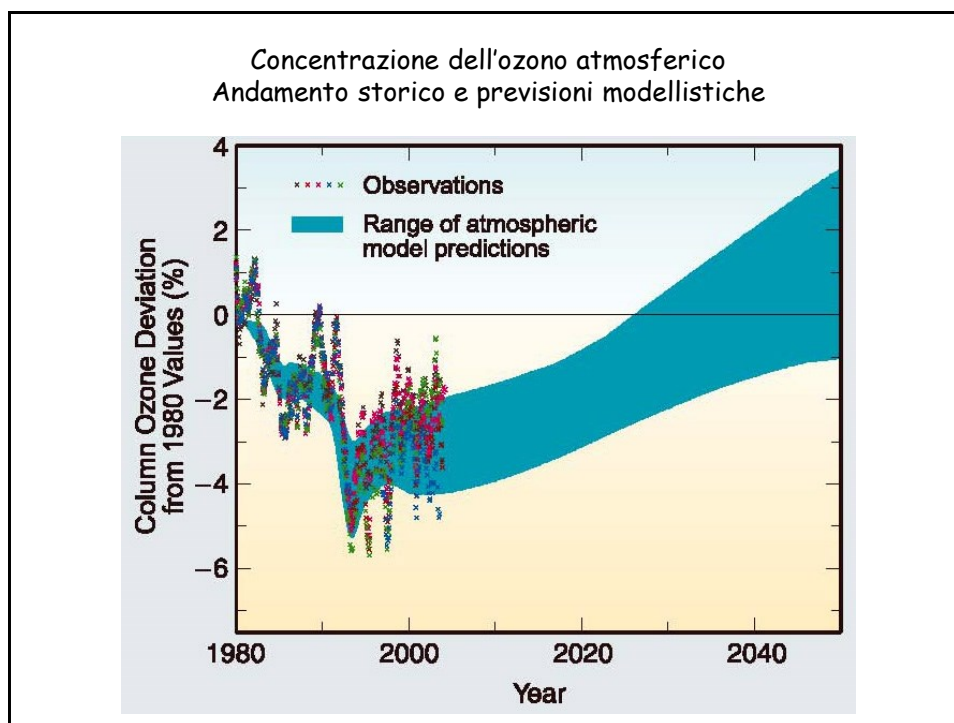
Idrocarburi nei quali gli atomi di idrogeno sono stati sostituiti solo in parte da atomi di fluoro

Esempi importanti:

CH_2F_2	HFC-32	(6 anni)
$\text{CHF}_2\text{-CF}_3$	HFC-125	(36 anni)
$\text{CH}_2\text{F-CF}_3$	HFC-134a	(14 anni)
$\text{CH}_3\text{-CCF}_3$	HFC-143a	(55 anni)
$\text{CH}_3\text{-CHF}_2$	HFC-152a	(1.5 anni)

Si tratta di composti che, non contenendo cloro, non hanno alcun effetto sull'ozono stratosferico

65



66

I risultati prodotti dal Protocollo di Montreal

Per effetto dell'entrata in vigore del protocollo di Montreal si è avuto un arresto della diminuzione dello spessore dello strato di ozono, e i modelli accettati fanno prevedere un ritorno ai valori del 1980 prima della fine del secolo.

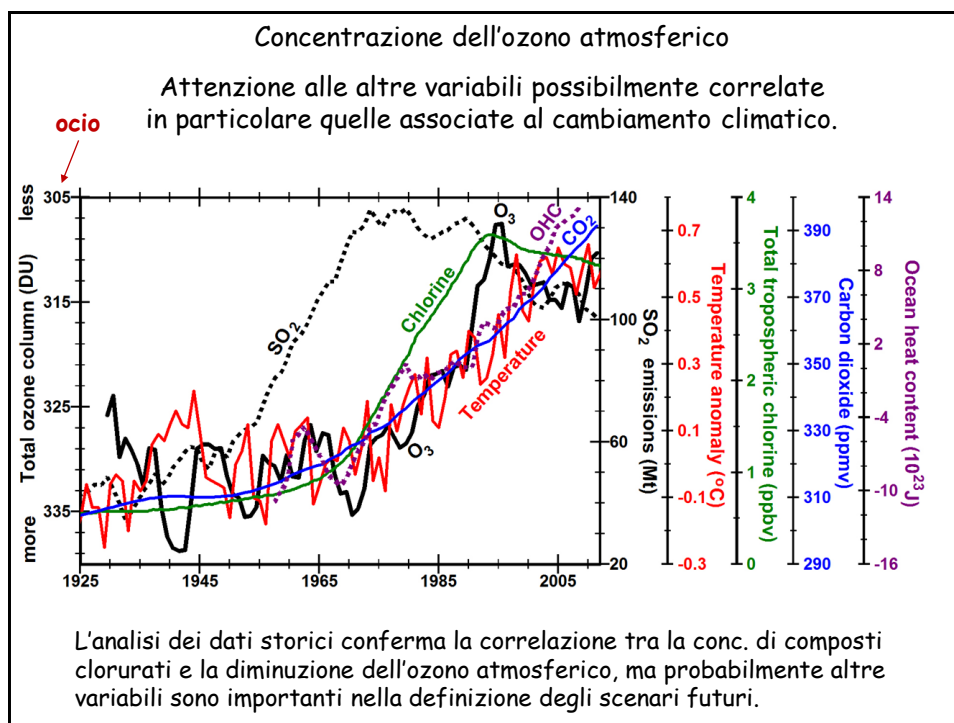
I modelli su cui si basano le previsioni riportate nella diapositiva precedente sono considerati affidabili dall' "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC), che è un gruppo di studio istituito da due "agenzie" delle Nazioni Unite, la World Meteorological Organization (WMO) e il programma per la difesa dell'ambiente (United Nations Environment Programme, UNEP).

Tuttavia sono stati recentemente avanzati dubbi sulla correttezza di queste previsioni, soprattutto per la difficoltà di tener conto dell'effetto del riscaldamento globale sui meccanismi di distruzione dell'ozono.

Per una breve storia dell'ozono stratosferico:

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2023/02/The_ozone_layer_a_hole_new_world

67



68

L'opinione anticonformista

"...Nonostante ciò è ancora controversa l'attendibilità delle prove scientifiche che identificano i freon come agenti responsabili dell'assottigliamento dello strato di ozono (i freon sono stati dichiarati illegali solo quando ne è scaduto il brevetto negli USA, e potevano quindi essere prodotti da chiunque nel mondo. I nuovi ritrovati chimici adottati al posto dei freon sono ancora oggi coperti da brevetto in USA)."

Da Wikipedia ediz. Italiana (Autore anonimo)
<http://it.wikipedia.org/wiki/Freon>

69

Press Release, 11 October 1995

[The Royal Swedish Academy of Sciences](#) has decided to award the 1995 Nobel Prize in Chemistry to

Professor **Paul Crutzen**, Max-Planck-Institute for Chemistry, Mainz, Germany (Dutch citizen),
 Professor **Mario Molina**, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences and Department of
 Chemistry, MIT, Cambridge, MA, USA and
 Professor **F. Sherwood Rowland**, Department of Chemistry, University of California, Irvine, CA, USA

for their work in atmospheric chemistry, particularly concerning the formation and decomposition of ozone.

The ozone layer - The Achilles heel of the biosphere

http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1995/press.html



Paul J. Crutzen
 b. 1933
 1/3 of the prize
 the Netherlands



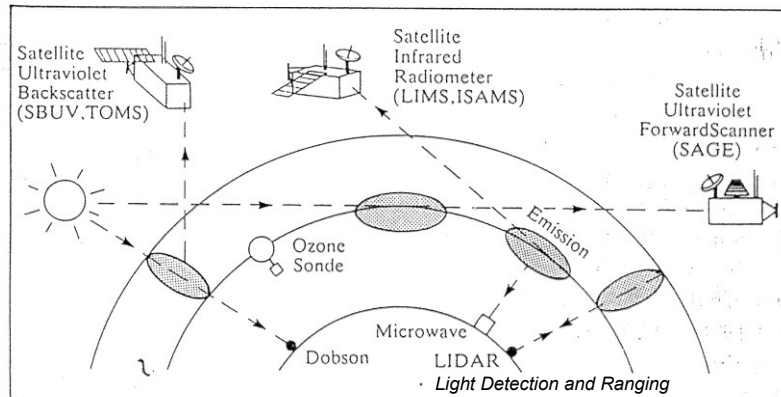
Mario J. Molina
 b. 1943
 1/3 of the prize
 USA



F. Sherwood Rowland
 b. 1927
 1/3 of the prize
 USA

70

Strumentazione utilizzata per la misura della concentrazione di ozono in atmosfera



Riguardo le tecnologie di misura:

<http://www.albany.edu/faculty/rgk/atm101/ozmeas.htm>

In conclusione:

<https://news.un.org/en/story/2023/01/1132277>