

Effetto serra e riscaldamento planetario

Bilancio energetico della Terra

A parte una piccola quantità di energia che arriva alla superficie della Terra come conseguenza dell'attività a grande profondità, l'energia della Terra viene essenzialmente dal Sole. La Terra riceve dal Sole energia radiante (cioè trasportata dalla radiazione elettromagnetica) composta per circa metà di luce visibile, una piccola frazione di ultravioletto e il resto infrarosso.

Energia che la terra riceve dal sole = 1370 w/m ²	frazione	lunghezza d'onda λ
	5% UV	200 - 400 nm
	45% visibile	400 - 750 nm
	45% IR	> 750 nm

Alla distanza a cui si trova la Terra, l'energia fornita dal Sole è di circa 1370 w/m², che viene chiamata costante solare I_0 . Questo valore può variare leggermente nel tempo in relazione alla abbondanza di macchie solari. Comunque le variazioni sono circa lo 0.1% per la frazione di radiazione nel visibile e nell'IR; maggiori oscillazioni sono state osservate per la piccola frazione ultravioletta. La quasi totale scomparsa delle macchie solari durante il XVII secolo coincise con un periodo di clima più freddo dell'attuale (la piccola età glaciale). Questo flusso di energia in buona parte attraversa l'atmosfera e viene assorbito nei suoi strati più bassi e dal suolo. Dalla nostra esperienza quotidiana sappiamo che l'energia solare è capace di provocare escursioni termiche giornaliere di 10 o 20 K ed escursioni dello stesso ordine durante l'anno da una stagione all'altra. Ciò nonostante, da un anno all'altro il ciclo si ripete quasi identico in ogni località. Se facciamo una media su tutto il globo, si trova un risultato notevolmente costante: nell'ultimo secolo, l'anno più caldo e quello più freddo sono separati soltanto da 1 K, e probabilmente la deviazione è dovuta ad una reale deriva verso un clima più caldo, piuttosto che a fluttuazioni casuali.

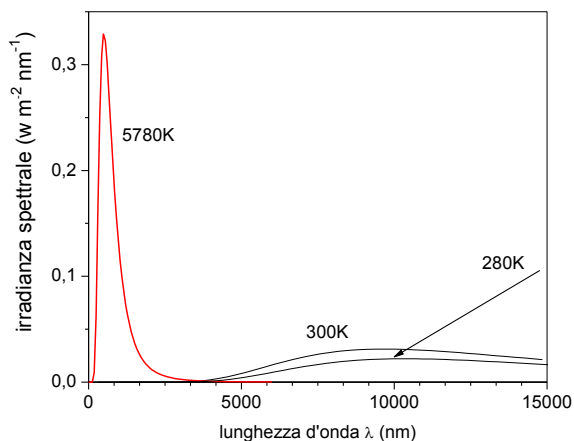
Questo significa che il bilancio energetico della Terra è assai equilibrato nel senso che ***l'energia radiante assorbita da tutta la Terra in un anno è circa uguale a quella ceduta nello spazio***. Il processo di cessione di energia radiante più importante è l'emissione di radiazione elettromagnetica nello spazio. Tutti i corpi emettono radiazione e.m. in quantità proporzionale alla sua superficie ed in misura crescente all'aumento della temperatura. Se il corpo è abbastanza grande, l'emissione avviene in generale su tutte lunghezze d'onda, ma non con la stessa intensità. In particolare all'aumentare della temperatura diventa più intensa l'emissione ad alte energie (basse lunghezze d'onda $E = hc/\lambda$) in accordo con la legge di Planck, valida per il cosiddetto 'corpo nero'. Secondo tale legge il flusso radiante (cioè l'energia emessa per secondo dalla superficie di un m² per unità di lunghezza d'onda) è

$$I(\lambda) = \frac{a}{\lambda^5 (e^{b/\lambda T} - 1)} \approx \frac{a}{\lambda^5} e^{-b/\lambda T}$$

dove $a = 3.74 \cdot 10^{20} \text{ w nm}^4 / \text{m}^2$, $b = 1.44 \cdot 10^7 \text{ nm} \times \text{K}$ e λ è la lunghezza d'onda espressa in nm. Anche il sole emette radiazione secondo la legge di Planck, ma rispetto alla Terra la sua temperatura di 5870 K risulta essere molto più alta e lo spettro è più ricco di radiazioni a bassa lunghezza d'onda. Lo spettro di emissione dei due corpi celesti è riportato nella figura seguente. È evidente che a causa della diversa temperatura, la sovrapposizione tra i due spettri è molto piccola: la Terra riceve radiazioni di bassa lunghezza d'onda (alta energia), la assorbe in parte e la riemette a lunghezze d'onda più alte. L'area sotto le curve rappresenta l'energia totale emessa per unità di tempo e di superficie. Secondo la legge di Stefan quest'area è proporzionale alla quarta potenza della temperatura

$$I_{tot} = \sigma T^4 \quad \left(\text{w/m}^2 \right) \text{ energia emessa da un m}^2 \text{ in un secondo}$$

con $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Quindi a parità di superficie un corpo più caldo emette energia radiante in misura maggiore rispetto a uno freddo delle stesse dimensioni.



Emissione di un corpo nero alla temperatura solare 5780 K, e a due temperature della superficie terrestre, secondo la legge di Planck. L'emissione solare è scalata per tener conto della distanza Terra-Sole, della dispersione sulla superficie sferica della Terra, e dell'albedo, cioè della frazione di radiazione solare riflessa dall'atmosfera e dalla superficie terrestre. La Terra emette a lunghezze d'onda maggiori di quelle dello spettro solare in ragione della temperatura più bassa, in accordo con la legge di Planck.

Cerchiamo adesso di analizzare in maggior dettaglio il bilancio energetico della Terra. Consideriamo una serie di fattori

- 1) la superficie assorbente della Terra è un disco di area πR^2
- 2) la superficie emittente è la superficie di una sfera: $4\pi R^2$
- 3) circa il 30% della radiazione incidente sulla Terra viene riflessa o diffusa nello spazio (questa frazione viene chiamata albedo)

Possiamo adesso scrivere le energie in gioco nel bilancio energetico della Terra nell'unità di tempo

Energia radiante assorbita	$I_0(1 - 0.30)\pi R^2$
Energia radiante ceduta	$\sigma T^4 \cdot 4\pi R^2$

in cui T è la temperatura effettiva superficiale della Terra e $I_0 = 1370 \text{ w/m}^2$. Eguagliando queste due espressioni, cioè supponendo che la Terra assorba ed emetta la stessa quantità di energia, si ricava l'equazione del bilanciamento energetico

$$I_0 0.70 = 4\sigma T^4$$

dalla quale possiamo ricavare la temperatura superficiale media della Terra, che risulta essere $T = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$. Dalle misure eseguite in molti punti della superficie terrestre la temperatura media annuale della Terra risulta però assai superiore: $T = 287 \text{ K} = +14^\circ \text{C}$ ossia una trentina di gradi più elevata! D'altra parte i dati forniti dai satelliti posti fuori dall'atmosfera terrestre hanno permesso di misurare l'emissione globale, confermando che l'energia emessa nello spazio corrisponde piuttosto a una temperatura di 255 K che a 287 K. Sembra quindi che la Terra emetta radiazione come se fosse più fredda di quello che è veramente. Queste discrepanze si spiegano con la presenza nell'atmosfera di certi gas, che assorbono parte della radiazione terrestre, fenomeno che viene chiamato effetto serra.

Effetto serra

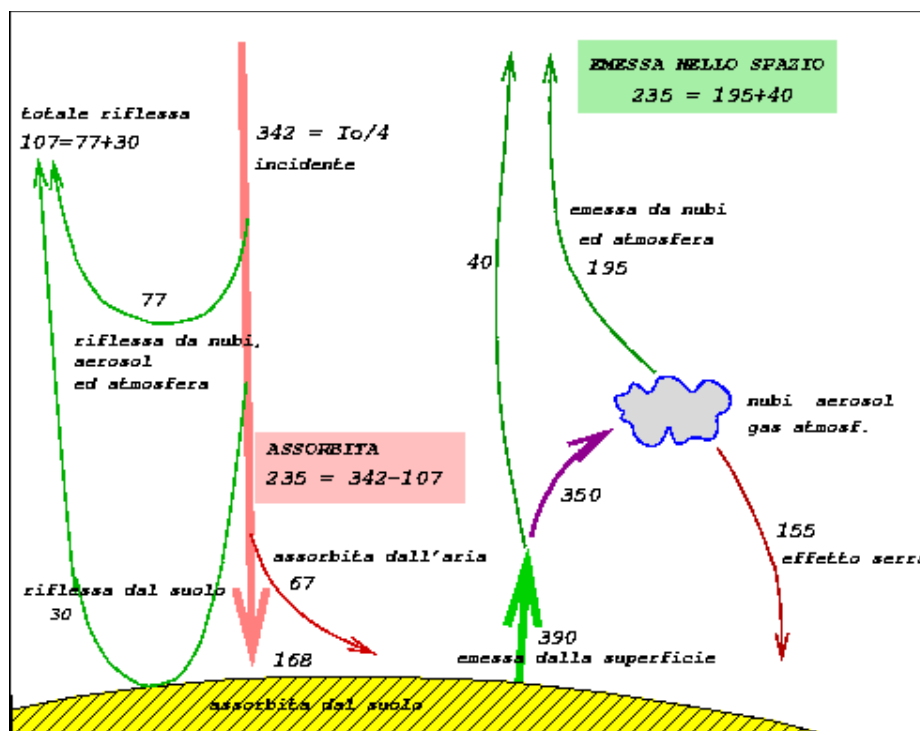
Abbiamo visto che, come qualsiasi corpo caldo, la Terra emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. In relazione alla sua temperatura, lo spettro di emissione (vedi figura sopra) consiste di luce infrarossa (IR) nell'intervallo tra 4'000 e 50'000 nm con un massimo intorno a

10'000 nm. Questa regione viene detta dell'infrarosso termico. Alcuni gas presenti nell'aria possono assorbire a certe lunghezze d'onda in questa regione così che non tutta la radiazione emessa dalla superficie della Terra sfugge nello spazio. Le molecole che assorbono passano ad uno stato eccitato e potranno poi riemettere radiazione in tutte le direzioni per cui parte di questa radiazione potrà ritornare verso la Terra ed essere assorbita dalla superficie terrestre, andando a riscaldare il pianeta. Il fenomeno di ritorno della radiazione IR sulla Terra viene chiamato **effetto serra**. Questo spiega perché i satelliti rivelano una quantità di radiazione corrispondente a una temperatura terrestre inferiore a quella reale. La superficie della Terra emette come un corpo nero a 288 K, ma esiste nell'atmosfera una sorta di schermo per cui parte della radiazione ritorna sulla Terra e, vista dall'esterno, la Terra appare più fredda di quello che in realtà è. *In definitiva, senza l'effetto serra, la Terra avrebbe una temperatura media di -15°C anziché di $+15^{\circ}\text{C}$.*

I principali gas dell'atmosfera terrestre N_2 e O_2 non sono in grado di assorbire radiazione IR. I gas responsabili dell'effetto serra sono principalmente due

gas	Contributo all'effetto serra
Acqua - H_2O	65 %
Biossido di Carbonio - CO_2	25 %
Altri gas (CH_4 , NO_2 ..)	10 %

L'azione dell'acqua come gas serra si apprezza facilmente nei deserti dove l'elevata aridità rende assai piccolo l'effetto serra, per cui durante la notte si raggiungono temperature molto basse, proprio a causa del fatto che la radiazione terrestre sfugge quasi completamente. Nelle regioni temperate umide invece si hanno notti tiepide con escursione termiche notte-giorno molto più basse. La ragione sta nell'elevata umidità atmosferica che cattura buona parte della radiazione in uscita e la ritrasmette alla superficie per cui la perdita di calore durante la notte è ridotta, soprattutto se il cielo è coperto da nuvole. Notiamo che anche la luce solare è in piccola parte assorbita da questi e da altri gas, ma solo una frazione delle sue componenti UV e IR. Rispetto alla luce visibile, l'aria è trasparente.



L'importanza dell'effetto serra sulla temperatura del pianeta si apprezza osservando la figura sopra che mostra il bilancio energetico della Terra espresso in W/m^2 . Per confrontare più facilmente la radiazione entrante con quella uscente, occorre considerare che la superficie emittente è 4 volte

superiore a quella assorbente (come descritto nella pagine precedente) per cui conviene dividere I_0 per 4. In questo modo $I_0/4=342 \text{ w/m}^2$ rappresenta l'intensità media della radiazione incidente rapportata alla superficie di tutta la Terra, ovvero come se anche le zone di ombra parziale e totale assorbissero una radiazione solare di 342 w/m^2 .

Dei 342 w/m^2 proveniente dalla radiazione solare, 235 sono quelli effettivamente assorbiti mentre gli altri 107 sono riflessi nello spazio. Questa frazione, $107/342 \approx 0.3$, corrisponde all'albedo. Si nota l'importanza dell'atmosfera nel ridurre la quantità di radiazione che arriva alla superficie: 77 w/m^2 (il 22% dei 342 incidenti) sono riflessi nello spazio e non contribuiscono al riscaldamento del pianeta.

La Terra emette 390 w/m^2 di radiazione IR di cui solo 40 sfuggono direttamente nello spazio, mentre gli altri 350 vengono assorbiti o riflessi dalle nubi, aerosol e gas atmosferici. che a loro volta riemettono energia radiante in tutte le direzioni. Il risultato è che 155 w/m^2 tornano sulla Terra (**il 40% dei 390 emessi dalla superficie**) mentre che 195 vengono emessi nella direzione di uscita. Alla fine l'emissione totale di 235 w/m^2 eguaglia l'energia in entrata e la temperatura della Terra rimane circa costante.

Da notare che l'effetto serra è responsabile del ritorno sulla superficie di circa 155 w/m^2 per cui gioca un ruolo importantissimo nel bilancio energetico.

Un semplice calcolo

Da notare che nel grafico del bilancio energetico della Terra la luce assorbita non dipende dalla temperatura (parte sinistra della figura) mentre che la parte destra, che rappresenta l'emissione, vi dipende. Possiamo adesso chiederci che cosa accadrebbe se l'effetto serra improvvisamente aumentasse; diciamo che cambia dal 40% al 42%. Supponendo per adesso che l'albedo rimanga inalterato l'energia assorbita è la stessa mentre che l'energia emessa sarebbe diminuita da 235 a 226 W/m^2 . Questo significa che l'energia assorbita è maggiore di quella emessa per cui si osserverà un graduale aumento di temperatura fino a che la nuova emissione della superficie (I_{new}) sarà tale da far sì che $I_{new} \cdot (1-0.42)=235$, ovvero $I_{new}=405 \text{ W/m}^2$. A questo incremento di emissione corrisponde un aumento di temperatura che si può ricavare dalla legge di Stefan

$$I_{new} = \sigma T_{new}^4 \quad I_{old} = \sigma T_{old}^4$$

$$T_{new}^4 = T_{old}^4 I_{new} / I_{old}$$

Inserendo i giusti dati $I_{new}=405$, $I_{old}=390$, $T_{old}=288\text{K}$, si ottiene $T_{new}=290.7 \text{ K}$, corrispondente ad un aumento di 2.7 K . Considerando che ad un aumento di effetto serra dovrà corrispondere un aumento di gas serra nell'atmosfera è presumibile che anche l'albedo aumenterà per cui ci possiamo aspettare un aumento di temperatura inferiore.

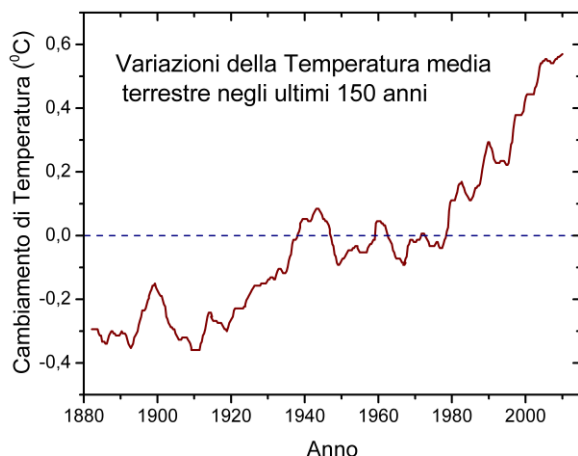
Nella tabella sotto sono riportati alcuni dati relativi all'effetto serra della Terra e di due pianeti, tra i più vicini. I pianeti Venere, Terra e Marte, sono riportati in ordine crescente di distanza Sole-pianeta.

Caratteristiche di tre pianeti messi a confronto			
	Venere	Terra	Marte
Massa totale (rocce + atmosfera) (10^{24} kg)	5	6	0.6
Raggio (km)	6050	6371	3390
Massa dell'atmosfera / Massa Pianeta	100	1	0.06
Distanza dal Sole d (10^6 km)	108	150	228
Costante solare I_0 (w/m^2)	2610	1370	590
Albedo (%)	75	30	15
Copertura di nubi (%)	100	50	variabile
Temperatura radiativa ($^{\circ}\text{C}$)	-39	-18	-56
Temperatura alla superficie ($^{\circ}\text{C}$)	+427	+15	-53
Riscaldamento per effetto serra ($^{\circ}\text{C}$)	466	33	3
Composizione dell'atmosfera			
$\text{N}_2 + \text{O}_2$ (%)	<2	99	<3
CO_2 (%)	>98	0.035	>96
Composizione delle nuvole	H_2SO_4	H_2O	H_2O , CO_2

La costante solare diminuisce quadraticamente all'aumentare della distanza dal Sole ($I_0 \propto 1/d^2$), per cui, a parità di altre condizioni, dovremmo aspettarci che Venere sia più caldo della Terra a sua volta più calda di Marte. Però l'albedo è assai differente per i tre pianeti ed in particolare è molto alto per Venere. Il risultato è che tra i tre pianeti visti dallo spazio è la Terra quello che risulta più caldo, dato che emette come un corpo nero a -18°C contro Venere che emette come se avesse una temperatura effettiva di -39°C . Notiamo come la differenza tra la temperatura radiativa e quella alla superficie sia molto diversa per Venere. Ciò è dovuto all'enorme quantità di gas nell'atmosfera (100 volte la massa della parte solida !) e alla loro natura chimica di gas serra (principalmente CO_2). Il risultato è che su Venere c'è un enorme effetto serra che provoca un aumento di temperatura di ben 466°C . Per la Terra abbiamo visto che tale aumento è di circa 33°C . Marte ha una piccola atmosfera che, anche se composta da CO_2 che è un gas serra, produce un effetto serra molto debole con grandi escursioni termiche giornaliere e bassissima temperatura media dovuta alla grande distanza dal Sole.

Variazione della temperatura terrestre negli ultimi secoli

La temperatura media della Terra nelle epoche passate può essere approssimativamente ricostruita sulla base di evidenze indirette, come gli anelli di accrescimento degli alberi. Fino all'inizio della rivoluzione industriale del 1800 la temperatura media è andata lievemente diminuendo ma dopo il



1850 la tendenza si è invertita e si è osservato un aumento medio pur con andamento oscillante. Questo effetto si è fortemente radicalizzato dal 1970 in poi con un riscaldamento medio mai visto prima: in 30 anni la temperatura è aumentata di circa 0.5 °C, con una **velocità attuale di aumento di poco meno di 2 °C per secolo**. Le fluttuazioni di temperatura di 0.1-0.2 °C si possono spiegare invocando la variazione dello schermo magnetico terrestre, la quantità delle macchie solari e fluttuazioni della componente UV dello spettro solare. Viceversa, un aumento così netto e costante della temperatura deve essere

imputato all'aumento dei gas serra nell'atmosfera (principalmente biossido di carbonio) risultante dalle accresciute attività antropiche susseguenti alla rivoluzione industriale. Come vedremo nel seguito l'aumento di temperatura appare fortemente correlato con un aumento della quantità di CO₂ nell'atmosfera.

Meccanismo dell'assorbimento di energia vibrazionale

Gli atomi che compongono una molecola sono vincolati nelle loro posizioni relative. Per esempio se considero la molecola di acqua, gli atomi H devono stare ad una certa distanza dall'atomo O, circa 0.1 nm, e formare un definito angolo HOH di 104°. Questa disposizione geometrica definisce la geometria di equilibrio della molecola di acqua. Gli atomi però non stanno fermi nelle loro posizioni relative, ma oscillano attorno ad esse con movimenti che vengono detti **moti vibrazionali**. Il numero di moti vibrazionali è uguale al numero totale di atomi della molecola, diminuito di 6 (o di 5 per molecole lineari). Ciascuna di queste vibrazioni ha una frequenza temporale ben definita che dipende dalle caratteristiche strutturali della molecola, ed in particolare dall'energia dei legami chimici.

I moti vibrazionali permettono ad una molecola di assorbire l'energia di un'onda elettromagnetica elementare (fotone) se questa ha la stessa frequenza (o frequenza molto vicina) di uno dei moti. Poiché l'energia della radiazione è

Energia di un fotone	$E = h\nu$	
Periodo (tempo per compiere un ciclo)	$T = \lambda / c$	Spazio / velocità
frequenza	$\nu = 1/T = c / \lambda$	Inverso del periodo
Costante di Planck h	$6.636 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$	
Velocità della luce nel vuoto c	$3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$	

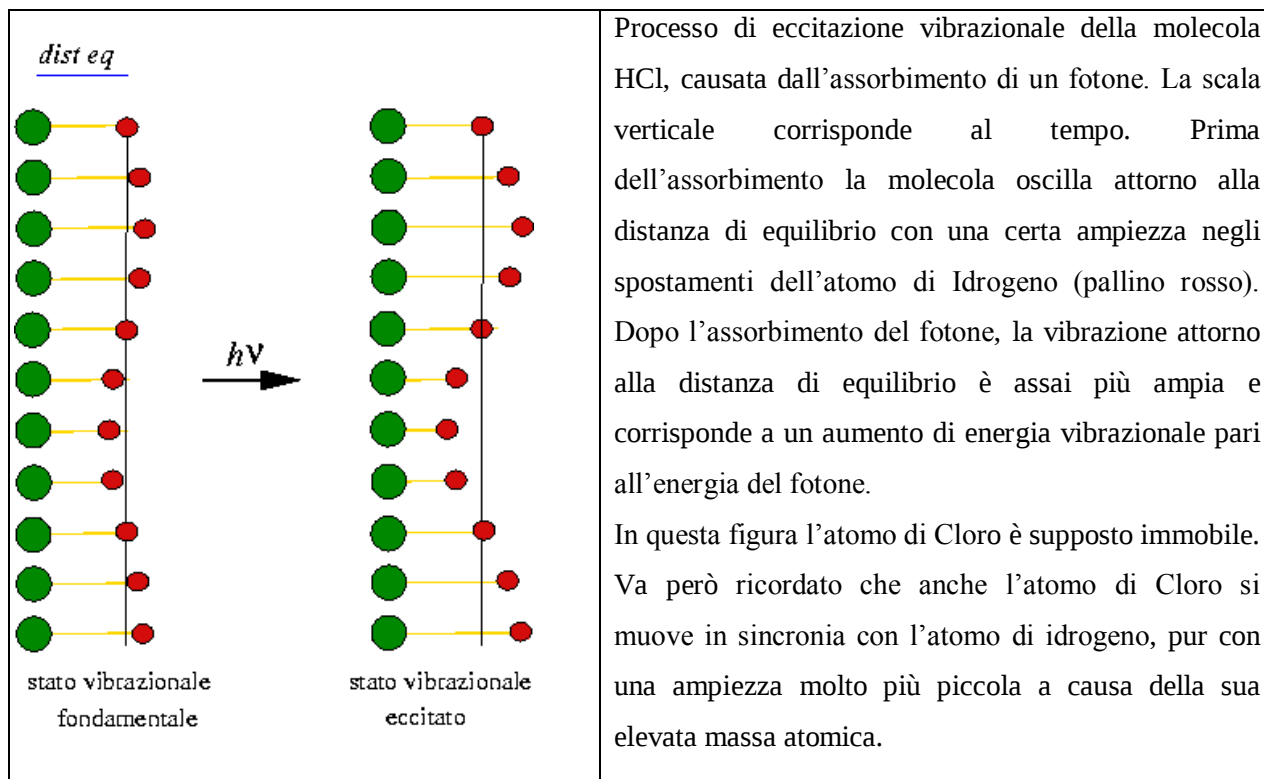
Quindi la frequenza temporale è legata alla lunghezza d'onda dalla relazione $\nu = c / \lambda$ dove c è la velocità della luce. Poiché i moti vibrazionali hanno frequenze dell'ordine di 10^{14} Hz , si ricava che la lunghezza d'onda della luce della stessa frequenza è

$$\lambda = c / \nu = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} / 10^{14} \text{ s}^{-1} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m} = 3000 \text{ nm}$$

Questa luce cade nella regione spettrale dell'infrarosso (IR) per cui si deduce che

i moti molecolari vibrazionali assorbono ed emettono nella zona spettrale IR

Quando una molecola assorbe un fotone di frequenza corrispondente a uno dei suoi moti vibrazionali, essa passa in uno stato eccitato che corrisponde ad una maggiore ampiezza delle oscillazioni vibrazionali come illustrato nella figura sotto per la molecola HCl.



Lo stato eccitato normalmente non ha vita lunga, ma l'eccesso di energia vibrazionale viene perso o emettendo un fotone (processo inverso) o urtando un'altra molecola a cui viene trasmessa parte della energia in eccesso. In questo secondo moto la seconda molecola si muoverà più velocemente, ovvero si sarà riscaldata.

La situazione risulta un poco più complicata nelle molecole poliatomiche dove ci sono più moti vibrazionali. Il moto totale deriva dalla somma di tutti i moti vibrazionali molecolari ciascuno dei quali ha una propria frequenza temporale. In genere le frequenze sono tutte diverse, ma può accadere, come per il biossido di carbonio, che due o tre frequenze siano coincidenti.

Affinché una molecola possa assorbire un fotone ed eccitarsi vibrazionalmente, deve però accadere che **durante il moto vibrazionale il momento di dipolo cambi**. Questo è più o meno garantito se la molecola possiede un momento di dipolo diverso da zero in ciascun punto del moto vibrazionale. I centri di carica positiva e negativa coincidono sempre negli atomi e nelle molecole biatomiche omo-nucleari. In quest'ultimo caso il momento di dipolo è sempre nullo perché, qualunque sia la distanza tra i due atomi uguali, il baricentro delle cariche positive e negative coincide col punto di mezzo del segmento che congiunge i due atomi. Per questa ragione **le molecole biatomiche omo-nucleari, come N₂ e O₂, non sono in grado di assorbire fotoni IR** e non contribuiscono all'effetto serra. Si dice che non sono attive alla radiazione IR.

Per le molecole poliatomiche occorre valutare il tipo di vibrazione per cercare di capire se una vibrazione è attiva o no all'assorbimento della radiazione. L'entità della variazione del momento di dipolo durante la vibrazione è legata all'intensità dell'assorbimento. Valuteremo nel seguito caso per caso.

Va infine ricordato che a causa dei moti rotazionali e per altri effetti, le molecole non assorbono esclusivamente quando la frequenza vibrazionale è identica a quella della radiazione, ma assorbono anche radiazioni di frequenza un poco diversa. La probabilità di assorbimento in funzione della frequenza assume perciò una forma a banda, che esamineremo nel seguito per i casi d'interesse.

Infine menzioniamo che **anche i moti rotazionali possono assorbire radiazione di lunghezza d'onda molto lunga**, ma la loro importanza ai fini dell'effetto serra è minore. Allo stesso modo delle vibrazioni affinché una molecola possa assorbire un fotone ed eccitarsi rotazionalmente occorre che abbia un momento di dipolo permanente.

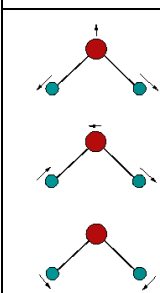
Va infine ricordato che **una molecola eccitata tende a perdere la sua energia in eccesso** essenzialmente in due modi distinti:

- Attraverso l'**emissione** di un fotone ad una lunghezza d'onda simile a quello assorbito, normalmente in tutte le direzioni.
- Attraverso gli **urti** con altre molecole che risultano così più veloci e quindi ad una temperatura più elevata. L'energia radiante si trasforma in un riscaldamento equivalente all'assorbimento di calore.

I gas responsabili dell'effetto serra

Vapore acqueo

Il vapore acqueo è il più importante dei gas serra, in quanto contribuisce per circa il 65 % all'effetto totale. Poiché la Terra emette nella regione dell'infrarosso termico un gas atmosferico sarà attivo per l'effetto serra se le sue frequenze vibrazionali cadono nell'IR. La molecola d'acqua **assorbe praticamente a tutte le lunghezze d'onda dell'IR termico escluso in una finestra tra 7000 e 18000 nm**. Sotto i 7000 nm l'assorbimento della radiazione è dovuto alla flessione (bending) dell'angolo H-O-H ed ancora a lunghezze d'onda minori i due moti di stiramento dei legami (vedi figura). Il momento di dipolo cambia molto durante queste vibrazioni che sono quindi molto intense. Le bande sono anche assai larghe a causa delle concomitanti transizioni rotazionali. Le rotazioni molecolari assorbono la radiazione IR di più bassa energia, sopra i 18000 nm.

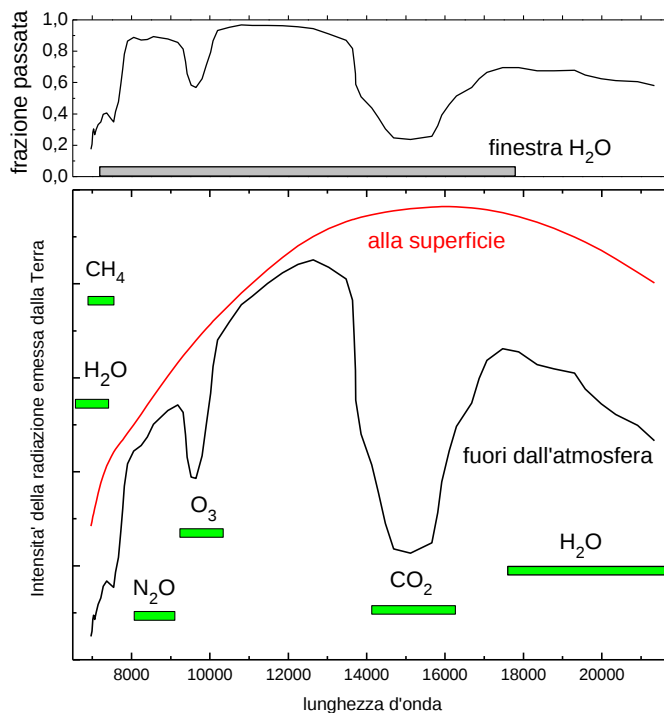
Moti vibrazionali della molecola di acqua		
	Stretching simmetrico (stiramento dei legami OH)	Assorbe a 2730 nm
	Stretching asimmetrico (stiramento dei legami OH)	Assorbe a 2660 nm
	Bending (flessione dell'angolo H-O-H)	Assorbe a 6200 nm

Bisogna però tener conto che il contenuto di vapore d'acqua dell'atmosfera è molto variabile, per cui l'ampiezza della finestra può cambiare significativamente da zona a zona: per esempio, sarà più larga sui deserti aridi e più stretta sui mari o sulle foreste tropicali. L'importanza assoluta e relativa degli altri gas dipende dalla collocazione delle loro bande di assorbimento rispetto alla finestra dell'acqua. In altre parole un gas che assorbe in una regione già coperta dall'acqua produce pochissimo effetto serra, mentre se assorbe dove l'acqua è trasparente darà un contributo significativo all'effetto serra anche perché l'emissione dalla superficie è assai alta nella finestra dell'acqua. Nella figura sotto si può apprezzare come sotto i 7000 nm e sopra i 18000 la radiazione

che sfugge all'atmosfera sia relativamente poca, mentre nella finestra dell'acqua il contributo degli altri gas risulta importante, soprattutto quello del biossido di carbonio.

Va anche considerato che fuori dalla finestra 7000-18000 l'acqua assorbe con grande efficacia per cui si osservano fenomeni di **saturazione**. Ciò significa che ad una certa concentrazione l'acqua assorbe tutta la radiazione di una certa lunghezza d'onda ed un ulteriore aumento di concentrazione non provoca un aumento di assorbimento e quindi di effetto serra.

Queste considerazioni sono esemplificate nella figura seguente che mostra lo spettro di emissione al suolo e fuori dall'atmosfera, ovvero al netto dell'effetto serra. Come si vede nel grafico superiore, nella finestra dell'acqua quasi tutta la radiazione sfuggirebbe nello spazio se non fosse per il biossido di carbonio che assorbe gran parte della radiazione della superficie tra 14000 e 16000 nm ed è quindi un importante gas serra.



Frazione di radiazione termica che supera il filtro atmosferico e sfugge nello spazio (dati rilevati sopra il deserto del Sahara).

Intensità della radiazione termica (nella finestra dell'acqua) emessa alla superficie della Terra (curva rossa superiore) ed intensità della radiazione effettivamente emessa nello spazio, dopo il filtro atmosferico. La differenza tra le due curve rappresenta la frazione di radiazione IR assorbita dall'atmosfera.

I dati sono riferiti al deserto del Sahara, dove l'umidità dell'aria è molto bassa. Nelle regioni più umide l'assorbimento dell'acqua è assai più pronunciato.

Le barrette orizzontali rappresentano le zone dello spettro dove i gas indicati assorbono.

Sebbene le attività antropiche, come la combustione, generino molta acqua, la concentrazione del vapore acqueo nell'aria è determinata dall'evaporazione dell'acqua degli oceani, ovvero dal fatto che il vapore acqueo è a contatto con la sua fase liquida. Perciò, **la quantità di vapore acqueo non può essere controllata dall'uomo, ma dipende esclusivamente dalla temperatura globale**. La tensione di vapore dell'acqua cresce fortemente con la temperatura, per cui a un riscaldamento del pianeta corrisponderà un aumento del vapore acqueo nell'atmosfera. Poiché l'acqua è un gas serra, l'effetto serra sarà aumentato col risultato di un ulteriore aumento di temperatura.

Un comportamento di questo tipo si dice a **feedback** (retroazione) **positivo**: un certo cambiamento (riscaldamento) produce un altro cambiamento (più vapore acqueo) che rinforza il cambiamento stesso (ulteriore aumento della temperatura). Il feedback positivo accelera quindi il cambiamento stesso.

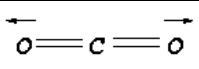
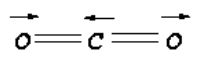
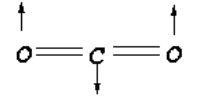
Le radiazioni IR sono assorbite anche dalle goccioline di acqua presenti nelle nubi. Le nubi però hanno anche un effetto opposto al riscaldamento, poiché riflettono parte della radiazione UV e visibile proveniente dal Sole aumentando l'albedo. In questo caso si ha a che fare con un **feedback negativo** dato che un aumento di temperatura conduce a un incremento dell'umidità atmosferica e della quantità di nubi, con un conseguente aumento della schermatura della radiazione solare. Quindi, in questo caso gli effetti innescati dall'aumento di temperatura vanno a opporsi al fenomeno iniziale.

Non è ancora chiaro quale dei due effetti (aumento dell'effetto serra o aumento dell'albedo) sia prevalente all'aumentare della temperatura. È stato osservato che le nubi sopra le regioni tropicali hanno un effetto netto praticamente nullo, mentre quelle alle latitudini settentrionali danno luogo ad un raffreddamento in quanto la diminuzione dell'albedo supera l'aumento di assorbimento della radiazione uscente.

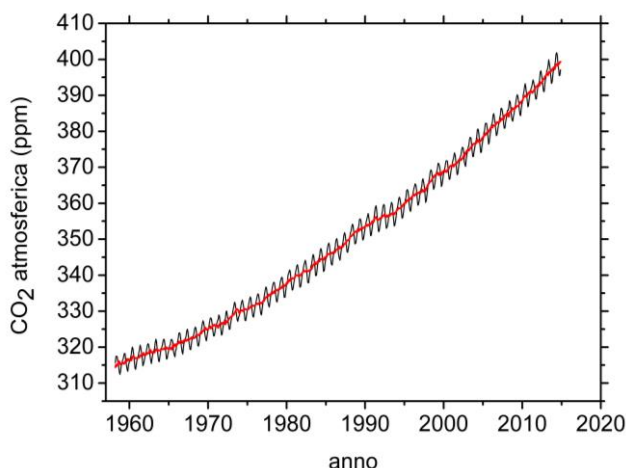
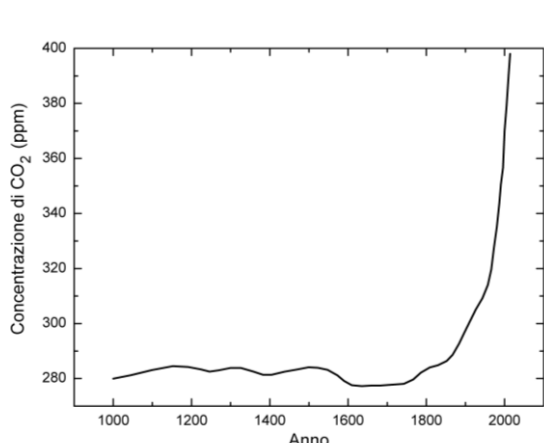
Biossido di carbonio

L'importanza del biossido di carbonio come gas serra deriva senz'altro dalla sua capacità di assorbire radiazione IR nella finestra lasciata libera dal vapore acqueo dove la Terra emette intensamente (si veda l'ultima figura). La vibrazione importante è quella di bending che è responsabile dell'assorbimento intorno a 15000 nm (vedi figura sotto e figura precedente). La vibrazione di stiramento a 4300 nm invece è intensa ma meno importante ai fini dell'effetto serra, sia perché si sovrappone all'assorbimento dell'acqua sia perché una minima frazione della radiazione emessa dalla Terra possiede questa lunghezza d'onda.

Le molecole di CO₂ nell'aria assorbono circa la metà della radiazione IR tra 12000 e 18000 nm e disperdono questa energia riemettendo un fotone (verso lo spazio o verso la Terra), oppure attraverso gli urti con altre molecole provocando un riscaldamento dell'aria.

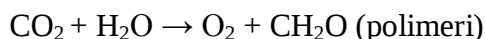
Moti vibrazionali del biossido di carbonio		
	Stretching (stiramento di legame) simmetrico	non assorbe
	Stretching (stiramento di legame) asimmetrico	assorbe a 4300 nm
	Bending (flessione dell'angolo O-C-O). La quarta vibrazione si ottiene ruotando i movimenti di 90° attorno all'asse molecolare.	assorbe a 15000 nm

Le misure effettuate sull'aria racchiusa nei ghiacciai perenni indicano che la concentrazione atmosferica di CO₂ prima della rivoluzione industriale era di circa 280 ppm. Intorno al 2002 tale concentrazione era di 380 ppm e nel 2014 aveva ormai raggiunto i 400 ppm. Come illustrato nella figura sotto a sinistra si è osservato un rilevante aumento dal 1900 in poi ed il tasso di crescita risulta sempre maggiore nel tempo. Anche negli ultimi anni il tasso di crescita è in lieve aumento, come si deduce dalla figura a destra. Dal 1990 il tasso di crescita è circa dello 0.4-0.5 %, il doppio di quello osservato intorno agli anni 60.

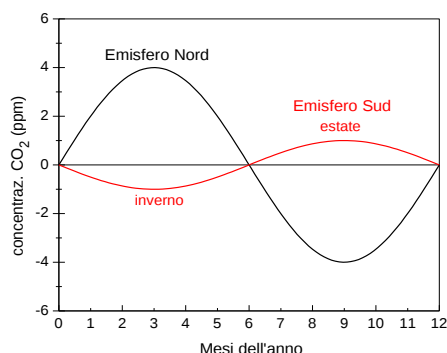


È evidente che il grafico dell'aumento di CO₂ correla fortemente con l'aumento della temperatura terrestre, per cui non vi è alcun dubbio che un'importante causa del riscaldamento globale (Global Warming, GW) è l'accresciuta quantità di CO₂ nell'aria.

Il grafico interno (riferito all'osservatorio sul vulcano Mauna Loa alle Hawaii) mostra una forte e regolare oscillazione stagionale, dovuta alla crescita delle piante (maggiore attività fotosintetica) durante la primavera-estate e al ciclo di decomposizione delle stesse che in autunno e inverno immette CO₂ nell'aria. La fotosintesi clorofilliana estrae grandi quantità di CO₂ dall'aria secondo la reazione generale



Le fluttuazioni stagionali della CO₂ sono pronunciate nell'emisfero nord, che conta la maggior estensione di terre emerse e quindi di vegetazione. I dati dell'Antartide risentono della minore quantità di terre emerse e di vegetazione nell'emisfero sud e mostrano oscillazioni più contenute. Il grafico accanto mostra tali oscillazioni durante l'anno solare per due località nell'emisfero nord e sud, rispettivamente. Notare che quando la CO₂ cresce nell'emisfero nord essa diminuisce nell'emisfero sud poiché nei due emisferi le stagioni sono opposte a causa dell'inclinazione dell'asse terrestre rispetto al piano dell'eclittica Terra-Sole.



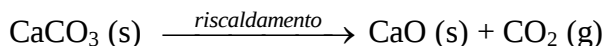
Immissioni di CO₂ nell'aria (sorgenti)

Ogni processo che fa aumentare la quantità di una certa sostanza viene chiamato **sorgente** (source, in inglese), mentre ogni processo che la fa diminuire è detto **pozzo** (sink).

La maggiore causa dell'aumento di CO₂ (sorgente) è dovuta alle attività umane e riguarda la **combustione** di combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) per trazione, riscaldamento, produzione di energia elettrica e altro. Si è calcolato che per ogni persona che vive nei paesi industrializzati, vengono emesse 5 t di CO₂ nell'aria ogni anno. In pratica ogni attività economica è accompagnata da emissioni di CO₂ nell'aria.

Una seconda causa rilevante di immissione di CO₂ nell'aria è la estesa **deforestazione** realizzata mediante incendi allo scopo di ottenere nuovi terreni agricoli. Nei secoli passati questa attività si è prodotta nelle zone temperate (Canada, USA) mentre attualmente si è spostata nelle zone tropicali. Attualmente, il paese che ha il primato di deforestazione è il Brasile (foresta amazzonica) accompagnato dall'America centrale e dal sud-est asiatico. Si stima che questa attività antropica sia responsabile di 1/4 delle emissioni, mentre la combustione dei combustibili fossili contribuisce per i rimanenti 3/4.

Una minore fonte di CO₂ riguarda la **produzione di cemento**. Il processo consiste nell'arrostimento di una miscela di carbonati e silicati, per ottenere ossidi di Ca, Si, Al, etc, con liberazione di CO₂ attraverso la reazione



Naturalmente oltre alle attività antropiche vi sono le attività naturali che influenzano la quantità di anidride carbonica nell'aria. La più importante è la respirazione degli esseri viventi e la decomposizione di materiale organico che viene ossidato a CO₂. Le attività naturali immettono nell'atmosfera una quantità molto maggiore di quella derivante dalle attività antropiche. **Comunque la fotosintesi clorofilliana compensa le attività naturali in modo molto preciso.** La prova è che prima dell'epoca industriale le fluttuazioni di CO₂ sono avvenute attorno ad un valore medio stabile, mentre dopo, oltre alle oscillazioni, si è evidenziato un deciso aumento.

Quindi non vi è dubbio che l'aumento di anidride carbonica nell'atmosfera deriva dalle attività antropiche. Le immissioni di CO₂ nell'aria sono aumentate da circa 2 Gt/anno (1 giga tonnellata = 10¹² kg) negli anni 60 a circa 7 Gt/anno negli ultimi anni. Perdurando la situazione attuale di immissioni di CO₂ nell'aria alcune stime molto approssimate prevedono che nel 2100 la concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera raggiungerà 650 ppm, quasi il doppio di adesso.

Tempo di vita dell'anidride carbonica e pozzi

Si è stimato che il totale delle immissioni di anidride carbonica nell'aria ammonta a più di 7 Gt/anno di carbonio, mentre l'aumento riscontrato nell'atmosfera è intorno a 3.2 Gt/anno (circa il 50%). Evidentemente ci deve essere qualche meccanismo di feedback negativo, cioè un meccanismo che all'aumentare della CO₂ nell'aria, ne amplifica la distruzione.

Il tempo di residenza della CO₂ nell'aria è legato alla velocità dei processi che ne provocano la distruzione. La fotosintesi rappresenta un pozzo temporaneo, dato che il carbonio assorbito viene re immesso nell'aria dopo pochi anni. L'unico pozzo permanente dell'anidride carbonica è rappresentato dalla **deposizione nella profondità degli oceani** sotto forma di carbonato di calcio CaCO₃ insolubile in acqua. Questo processo richiede che la CO₂ dell'aria si sciogla nelle acque superficiali e in seguito diffonda in profondità, dove precipita in modo definitivo. Mentre il primo processo è abbastanza rapido (alcuni anni), il passaggio alle acque profonde è lento, per cui si stima che per eliminare l'aumentata quantità di CO₂ nell'aria siano necessari da 50 a 200 anni.

La quantità di CO₂ che si scioglie nell'acqua è regolata dalla legge di Henry

$$[\text{CO}_2] = H \cdot P_{\text{CO}_2}$$

dove la pressione è circa 3.7 · 10⁻⁴ atm. La costante di Henry diminuisce con la temperatura, e vale 0.034 mol/l·atm a 25°C (più del doppio, 0.074, a 0°C). Questo valore in realtà non si riferisce soltanto alla specie molecolare CO₂ solvatata, ma anche all'acido carbonico H₂CO₃ con cui in soluzione si stabilisce un rapido equilibrio. In altre parole la concentrazione molare che indichiamo con [CO₂] è la somma delle concentrazioni di entrambe le specie. Va inoltre tenuto conto separatamente dell'equilibrio di idrolisi o dissociazione acida



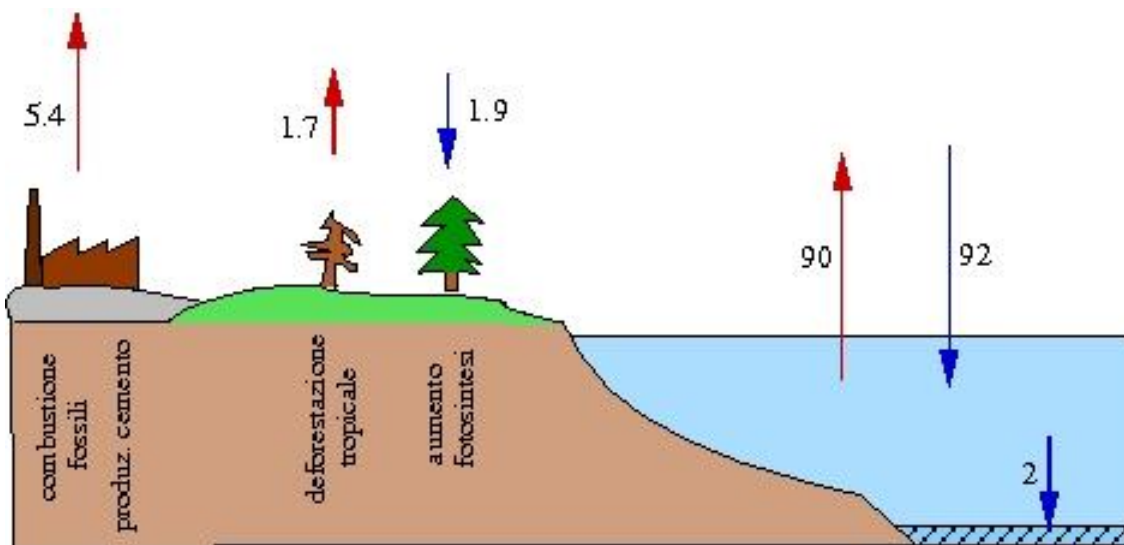
La costante di equilibrio, sempre a 25°C, è

$$\frac{[\text{H}^+][\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]} = K_{\text{ac}} = 4.45 \cdot 10^{-7} \text{ mol/l}$$

L'acqua di mare, a causa dei cationi disciolti, ha un pH intorno a 8.1. In queste condizioni [HCO₃⁻] è circa 55 volte [CO₂], cioè la solubilità della CO₂ è 56 volte maggiore di quanto ci si aspetterebbe dalla legge di Henry. La concentrazione di equilibrio è 7·10⁻⁴ M.

L'acido carbonico reagisce con ioni Ca^{2+} a formare carbonato di calcio insolubile che precipita nei fondali marini. A causa di questo meccanismo risulta che gli oceani contengono una quantità di carbonio enormemente più grande che non l'atmosfera e la biosfera.

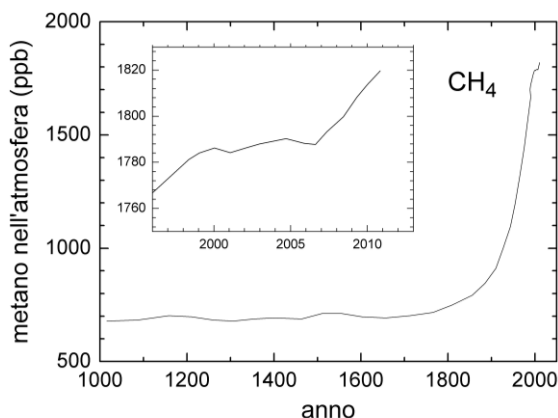
Un altro pozzo di grande importanza è costituito dall'**aumento della fotosintesi clorofilliana** nell'emisfero nord indotto sia dall'aumento della quantità di biossido di carbonio nell'aria, sia dalla più alta temperatura terrestre. Ciò ha dato luogo a una crescita molto veloce delle piante dell'emisfero nord che sembra *sia la ragione principale per cui l'aumento di CO_2 nell'aria è circa la metà di quanto ci si aspetterebbe in base all'aumento di immissioni antropiche*. Va ricordato che **le immissioni antropiche di CO_2 sono solo il 4% della quantità di CO_2 prodotta dalla natura**, per cui anche piccoli aumenti percentuali di efficienza nella fotosintesi possono avere effetti rilevanti nel compensare l'aumento di CO_2 provocato dalle attività umane.



La figura mostra i flussi antropici di entrata della CO_2 per anno, misurati negli anni 1980-90, insieme con i flussi di uscita. La combustione e deforestazione hanno immesso circa 7 Gt di carbonio (nella forma CO_2) nell'aria. Di questi una buona parte (circa 2 Gt) sono state assorbite dall'aumento di fotosintesi per cui l'altro pozzo, il mare, dovrebbe assorbire circa 5-6 Gt l'anno per controbilanciare l'aumento. In realtà i mari danno luogo a scambi enormi di CO_2 con l'aria ma, come su accennato, la quasi totalità ritorna nell'atmosfera. Una piccola frazione (circa 2 Gt) riesce invece a penetrare nelle profondità marine dove si trasforma in sali insolubili che si depositano sul fondo. Questo pozzo risulta definitivo ma la lentezza del trasferimento in profondità fa sì che solo la metà (2 su 5.2 Gt/anno) delle nuove immissioni venga eliminata, mentre poco più di 3 Gt/anno vanno ad incrementare la quantità di anidride carbonica nell'atmosfera.

Metano

Dopo l'acqua e il biossido di carbonio, il metano CH_4 è il terzo gas per importanza nei riguardi dell'effetto serra. Essendo una molecola con 5 atomi presenta $3 \times 5 - 6 = 9$ vibrazioni molecolari. Gli stiramenti dei legami C-H cadono tutti nell'intorno di 3000 nm e non hanno grande rilevanza per l'effetto serra, dato che in questa zona assorbe anche il vapore acqueo che si trova in ben maggiore quantità. Le vibrazioni di bending che riguardano l'angolo H-C-H invece cadono intorno a 7700 nm, all'estremità della regione finestra e quindi, anche a causa dell'elevata intensità di assorbimento, risultano importanti per l'effetto serra. Si calcola che una molecola di metano contribuisca al riscaldamento globale 23 volte rispetto a una molecola di anidride carbonica a causa



della più elevata probabilità che ha di assorbire un fotone. L'aumento di metano nell'atmosfera provoca perciò un riscaldamento molto maggiore di quanto ne provochi un corrispondente aumento di CO₂. Tuttavia la quantità di CO₂ è attualmente più di 200 volte quella del CH₄ per cui il risultato è che il biossido di carbonio risulta più importante ai fini dell'effetto serra.

Il grafico accanto mostra la quantità di metano nell'atmosfera negli ultimi 10 secoli. Analogamente alla CO₂ c'è stato un consistente aumento durante l'era industriale. Attualmente, la sua concentrazione è circa 1.7 ppm contro i 370

ppm della CO₂, mentre la sua crescita attuale è circa 100 volte inferiore a quella della CO₂. Studi recenti sembrano dimostrare che negli ultimi 20 anni il tasso di aumento del metano è negativo.

Le sorgenti di metano sono per il 70 % di origine antropica.

1) **degradazione anaerobica di materiale organico** nelle paludi, risaie, discariche (il metano era chiamato anche gas di palude) . Questo processo trasforma la cellulosa in metano e biossido di carbonio secondo la reazione



Questa reazione avviene praticamente in tutti i luoghi umidi e costituisce la principale sorgente di metano.

2) Gli **animali ruminanti** (compresi bovini e ovini) producono metano attraverso la digestione gastrica della cellulosa. L'aumento del bestiame, conseguente all'incremento demografico, ha provocato un sensibile aumento di produzione di metano da fonte animale.

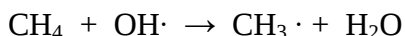
3) I **rifiuti alimentari** nelle discariche sono un'altra consistente sorgente di metano. In alcuni casi questo metano viene raccolto ed usato come combustibile. In questo caso si produce CO₂ il cui effetto serra per mole è notevolmente minore del metano (vedi sopra) per cui il risultato è positivo ai fini di una diminuzione dell'effetto serra.

4) La **combustione delle foreste** e savane delle aree tropicali che avviene in condizioni di scarsa ossigenazione.

5) Un'altra importante fonte è costituita dalle perdite di metano nelle **condutture e gasdotti**, ed anche durante l'**estrazione** del carbone, e soprattutto del petrolio.

I pozzi del metano.

1) Il pozzo principale del metano atmosferico, che ne elimina circa il 90% è costituito **dalla reazione con il radicale ossidrile OH[·]** che, pur essendo presente in concentrazioni bassissime, è molto reattivo e si forma a causa della irradiazione solare. La reazione è



Il radicale metile CH₃[·] è ancora reattivo per cui la sequenza di reazioni continua fino alla completa ossidazione del CH₄ a CO₂.

2) il secondo pozzo è costituito dalle **reazioni con il terreno**.

3) il terzo importante pozzo riguarda la **diffusione ad alte quote verso la stratosfera**, dove però reagisce con O* a formare H₂O, che contribuisce all'effetto serra in modo significativo; si stima il 25% del GW dovuto al metano. Perciò questo pozzo elimina il metano, ma non la sua azione sull'effetto serra.

Diversamente dall'anidride carbonica le molecole di metano nell'atmosfera hanno un tempo di vita di circa **10 anni**.

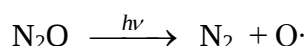
Si ipotizza che a causa dell'innalzamento della temperatura terrestre le immissioni di metano nell'aria potrebbero ulteriormente aumentare. Temperature più elevate potrebbero accelerare la decomposizione anaerobica delle biomasse vegetali nelle discariche e nelle vaste paludi e tundre del Canada e della Russia. Tuttavia altri fattori, come l'umidità dell'aria, potrebbero influire su questo fenomeno, per cui al momento non ci sono dati certi, né previsioni attendibili. Una fonte di preoccupazione viene anche dal fatto che una grande quantità di metano si trova congelata nel permafrost e sui fondali oceanici, in forma di clatrati. Questi composti sono formati da reticoli cristallini di ghiaccio che intrappolano il gas metano e sono stabili a basse temperature e alte pressioni, come quelle che si realizzano a grandi profondità marine. Un riscaldamento globale potrebbe favorire la loro fusione con conseguente rilascio di metano gassoso. L'aumento di metano in atmosfera causerebbe un ulteriore riscaldamento, per cui si tratterebbe di un feedback positivo, dalle possibili conseguenze molto serie.

Ossido nitroso N₂O

L'ossido nitroso (o protossido di azoto, detto anche gas esilarante) è presente in piccola quantità 300 ppb = 0.3 ppm e, come altri gas serra, ha subito un aumento nell'era industriale di circa il 10 %. La sua efficacia per l'effetto serra deriva dal fatto che assorbe intorno ai 7800 nm, ovvero all'interno della finestra non occupata dal vapore acqueo. La vibrazione efficace riguarda la flessione del legame N–N–O (la molecola è lineare). L'efficienza di una singola molecola è molto elevata, circa 200 volte quella dell'anidride carbonica. Il tempo di residenza nella troposfera è piuttosto elevato, circa 120 anni, dato che non subisce reazioni di ossidazione a basse altezze. Per queste ragioni il protossido di azoto è un gas pericoloso dal punto di vista dell'effetto serra. Come il metano, anche la quantità di ossido nitroso nell'atmosfera è rimasto costante fino all'epoca pre industriale ad un valore di 275 ppb. Successivamente è aumentato fino a 320 ppb nel 2010. Il contributo dell'ossido nitroso all'effetto serra è considerato essere circa 1/3 di quello del metano.

Le sorgenti principali di N₂O sono legate al ciclo dell'azoto nelle alghe marine e nei vegetali, soprattutto nelle zone tropicali. La produzione antropica è determinata dall'uso di fertilizzanti in agricoltura e sembra contribuire al 30-40% delle immissioni totali. Notare che questo gas non viene rilasciato dalla combustione di combustibili fossili. In passato si sono avute emissioni industriali nella produzione del nylon.

Come già detto, in pratica non ci sono pozzi nella troposfera, per cui la molecola diffonde nella stratosfera dove subisce reazioni fotochimiche che la trasformano in azoto molecolare



o anche reazioni che lo trasformano in monossido di azoto, che gioca un ruolo come catalizzatore nelle reazioni di distruzione dell'ozono.

Il protossido di azoto è usato correntemente come anestetico (soprattutto dai dentisti) e come gas nella panna spray.

Cloro-Fluoro-Carburi CFC

L'importanza come gas serra dei cloro-fluoro-carburi (CFC) deriva dal fatto che le vibrazioni di stiramento di legame C–F e C–Cl cadono nella regione finestra e che l'efficienza di assorbimento di queste bande IR è molto elevata. Queste sostanze (per esempio CFCl₃ e CF₂Cl₂) hanno tempi di permanenza nell'aria assai lunghi, per cui una molecola di CFC equivale, ai fini dell'effetto serra, a una decina di migliaia di molecole di anidride carbonica. Nonostante ciò **l'effetto serra dei CFC è assai modesto** a causa dei due effetti concomitanti di questi gas nella troposfera e nella stratosfera. *Nella troposfera i CFC assorbono radiazione uscente* e contribuiscono al riscaldamento. *Nella stratosfera distruggono parte dell'ozono* ivi presente e quindi causano un minore assorbimento di radiazione UV con un netto raffreddamento ad alta quota. La radiazione UV che riesce a passare colpisce la Terra per cui la diminuzione di ozono provoca un aumento di temperatura alla

superficie. Il bilancio totale di tutti questi tre effetti dei CFC, sembra conduca a un modesto riscaldamento.

L'influenza dei CFC dovrebbe diminuire nel tempo per effetto del protocollo di Montreal che ha messo al bando la produzione di queste sostanze a partire dal 1995 nei paesi sviluppati. La maggior parte dei sostituti proposti come gas refrigeranti non hanno bande di assorbimento nella regione finestra ed hanno tempi di permanenza più bassi, oltre a non distruggere l'ozono nella stratosfera. La maggior parte dei sostituti (HCFC e HFC) ha una vita media minore nella troposfera ed assorbe con minore efficienza nella regione finestra per cui dovrebbe avere un effetto serra molto più moderato. Sarà comunque necessario limitare le emissioni dei HCFC e HFC in quanto si tratta in ogni caso di gas serra, anche se non molto efficienti.

SF₆

L'esafioruro di zolfo è poco conosciuto ma merita una certa attenzione per la sua grande capacità di assorbire radiazioni IR, 24'000 volte quella della CO₂. Inoltre ha un'emivita nell'atmosfera assai lunga 3200 anni. La sua concentrazione attuale è ancora molto bassa 7 ppt (= $7 \cdot 10^{-12}$) per cui attualmente il suo contributo è praticamente trascurabile. Le emissioni antropiche sono legate al suo impiego industriale come gas isolante in apparecchiature elettriche; in passato veniva liberato nell'aria, adesso, grazie ai protocolli internazionali, viene per lo più riciclato. Nonostante questi accorgimenti negli ultimi anni si è registrato un aumento percentuale considerevole, che induce quanto meno a monitorare la sua quantità nell'aria.

Ozono O₃

L'ozono è un gas naturale in grado di produrre effetto serra. La sua permanenza nella troposfera è assai breve, mentre gioca un ruolo molto importante nella stratosfera ai fini dell'assorbimento delle radiazioni ultraviolette. L'ozono assorbe intorno a 9000-10000 nm e il suo effetto di assorbimento della radiazione uscente è abbastanza evidente nello spettro di emissione terrestre (si veda la relativa figura). Un'altra banda si trova a 14000 nm, ma poiché si sovrappone a una banda del biossido di carbonio, che si trova in quantità molto maggiore, l'effetto serra dell'ozono in questa regione è piuttosto piccolo.

Le sorgenti di ozono troposferico sono l'inquinamento prodotto dalle centrali elettriche, dai veicoli a motore e incendi. Quindi anche l'ozono viene prodotto da attività umane: si stima approssimativamente che circa il 10% del riscaldamento globale sia dovuto all'aumento della quantità di ozono troposferico.

Particolato (aerosol)

Per particolato si intendono piccole particelle di molecole di vario tipo come cristalli di ghiaccio, particelle da eruzioni vulcaniche, o particelle prodotte da processi industriali (aerosol da solfato). In passato il loro effetto sul riscaldamento globale è stato poco considerato. Oggi invece si è capito che gli aerosol compensano una parte considerevole dell'aumento di temperatura che si avrebbe avuto a causa dell'aumento dei gas serra.

L'effetto principale è dovuto alle loro proprietà di riflettere la luce solare per cui aumentano l'albedo, ovvero la riflessione della luce solare nello spazio. Tuttavia le particelle di dimensioni più grandi hanno anche un effetto serra nel senso che riflettono e assorbono anche la radiazione terrestre. La capacità di assorbire e riflettere la luce solare cambia anche a seconda del tipo di aerosol. Le particelle scure, dette nerofumo, costituite soprattutto da *fuliggine*, assorbono facilmente la radiazione solare, per cui contribuiscono al riscaldamento dell'aria. Gli *aerosol di solfato*, liberati per lo più dalla combustione del carbone, invece non assorbono la radiazione solare né quella

terrestre, ma sono in grado di riflettere la luce solare per cui contribuiscono ad aumentare l'albedo, con un effetto globale di raffreddamento terrestre. In molte regioni industrializzate dove c'è una notevole produzione di aerosol di origine antropica si è osservato un effetto globale di raffreddamento per cui sembra prevalere l'effetto sull'albedo rispetto all'effetto serra.

Le osservazioni sull'eruzione del vulcano Pinatubo (Filippine) del 1991 sono significative per l'effetto del particolato di origine vulcanica, assai ricco di zolfo.

Dopo poco tempo dall'eruzione si osservò *un innalzamento* della temperatura a causa dell'effetto predominante delle particelle di grandi dimensioni, che assorbivano la luce solare trasformandola in energia termica e avevano anche un effetto serra. Col passare del tempo le particelle più grandi si depositavano al suolo più rapidamente di quelle piccole, per cui dopo alcuni mesi la composizione dell'atmosfera nei dintorni del vulcano era cambiata. Le particelle piccole di cui l'atmosfera era ancora ricca aumentarono significativamente l'albedo, per cui si osservò *un discreto raffreddamento* locale. Data la grande quantità di particolato emessa dal Pinatubo negli anni 1992 e 1993 si è altresì osservata una diminuzione della crescita della temperatura media terrestre, ed alcune estati fredde tra cui quelle dell'America Settentrionale sono state messe in relazione con tale eruzione, per cui si sono avuti anche degli effetti globali e non solo locali.

Aerosol di solfato

Negli anni più recenti gli scienziati hanno posto una notevole attenzione sull'aerosol da solfato, che scaturisce dalle emissioni di biossido di zolfo SO_2 prodotte dalla combustione soprattutto di carbone. L'ossido di zolfo si unisce al vapore acqueo atmosferico a formare particelle dell'ordine del millesimo di millimetro. Tali particelle hanno come effetto prevalente la riflessione della luce solare, per cui contribuiscono a un raffreddamento globale e contrastano l'effetto serra. Esse sono per lo più presenti nell'emisfero nord ed hanno una vita media atmosferica solo di qualche giorno, a causa sia della gravità che delle piogge (non hanno quindi il tempo di migrare nell'emisfero sud). Si verifica perciò che gli effetti sulla temperatura siano principalmente a livello locale, per cui, per esempio, si è osservata una recente diminuzione di temperatura nella Cina a causa delle forti emissioni di SO_2 dalla combustione del carbone.

Non è ancora chiaro come cambieranno le emissioni di SO_2 negli anni a venire: nell'America settentrionale ed Europa le emissioni diminuiscono per contrastare le piogge acide, ma nell'Asia sono in costante aumento.

Alcuni segni del riscaldamento globale

La copertura di ghiaccio della Terra sta diminuendo

A causa del riscaldamento globale i ghiacciai, le calotte polari ed i ghiacci dei mari polari stanno fondendo a velocità maggiore che nel passato. Con il tasso di scongelamento attuale, si calcola che molti ghiacciai scompariranno nel giro di venti trenta anni. Dalla fine degli anni 1960 la copertura nevosa del mondo diminuita del 10% ed i ghiacci marini dell'Artide sono diminuiti del 9%.

Si registra un aumento del livello degli oceani

La diminuzione di ghiacci provoca un innalzamento del livello del mare che rischia di sommergere delle isole e diminuire la quantità di terre emerse. Nell'ultimo secolo l'aumento è stato pressoché costante e dal 1900 al 2000 il livello è cresciuto di circa 20 cm.

In molte aree si registra un aumento delle precipitazioni

La quantità di vapore acqueo nell'atmosfera aumenta con la temperatura media delle acque superficiali a causa dell'aumento della tensione di vapore dei liquidi con la temperatura. Questo provoca un generale aumento delle piogge sul pianeta. Tuttavia l'aumento non è distribuito uniformemente su tutte le regioni; si registra un aumento di precipitazioni nelle zone equatoriali e temperate mentre delle diminuzioni sono state registrate in diverse zone tropicali dell'Africa con conseguenze negative sulla produzione di cibo.

Aumento di manifestazioni climatiche estreme

La frequenza con cui si verificano eventi meteorologici violenti è aumentata in molte parti del mondo. Si tratta di tempeste violente con nevicate intense, grandine nelle regioni settentrionali e ondate di caldo intenso, e uragani altrove. Un innalzamento di temperatura implica un aumento dell'energia cinetica delle molecole, che sono quindi più veloci e in grado di provocare fenomeni energeticamente più rilevanti, cioè più estremi in senso meteorologico.

Per concludere, riportiamo una tabella che riassume alcuni dati relativi ai gas serra. Il GWP (global warming potential) potenziale di riscaldamento globale, indica quanto aumenterebbe l'assorbimento fra oggi e un qualche orizzonte temporale scelto (normalmente a 100 anni), causato da una massa unitaria di gas emesso oggi. Il GWP viene espresso relativamente a un gas di riferimento come la CO₂ e comprende tutti gli effetti indiretti dei gas emessi.

Gas	Concentr. 1860	Concentr. 2000	Vita media nella atmosfera	Tasso di crescita (% all' anno)	Sorgenti antropogeniche		GWP (W/m ²)
Vapore acqueo	1 ppc	1 ppc	pochi giorni	0.20%	equilibrio con il mare		<0
Anidride carbonica	290 ppm	370 ppm	50-200 anni	0.45%	combustibili fossili deforestazione produzione cemento	75% 24% 0.6%	1
Metano	0.85 ppm	1750 ppb	12 anni	0.60%	estraz. combustibili fossili dighe/bacini digestione bestiame risaie discariche deiezioni animali	20% 20% 18% 17% 10% 7%	23
Protossido di azoto	285 ppb	312 ppb	120 anni	0.25%	cattiva gestione dei suoli trasporti processi industriali ciclo dell'azoto	70% 14% 7% 6%	296
CFC	0	900 ppt	102 anni	1%	refrigeranti, schiume		10000
Ozono troposferico	25 ppb	25/26 ppb		non noto	indiretto, a partire dagli inquinanti industriali		-
Aerosol	0	variabile	giorni, settimane	non noto	uso dei combustibili fossili combustione biomassa		-