

Approfondimento preso da Robinson J.K. et al.

Chimica generale (VIII ed.) Pearson editore, (pagine 330-338)

10.9 Atmosfera terrestre ed effetto serra

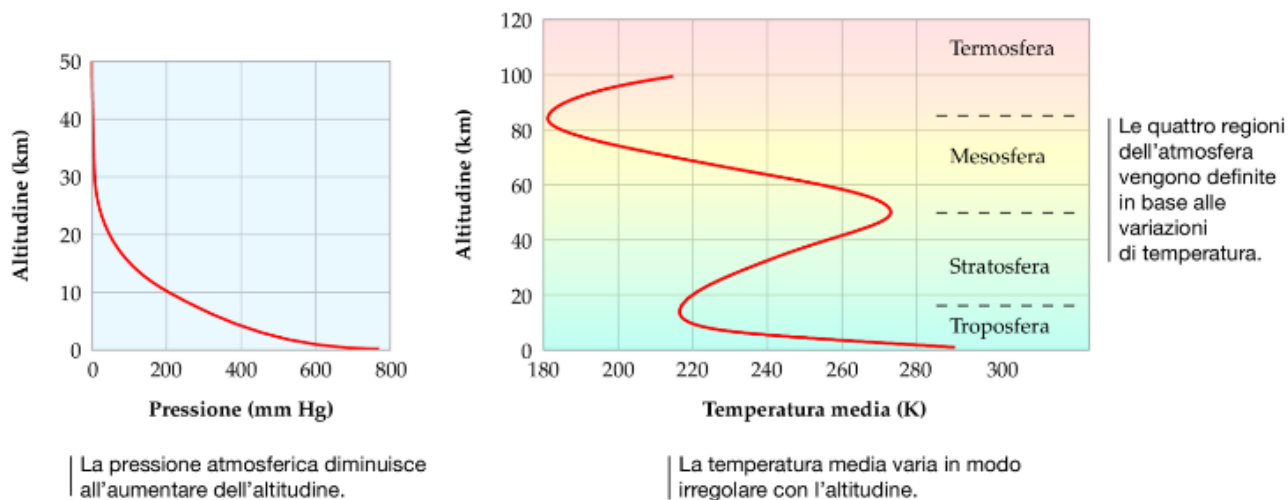


Figura 10.17

Andamento della pressione atmosferica e della temperatura media al variare dell'altitudine.

La coltre di gas che circonda la Terra è lungi dall'essere una miscela omogenea, come ci si potrebbe aspettare. Sebbene la pressione atmosferica diminuisca in modo prevedibile, l'andamento della temperatura in funzione dell'altitudine è più complesso (Figura 10.17). Le quattro regioni dell'atmosfera sono state definite in riferimento a questa curva della temperatura. La temperatura nella troposfera, la regione più vicina alla superficie della Terra, diminuisce regolarmente fino a circa 12 km di altitudine, dove raggiunge il valore minimo. Nella stratosfera, poi, la temperatura aumenta fino a circa 50 km. Al di sopra della stratosfera, nella mesosfera (50—85 km), la temperatura diminuisce nuovamente per poi aumentare nella termosfera (oltre gli 85 km). Per avere un'idea di queste altitudini, si consideri che un aereo di linea normalmente vola vicino al limite superiore della

troposfera, ad altitudini di 10-12 km, e che il record mondiale di altezza per un aereo a reazione è di 37,65 km — più o meno a metà della stratosfera.

Uno dei problemi ambientali più noti legati all'atmosfera è l'aumento della concentrazione dei gas serra dovuto alle attività umane. L'effetto serra si riferisce all'assorbimento della radiazione infrarossa (IR), nota anche come radiazione termica, da parte dei gas nell'atmosfera, che provoca un aumento della temperatura planetaria. I gas serra sono gas che assorbono la radiazione infrarossa (IR). L'effetto serra è un fenomeno presente in natura che ha un ruolo critico nella regolazione del clima. La temperatura media del nostro pianeta sarebbe all'incirca di soli $-17,8^{\circ}\text{C}$ se la quantità di radiazione solare che raggiunge la Terra fosse l'unico fattore a controllare il clima. La maggior parte dell'acqua sarebbe ghiacciata e il pianeta non sarebbe in grado di mantenere la vita! La presenza di gas serra, come il vapore acqueo, il diossido di carbonio e il metano, aumenta la temperatura media globale della Terra fino a circa $15,6^{\circ}\text{C}$. Il principio dell'effetto serra è illustrato in Figura 10.18.

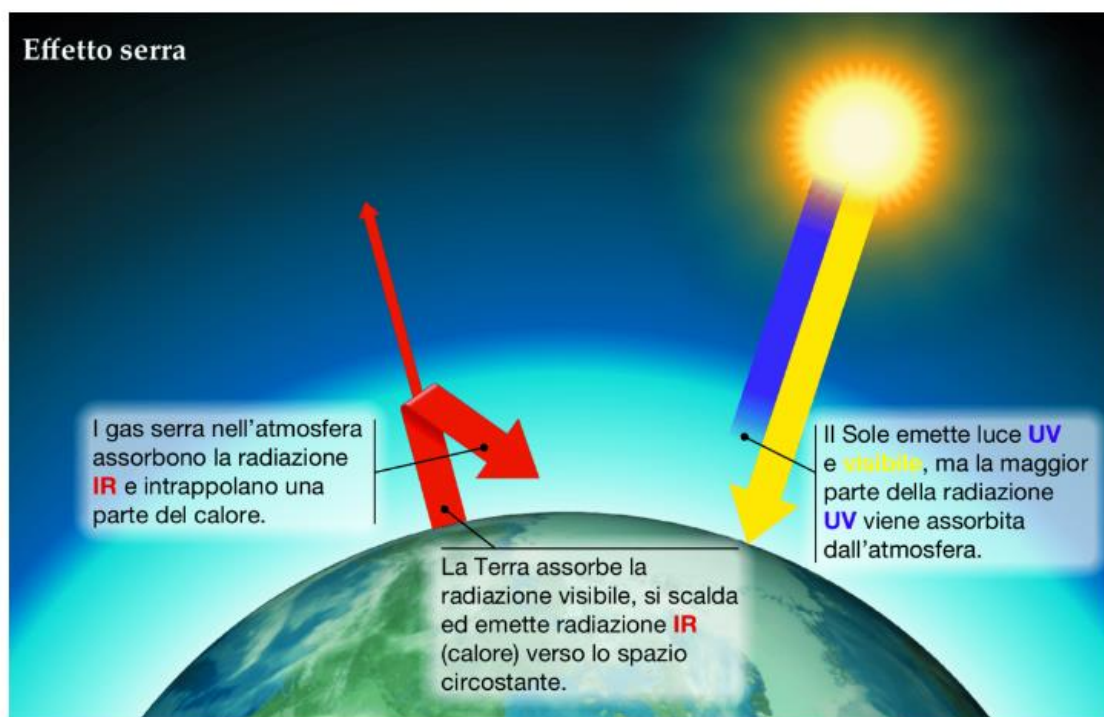


Figura 10.18
Effetto serra.

Il Sole, la fonte di energia primaria della Terra, emette radiazioni principalmente nelle regioni ultravioletta (UV) e visibile dello spettro elettromagnetico (freccie viola e gialla). La maggior parte della radiazione UV ad alta energia (freccia viola), biologicamente dannosa, viene assorbita

dall'ozono e dall'ossigeno nella stratosfera e quindi non raggiunge il livello del suolo. Di conseguenza, la maggior parte della radiazione che raggiunge la Terra è luce visibile (freccia gialla), che viene assorbita dalla superficie terrestre (vegetazione, rocce, acqua, costruzioni), provocandone il riscaldamento. La superficie calda riemette poi radiazione infrarossa (IR) verso lo spazio (freccia rossa).

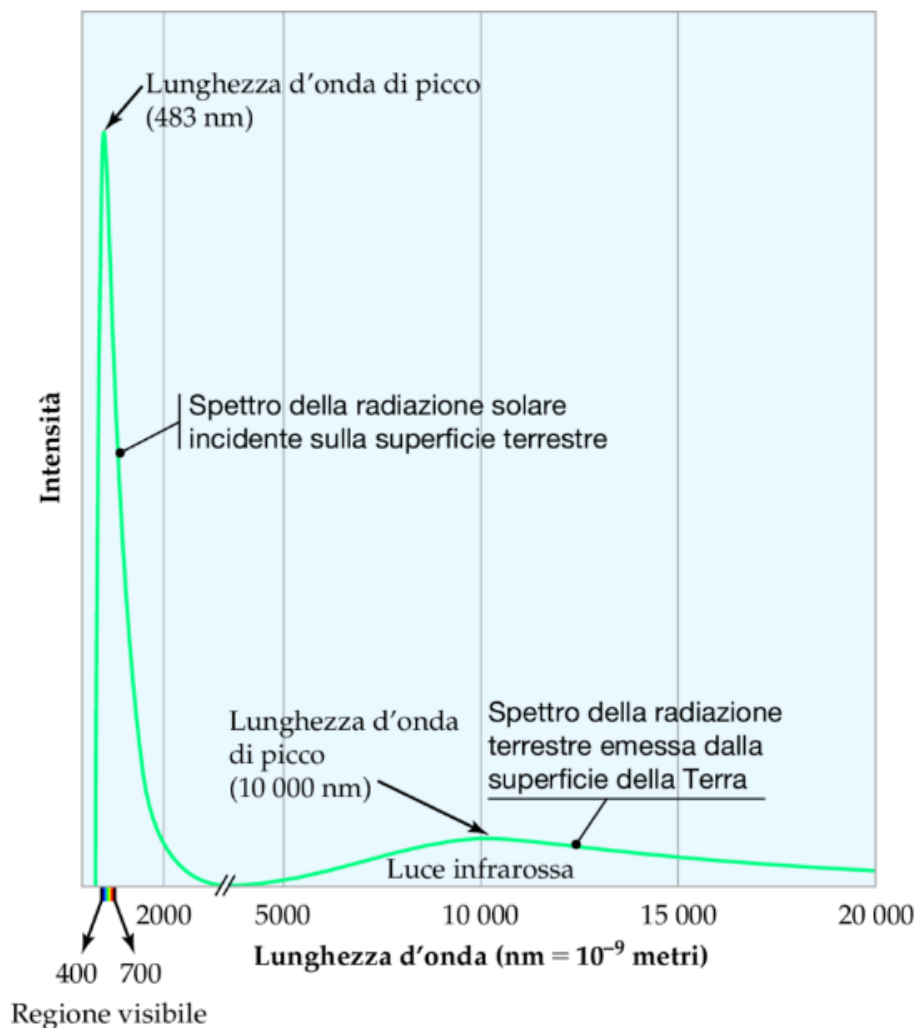


Figura 10.19
Spettro della radiazione solare incidente sulla superficie della Terra e spettro della radiazione emessa dalla Terra.

Si può percepire la radiazione IR emessa dalla Terra nel calore che si sente a notte fonda su una strada asfaltata che si è scaldata durante il giorno. La radiazione IR emessa dalla Terra può disperdersi nello spazio oppure essere assorbita dai gas serra. I gas serra, a loro volta, riemettono energia infrarossa, una parte della quale ritorna sulla Terra, provocando un aumento della

temperatura del pianeta. L'effetto serra viene chiamato così perché le finestre di vetro in una serra agiscono in maniera simile all'atmosfera terrestre. La luce visibile trasmessa attraverso il vetro è assorbita dalle superfici riscalda l'interno della serra. La radiazione infrarossa emessa dalle superfici calde al suo interno viene assorbita dal vetro, impedendo a parte del calore di disperdersi. In questo modo, l'interno della serra diventa presto molto più caldo rispetto all'esterno.

La Figura 10.19 illustra le differenze nella natura della radiazione elettromagnetica emessa dal Sole e di quella emessa dalla Terra. La radiazione solare incidente ha un massimo di intensità a 483 nm, nella regione visibile dello spettro elettromagnetico (luce blu), mentre l'emissione della Terra ha il suo massimo di intensità vicino a 10 000 nm nell'IR. Perché la Terra e il Sole emettono lunghezze

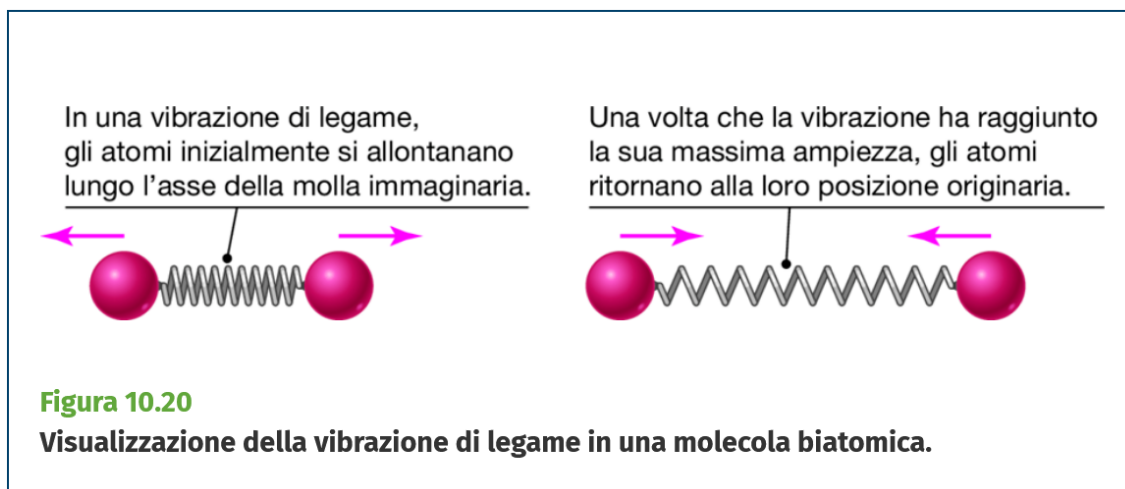


d'onda di luce differenti? La risposta è che il Sole è notevolmente più caldo della Terra. Entrambi emettono luce come un corpo nero. Un corpo nero emette uno spettro continuo, con lunghezze d'onda che dipendono dalla temperatura. Un esempio comune di radiazione da corpo nero è costituito dal bagliore rosso-arancione di un bruciatore elettrico incandescente. La lunghezza d'onda del picco a 483 nm nello spettro di emissione del Sole corrisponde a una temperatura estremamente elevata, circa 6000 K, mentre la lunghezza d'onda del picco dello spettro di emissione terrestre, vicina a 10 000 nm, corrisponde alla temperatura di 288 K (15 °C).

10.10 Gas serra

Per quale motivo alcuni gas atmosferici vengono classificati come gas serra e altri no? N_2 (N 80% in volume) e O_2 (N 20% in volume), i due gas più abbondanti nell'atmosfera, non assorbono la radiazione infrarossa e dunque non vengono considerati gas serra. CO_2 , al contrario, con una concentrazione atmosferica solo dello 0,04% in volume, è un gas serra che riveste un ruolo importante nella

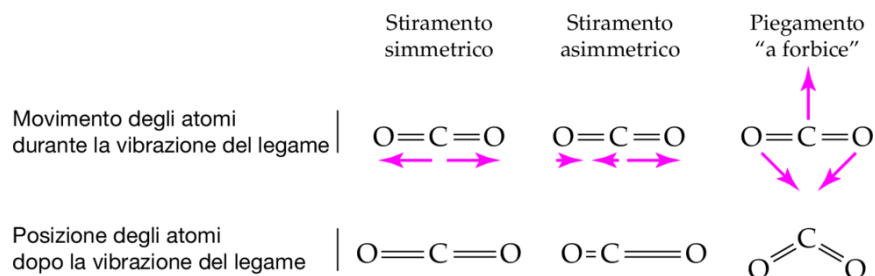
regolazione del clima. Per spiegare il motivo per cui CO_2 è un gas serra, mentre N_2 e O_2 non lo sono, bisogna capire cosa accade a livello molecolare quando un fotone di radiazione IR viene assorbito. Occorre innanzitutto rivedere l'interazione della luce visibile con gli atomi. Gli elettroni che decadono da orbitali di energia superiore a orbitali di energia più bassa emettono una serie discreta di linee colorate chiamata spettro atomico a righe. Quando invece queste stesse lunghezze d'onda di luce vengono assorbite da un atomo, gli elettroni si muovono da orbitali a più bassa energia ad altri di energia superiore.



La radiazione IR assorbita a causa dell'effetto serra non ha energia sufficiente per far saltare gli elettroni su un orbitale di energia maggiore, ma aumenta le vibrazioni dei legami nelle molecole. Per visualizzare la vibrazione di un legame, si immaginino due sfere che rappresentano gli atomi, poste alle due estremità di una molla (Figura 10.20). La molla può allungarsi e contrarsi. L'assorbimento di radiazione IR fa sì che una molecola raggiunga uno stato vibrazionale eccitato, in cui lo stiramento (stretching) spinge gli atomi lontano l'uno dall'altro.

Si prendano in considerazione alcune vibrazioni di legame che avvengono nel gas serra CO_2 . CO_2 ha due doppi legami attorno all'atomo centrale di carbonio, con una geometria lineare. Questi legami, però, non sono stazionari, ma vibrano con tre diverse modalità, come illustrato di seguito. Nello stiramento simmetrico entrambi i legami $\text{C}=\text{O}$ si allungano, mentre nello stretching asimmetrico entrambi gli atomi di ossigeno si muovono nella stessa direzione, con il risultato di un legame $\text{C}=\text{O}$ più lungo e uno più corto. La vibrazione di piegamento (bending) cambia la geometria lineare di CO_2 in una geometria piegata. Una volta che gli atomi hanno raggiunto le loro nuove posizioni, il moto

si inverte e gli atomi oscillano attorno alla loro posizione originaria. Ogni molecola di CO_2 presenta costantemente questi moti vibrazionali.

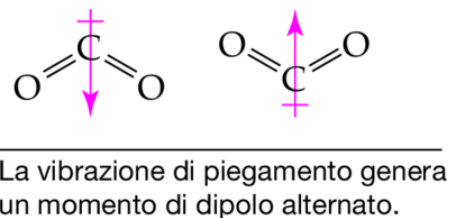
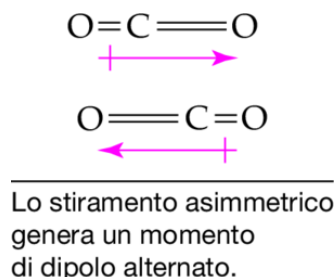


La differenza di energia tra lo stato vibrazionale più basso e lo stato vibrazionale eccitato coincide esattamente con l'energia del fotone IR. I livelli di energia vibrazionali nelle molecole sono quantizzati esattamente come i livelli di energia degli elettroni. Un fotone può essere assorbito soltanto se la sua energia corrisponde esattamente alla differenza di energia tra gli stati e se la vibrazione provoca un cambiamento del momento di dipolo. Prendiamo in esame ciascuna vibrazione nella molecola di CO_2 per stabilire se questi criteri sono soddisfatti.

Stiramento simmetrico: ciascun legame $\text{C}=\text{O}$ possiede un dipolo di legame perché l'ossigeno è più elettronegativo del carbonio, ma tali dipoli si annullano a vicenda e CO_2 non ha un momento di dipolo netto. Quando entrambi i legami $\text{C}=\text{O}$ si allungano durante lo stretching simmetrico, i dipoli di legame si annullano comunque l'un l'altro e non si ha alcun cambiamento del momento di dipolo. Pertanto, la vibrazione di stiramento simmetrico non assorbe radiazione IR.

Stiramento asimmetrico: nello stretching asimmetrico entrambi gli atomi di ossigeno recano una parziale carica negativa e si muovono nella stessa direzione durante la vibrazione. Ciò determina uno spostamento della carica negativa verso un'estremità della molecola di CO_2 , creando un momento di dipolo netto. Quindi, lo stiramento asimmetrico assorbe radiazione IR.

Piegamento a forbice: come lo stiramento asimmetrico, anche in questo caso, la vibrazione crea un momento di dipolo, quindi anche questo moto vibrazionale assorbe radiazione IR.



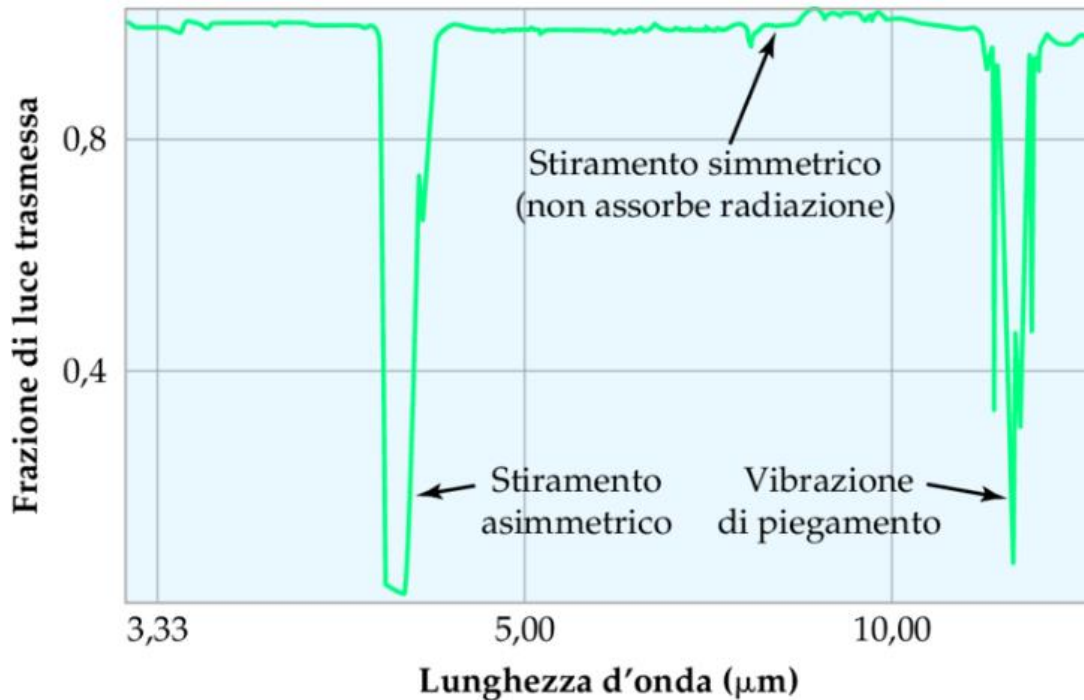


Figura 10.21
Spettro di assorbimento infrarosso del diossido di carbonio.

La Figura 10.21 mostra lo spettro di assorbimento infrarosso della molecola di CO_2 . L'asse verticale rappresenta la frazione di luce trasmessa dal campione e i picchi negativi indicano l'assorbimento di radiazione IR. Si noti che sia lo stretching asimmetrico sia la vibrazione di bending hanno dei picchi di assorbimento. La lunghezza d'onda (frequenza) dello stretching simmetrico è indicata, ma non è presente alcun picco di assorbimento poiché questa vibrazione non provoca un cambiamento netto nel momento di dipolo.

Le molecole che assorbono la radiazione IR sono gas serra e il vapore acqueo ne è uno degli esempi più importanti. L'osservazione che le notti stellate sono spesso più fredde di quelle nuvolose è un esempio familiare di effetto serra; il vapore acqueo nelle nubi assorbe fortemente nell'IR. Sebbene il vapore acqueo sia il principale responsabile dell'effetto serra naturale, la sua quantità nell'atmosfera è controllata soprattutto dalla temperatura dell'aria e non dalle emissioni delle attività umane. I gas serra emessi in seguito alle attività umane che destano maggiore preoccupazione sono il diossido di carbonio (CO_2), il protossido di azoto (N_2O), il metano (CH_4) e i gas alogenati. Il diossido di carbonio viene liberato nell'atmosfera principalmente dalla combustione dei combustibili fossili, ma anche i

processi industriali e di degradazione della materia organica contribuiscono in modo significativo. Il metano viene emesso durante l'estrazione e l'utilizzo dei combustibili Fossili, dalle discariche, dalle attività agricole, dagli allevamenti di bestiame, dalle termiti. L'attività microbica naturale nel suolo e negli oceani e l'uso di fertilizzanti in agricoltura sono fonti di ossido nitroso. I gas alogenati, come i clorofluorocarburi (CHClF_2) e l'esaffluoruro di zolfo (SF_6), sono gas serra sintetici emessi in conseguenza di una varietà di applicazioni industriali, come la refrigerazione e la climatizzazione.

TABELLA 10.7 Potenziali di riscaldamento globale e forza radiativa dei gas serra			
Gas serra	Potenziale di riscaldamento globale (valore su 100 anni)	Concentrazione atmosferica	Forza radiativa (W/m^2)
CO_2	1	400 ppm	1,82
CH_4	21	1,8 ppm	0,48
N_2O	310	325 ppb	0,17
CFC-12	4600	0,52 ppb	0,17
SF_6	22 800	0,007 ppb	0,004
Gas alogenati (totale)			0,360

Fonte: Intergovernmental Panel on Climate Change – Climate Change 2013: The Physical Science Basis.

Il potenziale di riscaldamento globale (Global-Warming Potential, GWP) è una misura relativa di quanto calore, per unità di massa, un gas serra può intrappolare nell'atmosfera. Il diossido di carbonio è preso come riferimento con valore pari a 1. L'indice GWP viene calcolato su uno specifico intervallo di tempo, di solito 20, 100 o 500 anni, ed è influenzato da quanto fortemente un gas assorbe l'IR e da quanto a lungo rimane nell'atmosfera. La TABELLA 10.7 fornisce i valori del GWP per la maggior parte dei gas serra associati alle attività umane. La Tabella 10.7 riporta inoltre i valori di forza radiativa, che descrivono il contributo relativo di ciascun gas all'effetto serra. Valori positivi più elevati di forza radiativa indicano effetti di riscaldamento maggiori. La forza radiativa viene definita come il cambiamento netto nel bilancio energetico della Terra e si esprime in watt per metro quadrato (W/m^2). Sebbene il diossido di carbonio abbia il valore di GWP più basso di tutti i gas serra elencati in Tabella 10.7, fornisce il contributo principale all'effetto serra perché è presente in concentrazione maggiore rispetto agli altri gas.

10.11 Cambiamento climatico

Il riscaldamento globale descrive un turbamento nel delicato equilibrio termico tra la radiazione incidente e quella emessa dalla Terra, provocato dall'aumento delle concentrazioni di gas serra nell'atmosfera. Livelli crescenti di gas serra assorbiranno più radiazione IR e causeranno un effetto di riscaldamento più intenso. Questo fenomeno, tuttavia, deve essere chiamato più precisamente cambiamento climatico, poiché non vi sarà un aumento uniforme della temperatura in tutti i luoghi. Al contrario, in aree differenti la temperatura aumenterà di un numero di gradi differente, mentre alcune zone potranno addirittura diventare più fredde. La climatologia è una scienza complessa in quanto ha una portata globale e la concentrazione dei gas serra è soltanto uno dei molteplici fattori che influenzano il clima. La copertura nuvolosa, il particolato, l'energia solare e il cambiamento della riflettività superficiale, dovuto allo scioglimento delle calotte di ghiaccio polari o alla deforestazione, sono solo alcune delle variabili che influiscono sulla temperatura a livello sia globale sia locale. In questo paragrafo si descriverà come le concentrazioni dei gas serra sono cambiate nel tempo e si analizzerà il loro impatto sul clima, sia allo stato attuale sia per il futuro.

Da quando ebbe inizio la Rivoluzione industriale, alla fine del Settecento, gli esseri umani hanno riversato nell'atmosfera quantità significative di gas serra bruciando i combustibili fossili per ricavarne energia, abbattendo le foreste e producendo merci industriali, come cemento o metalli. Sebbene esistano meccanismi naturali che rimuovono i gas serra dall'atmosfera, le loro concentrazioni stanno aumentando perché la velocità con cui vengono prodotti supera quella con cui vengono rimossi. Misurazioni accurate hanno dimostrato, per esempio, come la concentrazione del diossido di carbonio nell'atmosfera sia aumentata dalle 290 parti per milione (ppm) stimate nel 1850 a 406 ppm nel 2017 (Figura 10.22). Risulta inoltre utile esaminare i livelli di gas serra su una scala temporale più lunga, al fine di poter confrontare la situazione attuale con quella di altre epoche storiche. Gli scienziati possono ricostruire i dati storici a partire da campioni di ghiacci perenni, estratti dalle calotte polari, perché la profondità dei nuclei ghiacciati può essere correlata con il tempo. L'analisi quantitativa dei gas serra intrappolati nelle bolle d'aria all'interno di tali ghiacciai mostra che le attuali concentrazioni atmosferiche globali di CO_2 e CH_4 non hanno precedenti, se paragonate ai rispettivi livelli negli ultimi 650 000 anni (Figura 10.23).

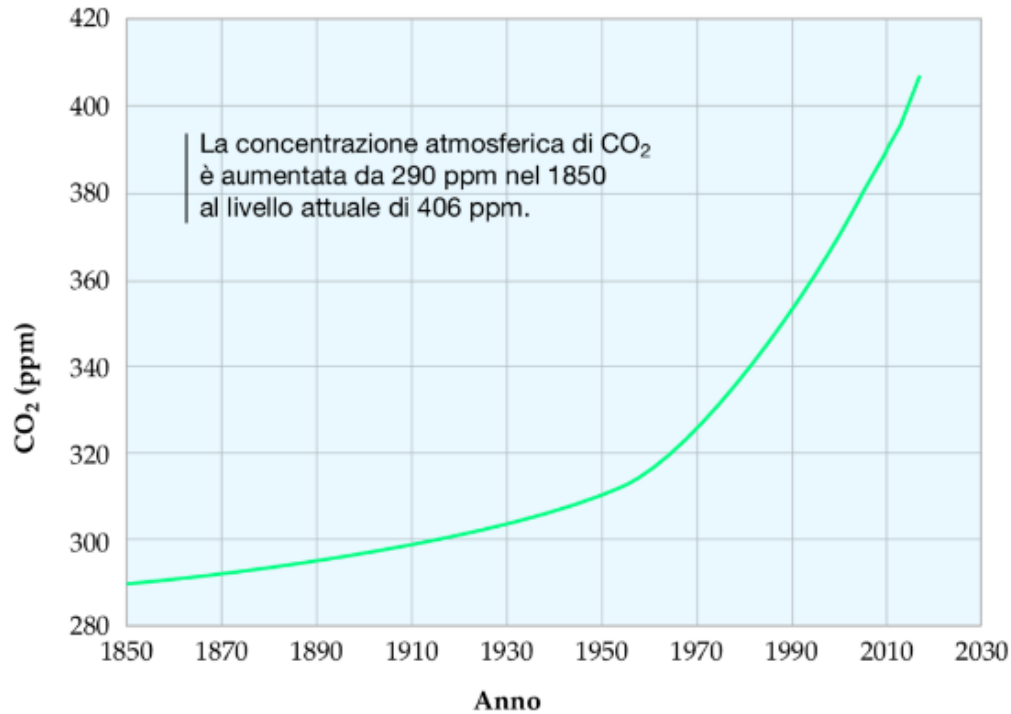


Figura 10.22
Concentrazione annuale di CO₂ atmosferica dal 1850.

Fonte: National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies.

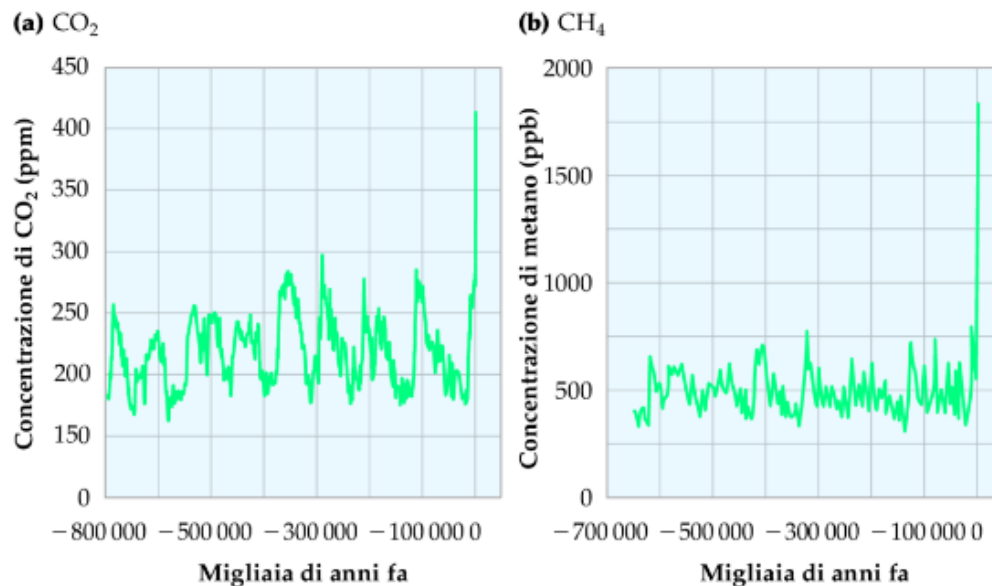


Figura 10.23
Andamento storico a lungo termine dei gas serra in base a misurazioni sui ghiacci perenni e sull'atmosfera.

Fonte: U.S. Environmental Protection Agency, Climate Change, Greenhouse Gases.

Le concentrazioni di questi gas serra hanno subito delle fluttuazioni nel tempo, ma un drastico aumento è chiaramente evidente nell'ultimo secolo. Si noti che i livelli di CO₂ non hanno mai superato 300 ppm nei dati storici di lungo periodo, ma il consumo dei combustibili fossili ne ha provocato l'aumento al di sopra di 400 ppm. La concentrazione di metano non ha mai oltrepassato 0,8 ppm (800 ppb) nel corso della storia, ma di recente è salita fino a 1,8 ppm (1800 ppb). In modo analogo, i livelli di N₂O, che non hanno mai superato 280 ppb negli ultimi 100 000 anni, hanno raggiunto una concentrazione di 325 ppb. La maggior dei gas alogenati vengono prodotti dall'uomo, perciò le loro concentrazioni nell'atmosfera hanno iniziato ad aumentare da quando, negli ultimi decenni, si è iniziato a utilizzarli nei processi industriali.

Sin da quando la Terra si è formata, il suo clima ha subito cambiamenti drammatici, passando dalle "ere glaciali", caratterizzate da un'elevata copertura di ghiaccio, a periodi relativamente caldi.

Fino al secolo scorso, fattori naturali hanno indotto variazioni della concentrazione di CO₂. I periodi più caldi hanno coinciso con concentrazioni relativamente elevate di CO₂. Il grafico non mostra il cambiamento di temperatura e il rapido aumento di CO₂ osservati nel secolo scorso.

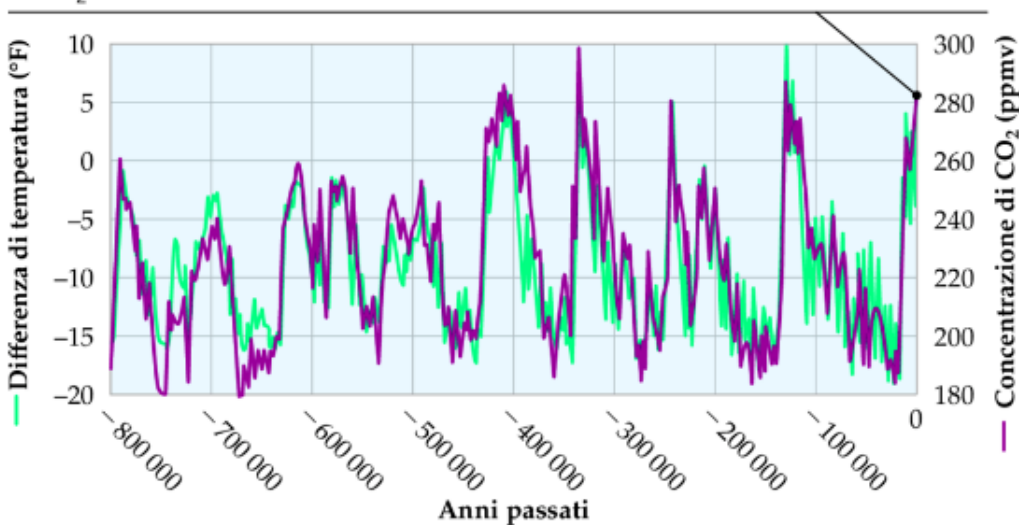


Figura 10.24

Correlazione tra i livelli di CO₂ e le temperature globali passate, stimate in base a misurazioni effettuate su campioni di ghiacci perenni.

Fonte: U.S. National Research Council. *Advancing the Science of Climate Change. The National Academies*

Fattori come la riflettività superficiale, le polveri sottili, le variazioni dell'orbita terrestre e l'intensità solare, in combinazione con i livelli di gas serra, hanno contribuito a queste periodiche fluttuazioni climatiche. Campioni di ghiacci perenni possono essere utilizzati anche per misurare l'andamento storico del clima. L'analisi del rapporto tra gli isotopi dell'idrogeno (²H:¹H) nell'acqua in campioni di

ghiacci perenni permette agli scienziati di stimare le variazioni di lungo periodo nella temperatura media globale. La Figura 10.24 mostra la correlazione tra la concentrazione di diossido di carbonio (CO₂) nel passato (in alto) e la temperatura dell'Antartide (in basso) negli ultimi 800 000 anni. I periodi più caldi coincidono con concentrazioni più elevate di CO₂.

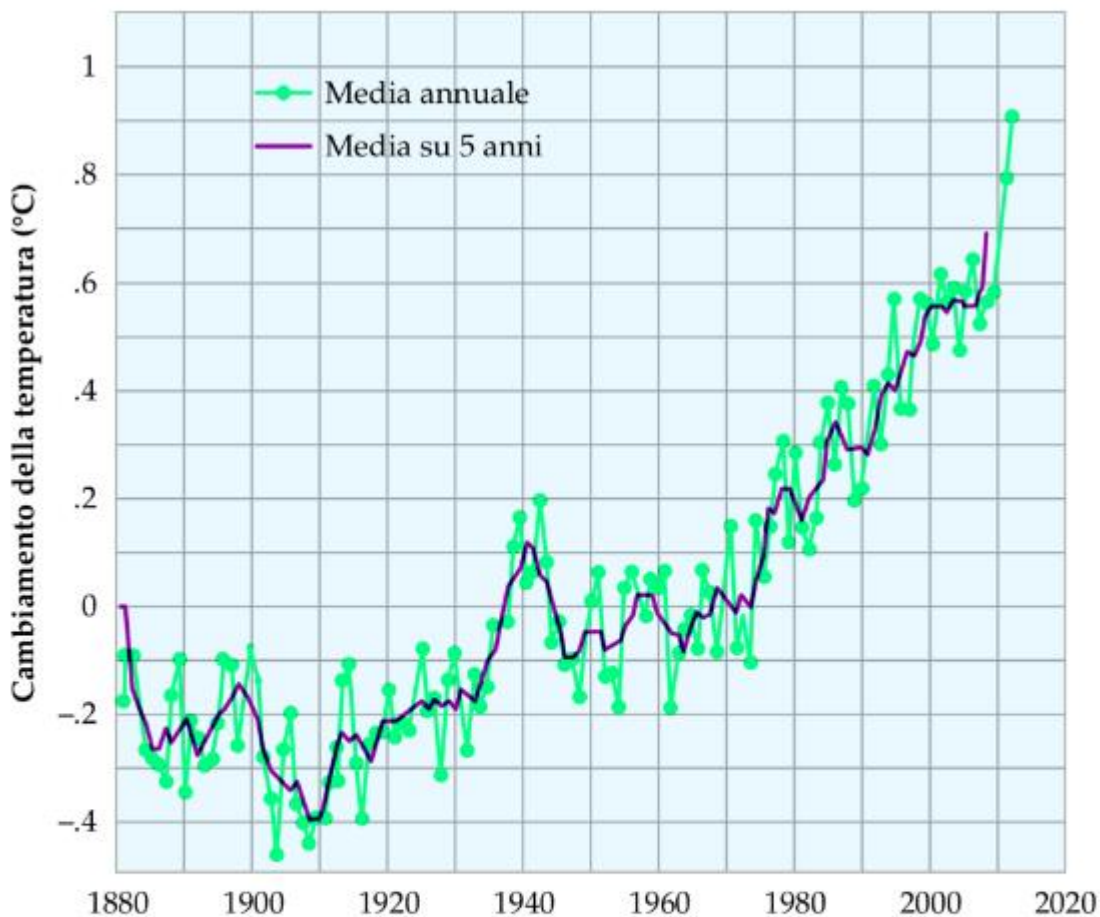


Figura 10.25
Variazione della temperatura superficiale globale (°C) rispetto alle temperature medie del periodo 1951-1980. La linea verde con i pallini è la media annuale e la linea rossa continua è la media su 5 anni.

Fonte: National Aeronautics and Space Administration, GISS Surface Temperature Analysis.

La maggior parte degli scienziati che studiano il clima ritiene che esso si sia modificato rapidamente in anni recenti, a causa dei cambiamenti indotti dall'uomo nell'atmosfera. La Figura 10.25 illustra il cambiamento della temperatura superficiale globale (in C) dal 1880 a oggi, rispetto alla temperatura media nel periodo di tempo 1951-1980. Approssimativamente due terzi del riscaldamento si sono verificati a partire dal 1975. Anche se l'aumento di temperatura può sembrare piccolo (circa 1 °C dal

1990 a oggi), è importante rendersi conto del fatto che il riscaldamento sta avvenendo a un ritmo molto più veloce rispetto ai cambiamenti climatici del passato, che si sono verificati nell'arco di migliaia di anni. I modelli climatici prevedono che la temperatura media globale potrebbe aumentare di 3,5-4 °C entro il 2100, in base ai livelli delle future emissioni di gas serra, e che il riscaldamento continuerà ad accelerare.

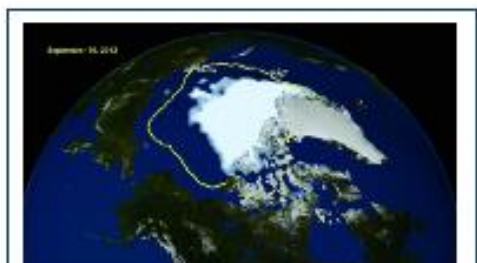


Figura 10.26

Estensione della banchisa nel Mare Artico. Il mese di settembre 2012 è stato caratterizzato dalla minor estensione dei ghiacci marini mai registrata, il 49% in meno rispetto alla media calcolata per lo stesso mese sul periodo 1979-2000, che è indicata dalla linea gialla.

Gli scienziati monitorano gli effetti del cambiamento climatico attraverso degli indicatori che misurano gli andamenti delle condizioni ambientali, quali per esempio l'Estensione delle banchine, le variazioni del livello del mare, i cambiamenti nella biodiversità e l'acidità degli oceani. L'Artico si sta scaldando a una velocità molto maggiore rispetto al resto della Terra e i ghiacci marini stanno sciogliendo con un ritmo impressionante. La superficie del Mare Artico ricoperta di ghiacci nel settembre 2012 era diminuita di circa 3.4 milioni di chilometri quadrati (un'area grande cinque volte il Texas) rispetto alla media

calcolata sul periodo 1979-2000 (Figura 10.26). Il clima influisce in modo drastico sugli ecosistemi e la velocità con cui la temperatura cambia potrebbe essere così elevata da non permettere a molte specie di adattarsi e sopravvivere. Le specie che sono particolarmente sensibili al clima come quelle che dipendono dai ghiacci marini (orsi polari e foche), oppure quelle che si sono adattate agli ambienti di montagna e alle acque fredde (picche e salmoni), potrebbero subire un significativo calo di popolazione o, in casi estremi, addirittura l'estinzione. Uno studio dell'Intergovernmental Panel on Climate Change stima che il 20-30% delle specie di piante e animali prese in esame sarebbero a rischio di estinzione se la temperatura dovesse raggiungere i livelli previsti entro la fine del secolo. Nel secolo scorso il livello del mare è aumentato di circa 25 centimetri a causa dello scioglimento dei ghiacciai terrestri e dell'espansione termica dell'acqua, mano a mano che la sua temperatura aumenta. Il cambiamento del livello dei mari può influenzare le attività umane nelle aree costiere. Per esempio, l'incremento del livello dei mari porta ad un aumento delle inondazioni costiere e dell'erosione, con danni maggiori dovuti alle tempeste. L'innalzamento del mare può alterare gli ecosistemi, trasformando le paludi e altri sistemi di acqua dolce in acqua salata. Le barriere coralline,

che ospitano buona parte della biodiversità degli oceani, stanno scomparendo rapidamente a causa delle temperature più alte e dell'acidità provocata dai crescenti livelli di diossido di carbonio disciolto.

La stragrande maggioranza dei climatologi (oltre il 97%, secondo un recente sondaggio) concorda sul fatto che la tendenza al riscaldamento nel secolo scorso sia stata molto probabilmente dovuta alle attività umane; inoltre, la maggior parte delle più eminenti organizzazioni scientifiche mondiali, tra cui l'Intergovernmental Panel on Climate Change, la National Academy of Sciences e l'American Chemical Society, hanno rilasciato dichiarazioni pubbliche che sostengono questa posizione. Le conseguenze del cambiamento climatico in corso sono state documentate in modo scientifico e l'uomo deve essere consapevole del rischio crescente di eventi meteorologici (ondate di calore, periodi di siccità, inondazioni, scomparsa delle coste e cambiamento dei modelli climatici che ha un impatto negativo sull'agricoltura e sugli approvvigionamenti alimentari).

È necessario decidere come si vuole rispondere a questo problema ambientale a lungo termine. Le soluzioni possono essere costose e difficili da attuare, ma numerose opzioni sono in fase di studio e verifica. Esse includono le fonti di energia (come il solare, l'eolico e il nucleare), la rimozione del carbonio — ovvero l'intrappolamento e la conservazione del diossido di carbonio - e altre misure di tipo conservativo (aumento dell'efficienza energetica o riduzione del consumo). Molti scienziati e politici sono convinti che sia più conveniente sviluppare un sistema energetico sostenibile, piuttosto che dover sopperire ai costi derivanti dalle conseguenze negative del cambiamento climatico.