

APPROFONDIMENTO

L'effetto serra

Il clima del pianeta Terra è un insieme estremamente complesso di fenomeni. I dettagli di questi fenomeni (le temperature locali, la forza dei venti, la distribuzione e l'intensità delle precipitazioni, e così via) dipendono da moltissime cause, che vanno dalla forma e dalla posizione dei continenti al tipo di piante che crescono in un determinato luogo.

La complessità del clima è tale da giustificare l'immagine del famoso *effetto farfalla*, secondo il quale il battito d'ali di una farfalla in Brasile potrebbe provocare un tornado in Texas. Gli aspetti fondamentali del clima terrestre, però, possono essere compresi in base a principi tutto sommato semplici.

In primo luogo, la Terra riceve energia dal Sole, con un flusso di energia che è sostanzialmente costante al passare del tempo. In secondo luogo, l'energia in arrivo sulla Terra non è distribuita in maniera uniforme, a causa dell'alternanza giorno-notte o estate-inverno e della diversa esposizione delle zone tropicali rispetto a quelle polari. In terzo luogo, la Terra possiede un'atmosfera relativamente densa, nella quale sono presenti alcuni gas dalle proprietà particolari, come il vapore acqueo e il biossido di carbonio.

Un fenomeno decisivo per la comprensione del clima terrestre è l'*effetto serra*. Questo fenomeno fa sì che la superficie della Terra abbia una temperatura molto più alta di quella che avrebbe se l'atmosfera non esistesse o se avesse una diversa composizione. L'effetto serra dipende da un piccolo numero di principi fisici relativamente semplici, che possiamo interpretare con facilità. È per questo che nessuno scienziato dubita della presenza di questo effetto e della sua importanza nel determinare il clima della Terra.

...

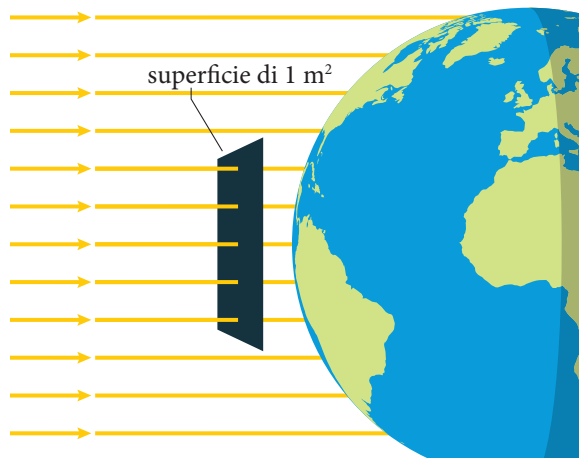
L'energia in ingresso nel sistema Terra

Trattando la superficie del Sole come un corpo nero sferico di raggio pari a $6,957 \times 10^8$ m che si trova alla temperatura di 5777 K, e applicando la legge di Stefan-Boltzmann, si ricava che la potenza irradiata complessivamente dal Sole è uguale a:

$$P = \Phi 4\pi r^2 = \sigma T^4 4\pi R^2 = 3,841 \times 10^{26} \text{ W}$$

La luce del Sole si allontana da esso in tutte le direzioni e distribuisce questa enorme potenza sulla superficie di una sfera via via più grande. Quando raggiunge la Terra, la potenza è distribuita su una sfera di raggio pari alla distanza media fra la Terra e il Sole, 150×10^9 m. Dividendo la potenza irradiata dal Sole per l'area di questa sfera si ottiene:

$$S = 1367 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

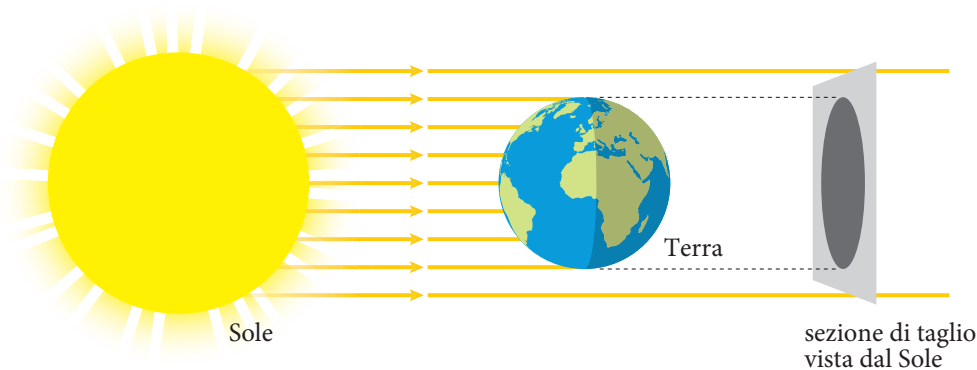


Questo valore prende il nome di *costante solare* ed esprime l'energia che investe a ogni secondo una superficie di un metro quadrato perpendicolare alla radiazione solare e posta alla distanza della Terra dal Sole.

Per trovare quanta energia assorbe *in media* ogni metro quadrato della superficie della Terra a ogni secondo bisogna tenere conto di altri due fattori: la sfericità della Terra e il suo *albedo*, vale a dire la percentuale di radiazione solare che la Terra riflette senza assorbirla, pari a circa il 30%.

Nell'intercettare la luce solare, la Terra si comporta come un *disco* di raggio $R_T = 6,371 \times 10^6$ m, ma l'energia intercettata va poi distribuita su una *sfera* dello stesso raggio. Tenendo conto anche dell'albedo a , si ottiene il flusso solare medio sulla Terra:

$$\Phi_0 = (1 - a) \frac{\pi R_T^2}{4\pi R_T^2} S = 240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$



Il bilancio energetico della Terra

La temperatura del pianeta Terra resta nel suo complesso costante al passare del tempo. Per il principio di conservazione dell'energia, ogni metro quadrato della superficie dell'atmosfera della Terra irradia in media a ogni secondo un'energia pari a quella che riceve. Dalla legge di Stefan-Boltzmann possiamo ricavare che la sommità dell'atmosfera terrestre si comporta come un corpo nero alla temperatura di:

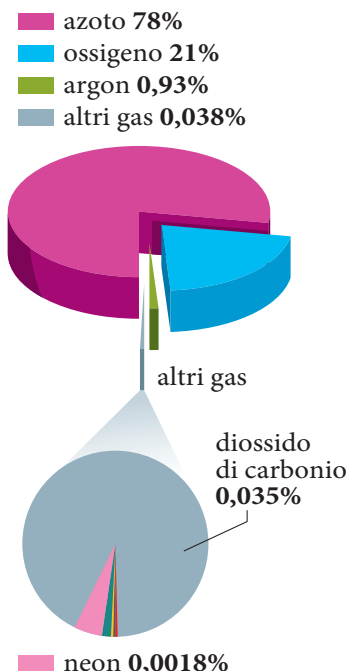
$$T_a = \sqrt[4]{\frac{\Phi_0}{\sigma}} = 255 \text{ K} = -18 \text{ }^\circ\text{C}$$

A questa temperatura la radiazione emessa è composta essenzialmente da infrarossi. La bella luce azzurra che il nostro pianeta emette, se visto dallo spazio, è luce solare *riflessa*, come quella di cui brilla la Luna o Venere.

La temperatura media della *superficie* della Terra è molto più alta di questo valore (se non fosse così, l'acqua non esisterebbe allo stato solido e gli oceani congelerebbero). Il valore effettivo è $T_T = 288 \text{ K} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$. Il fenomeno che causa questa differenza fra T_a e T_T è l'effetto serra.

Il meccanismo dell'effetto serra

Come abbiamo detto, l'atmosfera terrestre, pur essendo composta in prevalenza di azoto (N_2 , 78%) e ossigeno (O_2 , 21%), contiene quantità significative di gas come il vapore d'acqua (H_2O) e il biossido di carbonio (CO_2). Questi gas hanno la proprietà notevole di essere trasparenti alla luce visibile ma assorbire la radiazione infrarossa. Gas di questo tipo sono noti come *gas serra*.



Quando la radiazione solare, composta in larga misura di luce visibile, colpisce l'atmosfera terrestre, la frazione di essa che non viene riflessa attraverso l'atmosfera senza essere assorbita in modo significativo e raggiunge il suolo. Il suolo la assorbe e si riscalda, emettendo a sua volta radiazione come un corpo nero: data la temperatura che il suolo raggiunge, questa radiazione ora è composta in prevalenza di infrarossi. Se l'atmosfera fosse trasparente agli infrarossi, questa radiazione la attraverserebbe e abbandonerebbe la Terra. Come abbiamo visto prima, in tal caso la temperatura del suolo dovrebbe corrispondere a quella che è in realtà la temperatura della sommità dell'atmosfera, 255 K.

Ma l'atmosfera è opaca agli infrarossi e assorbe la radiazione del terreno, scaldandosi a sua volta. Si comporta allora anch'essa come un corpo nero e emette radiazione *in tutte le direzioni*: verso l'esterno (questo è il flusso di radiazione che lascia il pianeta Terra, assicurando l'equilibrio energetico) ma anche verso la superficie, aggiungendosi alla radiazione solare.

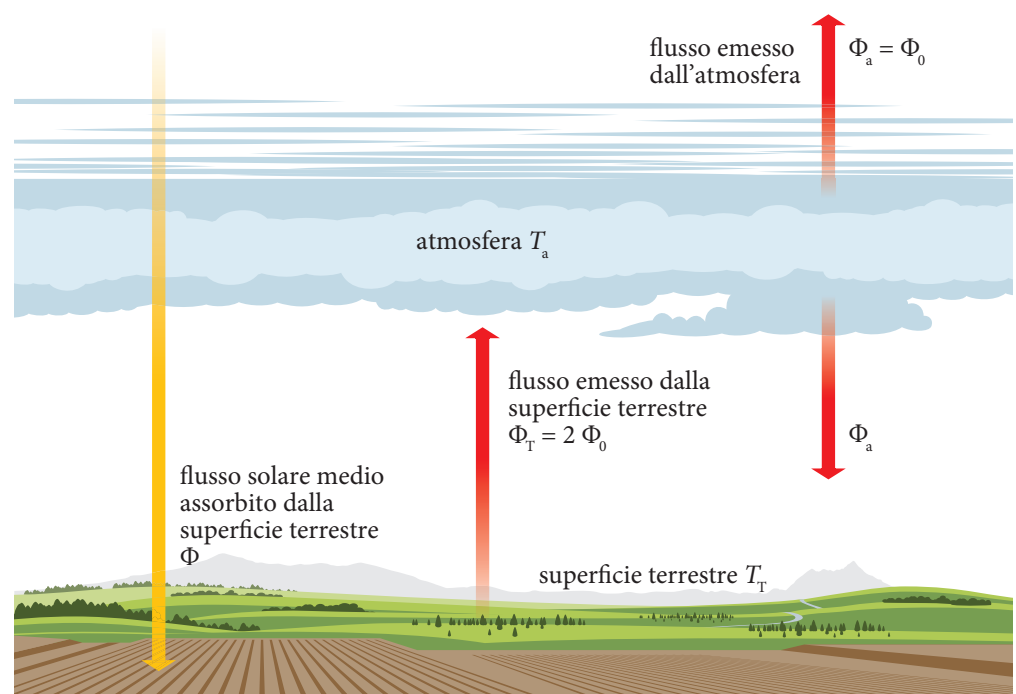
Un modello molto semplificato ci permette di capire l'essenziale di questo meccanismo. Immaginiamo che l'assorbimento e l'emissione da parte dell'atmosfera avvengano in un singolo strato posto fra troposfera e stratosfera (i due strati più bassi dell'atmosfera). Questo strato emette quindi in tutte le direzioni come un corpo nero alla temperatura T_a , con un flusso:

$$\Phi_a = \sigma T_a^4 = 240 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Il suolo viene così riscaldato sia dal flusso solare Φ_0 che dal flusso Φ_a dello strato di atmosfera sovrastante, per un flusso totale di $480 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. All'equilibrio, il suolo deve emettere un flusso $\Phi_T = 480 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, comportandosi come un corpo nero alla temperatura T_T :

$$\Phi_T = \sigma T_T^2 = 480 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Ricavando T_T , si ottiene $303 \text{ K} = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Il nostro modello è troppo semplice per fornire il valore corretto ($T_T = 288 \text{ K}$). Esso ci fa comunque capire perché l'opacità dell'atmosfera agli infrarossi permette alla superficie del pianeta di essere più calda della temperatura T_a di equilibrio con la radiazione solare incidente.



Il termine «effetto serra» deriva dall'analogia con ciò che accade all'interno di una serra per la coltivazione. Tuttavia, l'aumento della temperatura all'interno di una serra è dovuto solo parzialmente al fatto che il vetro di una serra è trasparente alla luce visibile e opaco alla radiazione infrarossa emessa dalle piante e dal suolo. In questo caso, l'aumento di temperatura è causato principalmente dalle pareti e dal soffitto della serra che, contenendo i moti convettivi dell'aria, impediscono al suolo e all'aria sovrastante di perdere energia e, quindi, di raffreddarsi.

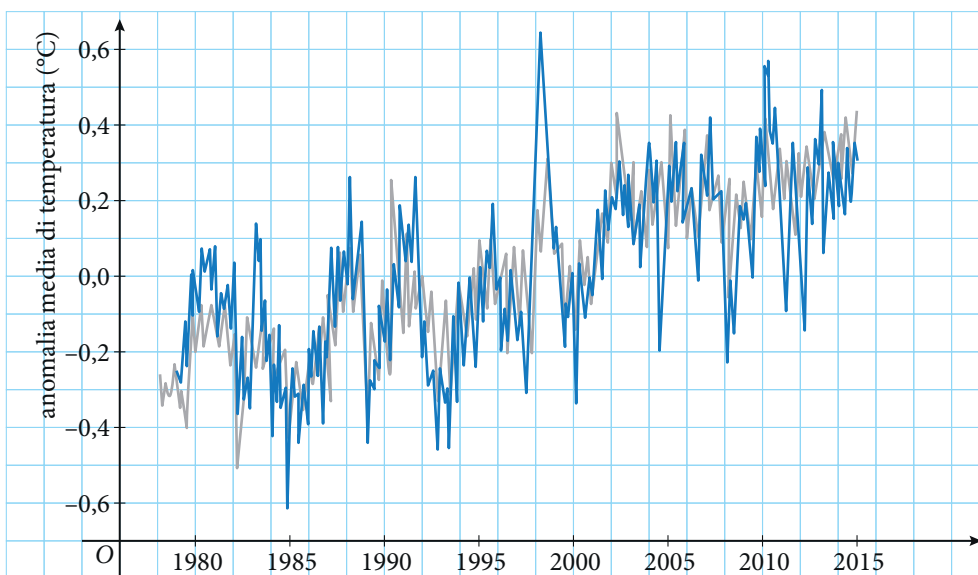
...
Il riscaldamento globale

Le concentrazioni attuali di gas serra nell'atmosfera non sono sufficienti (per fortuna!) a rendere la troposfera completamente opaca agli infrarossi. Questo è uno dei motivi principali per cui la temperatura media della superficie è 288 K, e non 303 K, come prevederebbe il nostro modello.

Dall'inizio della rivoluzione industriale nella seconda metà del XVIII secolo, però, gli uomini hanno bruciato quantità sempre crescenti di combustibili fossili (soprattutto carbone e petrolio), accrescendo la concentrazione atmosferica di CO₂ e di altri gas serra. Abbiamo solide prove sperimentali che la CO₂ è aumentata negli ultimi secoli e che l'aumento è legato all'uso dei combustibili fossili. Si tratta di un fenomeno *antropico*, cioè legato alle attività umane.

Più l'atmosfera diventa opaca agli infrarossi, più aumenta il flusso di energia che essa torna a emettere verso la superficie, scaldandola. Le misure, dirette e indirette, confermano questo aumento della temperatura media della superficie terrestre.

Il grafico che segue mostra misure satellitari dell'anomalia media mensile globale di temperatura (linea nera). La linea grigia è la temperatura registrata dal termometro di superficie. Le anomalie rappresentate nel grafico sono relative al periodo 1981-2010.



Il *riscaldamento globale* che ne deriva è un processo sempre più evidente, nella sua concretezza e nei suoi effetti, come la fusione dei ghiacciai o l'innalzamento del livello degli oceani. Il solo modo che abbiamo per mitigare questi effetti è limitare il più possibile le emissioni di CO₂, restringendo drasticamente il nostro impiego di combustibili fossili.

COMPITO DI REALTÀ La fisica dietro le decisioni

Come possiamo limitare il riscaldamento della Terra?

Le Nazioni Unite stanno organizzando un incontro internazionale per discutere su come affrontare il cambiamento climatico causato dalle crescenti emissioni antropogeniche di diossido di carbonio (CO₂). All'incontro dovrai presentare una relazione che mostri come una crescita della concentrazione di CO₂ nell'atmosfera provochi un aumento della temperatura della Terra.

- Prepara 3 slide da presentare all'incontro internazionale per aiutare gli stati a decidere su quanto rapidamente agire per limitare le emissioni antropogeniche di CO₂.



Il ruolo della CO₂ nello scaldare il pianeta

La CO₂ e gli altri gas serra presenti nella nostra atmosfera lasciano passare la maggior parte della radiazione solare, ma assorbono una parte significativa della radiazione terrestre. Una percentuale $p = 77\%$ della radiazione infrarossa irraggiata dalla superficie terrestre è assorbita dall'atmosfera, che a sua volta emette radiazione infrarossa, sia verso la superficie sia verso lo spazio cosmico. La temperatura dell'atmosfera è T_a .

- Trova la relazione tra la temperatura dell'atmosfera T_a , quella della superficie terrestre T_T e p .

Suggerimento: l'equilibrio energetico dell'atmosfera richiede che la potenza emessa dall'atmosfera per unità di superficie sia uguale a quella assorbita.

- Imponi l'equilibrio energetico per la superficie terrestre e trova la relazione tra T_T , p e il flusso solare medio sulla Terra Φ_0 .
- Calcola i valori di T_T e T_a .

$$\left[T_a = \sqrt[4]{\frac{p}{2}} T_T; T_T = \sqrt[4]{\frac{\Phi_0}{z(1-\frac{p}{2})}}; \text{circa } 288 \text{ K}; \text{circa } 243 \text{ K} \right]$$

La stima

L'umanità sta rilasciando una grande quantità di diossido di carbonio nell'atmosfera. La figura qui sotto mostra la concentrazione di CO₂ in atmosfera in unità di parti per milione (ppm) dalla fine degli anni Cinquanta a oggi, misurata da un osservatorio alle Hawaii.

- Qual è stato l'aumento medio annuale della concentrazione di CO₂ in atmosfera negli ultimi 60 anni?

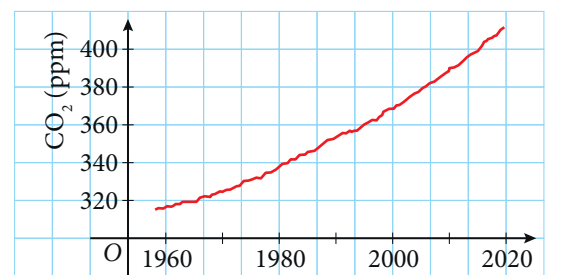
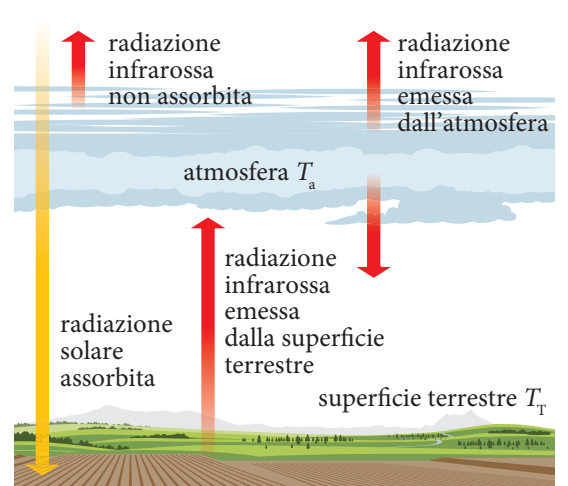
Il valore del 77% della frazione di radiazione infrarossa assorbita dall'atmosfera corrisponde a una concentrazione di CO₂ in atmosfera pari a 320 ppm. Oggi misuriamo circa 410 ppm, che porta al 79% il valore della frazione della radiazione infrarossa assorbita dall'atmosfera.

- Calcola di quanto è aumentata T_T dal 1960 a oggi.

[1,6 ppm/a; circa 1 K]

Tu che cosa ne pensi?

Secondo un rapporto del Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico, un aumento di 2 K della temperatura globale rispetto al periodo preindustriale potrebbe causare danni irreversibili all'ambiente e, di conseguenza, alla nostra società. Questo aumento di temperatura è molto probabile che si verifichi quando la concentrazione di CO₂ in atmosfera raggiungerà circa i 430 ppm. Con l'andamento attuale delle emissioni, quanto tempo ci vorrebbe a raggiungere questa concentrazione critica? Quali decisioni consiglieresti di prendere a livello globale per evitare l'aumento di 2 K della temperatura del nostro pianeta?



NOAA, Global Monitoring Laboratory