



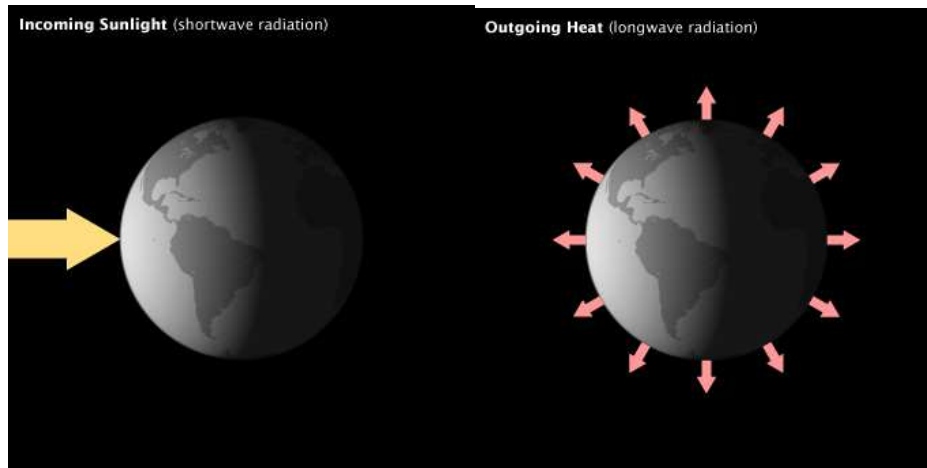
Bilancio energetico della Terra e Clima *

Il Clima della Terra è determinato e condizionato dalla energia solare. Globalmente, nel corso dell'anno il sistema Terra (terre emerse, oceani e atmosfera), assorbe una media di 340 Watt per m² di energia proveniente dal Sole (1 Watt > 1 Joule/sec). La energia assorbita alimenta il processo di fotosintesi, dà luogo alla evaporazione, causa lo scioglimento della neve e del ghiaccio, e riscalda l'intero sistema Terra.



Il Sole è all'origine del Clima della Terra. L'energia proveniente dal Sole riscalda la superficie terrestre, la atmosfera e origina le correnti oceaniche. (Astronaut photograph ISS015-E-10469, courtesy NASA/JSC Gateway to Astronaut Photography of Earth.)

Il Sole non riscalda la Terra in maniera omogenea. Essendo la Terra una sfera, il Sole riscalda le aree equatoriali molto più che le aree polari. L'atmosfera e gli oceani per parte loro contribuiscono a equilibrare il riscaldamento dovuto al Sole attraverso processi quali evaporazione delle acque superficiali, movimenti convettivi, precipitazioni, venti e correnti oceaniche. Questo sistema atmosfera-oceani è noto come il motore termico della Terra. Il motore termico del Clima non redistribuisce solamente il calore dall'Equatore verso i Poli, ma anche dalla superficie della Terra e degli strati bassi dell'atmosfera verso lo spazio. Se ciò non avvenisse la Terra si riscalderebbe indefinitamente. La temperatura della Terra non continua a crescere poiché la superficie terrestre e l'atmosfera ininterrottamente emettono radiazione termica verso lo spazio. Il flusso netto di energia in arrivo ed in uscita sul sistema Terra costituisce appunto il bilancio termico terrestre.

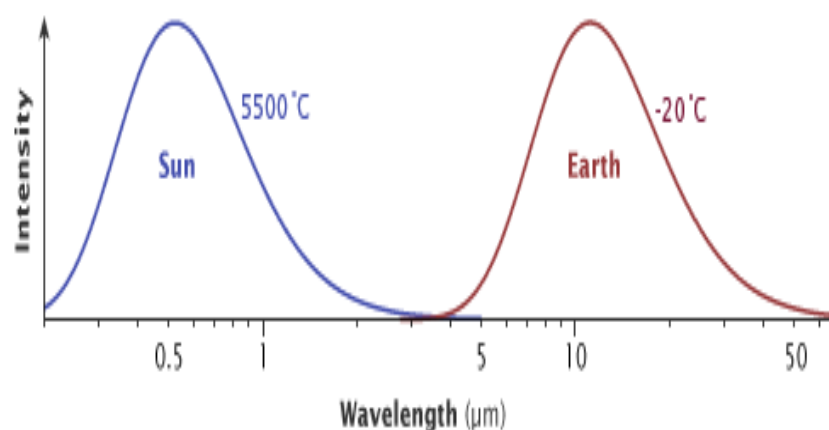


L'energia che la Terra riceve dal Sole è bilanciata da una eguale quantità di energia radiante riemessa verso lo spazio. Questa ultima energia fuoriesce in forma di radiazione termica infrarossa analoga a quella che noi sentiamo in prossimità di una lampada ad incandescenza (NASA illustrations by Robert Simmon.)

Quando il flusso dell'energia solare in arrivo è bilanciato da un eguale flusso di calore verso lo spazio, la Terra è in condizioni di equilibrio radiativo e la temperatura globale è relativamente stabile. Ogni qualvolta aumenta o diminuisce la quantità di energia in arrivo o in uscita, viene ad alterarsi l'equilibrio radiativo e conseguentemente la temperatura globale del sistema sale o scende.

La Radiazione solare in arrivo

Qualsiasi corpo dell'universo che abbia una temperatura superiore allo zero assoluto (temperatura alla quale tutti i movimenti atomici o molecolari cessano) emette energia radiante attraverso uno specifico range di lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico. Quanto più un oggetto è caldo, tanto più il picco di lunghezze d'onda cade verso la parte bassa dello spettro. Gli oggetti più caldi dell'universo emettono per lo più raggi gamma o raggi X. Oggetti più freddi emettono prevalentemente radiazioni e.m. più lunghe come luce visibile, infrarosso, onde radio e microonde.

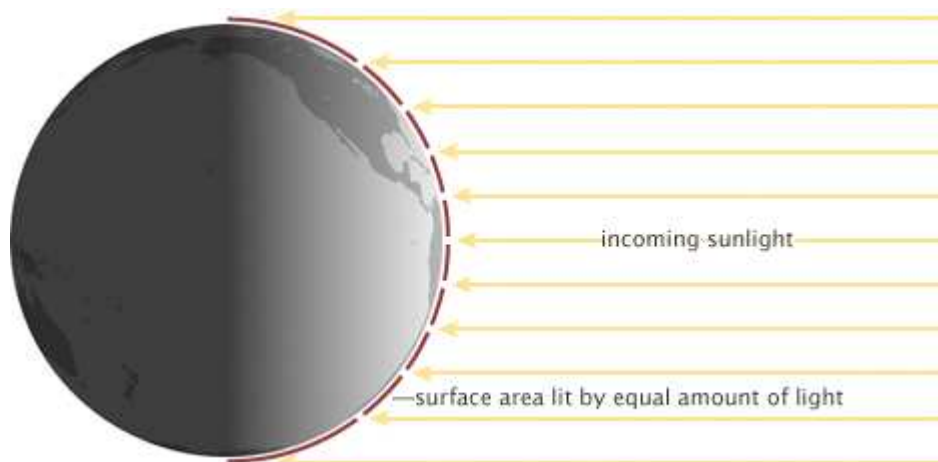


La temperatura della superficie del Sole è di circa 5,500° C, ed il picco della radiazione cade nella zona del visibile. La temperatura della Terra, quale verrebbe ad essere valutata quando osservata dallo spazio è circa -20° C, ed il suo picco di energia è situato nell'infrarosso termico (Illustration adapted from Robert Rohde.)



Una lampada ad incandescenza irradia da 40 a 100 Watt, il Sole 1360 Watt per metro quadrato. Un astronauta che sia volto verso il Sole esporrebbe una superficie di circa 0.85 metri quadrati, quindi è come se ricevesse l'energia di 19 lampade da 60 Watt. (Photograph ©2005 Paul Watson.)

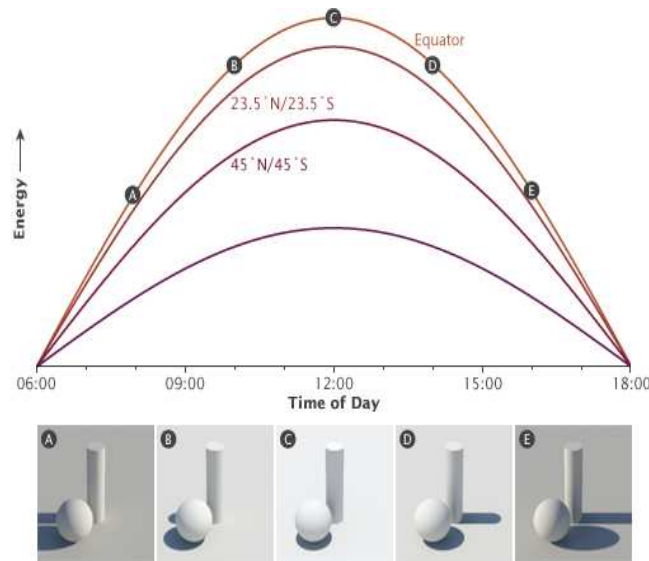
La superficie del Sole ha una temperatura di circa 5800 Kelvin (circa 5500 °C). A questa temperatura la maggior parte della energia che il Sole irradia è nel visibile o nel vicino infrarosso. Alla distanza media della Terra dal Sole (circa 150 milioni di km) la quantità di energia solare che raggiunge la sommità della atmosfera rivolta verso il Sole è circa 1360 Watt per m², ciò sulla base delle più recenti misurazioni eseguite dalle missioni satellitari della NASA. Questa quantità di energia è nota anche come Irradianza Solare Totale. Prima che gli scienziati scoprissero che questa irradianza variava leggermente in funzione del ciclo delle macchie solari la Irradianza Solare Totale veniva anche chiamata "costante solare". Il Watt è una misura della potenza, cioè della energia prodotta (o assorbita) da una sorgente o da una apparecchiatura nell'unità di tempo. A quanto corrisponde 1360 Watt? Una lampada ad incandescenza assorbe da 40 a 100 Watt, un forno a microonde circa 1000 di Watt. Se per la durata di un'ora si potesse catturare (e successivamente usare) tutta la energia solare in arrivo su un m² di superficie esposta al Sole al top della atmosfera, avremmo di che alimentare un frigorifero per un giorno intero. La irradianza solare totale corrisponde al massimo di energia che il Sole può fornire ad un pianeta come la Terra alla sua distanza dal Sole. Considerazioni di geometria elementare limitano comunque la effettiva energia solare intercettata dalla Terra. Solamente metà della Terra alla volta è esposta al Sole e quindi si dimezza la irradianza solare totale.



La energia in arrivo come radiazione solare non è distribuita uniformemente sulla Terra. Un emisfero è alternativamente al buio e quindi non riceve radiazione. Nella parte illuminata solo nei punti che ricevono perpendicolarmente la radiazione solare viene ricevuta la massima intensità. Spostandosi dall'Equatore ai Poli i raggi del Sole colpiscono la superficie terrestre ad angoli progressivamente piccoli e quindi la energia viene ad essere distribuita su aree sempre più estese. (NASA illustration by Robert Simmon.)

Inoltre il Sole irradia con la massima intensità la superficie quando questa è perpendicolare ai raggi in arrivo. Essendo la Terra una sfera, solo le aree vicine all'Equatore al mezzogiorno locale si

vengono a trovare pressoché perpendicolari ai raggi in arrivo. Diversamente la luce forma un angolo con la superficie. La diminuzione dell'angolo di incidenza con l'aumento della latitudine riduce la irradianza solare di un ulteriore 50%.

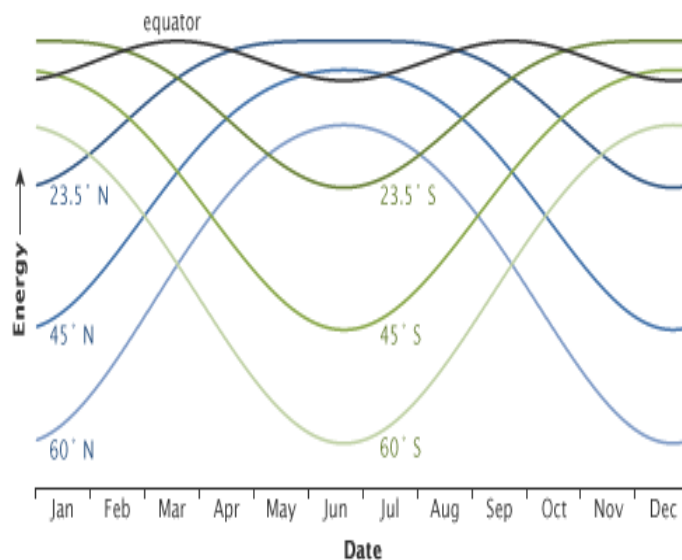


La quantità di radiazione solare ricevuta sulla Terra varia con il tempo e con la latitudine. Il grafico illustra la relazione tra latitudine, orario ed energia solare durante gli equinozi. La rappresentazione visuale (A-E) posta sotto il grafico mostra come l'ora del giorno influisce sull'angolo della luce incidente (evidenziato dalla lunghezza dell'ombra). Agli equinozi il Sole sorge alle 06.00 ovunque. La intensità della radiazione solare aumenta dall'alba al mezzogiorno locale, quando il Sole viene a trovarsi sulla perpendicolare all'Equatore (quindi non proietta ombra). Nel pomeriggio la intensità della radiazione diminuisce fino al tramonto 18.00. Durante gli equinozi la fascia tropicale (latitudine 0-23.5°) riceve circa il 90% della energia che si ha all'Equatore, alle medie latitudini (45°) circa il 70% e nelle zone artiche comprese entro i due circoli polari (66.6°) circa il 40%. (NASA illustration by Robert Simmon.)

Mediata sull'intero pianeta, l'ammontare di radiazione solare in arrivo alla sommità della atmosfera terrestre è solamente un quarto della irradianza solare totale, circa 340 Watt per m². Quando il flusso di energia solare in arrivo è bilanciato da un eguale flusso di calore in uscita verso lo spazio si dice che la Terra è in equilibrio radiativo e la temperatura globale è relativamente stabile. Qualsiasi fattore che provochi un aumento o una diminuzione della radiazione entrante o uscente altera questo equilibrio e conseguentemente la temperatura globale della Terra deve aumentare o diminuire.

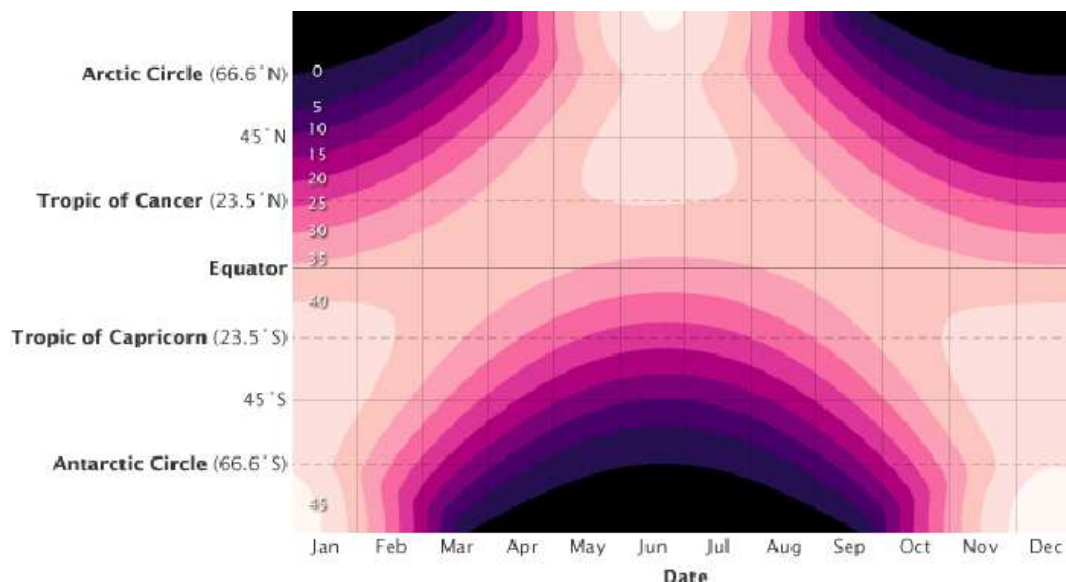
Disomogeneità del calore ricevuto.

La quantità di energia solare in arrivo (340 Watt per m²) è solamente una media globale. Questa grandezza varia considerevolmente dalle latitudini tropicali a quelle polari (come si è visto sopra) ed alle medie e alte latitudini inoltre varia notevolmente anche con la stagione.



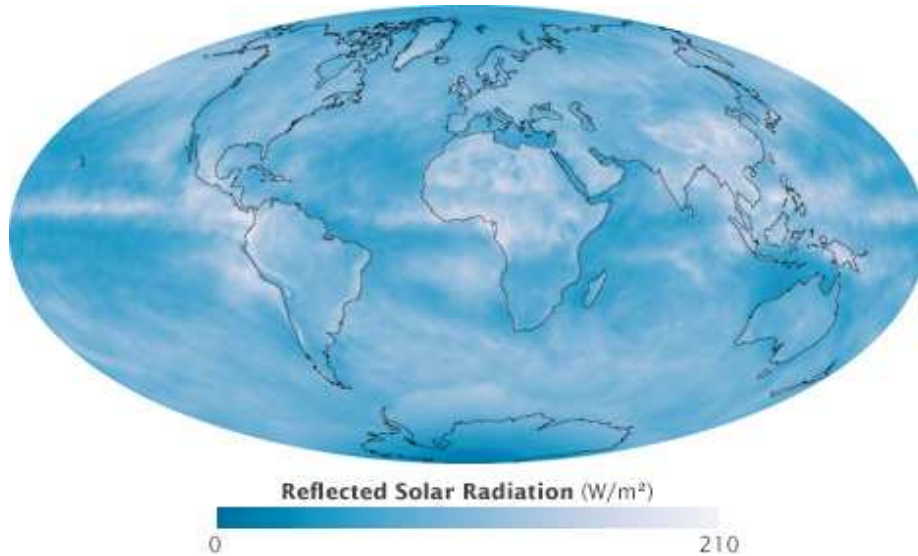
Il picco di energia ricevuta alle differenti latitudini cambia durante l'anno. Il grafico mostra come la energia solare ricevuta al mezzogiorno locale di ogni giorno durante l'anno cambia con la latitudine. All'Equatore (linea grigia) il picco cambia molto poco durante l'anno. Più a Nord (linee blu) ed anche a Sud (linee verdi) i cambiamenti stagionali sono molto accentuati. (NASA illustration by Robert Simmon.)

Se l'asse di rotazione terrestre fosse stato verticale rispetto al piano dell'eclittica della Terra attorno al Sole, le differenze di distribuzione del calore tra Poli ed Equatore durante l'anno si sarebbero mantenute costanti, mentre la presenza delle stagioni ci dimostra che così non è. L'asse terrestre è inclinato rispetto alla verticale di circa 23 gradi. A mano a mano che la Terra percorre la sua orbita attorno al Sole questa inclinazione fa sì che un emisfero riceva più radiazione solare diretta e che abbia giornate più lunghe.



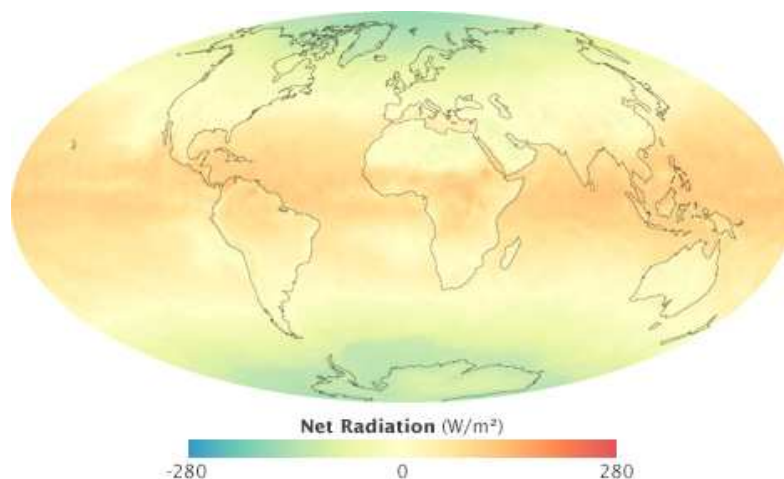
L'energia totale ricevuta ogni giorno alla sommità della atmosfera dipende dalla latitudine. La quantità maggiore di energia in arrivo (rosa pallido) si riscontra alle latitudini più elevate in estate (quando i giorni sono più lunghi) ancor più che all'Equatore. In inverno alcune aree polari non ricevono alcuna energia (zone in nero). L'emisfero meridionale riceve la maggior parte dell'energia in Dicembre (estate meridionale) più di quanto ne riceva l'emisfero settentrionale in Giugno (estate settentrionale) in quanto l'orbita terrestre non è perfettamente circolare e la Terra è viene a trovarsi più vicina al Sole in questo tratto della sua orbita.

Nell'emisfero ove è estate, la combinazione di maggiore radiazione solare e giornate più lunghe, fa sì che nella regione polare giunga più energia che ai tropici, mentre nell'emisfero invernale non ne giunge affatto. Ciononostante, la presenza di distese di ghiaccio marino e superfici nevose che riflettono una parte notevole della radiazione in arrivo, fa sì che venga ad essere fortemente ridotto il potenziale di riscaldamento della energia solare.



La quantità di radiazione solare che la Terra assorbe dipende dalla riflettività della atmosfera e della superficie terrestre. La presente mappa satellitare mostra la quantità la radiazione solare riflessa nel Settembre 2008. Attorno all'Equatore le nubi riflettono una gran parte della radiazione solare e le distese di sabbia chiara del Sahara sono la causa della grande riflettività del Nord Africa. Le aree polari in questo periodo dell'anno non ricevono molta radiazione solare e malgrado la presenza delle superfici coperte dai ghiacci non riflettono molta energia. (NASA map by Robert Simmon, based on CERES data.)

Le differenze di riflettività (albedo) ed illuminazione alle diverse latitudini sono la causa della disomogeneità del calore sulla superficie terrestre. In ogni punto della Terra il riscaldamento netto è dato dalla differenza tra quantità di radiazione solare in arrivo e calore reirradiato dalla Terra verso lo spazio. Ai tropici esiste un surplus netto di energia in quanto la quantità di radiazione solare assorbita è maggiore del calore reirradiato. Nelle regioni polari invece esiste un deficit annuale di energia perché avviene il contrario.



Questa mappa della radiazione netta (radiazione in arrivo meno radiazione uscente) mostra la disomogeneità della energia globale nel mese di Settembre 2008 nel

mese di un equinozio. Le aree attorno all'Equatore (colore giallo-arancio) assorbono circa 200 Watt per m² in più di quanto irradiato. Le aree prossime ai Poli (colore verde-azzurro) riflettono/irradiano circa 200 Watt per m² più di quanto assorbono. Alle medie latitudini il bilancio è pressoché pari. (NASA map by Robert Simmon, based on CERES data.)

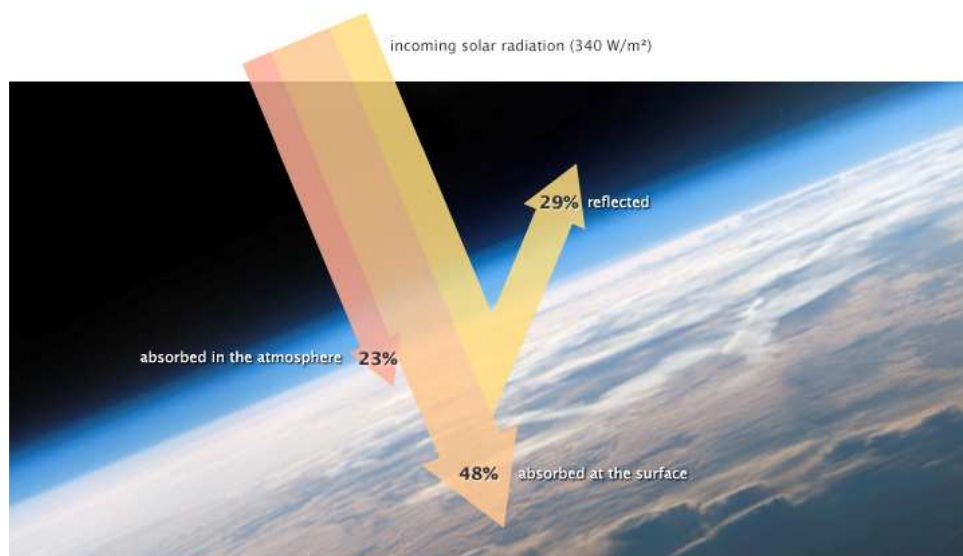
La disomogeneità della distribuzione del calore tra Poli ed Equatore è la causa dei movimenti atmosferici ed oceanici che gli scienziati chiamano "motore termico". (Nell'uso quotidiano del termine associamo la parola motore alle automobili, ma in generale un motore è un qualsiasi apparecchio che trasforma energia in movimento). Il Clima è un motore che usa l'energia del calore per far sì che l'atmosfera e gli oceani siano in movimento. I processi di evaporazione, convezione, le precipitazioni e le correnti oceaniche sono tutti parte del motore termico della Terra.

Bilancio energetico della Terra

Nota: la attribuzione di valori precisi ai flussi di energia del sistema Terra è oggetto di ricerche tuttora in corso. Esistono differenti stime e tutte le stime hanno un grado di incertezza. Le stime provengono da osservazioni satellitari, da osservazioni dal suolo e da modelli numerici. I numeri in questo report sono basati per lo più su osservazioni satellitari della radiazione solare riflessa e della energia termica reirradiata dalla atmosfera e dalla superficie terrestre.

Il motore termico della Terra non muove solo calore da una parte all'altra della superficie terrestre, ma muove anche calore dalla superficie della Terra e dagli strati bassi dell'atmosfera verso lo spazio. Questo flusso di energia in ingresso ed in uscita costituisce il bilancio energetico della Terra. Perché la temperatura della Terra sia stabile nel lungo periodo, i due termini ingresso/uscita di energia debbono essere eguali. In altre parole il bilancio energetico al top dell'atmosfera deve essere in pareggio. Questo stato è chiamato equilibrio radiativo.

Circa il 29% dell'energia solare che arriva al top dell'atmosfera è riflessa verso lo spazio dalle nubi, dalle particelle costituenti la atmosfera ed anche dalle superfici fortemente riflettenti come distese di ghiacci marini e nevi. Questa parte di energia non svolge alcun ruolo nel sistema climatico della Terra. Circa il 23% della radiazione solare entrante è assorbita dal vapore acqueo, dalle polveri, e dall'Ozono e circa il 48% penetra nell'atmosfera ed è assorbito dalla superficie terrestre. In totale quindi circa il 71% della energia radiante proveniente dal Sole è assorbita dal sistema Terra.

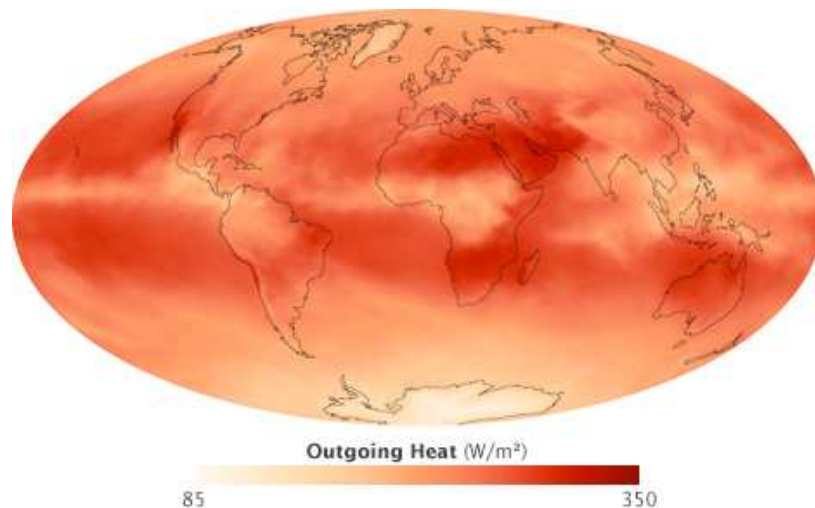


Dei 340 Watt per m² di energia solare che incidono sulla Terra, il 29% viene riflesso indietro nello spazio (principalmente dalle nubi, ma anche dalla atmosfera

stessa e dalle superfici fortemente riflettenti). Un 23% della energia in arrivo è assorbita dalla atmosfera (gas, polveri etc) , il rimanente 48% viene assorbito dalla superficie terrestre. (NASA illustration by Robert Simmon. Astronaut photograph ISS013-E-8948.)

Quando la materia assorbe energia , gli atomi e le molecole che la compongono vengono ad essere eccitati e si pongono in movimento rapido. Questa crescita del movimento causa l'aumento della temperatura del materiale. Se la materia potesse semplicemente assorbire la energia, la temperatura della Terra crescerebbe indefinitamente (così come fa l'acqua di una vasca priva di scarico che avesse il rubinetto sempre aperto).

La temperatura comunque non cresce indefinitamente perché gli atomi e le molecole non assorbono solamente la radiazione solare ma irradiano energia termica nell'infrarosso (calore). La quantità di calore che una superficie irradia è proporzionale alla potenza di 4 della temperatura. Se la temperatura raddoppia la energia radiante aumenta di 16 (2 elevato a 4). Se la temperatura della Terra aumenta il pianeta rapidamente emette una quantità crescente di calore verso lo spazio. Questa perdita di calore crescente in risposta ad una piccolo aumento di temperatura, nota come raffreddamento radiativo, è il meccanismo che evita che la Terra si surriscaldi.

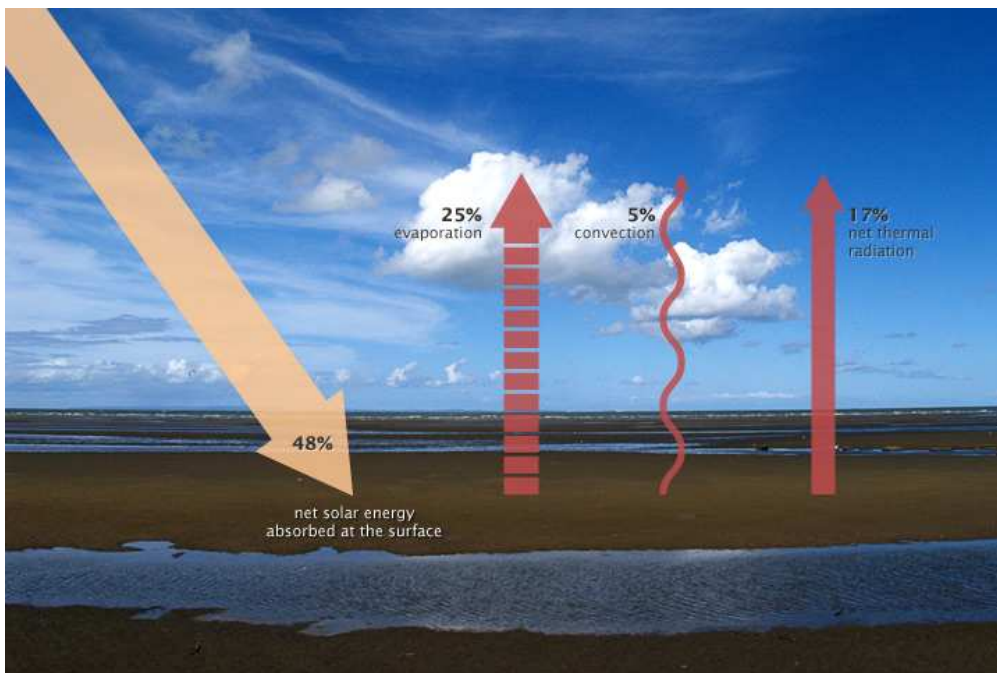


La radiazione solare assorbita è bilanciata dal calore irradiato dalla superficie terrestre e dall'atmosfera. La mappa satellitare mostra la distribuzione della radiazione termica infrarossa emessa dalla Terra nel Settembre 2008. La maggior parte della energia fuoriesce dalle zone a nord ed a sud all'Equatore, dove la superficie è calda e le nubi sono scarse. Lungo l'Equatore la persistenza di nubi riduce la perdita di calore. Analogamente le zone polari fredde irradiano pochissimo calore (NASA map by Robert Simmon, based on CERES data.)

L'atmosfera e la superficie terrestre assieme assorbono il 71% della radiazione solare in arrivo, pertanto le stesse debbono reirradiare verso lo spazio energia in quantità tale da far sì che la temperatura della Terra si mantenga costante. I contributi delle 2 fonti radianti (superficie e atmosfera) nei riguardi delle due azioni (assorbimento della radiazione e reirradiazione di calore) sono asimmetrici. L'atmosfera assorbe il 23% della radiazione solare, la superficie terrestre ne assorbe il 48%. La atmosfera reirradia sotto forma di calore il 59% della radiazione solare ricevuta, la superficie terrestre solo il 12%. In altre parole la maggior parte del riscaldamento dovuto al Sole viene a prodursi alla superficie, mentre il raffreddamento radiativo ha luogo per lo più nell'atmosfera. In che modo si svolge questo rimescolamento di energia tra superficie terrestre ed atmosfera? Lo vediamo nelle parti che seguono.

Il bilancio energetico alla superficie.

Per comprendere come il Clima della Terra si adatti al bilancio energetico dobbiamo esaminare i processi che si svolgono nei tre livelli: la superficie terrestre dove la maggior parte del riscaldamento solare ha luogo, il limite superiore dell'atmosfera terrestre dove la radiazione solare penetra nel sistema, e la atmosfera vera e propria compresa tra i due livelli. Ad ogni livello la quantità di energia entrante ed uscente (flusso netto) deve essere eguale. Ricordiamo che circa il 29% della radiazione solare entrante è riflessa verso lo spazio dalle particelle riflettenti atmosferiche o dal terreno anch'esso riflettente. Resta un 71% circa di cui il 23% viene assorbito dall'atmosfera ed un 48% dal terreno. Perché si mantenga il bilancio dell'energia alla superficie terrestre, debbono verificarsi dei processi tali da far sì che venga eliminata il 48% dell'energia assorbita dal terreno e dagli oceani. Questa energia lascia la superficie attraverso i 3 seguenti meccanismi: evaporazione, convezione ed emissione di energia termica nell'infrarosso.



La superficie terrestre assorbe circa il 48% della radiazione solare in arrivo. Una equivalente quantità di energia viene rimossa dalla superficie terrestre dai 3 meccanismi : evaporazione (25%), convezione (5%) e radiazione termica infrarossa-calore (17% netto). (NASA illustration by Robert Simmon. Photograph ©2006 Cyron.)

Circa il 25% della radiazione solare incidente lascia la superficie terrestre attraverso il processo di evaporazione. Le molecole di acqua liquida assorbendo la radiazione solare cambiano di fase da liquida a gas. L'energia sotto forma di calore necessario ad evaporare lo si ritrova in forma latente sotto forma di movimento *random* delle molecole di vapore creatosi nell'atmosfera. Quando le molecole di vapore ricondensano sotto forma di pioggia, il calore latente viene di nuovo rilasciato in atmosfera. L'evaporazione, soprattutto negli oceani tropicali, ed il conseguente rilascio di calore latente costituiscono uno dei principali motori della macchina termica atmosferica (descritta sopra).



Nubi cumuliformi torreggianti prelevano energia dalla superficie terrestre. Il calore del Sole origina la evaporazione. L'aria calda umida si leva dal basso e trasporta energia dalla superficie verso la atmosfera. L'energia catturata viene rilasciata in atmosfera quando il vapore acqueo condensa in forma liquida o di cristalli di ghiaccio. (Astronaut Photograph ISS006-E-19436.)

Un altro 5% della energia solare in arrivo lascia la superficie attraverso il meccanismo della convezione. L'aria a diretto contatto con il suolo riscaldato dal Sole diventa calda e galleggia. In generale l'atmosfera è più calda in prossimità del suolo e più fredda in alto. In queste condizioni l'aria sale trasportando calore dal basso verso atmosfera. Infine una quantità netta di circa il 17% della radiazione solare entrante lascia la superficie sotto forma di radiazione termica infrarossa (calore) irradiata dagli atomi e dalle molecole in superficie. Questo flusso netto verso l'alto è frutto di 2 opposti flussi di calore: uno verso l'alto, dalla superficie alla atmosfera (117%) ed un altro verso il basso, dalla atmosfera al suolo (100%). Questi 2 flussi che competono tra loro sono parte del cosiddetto "effetto serra" di cui vedremo più avanti. Ricordiamo che il picco di lunghezza d'onda della energia emessa da una superficie è funzione della temperatura. Il picco della radiazione solare è nel visibile e nel vicino infrarosso. La superficie della Terra è molto più fredda, circa 15°C in media. Il picco della radiazione emessa dalla Terra è nella zona dell'infrarosso termico, circa 12.5 μm .

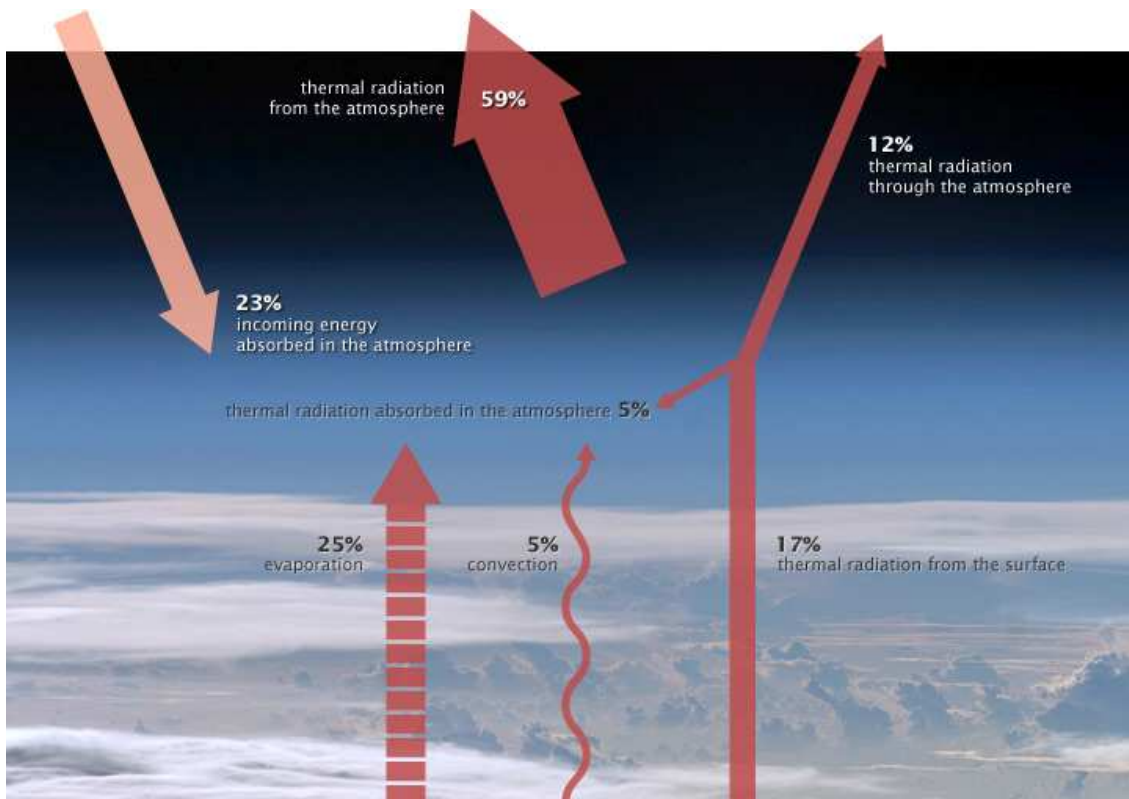
Il bilancio della energia nell'atmosfera.

Poiché l'energia in arrivo ed in uscita sulla superficie terrestre deve bilanciarsi, il flusso di energia verso la atmosfera deve essere controbilanciato da un eguale flusso dalla atmosfera verso lo spazio. Misure da satellite mostrano che la atmosfera irradia energia termica infrarossa equivalente al 59% della radiazione solare in arrivo. Se l'atmosfera emette una simile quantità di energia dovrà assorbirla da qualche parte. Da dove in particolare ? Le nubi , gli aerosol, il vapore acqueo e l'Ozono assorbono il 23% della energia solare in arrivo. L'evaporazione e la convezione trasferiscono rispettivamente il 25% ed il 5% della energia dovuta alla radiazione solare dalla superficie alla atmosfera. I tre processi assieme equivalgono al 53% di energia solare trasferita verso l'atmosfera. Da dove proviene il restante 5-6% ? dalla superficie terrestre come vedremo qui sotto.

L'effetto serra naturale

Così come i principali gas atmosferici (Ossigeno ed Azoto) sono trasparenti alla radiazione solare in arrivo essi sono anche trasparenti alla radiazione termica in uscita. Invece il vapore acqueo, la anidride carbonica, il Metano ed altri gas presenti in traccia sono opachi a molte delle lunghezze d'onda dell'infrarosso termico. Ricordiamo che la superficie terrestre reirradia una quantità di energia come infrarosso termico pari ad un 17% netto. Di questa frazione solamente un 12% è quella che

effettivamente passa nello spazio. La parte rimanente , 5-6%, rimane in atmosfera in quanto le molecole dei gas ad effetto serra assorbono la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre.

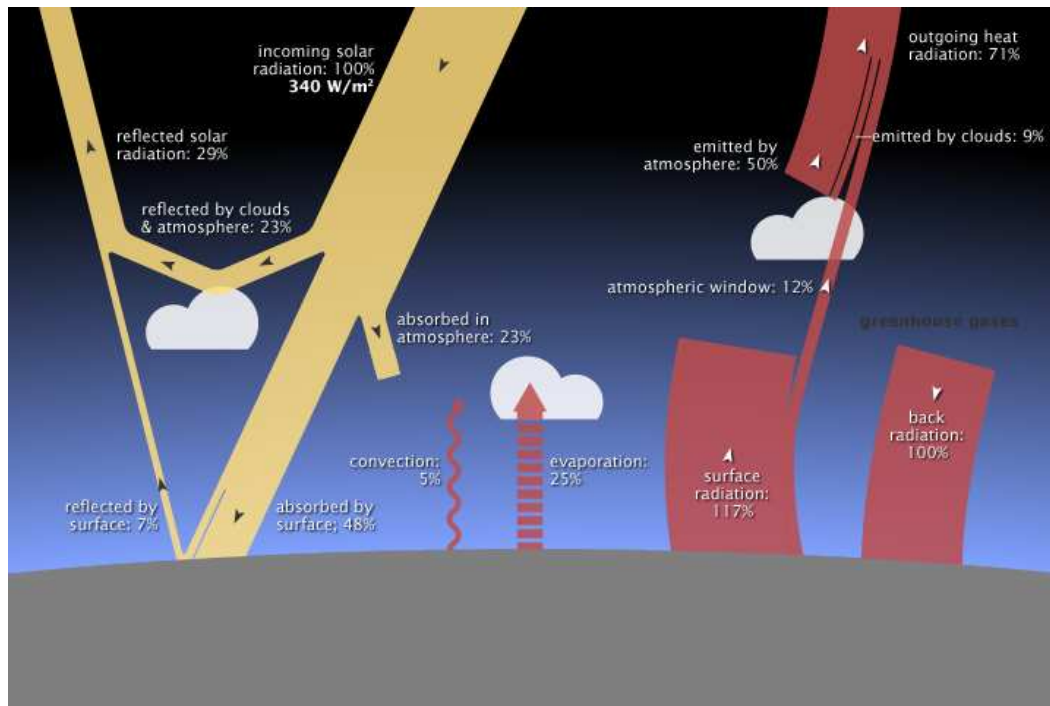


La atmosfera riemette verso lo spazio l'equivalente del 59% della radiazione solare in arrivo in forma di energia termica infrarossa o calore. Da dove preleva questa energia la atmosfera? La atmosfera assorbe direttamente circa il 23% della radiazione solare. Un altro 25% deriva dal processo di evaporazione, un 5% dalla convezione e 5-6% dalla radiazione termica emessa dalla superficie. Un 12 % di energia termica infrarossa viene emessa dalla superficie e fuoriesce nello spazio. (NASA illustration by Robert Simmon. Astronaut photograph ISS017-E-13859).

Quando le molecole dei gas serra assorbono energia termica infrarossa la loro temperatura sale e quindi irradiano energia in tutte le direzioni. Il calore irradiato verso l'alto a sua volta incontra altre molecole di gas serra che a loro volta assorbono calore, aumentano di temperatura, irradiano etc . Ad una altezza di 5-6 km le molecole di gas serra trovano una atmosfera sempre più rarefatta e quindi possono liberamente irradiare verso lo spazio. Poiché le molecole dei gas serra irradiano calore in tutte le direzioni una parte di esso viene diffuso verso il basso e quindi assorbito dalla superficie terrestre. La temperatura della superficie aumenta più di quanto sarebbe se fosse riscaldata solamente dai raggi solari diretti. Questo riscaldamento supplementare della superficie terrestre causata dall'atmosfera è chiamato effetto serra naturale.

Effetto sulla temperatura superficiale

L'effetto serra naturale innalza la temperatura superficiale della Terra a circa 15°C , circa 30 gradi più di quanto sarebbe se non ci fosse la atmosfera. La quantità di calore irradiato dall'atmosfera verso la superficie (chiamato anche radiazione di ritorno) equivale al 100% della energia solare in arrivo. La superficie della Terra risponde a questa extra radiazione (che si somma alla radiazione solare diretta) con l'innalzamento della temperatura.



Al top dell'atmosfera giungono in media 340 Watt per m^2 di energia solare. La Terra rimanda indietro una eguale quantità di energia verso lo spazio riflettendo una parte della radiazione entrante e sotto forma di radiazione termica infrarossa. La maggior parte della energia in arrivo è assorbita dalla superficie, una buona parte del calore è reirradiato verso lo spazio dalla atmosfera stessa. La temperatura media superficiale è mantenuta dai 2 flussi di verso opposto tra atmosfera e suolo (rappresentati sulla destra) costituenti l'effetto serra. NASA illustration by Robert Simmon, adapted from Trenberth et al. 2009, using CERES flux estimates provided by Norman Loeb).

Perché l'effetto serra naturale non dà luogo ad un incremento inarrestabile della temperatura superficiale? Ricordiamo che la quantità di energia che una superficie emette irradiando cresce molto velocemente con la temperatura del corpo (secondo la 4^a potenza della temperatura). A mano a mano che il riscaldamento solare e la energia reirraggiata dalla atmosfera verso il basso raggiungono la superficie terrestre, la superficie emette una quantità di calore equivalente a circa il 117% della energia solare in arrivo. Il flusso netto verso l'alto pertanto è il 17% della luce solare in arrivo ($117 \uparrow - 100 \downarrow$). Una parte del calore sfugge direttamente nello spazio, mentre la parte restante viene portata verso gli strati atmosferici superiori sino a che l'energia uscente dal top dell'atmosfera eguaglia l'energia solare in ingresso. Poiché la massima quantità possibile di radiazione in arrivo è fissata dalla costante solare (che dipende solamente dalla distanza Terra-Sole e dalle piccole variazioni del ciclo solare) l'effetto serra naturale non dà luogo ad una crescita inarrestabile della temperatura superficiale della Terra.

I forcings climatici ed il riscaldamento globale

Ogni cambiamento al sistema climatico terrestre che modifichi quanta energia entra o esce dal sistema altera l'equilibrio radiativo della Terra e provoca un aumento o una diminuzione della temperatura. Queste cause destabilizzanti sono chiamate *forcings* radiativi. *Forcings* radiativi naturali sono ad esempio variazioni di brillantezza o radianza del Sole, i cicli di Milankovitch (piccole variazioni della forma dell'orbita terrestre e del suo asse di rotazione che avvengono sulla base delle migliaia di anni), grandi eruzioni vulcaniche che immettono particelle riflettenti la luce fin nella stratosfera. *Forcings* dovuti all'uomo sono ad esempio legati alla presenza di particelle inquinanti (*aerosols*) che assorbono e riflettono la luce solare in arrivo, oppure la deforestazione, che cambia come e quanto il suolo riflette la luce assorbita, e soprattutto l'aumento della concentrazione dell'anidride carbonica atmosferica e degli altri gas serra che provoca una riduzione della quantità di calore reirradiato verso lo spazio e quindi

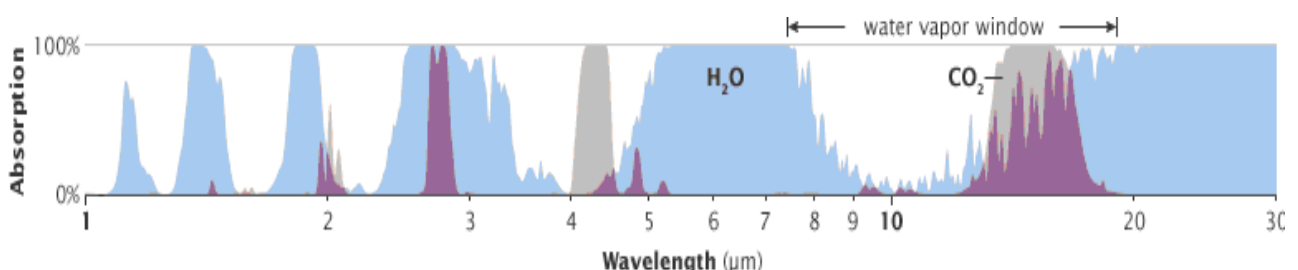
l'intrappolamento dello stesso nella troposfera. Un *forcing* può, attraverso un meccanismo di retroazione, intensificare o ridurre la causa forzante originaria. Ad esempio la perdita di ghiaccio ai Poli che rende la superficie meno riflettiva, è un esempio di *feedback* di crescita.



Meccanismi che alterano la energia in ingresso e in uscita dal sistema climatico vengono chiamati *forcings*. *Forcings* naturali sono le eruzioni vulcaniche. *Forcings* antropici sono i gas serra e l'inquinamento atmosferico. Un *forcing* climatico come l'aumento dei gas serra può provocare una retroazione (*feedback*) che da luogo ad una diminuzione delle superfici ghiacciate aventi proprietà riflettente delle radiazione solare in arrivo. (Photographs ©2008 antonio, ©2008 haglundc, and courtesy Mike Embree/National Science Foundation.)

La anidride carbonica altera l'equilibrio del bilancio energetico della Terra assorbendo la energia termica nell'infrarosso emessa dalla superficie terrestre. Questo assorbimento di energia avviene per lunghezze d'onda per le quali altri gas, come il vapore acqueo, non agiscono. Sebbene il vapore acqueo assorba fortemente in molte delle lunghezze d'onda dell'infrarosso termico, è pressoché trasparente in altre. La trasparenza a queste lunghezze d'onda rappresenta come una finestra aperta per il raffreddamento radiativo della Terra. La più importante di queste "finestre del vapore acqueo" è nella zona del infrarosso termico centrata a circa 10 μm (il massimo di trasparenza avviene a 10 μm ma una parziale trasparenza si verifica pure tra 8 e 14 μm).

La anidride carbonica atmosferica è un forte assorbitore della energia termica nell'infrarosso a lunghezze d'onda non superiori a 12-13 μm , il che significa che l'aumento di anidride carbonica "chiude" in parte la finestra atmosferica sopra citata. In altre parole alle lunghezze d'onda caratteristiche della energia termica uscente, che il nostro gas atmosferico più abbondante (vapore acqueo) lascerebbe libere per il raffreddamento radiativo, subentra con azione contraria la anidride carbonica che quindi agisce da trappola per il calore uscente.



Tutti i gas atmosferici hanno una specifica caratteristica per quanto riguarda l'assorbimento della energia: assorbono a certe lunghezze d'onda, sono trasparenti ad altre. Lo spettro di assorbimento da parte del vapore acqueo è rappresentato nella figura di sopra dalle zone segnate in azzurro, mentre quello della anidride carbonica è segnato in viola. In alcune zone le due caratteristiche si sovrappongono. La anidride carbonica non è un gas serra così potente come il vapore acqueo, ma assorbe energia a lunghezze d'onda (10-11 μm) nelle quali in vapore acqueo non è attivo e pertanto

“chiude” parzialmente la finestra dell’infrarosso attraverso la quale il calore irradiato dalla superficie normalmente scapperebbe nello spazio. (Illustration adapted from Robert Rohde.)

L’assorbimento di energia termica infrarossa da parte della anidride carbonica comporta che la Terra continua ad assorbire quel 70% circa di energia solare entrante ma una certa parte di calore non lascia più la atmosfera. Questa quantità esatta di energia non facile da misurare, ma si stima debba essere poco sopra 0.8 W m^{-2} . Questa valutazione è frutto di un insieme di misurazioni (da satellite, da piattaforme oceaniche per rilevamento del livello del mare e del riscaldamento).

Quando un *forcing* quale l’aumento della concentrazione di anidride carbonica atmosferica spinge il bilancio dell’energia fuori dall’equilibrio, la temperatura globale superficiale non cambia istantaneamente. Possono trascorrere anni o decenni perché le conseguenze dell’impatto si manifestino. Questo ritardo è causato principalmente dalla immensa capacità termica degli oceani. La capacità termica che hanno gli oceani si traduce in inerzia termica che a sua volta fa sì che il riscaldamento o il raffreddamento si manifestino molto gradualmente ma nulla poi può arrestarlo.

I cambiamenti che abbiamo sperimentato fino ad ora sono solamente una parte dell’intero cambiamento climatico causato dai gas serra che abbiamo introdotto nell’atmosfera. La temperatura media globale superficiale è aumentata tra 0.6 e 0.9 °C nel secolo trascorso e molto probabilmente salirà ancora di almeno 0.6 °C come conseguenza dello squilibrio che abbiamo già provocato. A mano a mano che la temperatura continuerà a salire, la quantità di calore che la superficie terrestre irradia crescerà in maniera esponenziale (come illustrato sopra). Se la concentrazione dei gas serra verrà stabilizzata il Clima della Terra gradualmente troverà un equilibrio, ma il “termostato” della temperatura della Terra sarà sicuramente molto più alto di quanto era prima della rivoluzione industriale. Se la concentrazione dei gas serra continuerà a salire la quantità di energia solare assorbita sarà sempre maggiore di quella in uscita come calore verso lo spazio e quindi la temperatura continuerà a salire.

* Rebecca Lindsey (<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/page1.php>)

January 14, 2009

Tradotto da Luigi Ciattaglia, Aprile 2010

Bibliografia

1. Cahalan, R. (n.d.) Solar and Earth Radiation. Accessed December 12, 2008.
2. Hansen, J., Nazarenko, L., Ruedy, R., Sato, M., Willis, J., Del Genio, A., Koch, D., Lacis, A., Lo, K., Menon, S., Novakov, T., Perlwitz, J., Russell, G., Schmidt, G.A., and Tausnev, N. (2005). Earth’s Energy Imbalance: Confirmation and Implications. *Science*, (308) 1431-1435.
3. Kushnir, Y. (2000). Solar Radiation and the Earth’s Energy Balance. Published on The Climate System, complete online course material from the Department of Earth and Environmental Sciences at Columbia University. Accessed December 12, 2008.
4. Peixoto, J., and Oort, A. (1992). Chapter 6: Radiation balance. In *Physics of Climate* (pp. 91-130). Woodbury, NY: American Institute of Physics Press.
5. Peixoto, J., and Oort, A. (1992). Chapter 14: The ocean-atmosphere heat engine. In *Physics of Climate* (pp. 365-400). Woodbury, NY: American Institute of Physics Press.
6. Marshall, J., and Plumb, R.A. (2008). Chapter 2: The global energy balance. In *Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics: an Introductory Text* (pp. 9-22).
7. Marshall, J., and Plumb, R.A. (2008). Chapter 4: Convection. In *Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics: an Introductory Text* (pp. 31-60).

8. Marshall, J., and Plumb, R.A. (2008). Chapter 8: The general circulation of the atmosphere. In *Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics: an Introductory Text* (pp. 139-161).
 9. Trenberth, K., Fasullo, J., Kiehl, J. (2009). Earth's global energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*.
-