

Effetti termici della radiazione ed effetto serra

Gruppo di Ricerca in Didattica della Fisica
Dipartimento di Fisica “A. Volta”, Università di Pavia

Introduzione

Il problema che dovrebbe motivare tutta l'indagine (*driving issue*) è la comprensione degli aspetti fisici legati all'effetto serra sulla Terra.

E' generalmente noto che la produzione di biossido di carbonio (CO_2) dovuto all'utilizzo di combustibile fossile nelle attività umane può causare un incremento della temperatura media terrestre. Questo fenomeno è preso sempre più in considerazione sia dal punto di vista scientifico che da quello socio-politico poiché può alterare l'equilibrio dell'ecosistema terrestre. I rischi dovuti all'incremento dell'effetto serra sono spesso discussi dai media, ma la ricerca ha mostrato che le idee degli alunni su quest'argomento sono molto confuse. Per esempio, molti studenti associano erroneamente il riscaldamento globale con la riduzione dello strato d'ozono e il conseguente incremento di radiazioni ultraviolette che raggiungono la superficie della Terra.

Per queste ragioni è importante presentare e discutere con gli studenti gli aspetti principali di quest'argomento, partendo dalla conoscenza dei processi fisici di base fino a ottenere un semplice modello esplicativo. Il punto di partenza è lo studio del comportamento termico di oggetti esposti alla radiazione del Sole con l'obiettivo di scoprire i parametri che influenzano sia l'assorbimento sia l'emissione di radiazione elettromagnetica da parte di oggetti aventi diverse temperature. Qual è il ruolo della radiazione elettromagnetica (visibile e infrarossa) nel determinare la temperatura di un oggetto? Come può essere raggiunto l'equilibrio termico quando un oggetto è esposto alla radiazione solare?

Si vuole anche creare un collegamento tra due aree disciplinari (l'ottica e i fenomeni termici) strettamente connesse dal punto di vista concettuale, scientifico e tecnologico, ma spesso separate o collegate solo sporadicamente nell'insegnamento scolastico tradizionale.

Questo modulo si caratterizza anche per il suo intento di proporre attività sperimentali da eseguire all'aperto, in contesti diversi da quello scolastico, per le quali saranno impiegati data logger portatili connessi a opportuni sensori, di facile utilizzo da parte degli studenti.

Le **attività** sono organizzate nelle sette fasi seguenti:

- 1) Richiamo di alcuni concetti e leggi sui fenomeni termici.
- 2) Che cosa succede ad oggetti differenti esposti al sole.
- 3) La radiazione emessa da oggetti a differenti temperature.
- 4) Situazione stazionaria di oggetti esposti al sole.
- 5) Lo spettro della radiazione, radiazione visibile ed invisibile.
- 6) Effetto serra: modellino di dimostrazione e serre reali.
- 7) Bilancio energetico della Terra, effetto serra della Terra e riscaldamento globale.

Il **contesto** per queste attività include l'aula, il laboratorio e l'ambiente naturale. Le attività all'aperto dovrebbero essere scelte tenendo conto di due criteri: l'uso di luoghi significativi dal punto di vista della cultura locale e l'opportunità di osservare concretamente l'effetto serra.

I **materiali** suggeriti per le attività sperimentali sono: data-logger portatile (Xplorer GLX: www.pasco.com/GLX) con sensori di temperatura e software DataStudio; sensore di radiazione infrarossa (radiometro); multimetro digitale; piccoli cilindri di metallo di uguale massa con superficie lucida, di materiale trasparente, colorati di bianco, di nero, di altri colori; bottiglie con superfici opache colorate; lavagna luminosa, prisma di vetro (o di plastica) trasparente, lastre di vetro e di plastica, una robusta scatola di plastica con un coperchio trasparente e una piastra di alluminio nera disposta sul fondo (modello di serra).

La sequenza didattica

All'inizio delle attività deve essere assegnato agli studenti un pre-test per raccogliere le loro idee sugli argomenti che saranno trattati nella sequenza. Un esempio è fornito in Appendice.

1) Richiamo di alcuni concetti e leggi sui fenomeni termici.

Si riprendono concetti e leggi riguardanti i fenomeni termici, facendo attenzione particolarmente ai bilanci energetici. Infatti, molte difficoltà degli allievi possono provenire da una mancanza di padronanza dei concetti di base di termologia, da una confusione fra grandezze di stato e d'interazione e da una difficoltà nel distinguere bene fra i concetti di calore, temperatura, lavoro ed energia interna. È utile sottolineare che la temperatura T di un oggetto (sistema) è legata in modo complesso alla sua *energia interna*. Soltanto una parte di questa è strettamente legata (è proporzionale) alla temperatura, e tale parte è spesso chiamata *energia termica*.

E' possibile aumentare la temperatura di un sistema aumentando la sua energia interna. Ciò può essere realizzato sia *compiendo lavoro su di esso* ("scaldare" senza calore) sia fornendo *calore* ("scaldare" per contatto con un sistema a temperatura maggiore, questa modalità corrisponde al termine "scaldare" del linguaggio comune).

Si discute la seguente relazione (cambiamenti di fase o altri effetti non sono considerati):

energia (entrante nel sistema) = $m \cdot c \cdot \Delta T$ + energia (ceduta all'ambiente),

dove m è la massa del sistema e c è il suo calore specifico.

È inoltre possibile incrementare l'energia interna di un sistema senza aumentarne la temperatura, per esempio in un cambiamento di stato. D'altra parte, in alcuni processi, la temperatura di un sistema può aumentare senza che il sistema riceva energia dall'esterno (come in certe reazioni chimiche o nel caso di movimenti dissipativi).

Si eseguono misure della temperatura di oggetti riscaldati o raffreddati in diversi modi. Si analizzano due casi di riscaldamento senza calore:

- scaldare compiendo lavoro meccanico (utilizzando le forze d'attrito);
- scaldare utilizzando corrente elettrica (ad esempio il filamento di una lampadina o la serpentina di un riscaldatore elettrico).

2) Che cosa succede ad oggetti differenti esposti al sole.

Si propone una discussione sugli effetti della radiazione solare su organismi viventi e su oggetti: abbronzatura della pelle, fotosintesi clorofilliana, reazioni chimiche nelle pellicole fotografiche, aumento della temperatura, *etc.* L'ultimo effetto sarà studiato con le attività all'aperto.

Vengono esposti alla luce solare il cilindro di metallo bianco, quello nero, e quello lucido. Ogni cilindro è posizionato su un sensore di temperatura (inserito in un foro del cilindro come mostrato in figura), mentre un altro sensore misura la temperatura dell'ambiente.

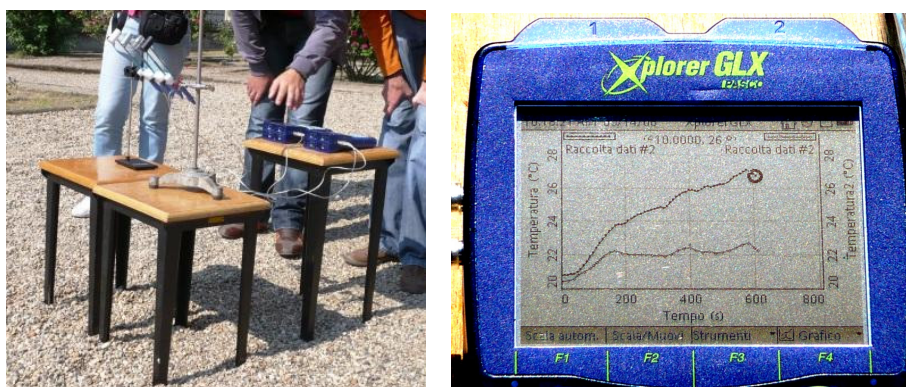


Fig. 1. Variazione di temperatura di oggetti esposti al sole.

Si registrano i grafici di temperatura-tempo per ogni cilindro fino al raggiungimento delle condizioni di equilibrio. Si discute una prima spiegazione degli andamenti ottenuti: confrontando la parte iniziale dei grafici (prima che sia raggiunto l'equilibrio), è possibile riconoscere che il cilindro nero assorbe, in un tempo fissato, più energia degli altri, il cilindro bianco e quello lucido assorbono meno energia di quello nero perché riflettono parte della radiazione incidente.

La prova con cilindri colorati mostra comportamenti intermedi: riflettono, infatti, solo la radiazione corrispondente ad un dato colore.

Il cilindro di metallo nero e quello trasparente vengono esposti alla radiazione solare e si tracciano i grafici di temperatura-tempo utilizzando i sensori di temperatura. I grafici permettono di confrontare la quantità di energia assorbita dai due cilindretti nello stesso tempo.

Si possono eseguire misure anche introducendo i sensori di temperatura in una bottiglia trasparente contenente acqua, e in bottiglie riempite con acqua molto torbida.

I grafici temperatura-tempo ottenuti all'aperto sono analizzati in due fasi.

Si considera la prima parte di ogni grafico, che mostra un andamento pressoché lineare: tale andamento è compatibile con l'ipotesi che la maggior parte della radiazione entrante nel sistema produca un aumento dell'energia "termica" interna, espressa dalla relazione $E = m \cdot c \cdot \Delta T$.

In seguito si osserva la parte di curva che porta alla condizione stazionaria. Ogni oggetto ha una diversa temperatura di equilibrio e ciascuna è maggiore della temperatura ambiente.

La discussione di questo risultato mette in luce il fatto che una condizione stazionaria può essere raggiunta solo se sussiste un equilibrio tra l'energia assorbita dagli oggetti e l'energia ceduta all'ambiente. L'intero range temporale delle curve sperimentali è poi analizzato tentando di individuare un fit con una funzione esponenziale.

3) La radiazione emessa da oggetti a differenti temperature.

Si studia l'emissione di radiazione da parte di corpi a temperature intorno alla temperatura ambiente. Per mezzo del radiometro è infatti possibile verificare se un corpo, ad una data temperatura, emette radiazioni. In particolare si misura quanto irradia un oggetto a diverse temperature (si considerano anche oggetti a temperature inferiori a quella dell'ambiente). Si studia inoltre la dipendenza della potenza (energia per unità di tempo) della radiazione emessa da un oggetto dalla sua temperatura.

Si misura con il radiometro l'intensità relativa della radiazione infrarossa ("termica") emessa da diversi oggetti (ferro caldo, mani, *etc.*). Il sensore deve essere posto vicinissimo alla superficie dell'oggetto in modo da ricevere solo la radiazione emessa dal corpo e non radiazioni provenienti da altri oggetti o riflesse dal corpo stesso.

La discussione dei risultati si focalizza sul fatto che la radiazione produce effetti termici quando



Fig. 2.

viene "catturata" dal materiale. Un oggetto è trasparente se parte dell'energia entrante passa attraverso ad esso senza produrre effetti termici. La natura del materiale non è il solo fattore che determina la trasparenza o l'opacità di un corpo: un altro fattore è lo spessore che la radiazione deve attraversare. Mediante il radiometro si può ottenere una valutazione della trasmissione di radiazione attraverso strati trasparenti di diverso spessore. La figura mostra un esperimento in cui è stato utilizzato un certo numero di vetrini da microscopio. Aumentando il numero di vetrini, l'intensità misurata dal sensore diminuisce. Si analizza la dipendenza dell'intensità trasmessa dal numero di vetrini.

Ulteriori attività all'aperto.

Usando un sensore di temperatura e il radiometro IR, si misurano le temperature di diversi "oggetti" e la radiazione infrarossa emessa da ciascuno di essi. Gli oggetti dovrebbero comprendere sassi, tronchi d'albero, metalli, erba e foglie; alcuni di essi devono essere esposti al sole, altri essere in ombra. Per fornire un'interpretazione corretta dei risultati ottenuti, tutti i fattori che influenzano il valore della temperatura degli oggetti devono essere tenuti in conto.

L'ambiente esterno è un esempio di situazione complessa, dove tutti i contributi, che nelle precedenti esperienze di laboratorio erano separati, agiscono contemporaneamente (per esempio: l'orientamento delle superfici rispetto alla radiazione solare, le caratteristiche delle superfici, l'assorbimento e l'emissione di radiazione infrarossa, ecc.).



Fig. 3

4) Situazione stazionaria di oggetti esposti al sole.

Un oggetto esposto alla radiazione del sole può raggiungere uno stato stazionario se l'energia assorbita eguaglia l'energia che l'oggetto cede all'ambiente in forma di calore e di radiazione.

La discussione deve mettere bene in luce il fatto che una condizione stazionaria può essere raggiunta solo se sussiste un equilibrio tra l'energia assorbita dagli oggetti e l'energia ceduta all'ambiente.

È opportuno dedicare tempo per spiegare bene e discutere il bilancio energetico nei casi di situazioni stazionarie e transitorie, perché in genere per gli allievi è difficile capire correttamente questo punto e distinguere i due casi.

5) Lo spettro della radiazione, radiazione visibile ed invisibile.

La radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente è generalmente composta da un range di frequenze diverse. La distribuzione di energia in funzione della frequenza è chiamata *spettro di emissione* della sorgente. Il nostro occhio non ci permette di distinguere le diverse componenti, ma fornisce una risposta complessiva su un limitato range di frequenze, che costituisce la “componente visibile”.

Componenti diverse dello spettro possono essere evidenziate mediante la rifrazione della luce attraverso una superficie frapposta tra due mezzi diversamente rifrangenti. Questo processo è chiamato *dispersione cromatica* e può essere ottenuto, per esempio, mediante un prisma trasparente, nel quale la dispersione si verifica nel passaggio attraverso la prima superficie ed è incrementata all'uscita dalla seconda. La rifrazione della luce solare dovuta a gocce di pioggia produce gli arcobaleni.

Un altro modo per ottenere la separazione cromatica della luce è l'interferenza dovuta a riflessione, per esempio sulle due facce di pellicole sottili. L'iridescenza delle bolle di sapone, dell'olio nelle pozzanghere è dovuta all'interferenza così come i colori cangianti delle ali delle farfalle e persino dei Compact Disc. L'occhio umano distingue generalmente sei o sette diversi colori, dal rosso al violetto.

E' possibile ottenere una dispersione cromatica utilizzando una lavagna luminosa ed un prisma trasparente disposti come in figura 4. Disponendo due libri sul proiettore si ottiene una fessura da cui fuoriesce la luce. Il prisma deve essere posizionato in modo tale da catturare la luce proveniente dalla fessura. E' necessario solamente variare la larghezza della fessura e trovare il corretto orientamento del prisma per ottenere uno spettro ben visibile su una parete bianca.

Utilizzando una macchina fotografica digitale si osserva sul display anche la componente non visibile del vicino infrarosso dello spettro.

La sensibilità all'infrarosso di una macchina fotografica digitale è documentata dalla figura 5 che mostra la radiazione infrarossa emessa da un telecomando.

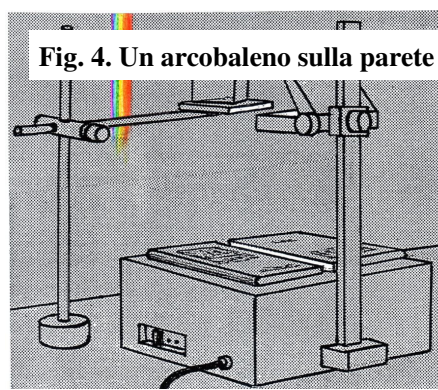




Fig. 5. Fotografare la radiazione infrarossa emessa da un telecomando

Due foto dello stesso telecomando, con una video-camera. Nella foto di destra, un fascio di radiazione infrarossa è stato emesso dalla video-camera durante l'osservazione. Gli allievi possono osservare che la copertura del telecomando è opaca alla luce visibile ma è trasparente all'infrarosso vicino.

Queste attività mirano a mostrare che nei materiali (in particolare vetro e plastica trasparente) la trasparenza dipende dalla frequenza ν o lunghezza d'onda λ della radiazione. Il vetro è trasparente per radiazioni aventi λ tra circa 400 nm (vicino ultravioletto) e 3500 nm (vicino infrarosso). Il vetro è quindi *trasparente* alla radiazione solare visibile e nel vicino infrarosso mentre è *opaco* alla radiazione emessa da una sorgente ad una temperatura inferiore a 600 K.

Viene richiamata e studiata la dipendenza dello spettro di emissione di un corpo solido dalla sua temperatura. Un aumento della temperatura della sorgente produce due effetti: un incremento dell'energia totale emessa per unità di tempo, e una variazione dell'intensità relativa delle diverse componenti dello spettro.

Il primo effetto è già stato considerato nella fase 3. Ora può essere presentata la legge di Stefan-Boltzmann: $E \propto T^4$ (con T temperatura assoluta), evidenziando che il coefficiente di proporzionalità dipende dall'area e dalla natura della superficie.

Il secondo effetto può essere mostrato utilizzando una lampada a incandescenza. Diminuendo la tensione, il colore del filamento passa dal bianco al rosso e al marrone. Questo semplice esperimento è utile per suggerire la continuità esistente tra la radiazione visibile emessa dalla lampada e la radiazione non visibile emessa da un oggetto a bassa temperatura.

Può essere presentata ora la legge di Wien: $\lambda_{\max} T = \text{costante}$, dove $\lambda_{\max}$ rappresenta il valore di λ corrispondente al punto di massimo dell'energia relativa dello spettro ad una data temperatura.

Una simulazione può essere utile per mostrare in che modo lo spettro di una data sorgente varia al variare della sua temperatura: <http://fisicavolta.unipv.it/didattica/energia/irraggiamento.htm>

Per quanto riguarda il Sole (temperatura della superficie circa 6000 K), lo spettro della radiazione emessa copre un range tra 10^2 nm e 10^5 nm, con un massimo a circa 500 nm. La parte visibile dello spettro varia tra 400 e 700 nm.

La radiazione emessa da un corpo a 300 K (circa la temperatura ambiente) ha un massimo corrispondente a $\lambda = 10^4$ nm, ossia nel lontano infrarosso (vedi fig. 6).

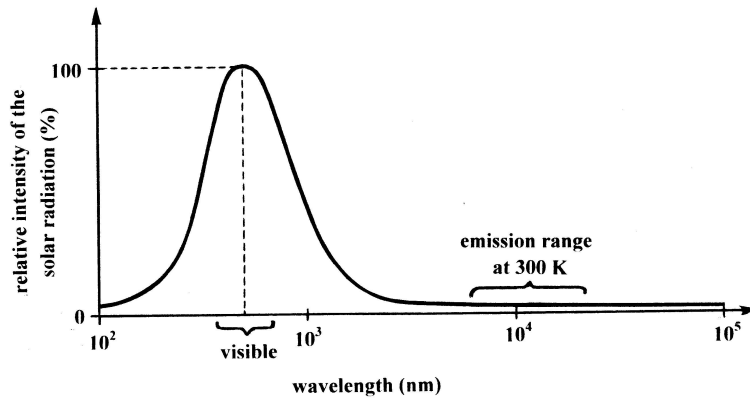


Fig. 6. Spettro della radiazione solare.

Sull'asse orizzontale è indicato il range di emissione relativo ad un corpo a 300 K. Lo spettro di emissione di questo corpo non è rappresentato e sarebbe interamente sotto la curva dello spettro solare.

Basandosi sulle attività precedenti, una discussione dovrebbe permettere agli studenti di concludere che la radiazione emessa per esempio da un sasso al sole in uno spazio aperto ha un massimo nella zona dell'infrarosso. Da notare che è possibile vedere il sasso poiché riflette e diffonde la luce solare e non perché emette radiazione infrarossa come conseguenza della sua temperatura. Usando il radiometro appoggiato contro la superficie di un sasso in una zona assolata, si può misurare l'intensità relativa della radiazione emessa dal sasso e che entra nel sensore. La stessa misurazione va ripetuta dopo aver interposto una lastra di vetro trasparente o di plastica tra la superficie del sasso e il sensore di radiazione. Si osserva che l'intensità misurata diminuisce. Questo risultato mostra che la radiazione infrarossa emessa dal sasso non passa attraverso il vetro (o la plastica), ma è assorbita e riflessa da questi materiali. La luce visibile invece passa attraverso il vetro, infatti si può vedere il sasso anche dietro la lastra.

La parola “trasparente”, usata nel linguaggio quotidiano per vetro e plastica, si riferisce dunque solo alla luce visibile (e al vicino infrarosso), come mostra la Figura 7.

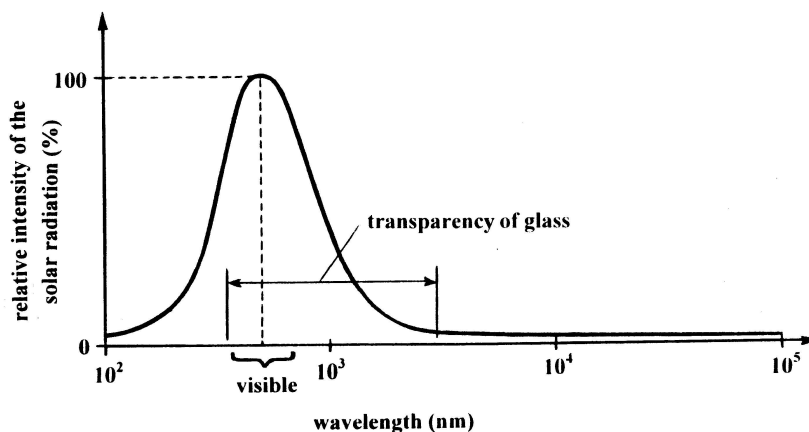


Fig. 7. Range di trasparenza del vetro rappresentato sullo spettro della radiazione solare.

Un confronto con la figura precedente mostra che il vetro non è trasparente nel range di emissione dei corpi a temperatura ambiente o di poco superiore.

6) Effetto serra: modellino di dimostrazione e serre reali.

Si considerano le due situazioni seguenti:

1. Una piastra di alluminio dipinta di nero è posta sul fondo di una scatola di plastica ed è messa al sole (Figura 8-a). Per mezzo di un sensore si misura la temperatura della piastra fino al raggiungimento delle condizioni stazionarie (nell'arco di tempo di circa 10-15 minuti).
2. Si prosegue nella misura della temperatura dopo aver chiuso la scatola con un coperchio di plastica o di vetro trasparente (Figura 8-b). In questo modo si crea una piccola serra.



Fig. 8-a



Fig. 8-b

Misura della temperatura di equilibrio della piastra nera senza e con il coperchio di plastica.

Prima di eseguire gli esperimenti, è opportuno chiedere agli studenti di prevedere e di tracciare i grafici della temperatura della piastra in funzione del tempo per entrambi i casi.

Interpretazione dell'esperimento relativo alla piccola serra.

Per trovare un modello esplicativo dei fenomeni osservati, si confrontano le previsioni degli studenti con i risultati sperimentali. La Figura mostra un esempio di grafico dell'andamento della temperatura della piastra in funzione del tempo .

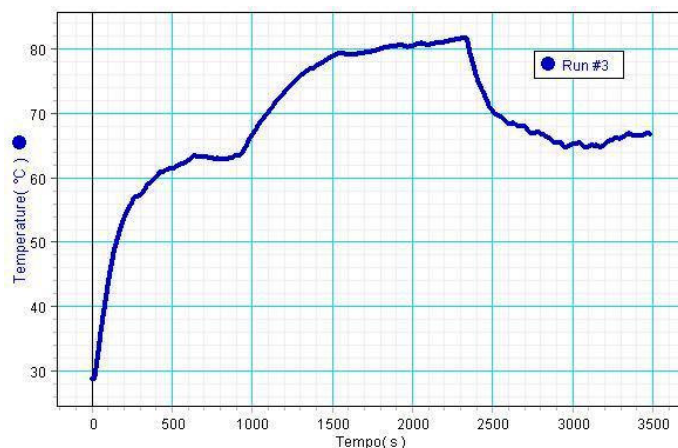


Fig. 9. Grafico della Temperatura in funzione del tempo della piastra di metallo nella scatola, con e senza il coperchio

In particolare, si confrontano le temperature di equilibrio della piastra nella scatola con e senza coperchio.

Nel caso di scatola aperta gli elementi chiave da considerare sono i seguenti:

- La radiazione solare che entra nella scatola è assorbita dalla piastra nera e ne produce un aumento di temperatura.
- La piastra nera emette radiazione infrarossa che esce dalla scatola. Inoltre, del calore passa dalla piastra all'aria in contatto con essa e al fondo della scatola. La convezione produce un continuo scambio di aria fra l'interno e l'esterno della scatola.
- La piastra raggiunge una temperatura di equilibrio quando il flusso di "energia entrante" (radiazione solare assorbita) è uguale al flusso di "energia uscente" (radiazione infrarossa emessa e calore ceduto). Questa temperatura è più elevata della temperatura dell'aria nell'ambiente.

Nel caso di scatola chiusa con il coperchio:

- La radiazione entrante è quasi uguale a quella del caso precedente (ad eccezione della radiazione ultravioletta e del lontano infrarosso che vengono "bloccate" dal coperchio). Questa radiazione è assorbita dalla piastra nera e produce un aumento della temperatura.
- La piastra emette radiazione infrarossa che non passa attraverso il coperchio di vetro, perché questo la assorbe e parzialmente la riflette. L'aria nella scatola riceve calore dalla piastra, ma il coperchio impedisce uno scambio di aria con l'esterno.
- Aumenta la temperatura del coperchio che emette radiazione infrarossa e cede calore all'aria in contatto con esso. Si raggiunge una temperatura di equilibrio del coperchio quando il flusso di "energia entrante" è uguale al flusso di energia uscente (radiazione infrarossa emessa dal coperchio e calore ceduto).
- Il coperchio emette radiazione verso l'esterno e verso l'interno della scatola.
- La temperatura di equilibrio della piastra è maggiore di quella del caso precedente poiché nella condizione di equilibrio la piastra deve emettere una quantità di energia in grado di bilanciare non solo l'energia che riceve dal Sole, ma anche quella che riceve dal coperchio. Il bilancio dell'energia in entrata e in uscita dalla scatola è mostrato in Figura.

E' utile chiedere se la piastra e il coperchio raggiungono temperature uguali oppure diverse e invitare a motivare la risposta basandosi sul modello rappresentato in Figura 10. Nella figura, la dimensione delle frecce è qualitativamente legata al valore del flusso di energia che rappresentano. I differenti flussi sono:

R_{SUN} : radiazione solare entrante nella scatola; R_{ENV} : radiazione proveniente dall'ambiente;

R_L : radiazione emessa dal coperchio;

R_P : radiazione emessa dalla piastra;

Q_P : flusso di calore dalla piastra al coperchio attraverso l'aria all'interno della scatola;

Q_L : flusso di calore dal coperchio all'aria dell'esterno.

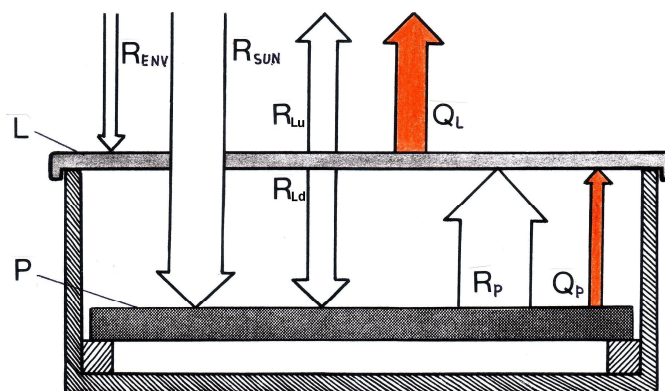


Fig. 10. Flussi di radiazione e di calore nella serra

Nella figura si è considerato il caso di un coperchio “ideale”, cioè che è trasparente a tutta la radiazione solare ed assorbe tutta la radiazione termica infrarossa (ovviamente nessun coperchio reale realizza esattamente queste condizioni). Nel caso in cui Q_L e R_{ENV} possono essere trascurati (questa ipotesi è utile per estendere il modello al sistema Terra-atmosfera), i flussi di energia nella situazione stazionaria diventano: per la piastra $R_{SUN} + R_{Ld} = R_P + Q_P$; per il coperchio $R_P + Q_P = R_{Lu} + R_{Ld}$. Si ottiene quindi $R_{Lu} = R_{SUN}$ e poiché $R_{Ld} \cong R_{Lu}$, si ha $R_{Ld} \cong R_{SUN}$.

Ciò significa che il flusso di radiazione dal coperchio alla piastra è uguale a quella dal sole alla piastra così che l'energia totale che arriva alla piastra quando c'è il coperchio è il doppio dell'energia che arriva in assenza del coperchio. Ne segue che il rapporto fra le temperature assolute della piastra con e senza il coperchio è approssimativamente $(2)^{1/4}$, cioè circa 1.2 (se Q_L non può essere trascurato il rapporto è più basso).

Il confronto con una serra reale permette di comprendere la complessità della situazione reale, ma anche di riconoscere che il modello semplificato dei flussi di energia è ancora utilizzabile.

7) Bilancio energetico della Terra, effetto serra della Terra e riscaldamento globale.

Per costruire un modello dell'effetto serra terrestre, si può immaginare una relazione tra gli elementi del sistema atmosfera-Terra e quelli della piccola serra, rappresentati in Figura:

- La superficie della Terra gioca lo stesso ruolo della piastra nera: assorbe la radiazione incidente ed emette radiazione infrarossa in base alla sua temperatura.
- L'atmosfera (i suoi costituenti principali sono: $N_2 \cong 78\%$; $O_2 \cong 20\%$; $Ar \cong 1\%$; $H_2O \cong 0\% \div 6\%$ media 0.33% ; $CO_2 \cong 0.03\%$) gioca lo stesso ruolo del coperchio, è trasparente per la maggior parte della radiazione solare, ma assorbe la radiazione del lontano infrarosso emessa dalla Terra.

Questo assorbimento è dovuto principalmente al vapore acqueo, alle nuvole e al CO_2 , con un più piccolo contributo (del 5%) dei gas O_3 , N_2O e CH_4 e un contributo ancora più piccolo di altri gas antropogenici, come i clorofluorocarburi del tipo per esempio del $CFCl_3$. Tutti questi gas, responsabili dell'assorbimento della radiazione nel range del lontano infrarosso, sono chiamati “gas serra”. Radiazione infrarossa viene emessa da questi gas verso la Terra e verso lo spazio esterno. Questo effetto ha garantito sulla superficie della Terra una temperatura di equilibrio compatibile con la vita. La situazione è rappresentata nella Figura. 11

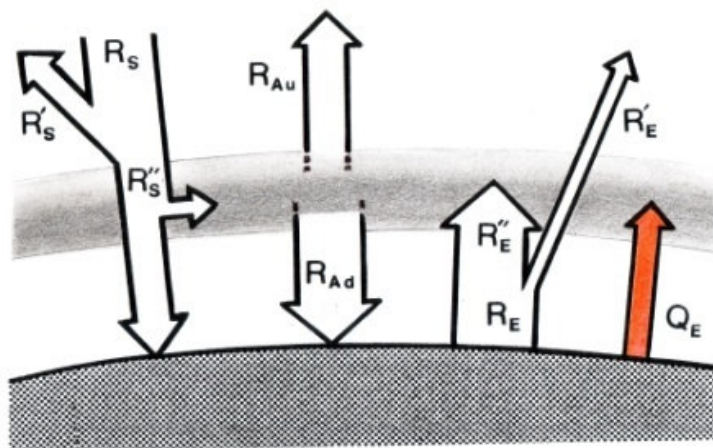


Fig. 11. Flussi di radiazione e di calore nel sistema Terra – atmosfera

In questo caso, i vari flussi sono i seguenti:

R_{SUN} : radiazione solare;

R'_{SUN} : radiazione solare riflessa dall'atmosfera e dalla superficie della Terra;

R''_{SUN} : radiazione solare assorbita dalla Terra (circa 2/3) e dall'atmosfera, in particolare dalle nuvole (circa 1/3);

R_E : radiazione emessa dalla Terra: molta di questa energia è assorbita dai gas serra e dalle nuvole (R''_E); la restante parte supera l'atmosfera ed esce nello spazio (R'_E);

Q_E : rappresenta due contributi: il calore ceduto dalla superficie della Terra all'aria, e l'energia termica liberata durante la formazione di nuvole, ossia durante la condensazione del vapore prodotto sulla superficie terrestre (oceani);

R_{Ad} : radiazione emessa dall'atmosfera e assorbita dalla Terra;

R_{Au} : radiazione emessa dall'atmosfera verso lo spazio.

Un aumento della concentrazione di CO_2 e degli altri gas serra nell'atmosfera provoca un aumento dell'assorbimento (R''_E) e della emissione di radiazione infrarossa (R_A).

Conseguentemente si ha un incremento della temperatura di equilibrio della Terra.

È importante evidenziare il fatto che l'effetto serra ha un ruolo fondamentale nel mantenere la temperatura della superficie della Terra adatta alla vita. È l'incremento di tale effetto che è potenzialmente pericoloso.

Nel paragonare l'atmosfera al coperchio della serra, è importante sottolineare che nessun flusso di calore può uscire verso lo spazio esterno. Di conseguenza, sulla superficie della Terra arriva un flusso di energia radiante emesso dall'atmosfera approssimativamente uguale a quello che arriva dal sole: $R_{\text{Ad}} \cong R_{\text{Au}} = R''_{\text{SUN}} - R'_E$ dove R'_E è molto più piccolo di R''_{SUN} . Tuttavia, poiché la temperatura dell'atmosfera non è uniforme lungo il verticale, essa irradia di più verso la superficie della Terra che verso lo spazio esterno, così $R_{\text{Ad}} > R_{\text{Au}} = R''_{\text{SUN}} - R'_E$.

Il ruolo della CO_2 può essere evidenziato con un esperimento in cui viene usata una lampada come sorgente di luce. Si misura la temperatura della piastra nera dapprima tenendo semplicemente la scatola aperta e poi coprendo la piastra con della CO_2 , prodotta miscelando bicarbonato di sodio e aceto e “versata” nella scatola mediante un tubetto di plastica.



Fig. 12. Un semplice esperimento per evidenziare il ruolo della CO_2 nell'effetto serra

Riferimenti bibliografici

Ugo Besson, Anna De Ambrosis and Paolo Mascheretti , Studying the physical basis of global warming: thermal effects of the interaction between radiation and matter and greenhouse effect, *Eur. J. Phys.* 31 (2010) 375–388

P. Onorato, P Mascheretti and A DeAmbrosis ‘Home made’ model to study the greenhouse effect and global warming, *Eur. J. Phys.* 32 (2011) 363–376

U. Besson, Paradoxes of thermal radiation, *Eur. J. Phys.* 30 (2009) 995–1007