

# FASE S: EFFETTO SERRA E RISCALDAMENTO GLOBALE

## Fascicolo Teorico

### 1. Un modellino di serra

Analizziamo i risultati dell'esperimento con il modello di serra rappresentato in Fig.1.



Fig. 1- Misura della temperatura di equilibrio della piastra nera senza e con il coperchio di plastica.

Un tipico andamento della temperatura in funzione del tempo della piastra di metallo nella scatola, con e senza il coperchio è rappresentato nel grafico riportato nella figura 2, che si riferisce alla scatola illuminata da una lampada.

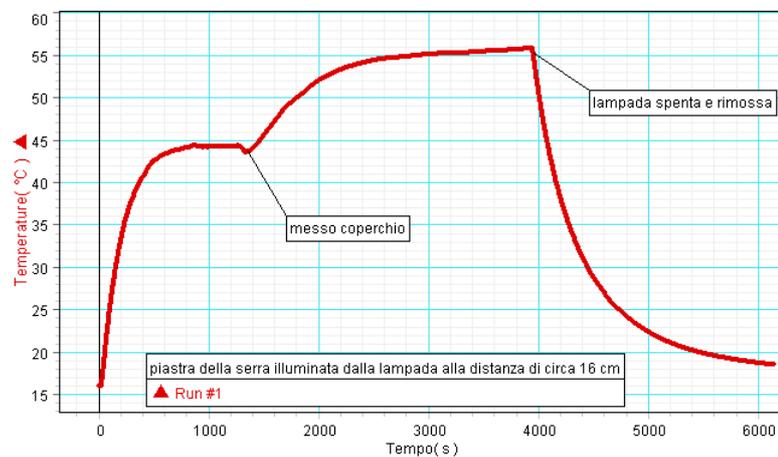


Fig. 2- Grafico della Temperatura in funzione del tempo della piastra di metallo nella scatola, con e senza il coperchio

Come si può spiegare la differenza dei valori massimi di temperatura raggiunti con e senza coperchio?

Inizieremo studiando un caso ideale semplificato e introdurremo poi progressivamente altri fattori e fenomeni implicati nell'esperimento.

## 2. Una serra nello spazio

Iniziamo studiando una situazione molto semplificata ma interessante, poi nei paragrafi successivi complicheremo le cose aggiungendo altri dettagli. Immaginiamo di portare la nostra piccola serra nello spazio vuoto, lontano da altre fonti di energia, dove non ci sono scambi di calore per conduzione e non c'è la radiazione dell'ambiente, c'è solo la radiazione che arriva dal Sole  $R_S$ .

Quando la scatola è posta al sole, la radiazione solare  $R_S$  che arriva sulla piastra è assorbita dalla piastra stessa (che è nera, cioè assorbe totalmente le radiazioni) e ne produce un aumento di temperatura. La piastra, come tutti i corpi, emette radiazione termica infrarossa  $R_P$ , in quantità che aumenta all'aumentare della temperatura. La temperatura della piastra aumenta fino a una temperatura  $T_1$  tale che il flusso di energia della radiazione infrarossa emessa è uguale al flusso di energia della radiazione solare assorbita  $R_S$ . Raggiunta tale situazione, la temperatura della piastra rimane stazionaria al valore  $T_1$ . Trascuriamo la radiazione emessa dal fondo della serra verso l'esterno, il che equivale a supporre che tra la piastra e il fondo ci sia uno strato di materiale molto isolante e che il fondo rimanga quindi a bassissima temperatura (se si vuole tenere conto anche di tale piccola energia emessa si deve considerare  $R_P$  come il valore totale dell'energia della radiazione emessa dalla piastra e dal fondo).

I flussi di energia nella situazione stazionaria per la piastra senza coperchio sono:

$$R_P = R_S$$

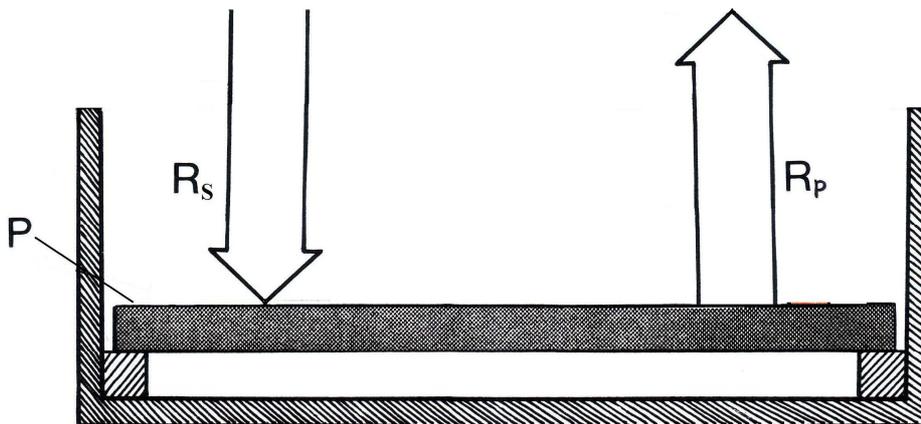


Fig. 3. Bilancio energetico di una serra nello spazio senza coperchio.

Poniamo ora il coperchio.

Consideriamo il caso di un coperchio "ideale" per le serre, che è trasparente a tutta la radiazione solare (tranne la componente nel lontano infrarosso, frazione molto piccola dell'intera radiazione solare) e assorbe tutta la radiazione termica infrarossa, cioè ha potere assorbente (assorbività)  $a_S=0$  per la radiazione solare e potere assorbente  $a_T=1$  per la radiazione termica infrarossa alle temperature considerate, diciamo fra  $-50^\circ\text{C}$  e  $200^\circ\text{C}$ . Ovviamente nessun materiale realizza esattamente queste condizioni, ma alcuni le approssimano abbastanza bene, magari con  $a_S=0,1$  e  $a_T=0,8-0,9$ . Il vetro è un ottimo esempio, e anche il materiale plastico del coperchio della piccola serra. Comunque l'assorbimento dipende sempre anche dallo spessore della lastra.

Il coperchio L riceve e assorbe energia dalla radiazione termica  $R_P$  emessa dalla piastra, quindi si riscalda ed emette radiazione verso l'esterno  $R_{Lu}$  (up) e verso la piastra  $R_{Ld}$  (down). Nella situazione stazionaria ora la piastra deve emettere una quantità di energia radiante infrarossa in grado di bilanciare l'energia che riceve dal Sole e quella che riceve dal coperchio  $R_{Ld}$ .

I flussi di energia nella situazione stazionaria sono i seguenti (vedi figura 4):

$$\begin{aligned} \text{per la piastra} & R_S + R_{Ld} = R_P \\ \text{per il coperchio} & R_P = R_{Lu} + R_{Ld}. \end{aligned}$$

Sommando, si ottiene:

$$R_S = R_{Lu} \quad \text{e se possiamo considerare } R_{Ld} \cong R_{Lu} \text{ (coperchio poco spesso e buon conduttore)}$$

si ha  $R_{Ld} \cong R_S$  e quindi  $R_P \cong 2R_S$

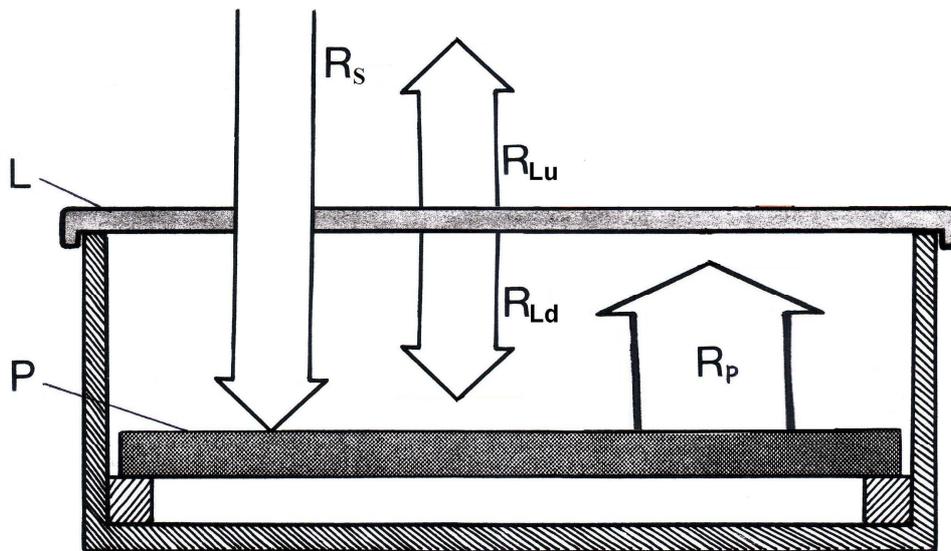


Fig. 4. Bilancio energetico di una serra nello spazio con coperchio.

Ciò significa che il flusso di radiazione dal coperchio alla piastra  $R_{Ld}$  è circa uguale a quello del sole così che l'energia totale che arriva alla piastra è il doppio dell'energia che arriva in assenza del coperchio e la piastra emette un'energia doppia di quella che arriva sulla piastra dal sole e di quella che emetteva senza coperchio. La temperatura della piastra nella situazione stazionaria è quindi più alta quando sulla scatola viene posto il coperchio. Per valutare questo aumento di temperatura dobbiamo ricorrere alla legge di Stefan-Boltzmann.

#### Calcolo dell'aumento di temperatura nella serra chiusa

L'energia emessa da un corpo per radiazione termica è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta (Legge di Stefan-Boltzmann)  $E_2/E_1=(T_2/T_1)^4$  quindi, in questo caso, essendo l'energia emessa dalla piastra con coperchio il doppio di quella emessa dalla piastra senza coperchio  $E_2/E_1=2$ , si ha  $(T_2/T_1)^4=2$ . Ne segue che il rapporto fra le temperature assolute della piastra con e senza il coperchio è approssimativamente  $T_2/T_1=(2)^{1/4} \approx 1,2$  cioè la temperatura assoluta aumenta del 20%. Per esempio, se  $T_1=44^\circ\text{C}=317\text{ K}$ , si ottiene  $T_2=380\text{ K}=107^\circ\text{C}$ .

È questo **l'effetto serra radiativo**: basta interporre un coperchio con opportune proprietà ottiche perché la piastra aumenti notevolmente di temperatura. È fondamentale per questo che il coperchio si comporti *diversamente* per la *radiazione solare* entrante e per la *radiazione infrarossa termica*: assorbimento molto basso per la prima e molto alto per la seconda.

Diamo dei numeri. Fuori dall'atmosfera, a distanze dal Sole uguali alla distanza Terra-Sole, l'energia della radiazione solare per unità di tempo e di area che arriva su una superficie perpendicolare alla direzione della radiazione è un valore noto e importante, detto *costante solare*:  $f_S=1367 \text{ W/m}^2$ . Su un oggetto la cui sezione perpendicolare alla radiazione è  $S_{\perp}$  arriva la potenza (energia per secondo)  $W_S=f_S \cdot S_{\perp}$ .

Per la potenza della radiazione termica emessa da un oggetto di area  $S$  vale la legge di Stefan-Boltzmann  $W=e\sigma T^4$  dove  $e$  indica il coefficiente di emissione termica e  $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ W(m}^2\text{K}^4)^{-1}$ . Il bilancio energetico per la piastra senza coperchio  $R_P = R_S$  diventa  $e\sigma T^4 = a f_S \cdot S_{\perp}$  dove  $a$  indica il coefficiente di assorbimento per la radiazione solare.

Se la piastra è perpendicolare alla radiazione si ha  $S=S_{\perp}$  e i due valori si semplificano. Se è inclinata di un angolo  $\theta$  rispetto alla direzione della radiazione incidente, sarà  $S_{\perp}=S \cdot \sin\theta$ . Inoltre, avendo supposto la piastra nera, si ha  $a=e=1$ .

Facendo i calcoli, si trova  $T_1=394 \text{ K} = 121^{\circ}\text{C}$ . Ben calda, dunque.

Con il coperchio, la temperatura assoluta della piastra aumenta del 20% e diventa:

$T_2=1,2 \cdot T_1=1,2 \cdot 394 \text{ K} = 473 \text{ K} = 200^{\circ}\text{C}$ . Caldissima.

#### *Una serra sferica nello spazio*

Se invece di una piastra consideriamo una sfera di raggio  $r$ , l'area totale della superficie è  $S=4\pi r^2$  mentre l'area perpendicolare alla radiazione è solo  $S_{\perp}=\pi r^2$  cioè  $S=4S_{\perp}$ . Il bilancio energetico si esprime allora con la relazione  $\sigma T^4 = f_S \cdot S_{\perp}$  cioè  $\sigma T^4 = f_S \cdot S_{\perp}/S = f_S/4$ .

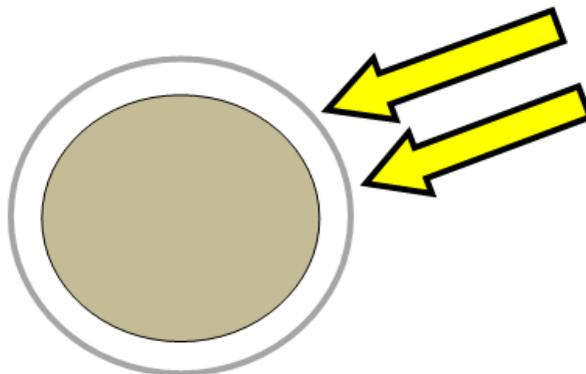


Figura 5. Una serra sferica nello spazio, ovvero un pianeta.

Ovviamente solo una metà della sfera è colpita dalla radiazione solare e con inclinazione differente da zona a zona, per cui si avranno temperature molto diverse sulle diverse parti della superficie; ciò anche se si fa ruotare la sfera, in modo che tutte le parti siano a turno illuminate, perché comunque le inclinazioni sono diverse. Si deve quindi parlare di temperatura media.

La temperatura media  $T_1$  sulla superficie della sfera sarà più bassa di quella sulla piastra piana, a causa del fattore 4 fra  $S_{\perp}$  e  $S$ . Facendo i calcoli si trova  $T_1 = 278,6 \text{ K} = 5,6^{\circ}\text{C}$ . Molto più freddo!

Col coperchio la sfera avrà temperatura  $T_2 = 1,2 \cdot T_1 = 334,3 \text{ K} = 61,3^{\circ}\text{C}$ . Abbastanza caldo.

Il caso della sfera è importante, perché è quello della Terra, degli altri pianeti e della Luna.

Solo che in generale la Luna e i pianeti non assorbono totalmente la radiazione solare, ma ne riflettono una parte, cioè il coefficiente  $a$  non è uguale a 1 (la frazione di energia riflessa si chiama *albedo*). D'altronde, è per questo che possiamo vederli, grazie alla luce solare riflessa, perché la radiazione termica emessa è nell'infrarosso, quindi invisibile ai nostri occhi.

In genere invece si può considerare  $e=1$  per le temperature dei pianeti.

Per la Luna è  $a=0,89$  per cui si ha  $\sigma T^4 = 0,89 \cdot f_s/4$  e si ottiene  $T_1 = 271 \text{ K} = -2^\circ\text{C}$ .

Ma a noi interessa di più la Terra, che ha albedo del 30%, cioè  $a=0,7$  e quindi la temperatura media sarebbe più bassa di quella della Luna:  $T_1=254 \text{ K}=-19^\circ\text{C}$ . Troppo freddo per noi uomini e per molti altri organismi viventi. Ma appunto l'atmosfera, come un coperchio speciale, provoca un effetto serra e fa aumentare la temperatura della piastra, cioè della superficie terrestre. Se ci fosse un effetto serra totale, si è visto che la temperatura aumenterebbe del 20% e quindi sarebbe  $T_2 = 1,2 \cdot 254 \text{ K} = 304 \text{ K} = 32^\circ\text{C}$ . In realtà, la temperatura media della Terra è invece  $289 \text{ K} = 16^\circ\text{C}$ . Il che vuol dire che c'è un effetto serra parziale, che ci regala una temperatura abbastanza mite per noi, in media. Il coperchio, cioè l'atmosfera, non assorbe tutta la radiazione infrarossa emessa dalla piastra Terra, parte di questa radiazione sfugge via nello spazio, inoltre il coperchio assorbe anche parte della radiazione solare. Ma su tutto questo ritorneremo alla fine.

### 3. Esperimento della piccola serra: analisi del caso senza coperchio

Torniamo ora all'esperimento. Non siamo più nel vuoto quindi nei bilanci energetici intervengono anche i flussi di calore e la radiazione termica dell'ambiente. Nel caso di scatola aperta gli elementi chiave da considerare sono i seguenti:

- All'inizio la scatola è all'ombra, in equilibrio termico con l'aria ambiente a temperatura  $T_o$ . Non c'è scambio di calore con l'esterno e l'energia della radiazione termica infrarossa emessa dalla piastra uguaglia esattamente quella della radiazione ricevuta dall'ambiente  $R_E$ .
- Quando la scatola è posta al sole, la radiazione solare  $R_s$  che entra nella scatola è assorbita dalla piastra nera e ne produce un aumento di temperatura.
- A causa della maggiore temperatura della piastra rispetto all'aria, l'energia della radiazione infrarossa emessa dalla piastra  $R_p$  diventa maggiore di quella ricevuta dall'ambiente  $R_E$ . Inoltre, del calore passa dalla piastra all'esterno attraverso l'aria in contatto con essa e attraverso il fondo e le pareti della scatola ( $Q_p$  e  $Q'_p$ ). La convezione produce un continuo scambio di aria fra l'interno e l'esterno della scatola favorendo lo scambio di calore con l'esterno.
- La temperatura della piastra aumenta fino a che la differenza di temperatura con l'ambiente  $T_1-T_o$  è tale che il flusso netto di "energia uscente" (calore ceduto  $Q_p+Q'_p$  più differenza fra energia della radiazione infrarossa emessa e di quella ricevuta dall'ambiente  $R_p-R_E$ ) è uguale al flusso di radiazione solare assorbita  $R_s$ . Raggiunta tale situazione, la temperatura della piastra rimane stazionaria al valore  $T_1$ , che deve ovviamente essere maggiore della temperatura dell'aria. Il bilancio dell'energia in entrata e in uscita nella situazione stazionaria è mostrato in Figura 6.

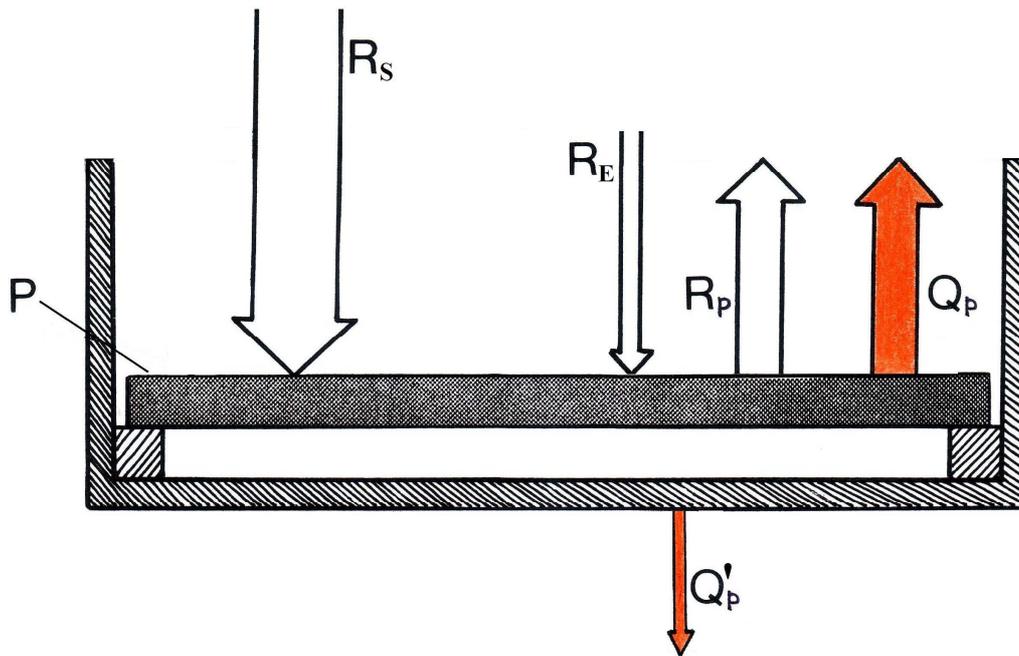


Fig. 6. Flussi di radiazione e di calore nella serra senza coperchio

Nella figura, la dimensione delle frecce è qualitativamente legata al valore del flusso di energia che rappresentano. I differenti flussi sono:

$R_s$  : radiazione solare entrante nella scatola;

$R_e$  : radiazione termica proveniente dall'ambiente;

$R_p$  : radiazione emessa dalla piastra;

$Q_p$  : flusso di calore dalla piastra all'aria;

$Q'_p$  : flusso di calore dalla piastra all'esterno attraverso le pareti della scatola.

I flussi di energia nella situazione stazionaria sono:

$$R_s = (R_p - R_e) + Q_p + Q'_p \quad (1)$$

Cioè l'energia della radiazione solare assorbita dalla piastra deve essere uguale all'energia ceduta dalla piastra all'ambiente in forma di calore ( $Q_p + Q'_p$ ) e di radiazione ( $R_p - R_e$ ). Entrambe queste energie cedute aumentano all'aumentare della differenza di temperatura fra piastra e ambiente.

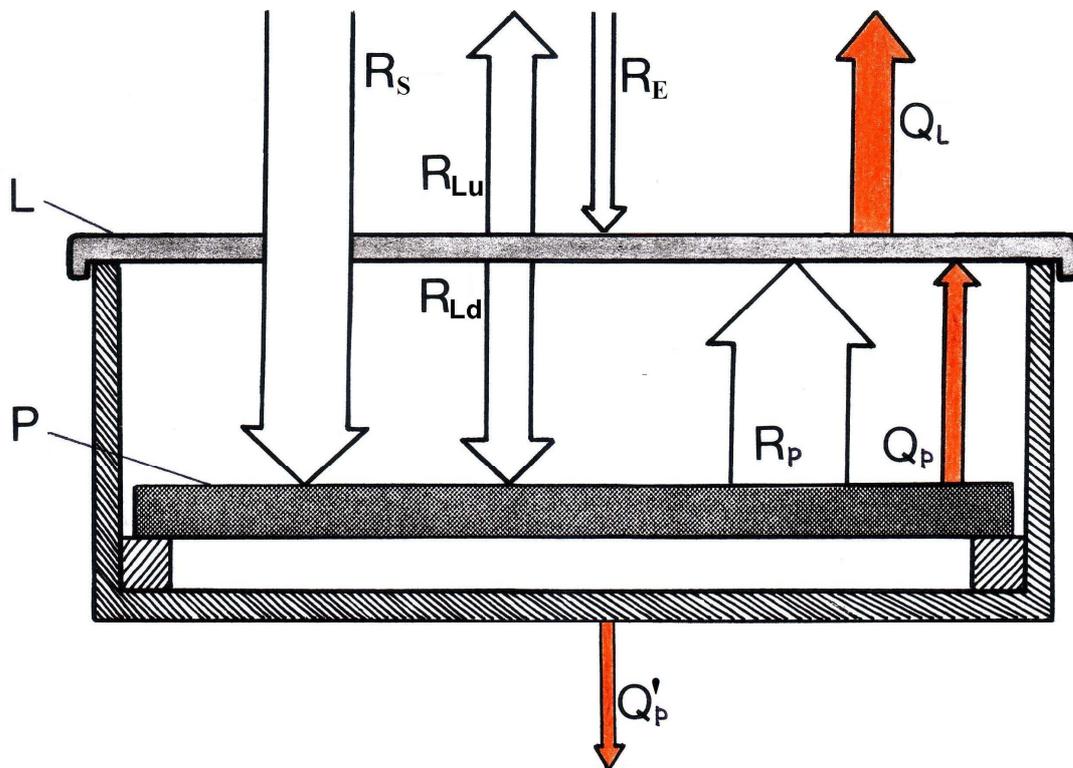
#### 4. Esperimento della piccola serra: studio del caso con il coperchio

Nel caso di scatola chiusa con il coperchio:

- Quasi tutta la radiazione solare passa attraverso il coperchio senza essere assorbita (ad eccezione della radiazione ultravioletta e del lontano infrarosso che vengono assorbite dal coperchio). Quindi la radiazione solare che arriva sulla piastra è quasi uguale a quella del caso precedente e viene assorbita dalla piastra nera.
- La radiazione infrarossa emessa dalla piastra  $R_p$  e quella che arriva dall'ambiente  $R_e$  non attraversano il coperchio *ma sono da esso quasi totalmente assorbite, per cui la temperatura del coperchio aumenta*. L'aria nella scatola riceve calore dalla piastra, ma il coperchio impedisce uno scambio di aria con l'esterno.

- Il coperchio emette radiazione verso l'esterno  $R_{Lu}$  e verso l'interno della scatola  $R_{Ld}$ , riceve energia dalla radiazione termica emessa dall'ambiente  $R_E$  e da quella emessa dalla piastra  $R_p$ , inoltre cede calore  $Q_L$  all'aria esterna e riceve calore  $Q_p$  dall'aria interna. La temperatura del coperchio aumenta fino a che il flusso di energia uscente diventa uguale al flusso di energia entrante. Raggiunta tale situazione, la temperatura del coperchio rimane stazionaria al valore  $T_L$ .
- Nella condizione stazionaria la piastra deve emettere, come radiazione e come calore, una quantità di energia in grado di bilanciare l'energia che riceve dal Sole e quella che riceve dalla radiazione infrarossa emessa dal coperchio verso il basso  $R_{Ld}$ .

Il bilancio dell'energia in entrata e in uscita è mostrato in Figura 7.



**Fig. 7.** Flussi di radiazione e di calore nella serra con coperchio

Nella figura, la dimensione delle frecce è qualitativamente legata al valore del flusso di energia che rappresentano. I differenti flussi sono:

$R_S$  : radiazione solare entrante nella scatola;

$R_E$ : radiazione termica 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;

$Q'_p$  : flusso di calore dalla piastra all'esterno attraverso le pareti della scatola.

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

Nella figura si è considerato il caso di un coperchio “ideale”, trasparente a tutta la radiazione solare (tranne quella nel lontano infrarosso) e che assorbe tutta la radiazione termica infrarossa (ovviamente nessun coperchio reale realizza esattamente queste condizioni). Trascuriamo inoltre, per ora, il calore  $Q'_p$  ceduto attraverso il fondo e le pareti della scatola.

Con queste ipotesi, i flussi di energia nella situazione stazionaria sono:

$$\text{per la piastra} \quad R_S = (R_P - R_{Ld}) + Q_P \quad (2a)$$

$$\text{per il coperchio} \quad (R_P - R_{Ld}) + Q_P = (R_{Lu} - R_E) + Q_L \quad (2b)$$

Sommando le due relazioni si ottiene:

$$R_S = (R_{Lu} - R_E) + Q_L \quad (3)$$

Vediamo le conseguenze sulle temperature del coperchio e della piastra.

### *Il coperchio*

L'equazione (3) mostra chiaramente che la temperatura del coperchio deve essere maggiore della temperatura dell'ambiente: solo in questo caso, infatti, i termini  $(R_{Lu} - R_E)$  e  $Q_L$  sono positivi e quindi la loro somma può uguagliare  $R_S$ . In altre parole, la (3) ci dice che nella situazione stazionaria il coperchio deve cedere all'aria via radiazione e via calore una energia uguale a quella della radiazione solare più quella dell'ambiente in arrivo, e quindi deve essere a temperatura maggiore dell'ambiente.

### *La piastra*

La piastra deve emettere una quantità di energia in grado di bilanciare l'energia che riceve dal Sole e quella che riceve dalla radiazione infrarossa emessa dal coperchio verso il basso  $R_{Ld}$ . Ma quest'ultima è maggiore dell'energia della radiazione infrarossa dell'ambiente  $R_E$  che arrivava sulla piastra nel caso senza coperchio, perché, come mostrato prima, la temperatura del coperchio è maggiore di quella dell'aria esterna  $T_L > T_o$ . Quindi, **la temperatura stazionaria della piastra  $T_2$  è maggiore di quella raggiunta nel caso precedente senza coperchio:  $T_2 > T_1$ .**

### *Discussione delle approssimazioni fatte*

Le approssimazioni fatte influiscono in vario modo sul risultato. In effetti:

- a) Una parziale riflessione  $R'_s$  e un parziale assorbimento  $R''_s$  della radiazione solare da parte del coperchio fanno diminuire l'energia solare che arriva sulla piastra e quindi la sua temperatura finale  $T_2$  e la radiazione termica emessa. Per il coperchio della piccola serra, l'assorbimento è maggiore quando la radiazione incidente non è quella solare ma quella emessa da una lampada a incandescenza, il cui spettro è più spostato verso il rosso rispetto a quello del sole. Il grafico in figura 2, infatti, mostra un immediato e temporaneo piccolo abbassamento della temperatura della piastra quando viene applicato il coperchio.
- b) Una parziale trasparenza del coperchio all'infrarosso termico fa sì che una parte  $R'_p$  della radiazione emessa dalla piastra sfugga all'esterno e quindi si ha una diminuzione di temperatura del coperchio, che riceve meno energia. Di conseguenza, si ha anche una diminuzione di temperatura della piastra, perché riceve meno energia dal coperchio. Questa diminuzione è compensata solo in parte dal fatto che in questo caso il coperchio lascia passare anche una parte  $R'_E$  della radiazione dell'ambiente esterno, che quindi arriva direttamente sulla piastra; infatti, essendo la piastra a temperatura più elevata dell'ambiente, sarà  $R'_p > R'_E$ .

c) Il calore ceduto attraverso il fondo e le pareti della scatola  $Q'_P$  consente alla piastra di compensare l'energia solare assorbita emettendo meno radiazione termica e quindi con una minore differenza di temperatura con l'ambiente esterno.

Formalmente, introducendo queste quantità, le equazioni 2 e 3 diventano:

$$\text{per la piastra} \quad R_S - R'_S - R''_S + R'_E = (R_P - R_{Ld}) + Q_P + Q'_P \quad (4a)$$

$$\text{per il coperchio} \quad R''_S + (R_P - R'_P - R_{Ld}) + Q_P = (R_{Lu} - (R_E - R'_E)) + Q_L \quad (4b)$$

Sommando le due relazioni si ottiene:

$$R_S - R'_S - R'_P = (R_{Lu} - R_E) + Q_L + Q'_P$$

I tre effetti prima indicati tendono tutti a fare diminuire le temperature della piastra, cioè a far diminuire l'effetto serra. C'è invece un altro importante effetto che tende a fare aumentare la temperatura della piastra. Come accennato prima, il coperchio impedisce la circolazione d'aria con l'esterno per convezione, di conseguenza la conduzione termica fra piastra e ambiente esterno è minore rispetto al caso senza coperchio. Ciò fa aumentare la differenza di temperatura fra piastra e coperchio ambiente esterno, perché è necessaria una maggiore differenza di temperatura per ottenere lo stesso flusso di energia (per calore e per radiazione) dalla piastra. È come se si fosse aggiunto un isolante fra piastra e aria esterna, che fa rallentare il flusso di calore e quindi mantiene più alta la temperatura della piastra scaldata dalla radiazione solare. È il cosiddetto *effetto serra convettivo*, che può essere molto importante e anche preponderante in certe condizioni rispetto all'*effetto serra radiativo*, su cui abbiamo ragionato finora.

Se al limite il coperchio fosse completamente trasparente a tutte le radiazioni entranti e uscenti, esso non aumenterebbe la sua temperatura per effetto di assorbimento di radiazione, tuttavia il blocco della circolazione dell'aria farebbe diminuire la conduzione termica e quindi si avrebbe una maggiore temperatura della piastra rispetto al caso senza coperchio, cioè un *effetto serra convettivo*.

### 5. Bilancio energetico della Terra, effetto serra e riscaldamento globale.

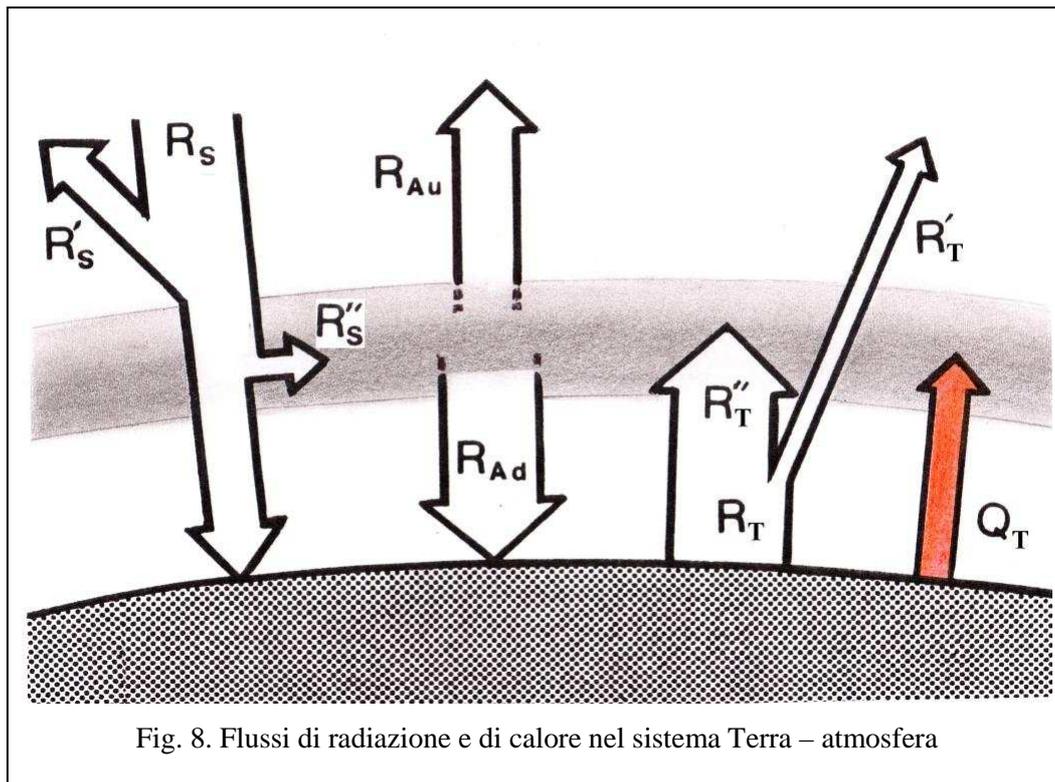
Per costruire un modello dell'effetto serra terrestre, si può istituire un'analogia tra gli elementi del sistema atmosfera-Terra e quelli della piccola serra:

- 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 costituenti principali sono:  $N_2 \cong 78\%$ ;  $O_2 \cong 20\%$ ;  $Ar \cong 1\%$ ;  $H_2O \cong 0.33\%$ ;  $CO_2 \cong 0.03\%$ ) gioca lo stesso ruolo del coperchio, è trasparente per la maggior parte della radiazione solare, ma assorbe la maggior parte della 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 nella regione del lontano infrarosso, sono chiamati "gas serra". Questi gas emettono radiazione infrarossa 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 schematicamente nella Figura 8.



In questo caso, i vari flussi di energia sono i seguenti:

$R_s$  : radiazione solare;

$R'_s$  : radiazione solare riflessa dall'atmosfera e dalla superficie della Terra;

$R''_s$  : radiazione solare assorbita dall'atmosfera, in particolare dalle nuvole;

$R_T$  : radiazione emessa dalla Terra;

$R'_T$  : parte della radiazione emessa dalla Terra che attraversa l'atmosfera ed esce nello spazio;

$R''_T$  : parte della radiazione emessa dalla Terra che è assorbita dai gas serra e dalle nuvole;

$Q_T$  : rappresenta due contributi e cioè 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 ( $R''_T$ ) e dell'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 e si parla infatti di *effetto serra anomalo*.

Nel paragonare l'atmosfera al coperchio della serra, è importante sottolineare che non può esserci nessun flusso di calore verso lo spazio esterno. Inoltre, la radiazione termica proveniente dall'ambiente esterno è del tutto trascurabile. Sulla superficie della Terra arriva un flusso di energia radiante emesso dall'atmosfera dello stesso ordine di grandezza di quello che arriva dal Sole.

Tuttavia, poiché la temperatura dell'atmosfera non è uniforme lungo la verticale, essa irradia di più verso la superficie della Terra che verso lo spazio esterno, così  $R_{Ad} > R_{Au}$ .

Possiamo applicare le equazioni (4a) e (4c) al bilancio energetico della Terra, eliminando i termini relativi agli scambi di calore con l'esterno  $Q'_P$  e  $Q_L$  e alla radiazione dell'ambiente  $R_E$ . Nei vari termini sostituiamo la Terra T alla piastra P e l'atmosfera A al coperchio L. Otteniamo:

$$R_S - R'_S - R''_S = (R_T - R_{Ad}) + Q_T \quad (5a)$$

$$R_S - R'_S - R'_T = R_{Au} \quad (5c)$$

La figura 8 rappresenta uno schema semplificato del bilancio energetico della Terra, in cui abbiamo trascurato dettagli non essenziali per la comprensione del fenomeno dell'effetto serra e del problema del riscaldamento globale, allo scopo di facilitare il ragionamento. Una rappresentazione più completa è quella fornita dalla figura 9. Confrontate le figure 8 e 9 e cercate la corrispondenza fra i flussi indicati nella figura 8 e quelli della figura 9, assegnando i valori numerici corrispondenti.

Verificate la validità delle relazioni (5a) e (5c) con i dati della figura 9.

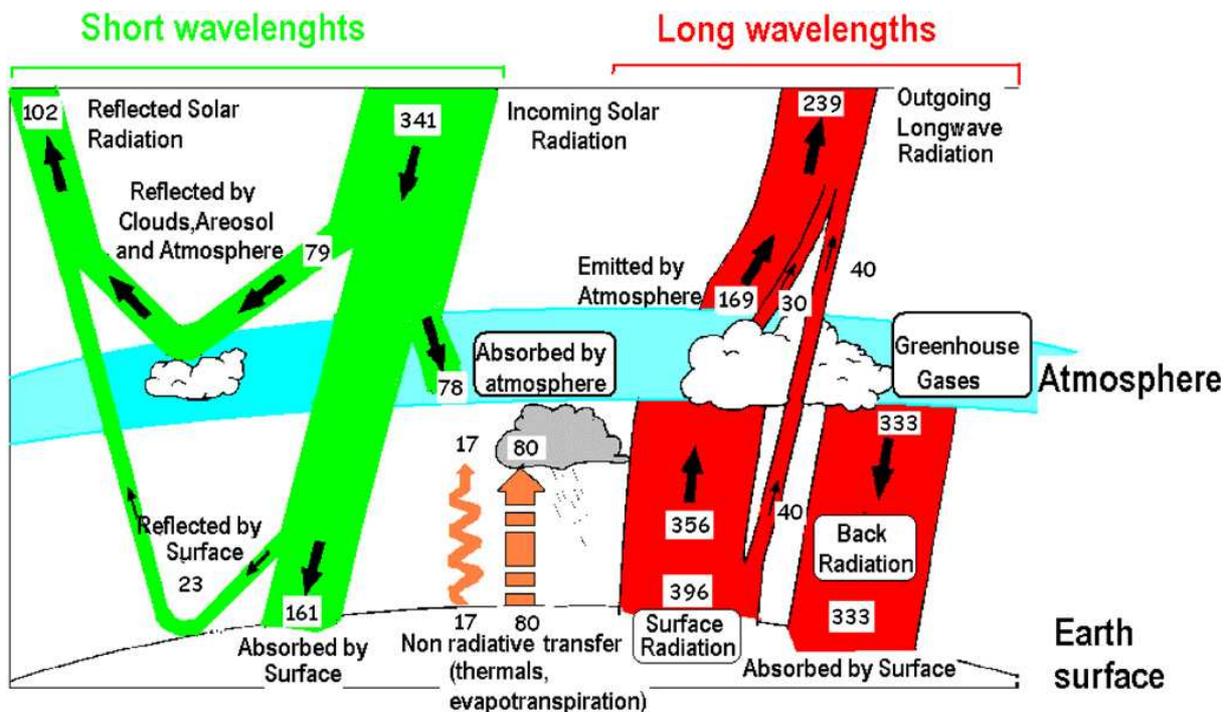


Fig. 9. Bilancio energetico del sistema Terra (da Trenberth et al. 2009).

I valori numerici sono in unità standard del S.I., cioè  $W/m^2$