



Area Previsione e Monitoraggio Ambientale

Torino, 20-9-2006

I meccanismi del forcing climatico (radiazione solare, effetto serra, aerosol)



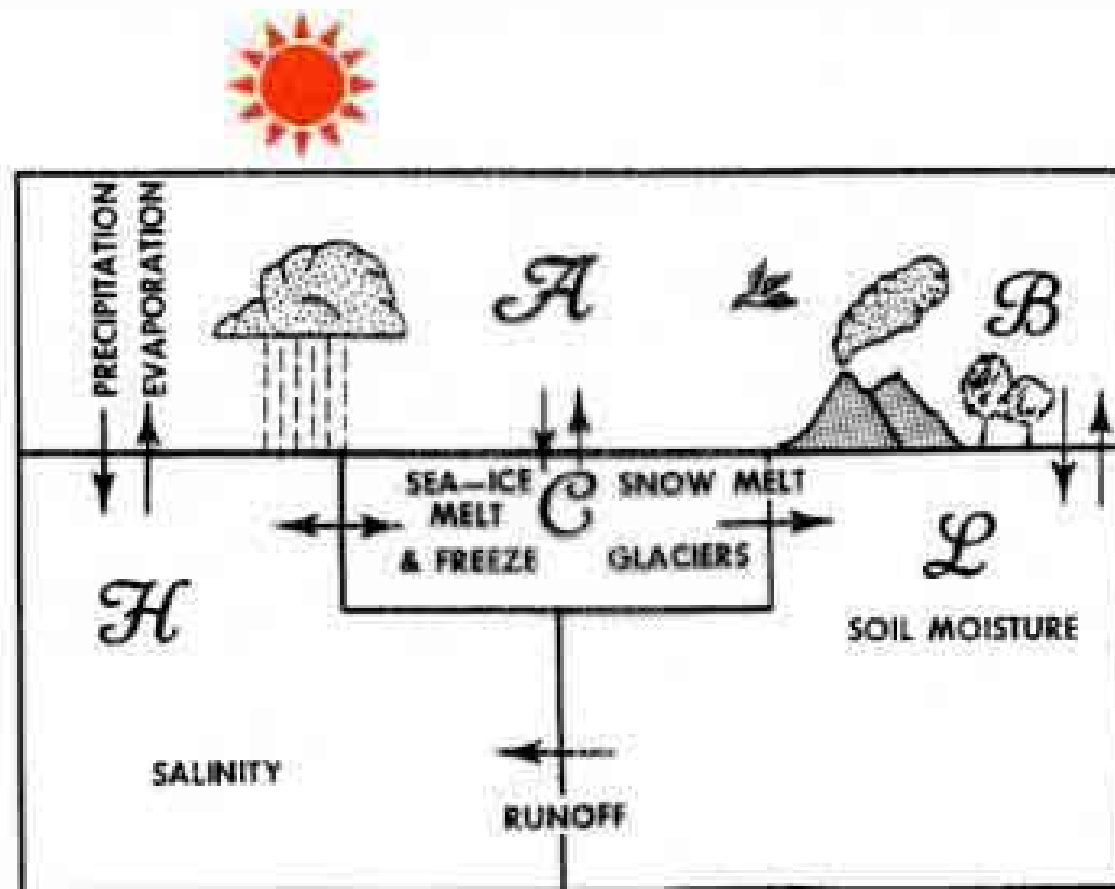
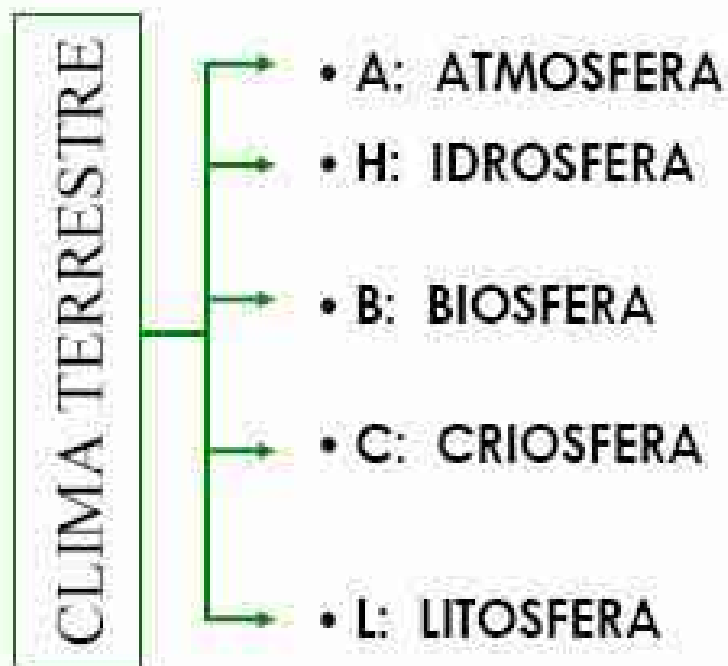
Corso-Laboratorio di Educazione Ambientale

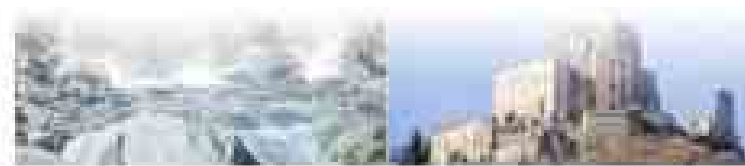
Modulo "Il Cambiamento Climatico"

Dott. Giovanni Paesano



Sistema Climático



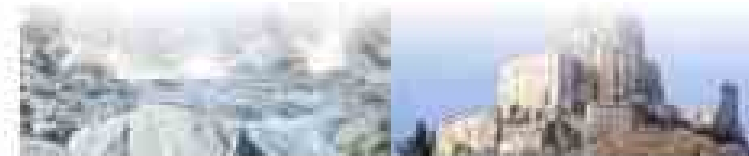


Quali sono le forzanti del clima terrestre? Che cosa agisce sul clima della Terra?

Le FORZANTI del
CLIMA TERRESTRE

- la RADIAZIONE SOLARE
- L' EFFETTO SERRA dell'atmosfera
- Gli AEROSOL





Le forzanti del clima terrestre: il SOLE

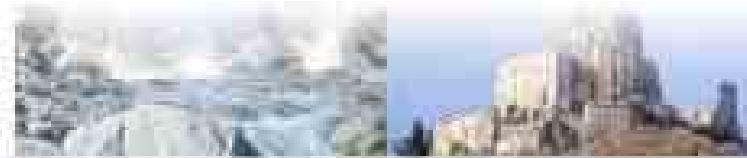
Le FORZANTI del
CLIMA TERRESTRE

- la **RADIAZIONE SOLARE**

- L' **EFFETTO SERRA** dell'atmosfera

- Gli **AEROSOL**





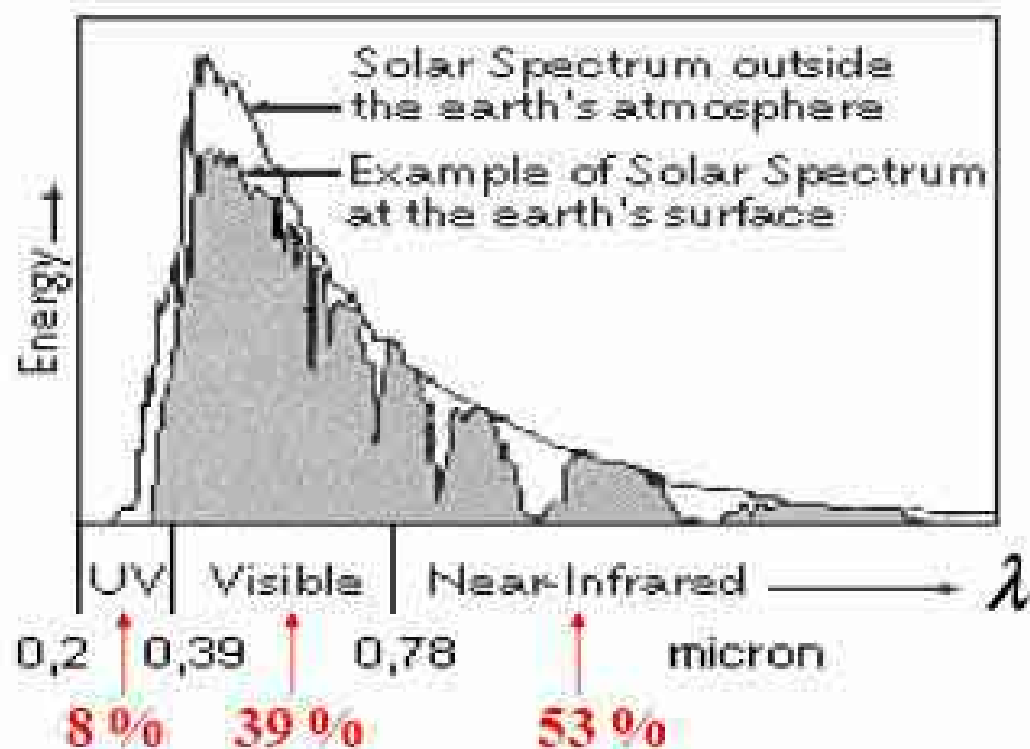
Il Sole

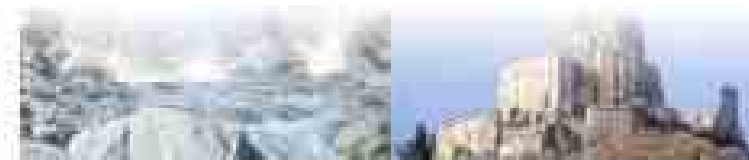


Emette una radiazione
che copre l'intero spettro elettromagnetico
(dall'ultravioletto all'infrarosso),

secondo la legge
fondamentale:

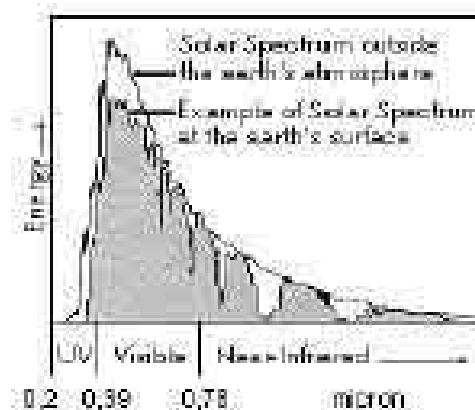
$$E = \frac{hc}{\lambda}$$



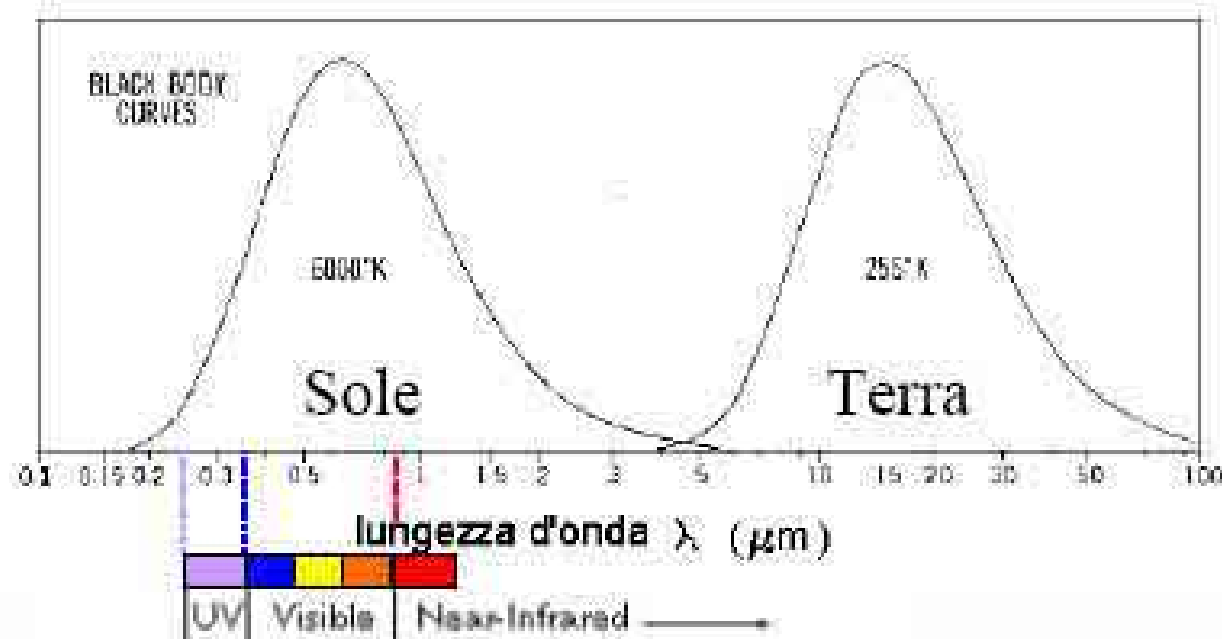


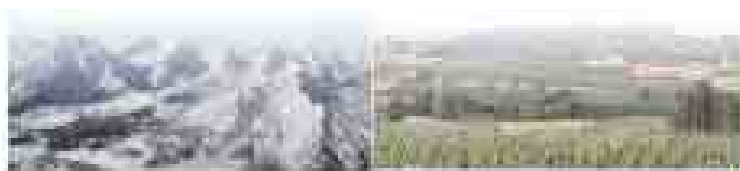
Il Sole

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$



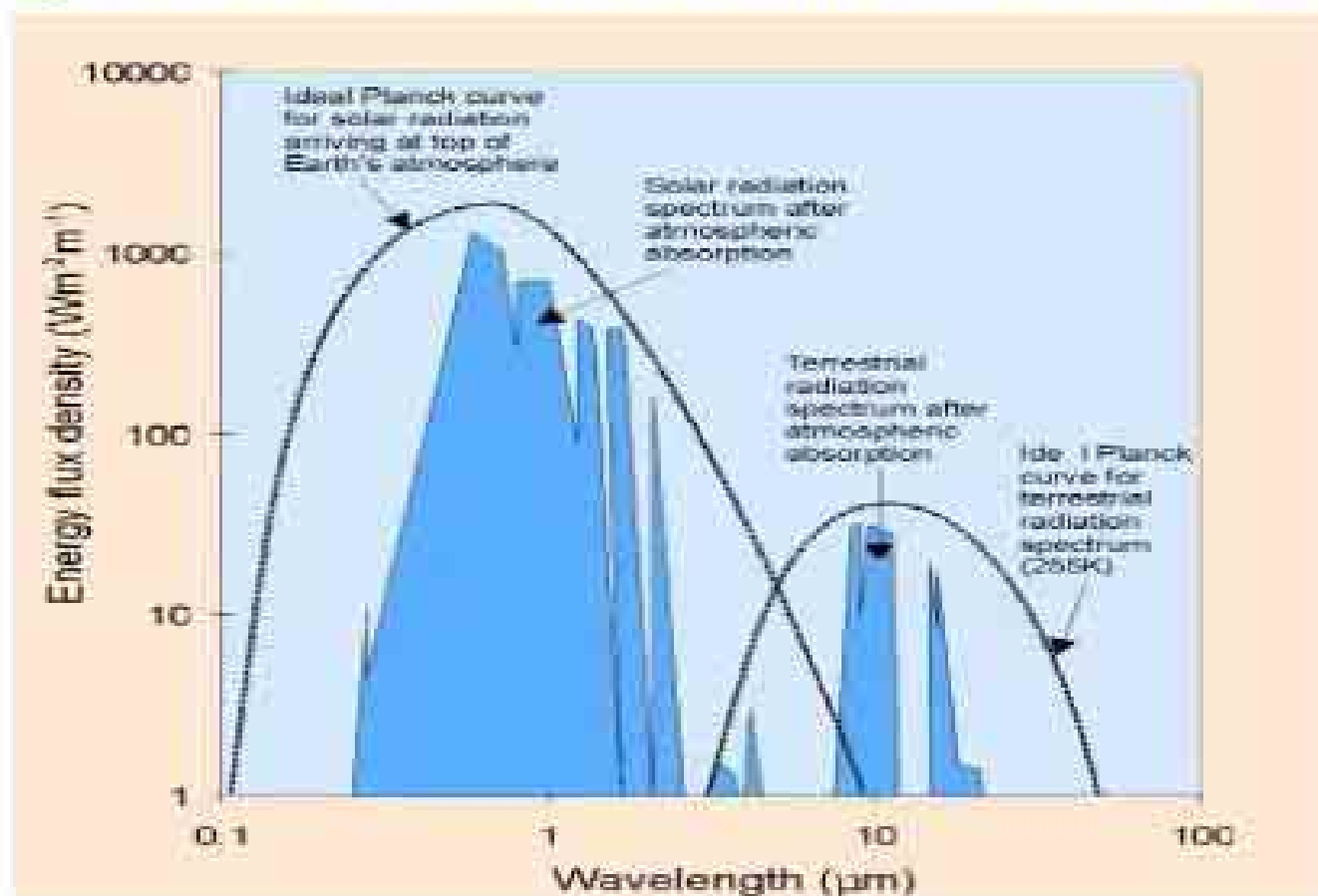
Radiazione emessa
 dal Sole
 e dalla Terra:

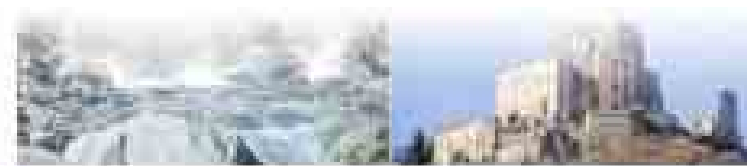




Il Sole

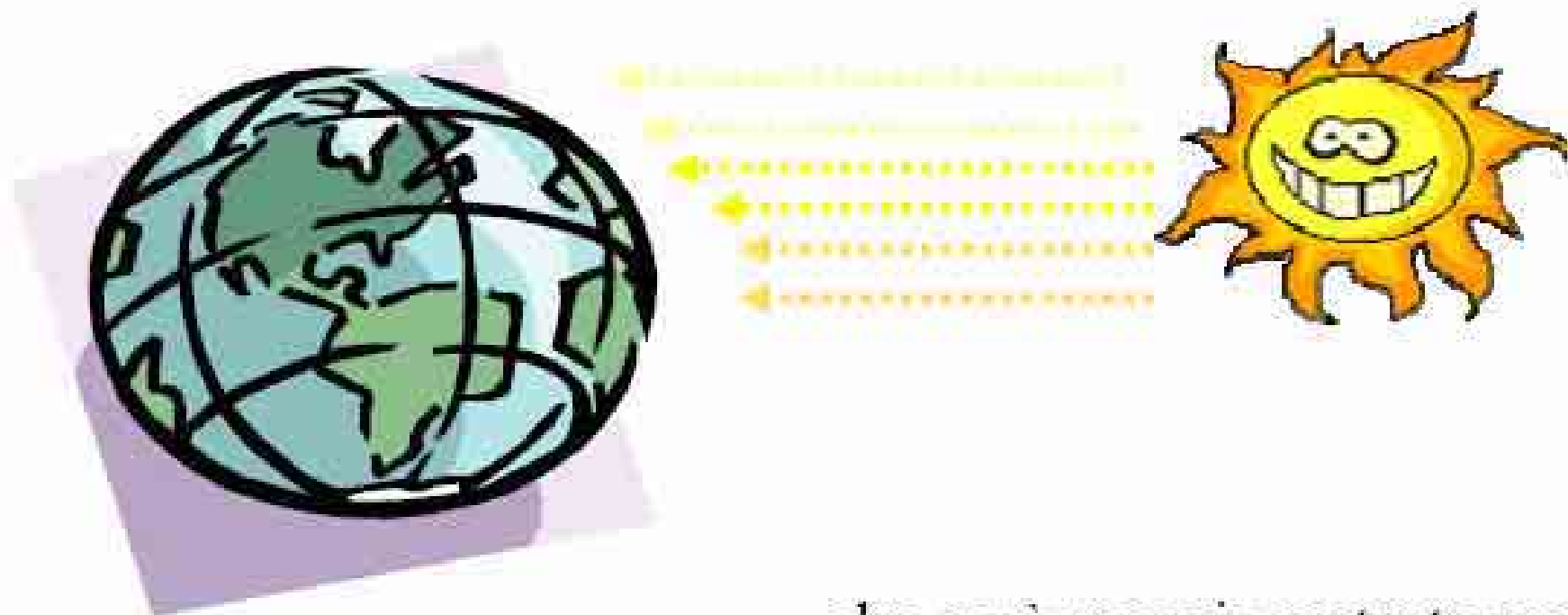
Distribuzione della energia solare che entra nella Terra e della energia terrestre che il suolo emette verso lo spazio



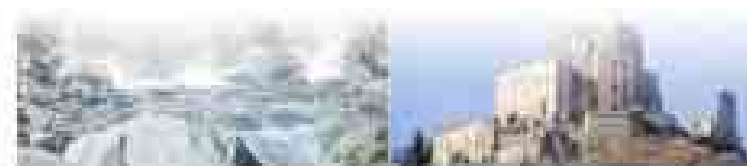


Il Sole

All'esterno dell'atmosfera terrestre,
il flusso di radiazione solare ha un'intensità di circa 1360 W/m^2 ,
nota come “costante solare”...



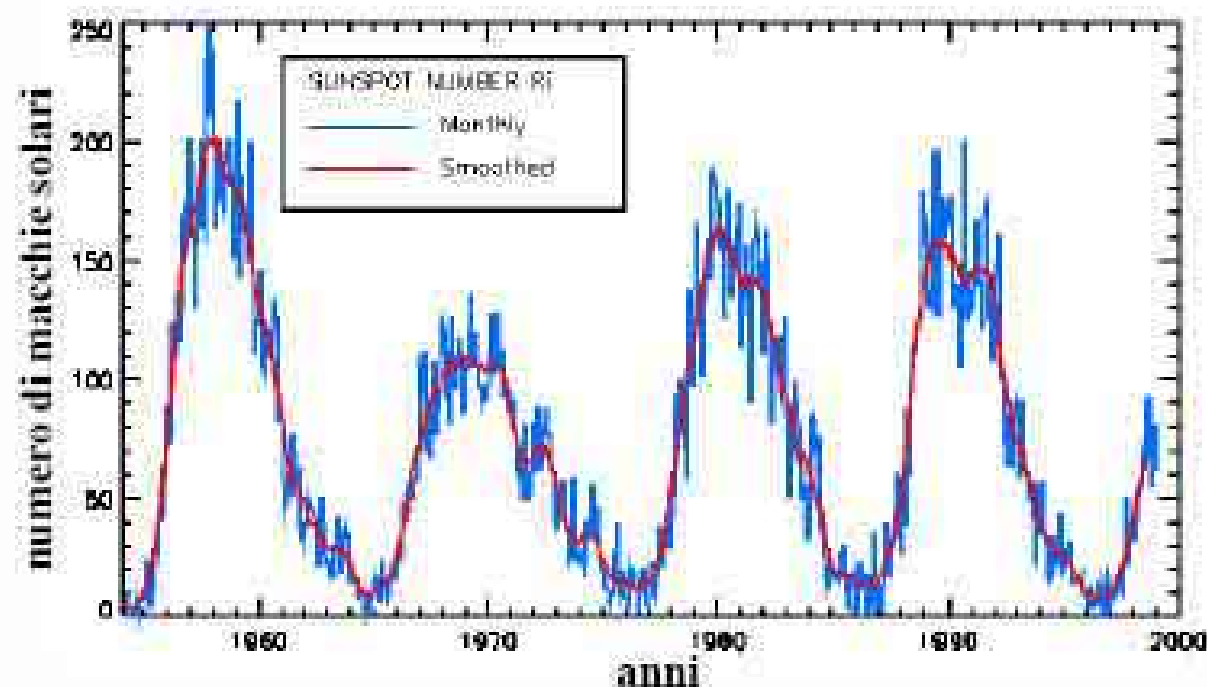
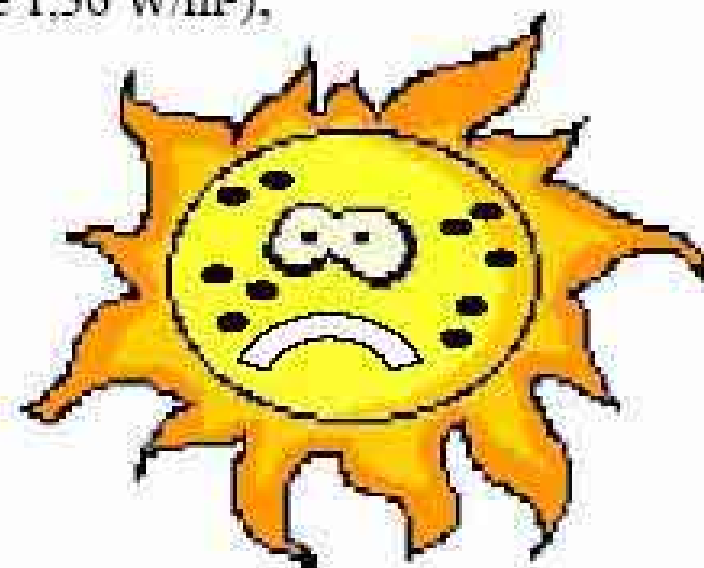
...che, però, proprio costante non è!



Il Sole

Infatti la “costante solare” varia del 0,1% (cioè 1.36 W/m^2), su scala pluri-decennale.

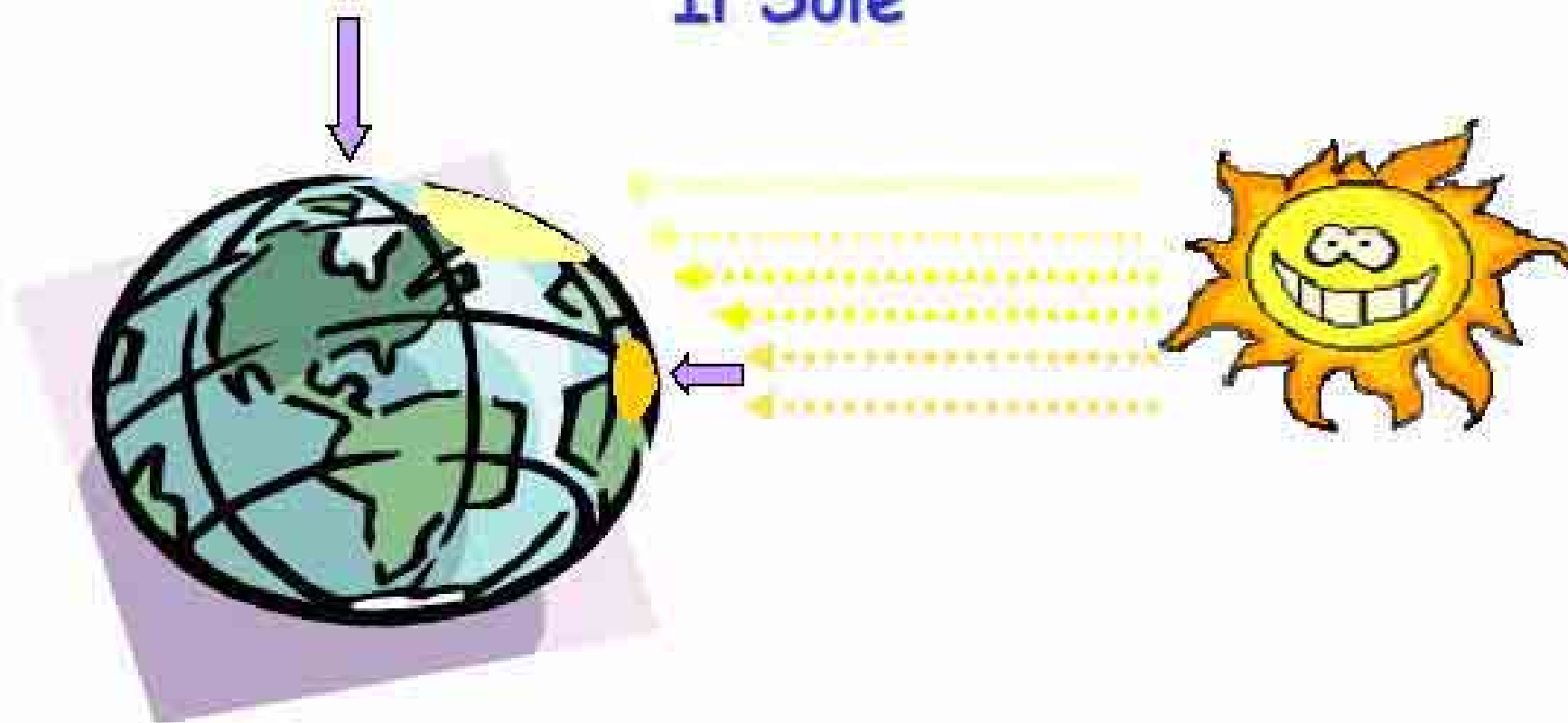
Esiste un **ciclo solare undecennale** (11 anni), legato alla comparsa **delle macchie solari** sul disco del Sole.



Le macchie solari, legate ad interazioni del campo magnetico solare, hanno una temperatura “fredda” di $4'600 \text{ K}$ e un diametro da $2'000$ a $200'000 \text{ km}$.



Il Sole



A causa della forma rotonda (e non piatta) della Terra e della sua posizione variabile rispetto al Sole, l'energia fornita dalla radiazione solare è distribuita in modo **NON** uniforme sulla superficie terrestre.

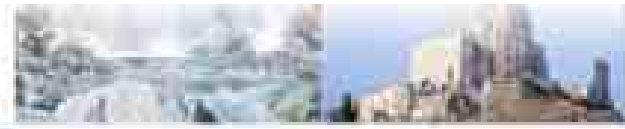


Il Sole

Al polo...



all'equatore

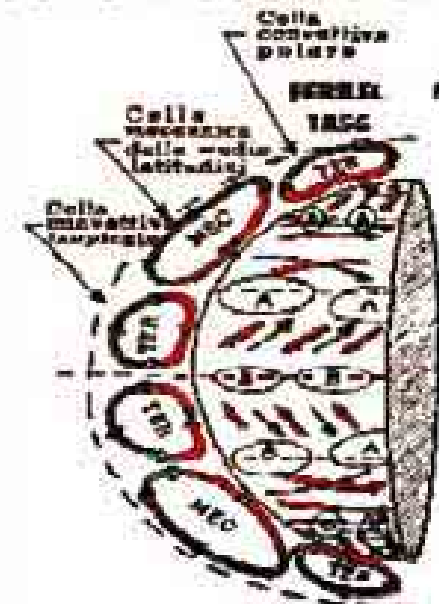
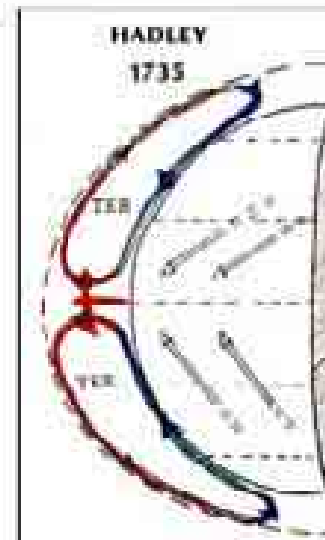


Il Sole

Ma l'**equatore** è generoso...

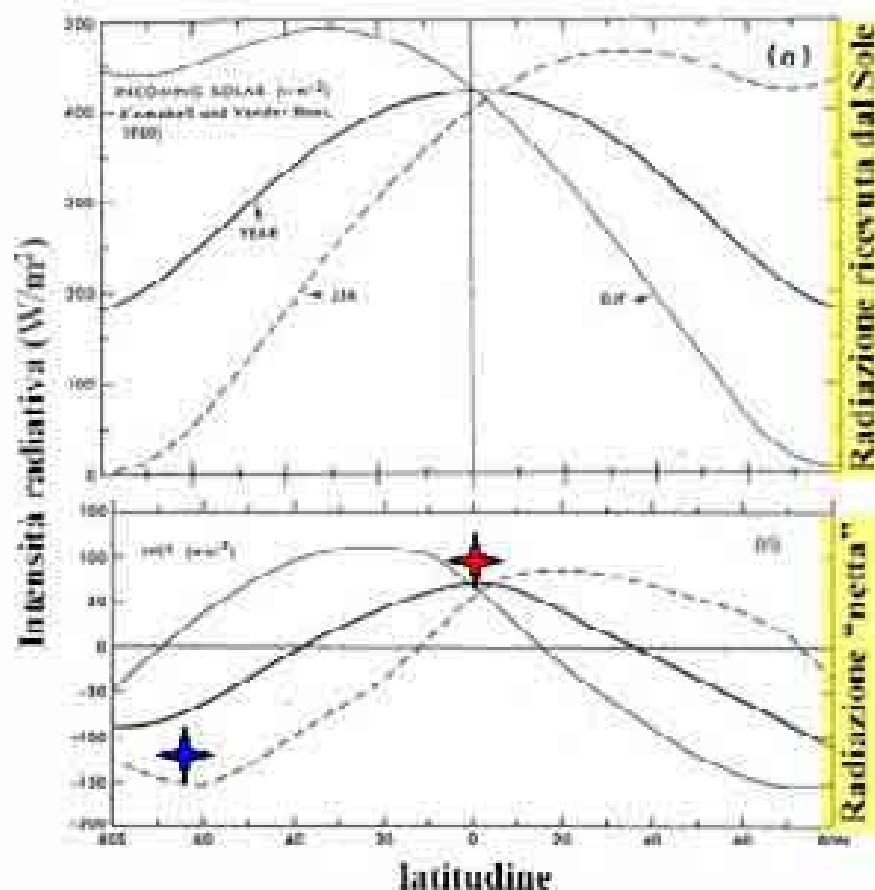
(perché si adegua alle leggi della natura che tende sempre all'uniformità)

... e regala un po' del suo calore ai **poli**, innescando così una circolazione delle masse d'aria.





Il Sole



Ecco il profilo medio della radiazione (entrante ed "entrante - uscente") misurata in alta atmosfera;

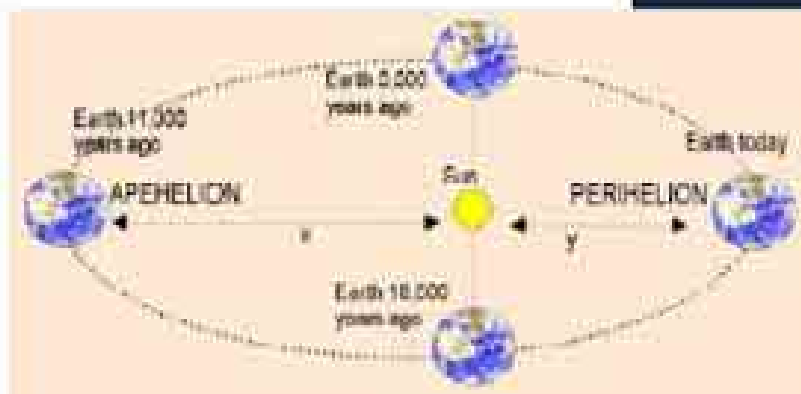
integrando la radiazione netta su tutto il globo si ottiene zero: il sistema è naturalmente in equilibrio.

Flusso radiativo netto:
 +70 W/m² all'equatore
 -100 W/m² sopra i 40° lat.



Il Sole

Il ciclo stagionale
del moto di rivoluzione
della Terra intorno al Sole

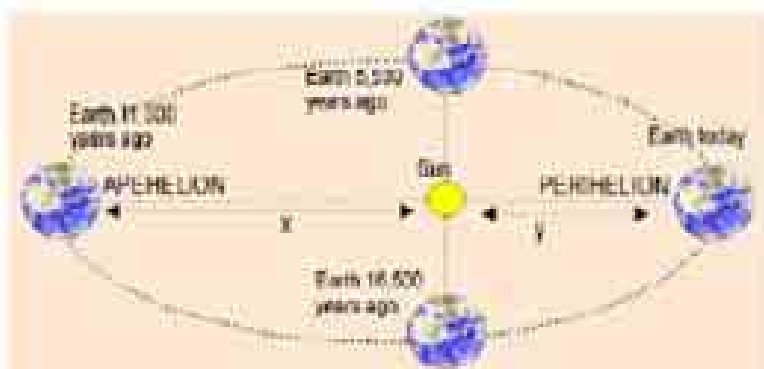


*Ogni 11'000 anni circa
(cioè con un periodo di circa 22'000 anni)
le stagioni si invertono tra Afelio e Perielio*



Il Sole

Variazioni dell'energia solare entrante:



Precessione

La precessione ha due componenti: una precessione assiale e una ellittica

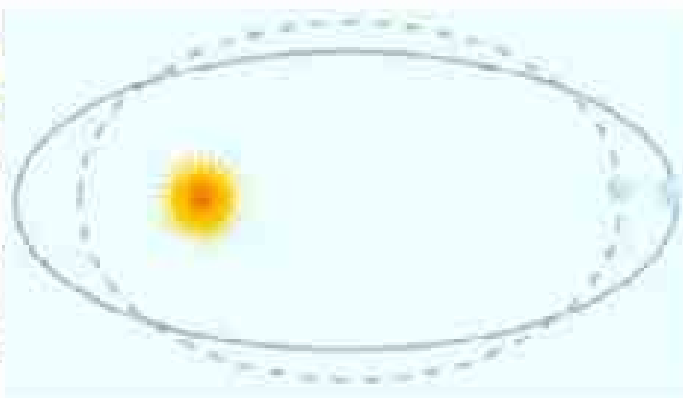
Il risultato complessivo che porta alla precessione degli equinozi avviene con periodo di circa 22'000 anni, ma è composto da un periodo di 19'000 anni e da un altro di 23'000 anni.

Eccentricità dell'orbita terrestre

L'orbita terrestre varia da una forma quasi circolare ad una forma molto ellittica:

la differenza di energia solare che giunge al suolo tra le due forme è di circa il 30%.

Le due periodicità principali sono di 96'000 e 413'000 anni
(=> periodo risultante principale = 100'000 anni circa)





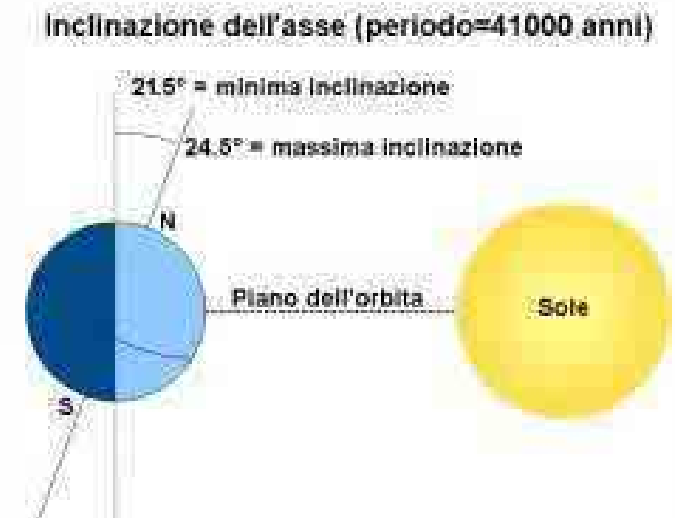
Il Sole

Variazioni dell'energia solare entrante:

Obliquità orbitale

Attualmente l'asse di rotazione terrestre è inclinato di 23.4° rispetto alla perpendicolare sul piano orbitale terrestre. Ogni **41'000 anni** questa inclinazione fluttua tra $21,5^\circ$ e $24,5^\circ$. Quando l'inclinazione è più alta, anche l'energia solare che giunge al suolo alle alte latitudini è più alta, e viceversa.

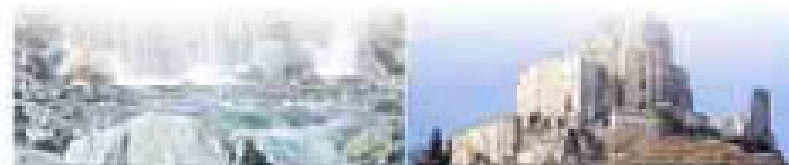
Cambia così il gradiente di temperatura tra poli ed equatore e la distribuzione di energia al suolo.



Variazioni galattiche

Nel corso della rotazione che il nostro sistema solare compie nella nostra galassia e che dura 303 milioni di anni, cambiamenti della composizione dello spazio interstellare possono causare variazioni della quantità di energia solare incidente sulla superficie della Terra.

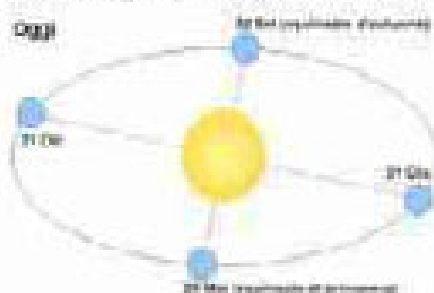
Si tratta di cambiamenti del clima che possono durare **da 200 a 500 milioni di anni**.



Il Sole



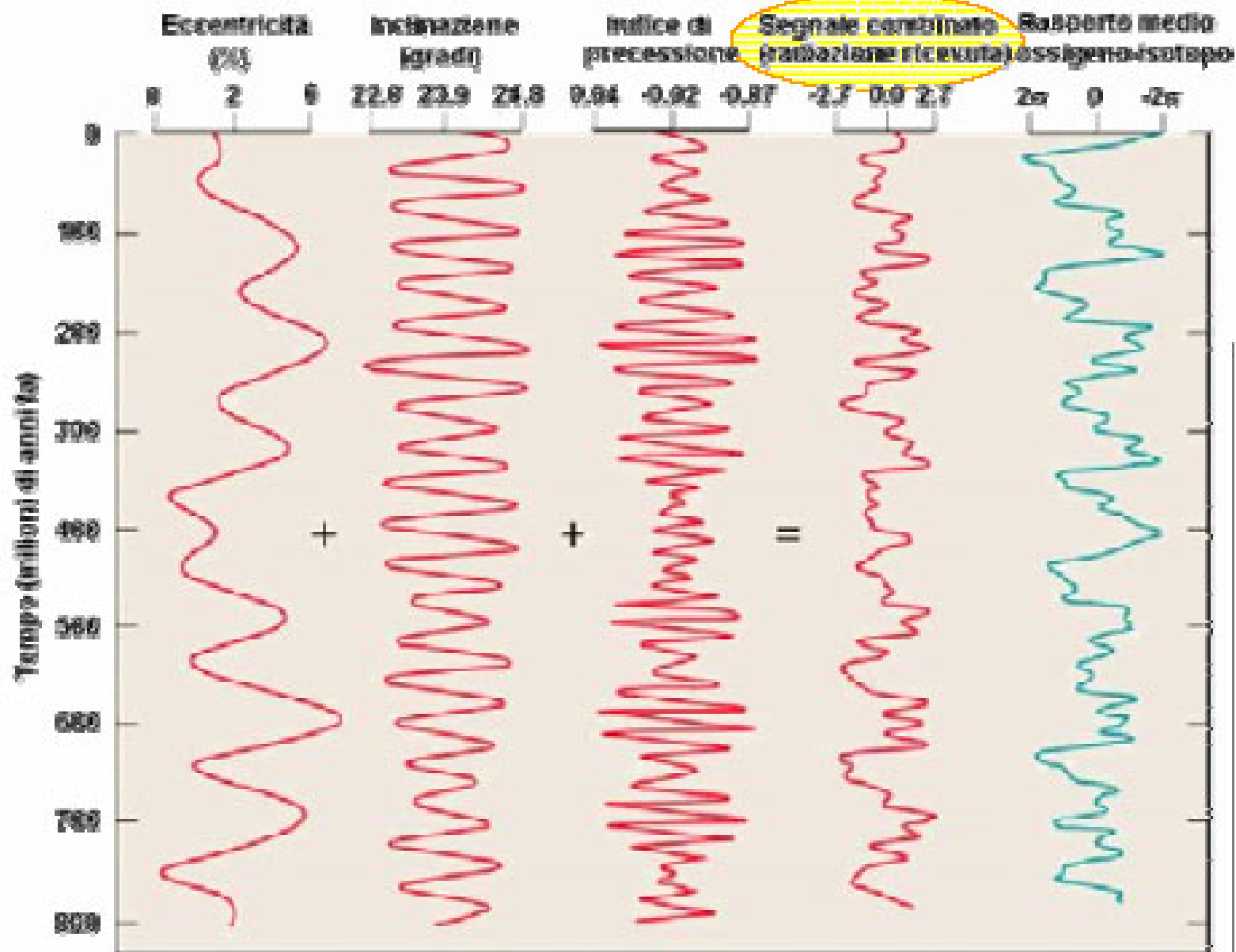
Precessione degli equinozi (periodo = 25000 anni)



Inclinazione dell'asse (periodo=41000 anni)



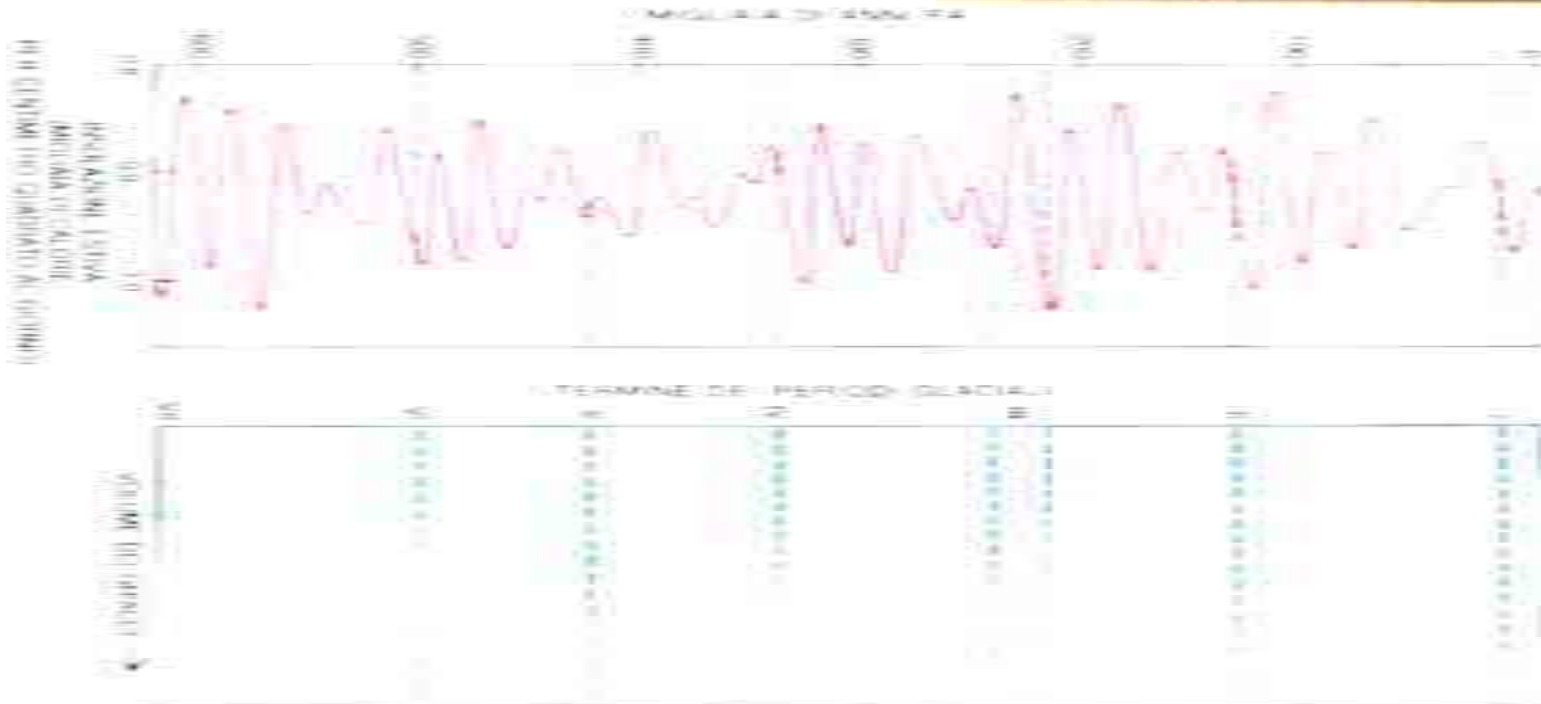
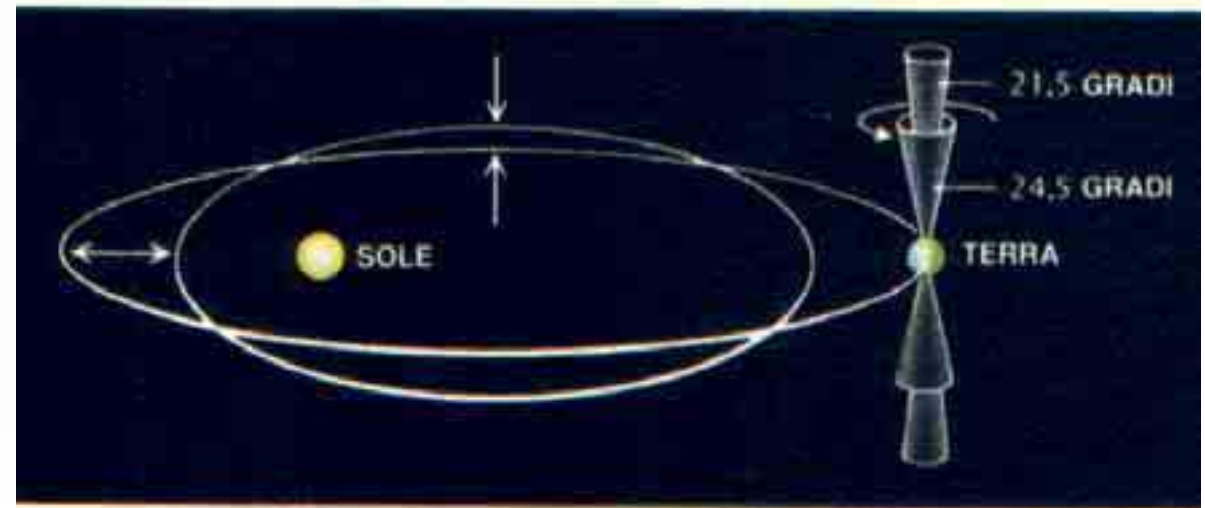
Eccentricità (periodo dominante=100000 anni)





Il Sole

=> Le glaciazioni

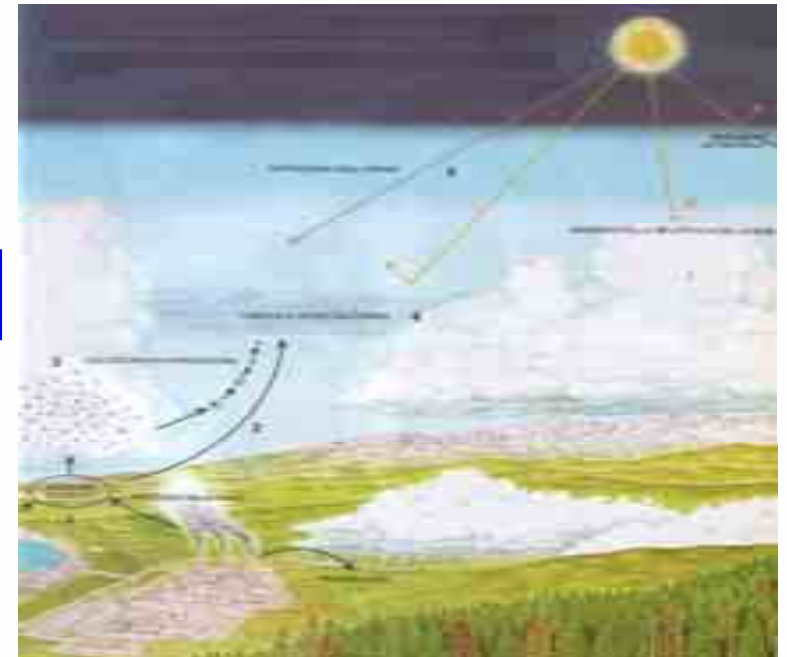




Le forzanti del clima terrestre: l'EFFETTO SERRA

Le FORZANTI del
CLIMA TERRESTRE

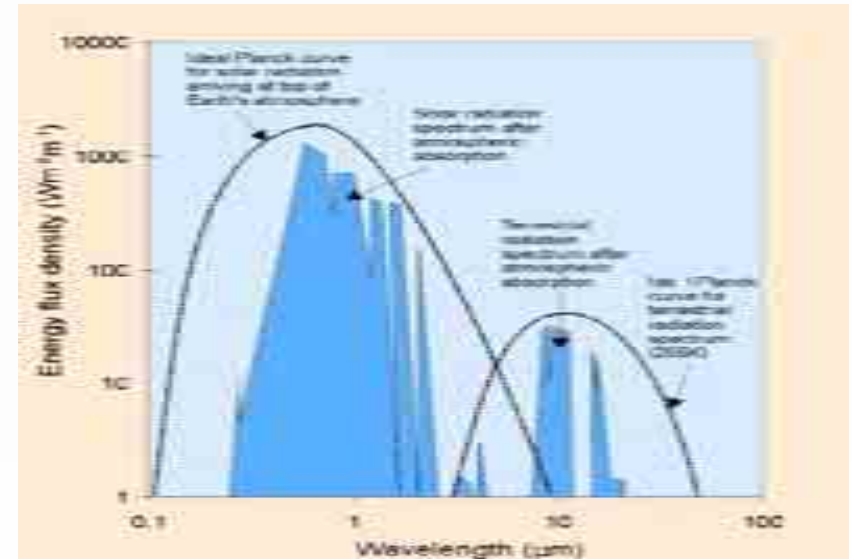
- la RADIAZIONE SOLARE
- L' EFFETTO SERRA dell'atmosfera
- Gli AEROSOL





L'effetto serra

La radiazione solare
ad onda corta (tra $0,2$ e $4 \mu\text{m}$)
può attraversare l'atmosfera
(in assenza di nuvole)
ed essere assorbita dalla superficie terrestre,
la quale si scalda
e la ri-emette da 4 a $100 \mu\text{m}$.



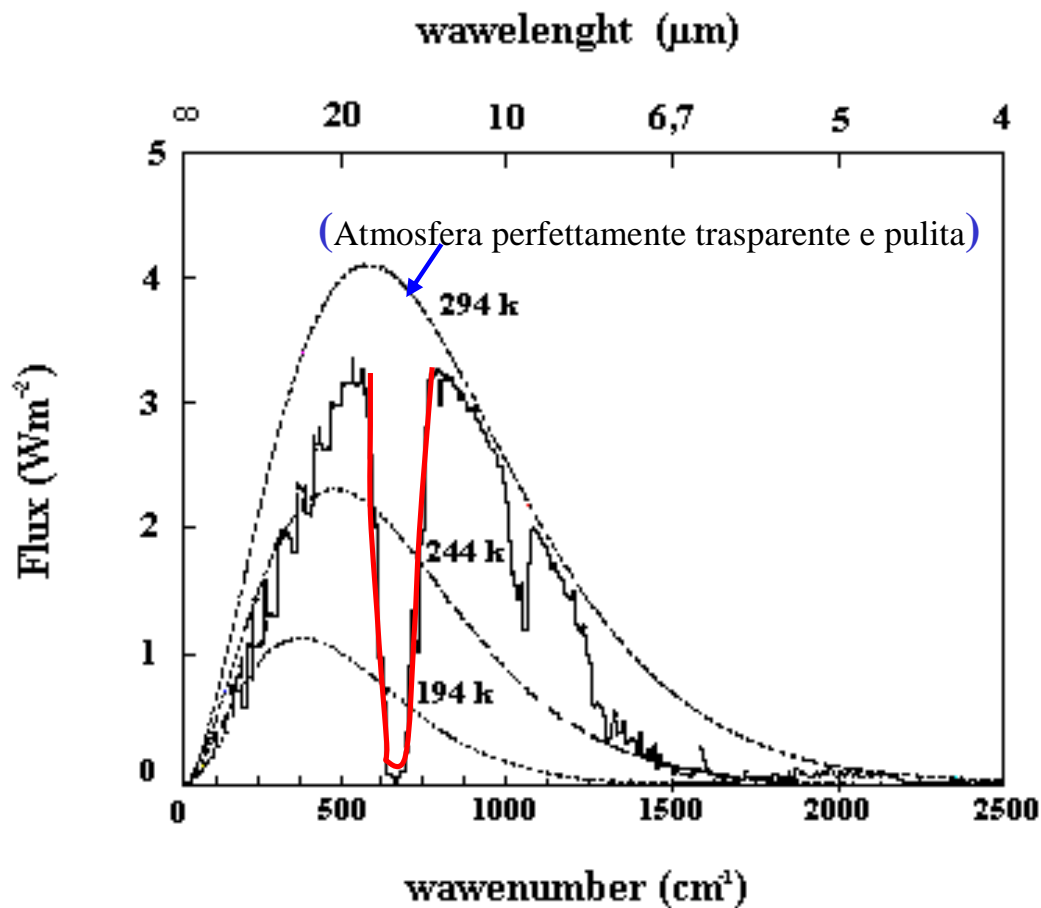
Alcuni gas atmosferici
possono assorbire tale
radiazione terrestre e
ri-emetterla di nuovo
verso la superficie terrestre.



L'effetto serra

I principali gas serra sono:

vapore acqueo, CO_2 , CH_4 , NO_x , N_2O , O_3 e i CFC.



La radiazione emessa dalla superficie terrestre verso lo spazio, viene in gran parte trattenuta entro la troposfera dalla presenza di gas serra in atmosfera.



L'effetto serra

L'azione dei gas serra su alcuni pianeti del sistema solare

	Pressione Superficiale (relativa alla Terra)	Principali Gas Serra	Temperatura Superficiale (senza gas serra)	Temperatura Superficiale (con gas serra)
VENERE	90	> 90% CO ₂	-46 °C	477 °C
TERRA	1	≅ 0,04% CO ₂ ≅ 1% H ₂ O	-18 °C	15 °C
MARTE	0,007	> 80% CO ₂	-57°C	-47 °C

(da IPCC 1990)

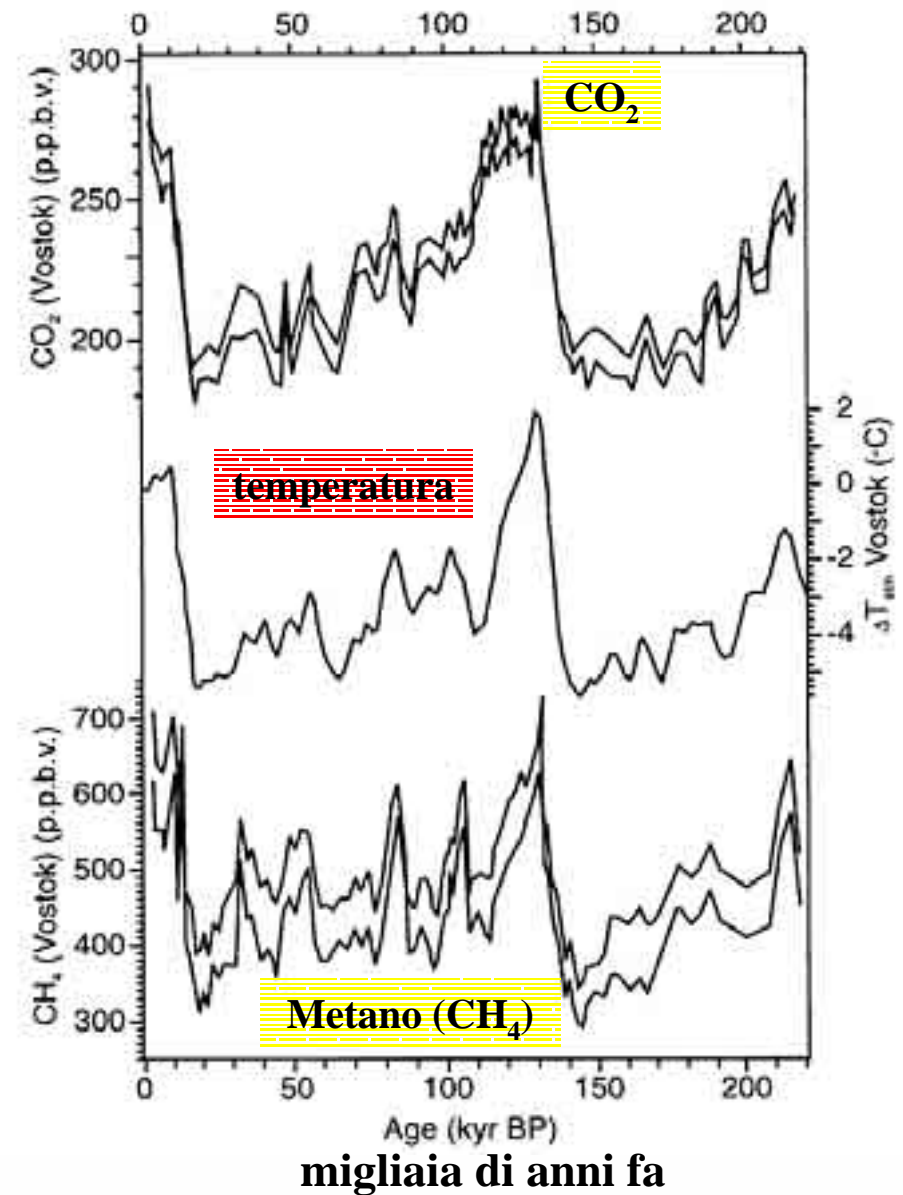


L'effetto serra

**Analisi
dei carotaggi di ghiaccio
polare antartico (Vostok):**

[Jouzel et al., 1993]

**in coincidenza
con le glaciazioni,
i gas serra diminuiscono
(ovvero aumentano
nei periodi interglaciali).**

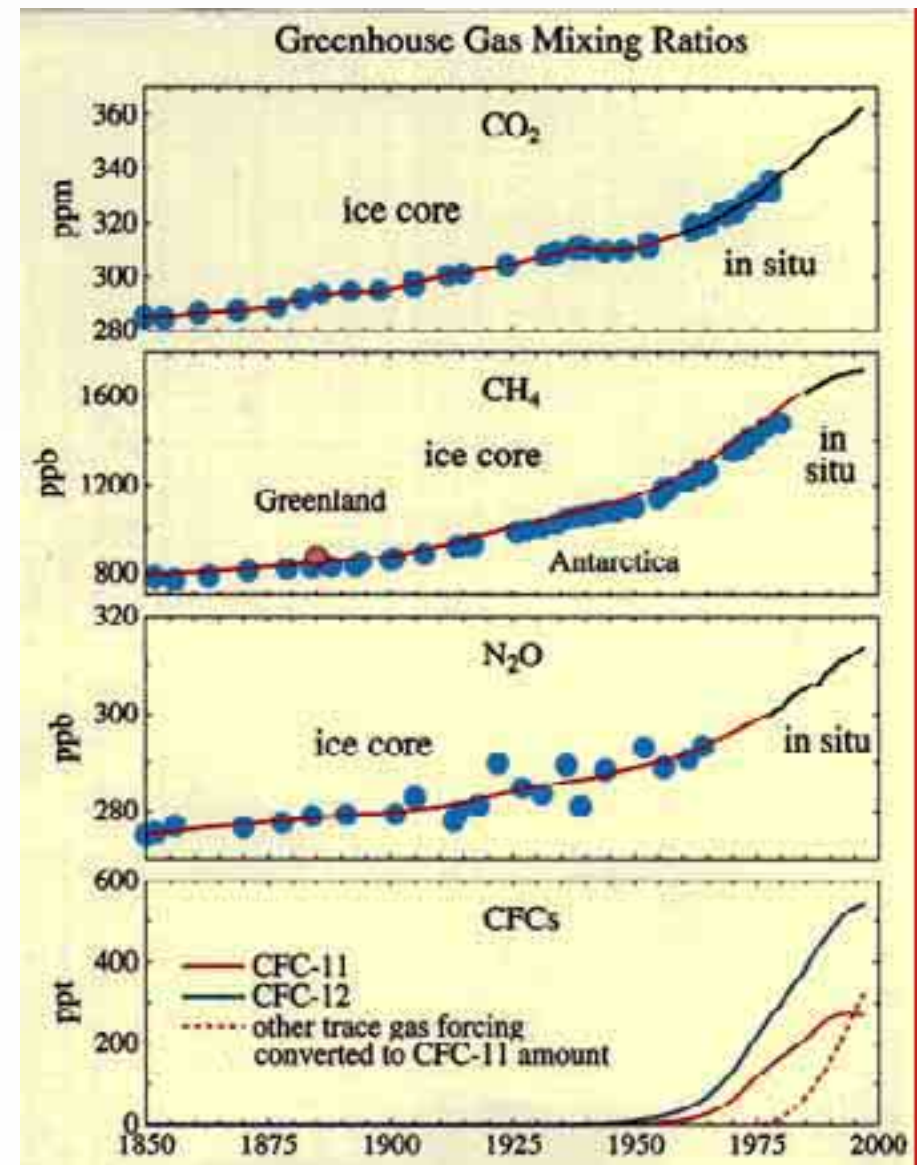




L'effetto serra

L'effetto serra
è un fenomeno naturale del pianeta,
che ha contribuito
anche in maniera positiva
al raggiungimento dell'equilibrio
della temperatura della Terra,
favorevole allo sviluppo della vita.

Ma i gas serra in atmosfera
oggi possono aumentare a causa di
numerosi attività umane:
quale sarà il loro impatto
sull'equilibrio naturale
del sistema climatico del pianeta?

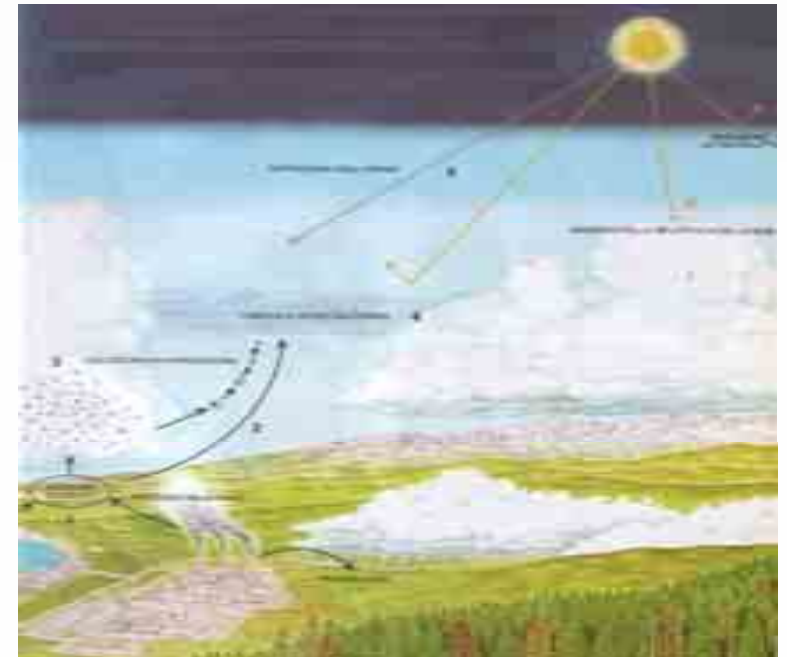




Le forzanti del clima terrestre: gli AEROSOL

Le FORZANTI del
CLIMA TERRESTRE

- la RADIAZIONE SOLARE
- L' EFFETTO SERRA dell'atmosfera
- Gli AEROSOL





Gli aerosol

Sono particelle liquide o solide di raggio infinitesimale tra 0,001 e 10 micron (10^{-3} mm), in sospensione nell'atmosfera:

- fumi metallurgici
- nuclei di combustione
- molecole varie
- batteri
- polvere
- sale marino
- pollini ...





Gli aerosol

Le loro interazioni col clima possono essere

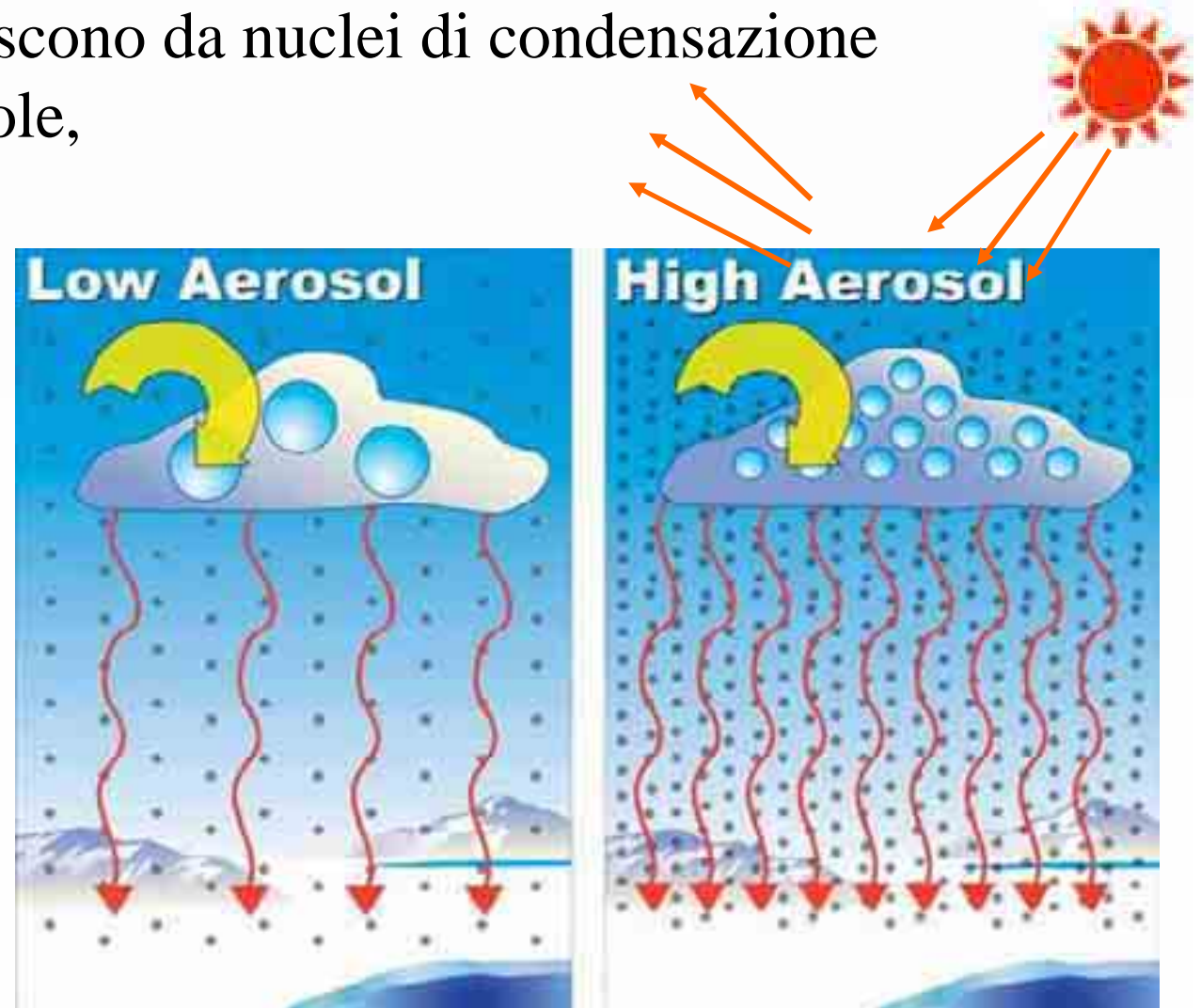
- **dirette:**
assorbimento o diffusione della radiazione solare,
- **indirette:**
modifica delle proprietà micro-fisiche delle nuvole.



Gli aerosol

Gli aerosol in atmosfera agiscono da nuclei di condensazione per la formazione delle nuvole,

ma così formano nuvole caratterizzate da una minore densità, che quindi danno meno piogge e una maggiore diffusione della radiazione (sia verso lo spazio esterno, sia verso la superficie terrestre).





Gli aerosol

Gli aerosol, in base alla loro quota di collocazione in atmosfera, si distinguono in:

- aerosol stratosferici

(in alta quota => permangono più a lungo, principalmente legati a cause naturali come le eruzioni vulcaniche)



- aerosol troposferici

(a quote inferiori, sostanzialmente legati alle attività umane).





Gli aerosol

Gli **aerosol stratosferici** provocati da eruzioni vulcaniche (Tambora 1815, Krakatoa 1883, Agung 1963, Pinatubo 1990) sono formati da aggregati di acido solforico originati dall' SO_2 vulcanica. Provocano un raffreddamento di pochi decimi di grado persistente in atmosfera per 1 o 2 anni dopo l'eruzione.

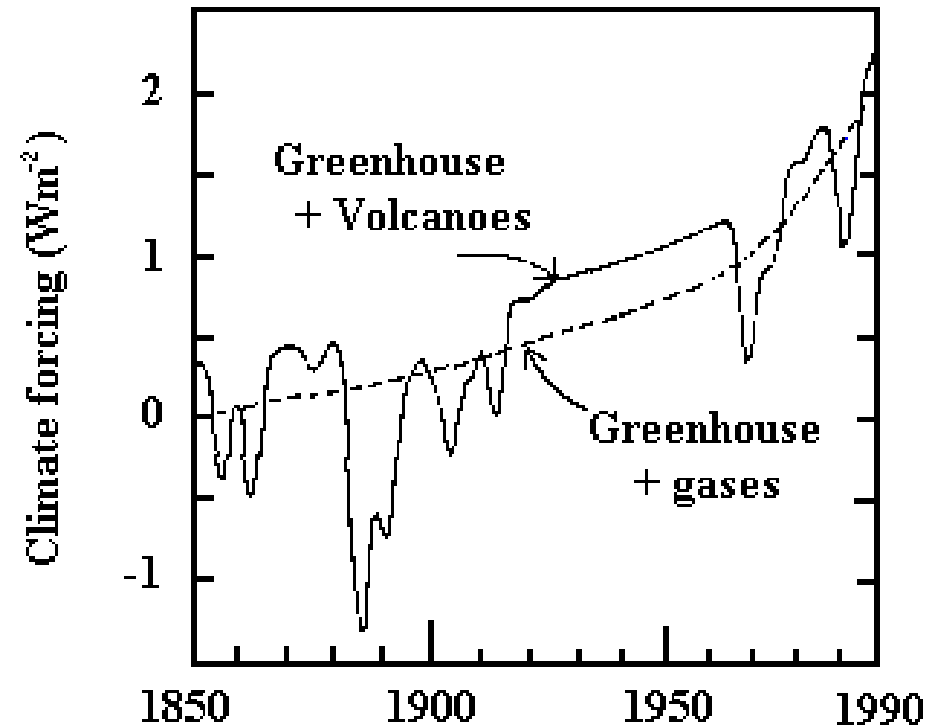


Anche il traffico aereo sta immettendo in stratosfera quantità di aerosol maggiori di quelle di origine vulcanica!



Gli aerosol

L'azione provocata dagli aerosol vulcanici potrebbe contrastare l'effetto serra nei trend a breve termine, ma si tratta di un fenomeno irregolare e di bassa entità.

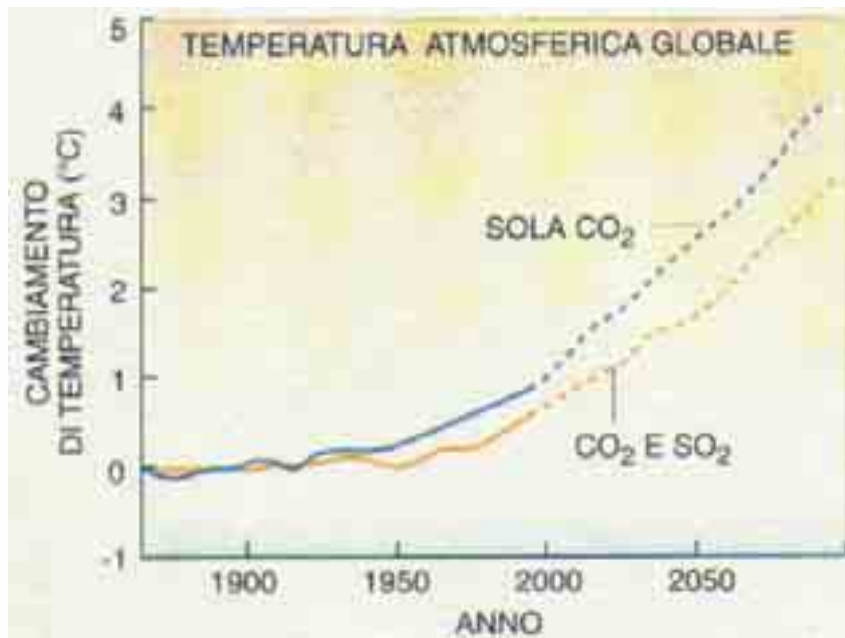


Servirebbero troppe eruzioni vulcaniche per ottenere un impatto climatico significativo!



Gli aerosol

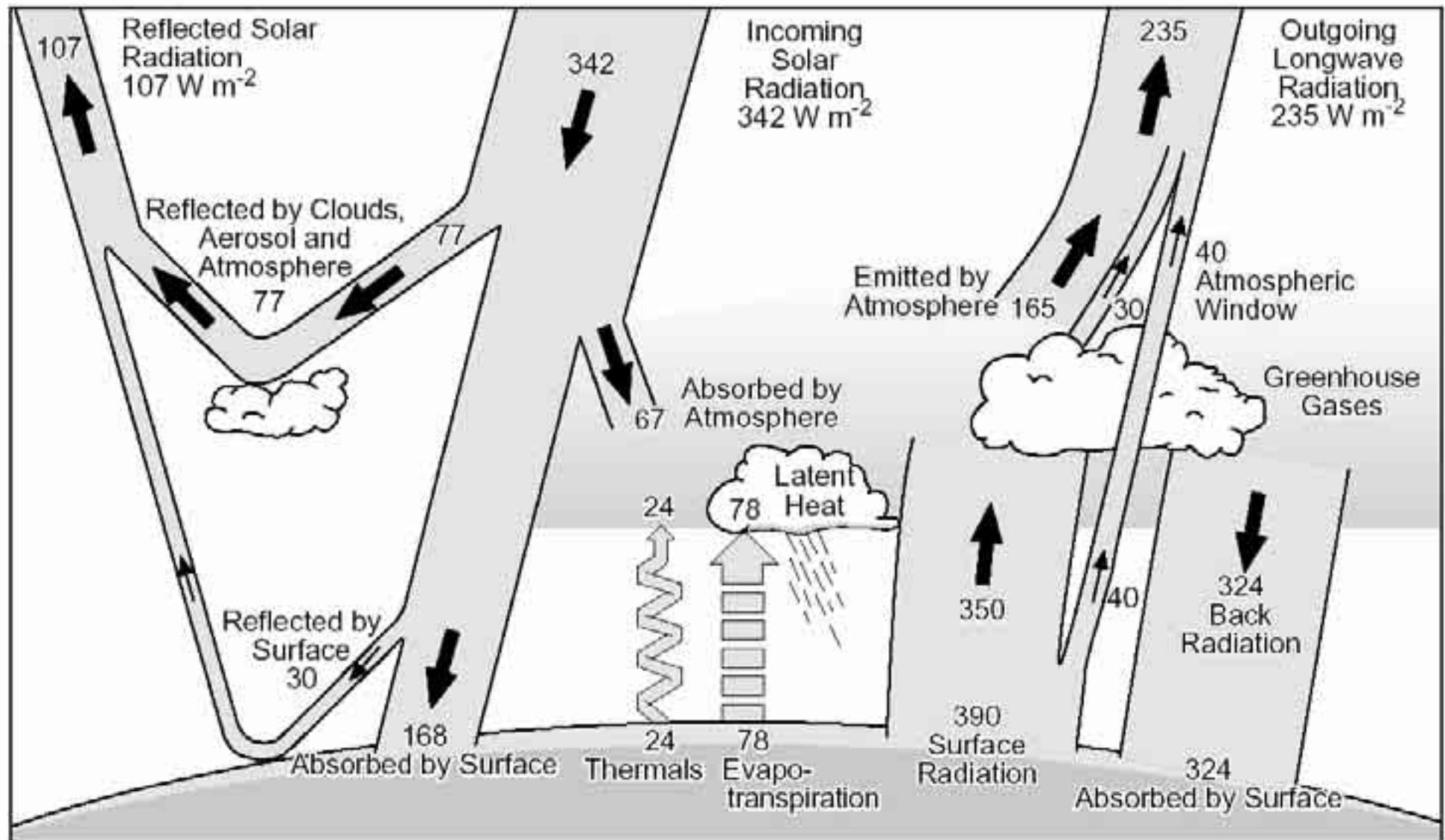
Gli **aerosol troposferici**, sostanzialmente di origine antropogenica, potrebbero anch'essi avere un effetto di raffreddamento (come misurato negli anni 1940-1970 sulle aree industriali).



Ma questo risultato è controverso e tutt'ora dibattuto nel mondo scientifico: il forcing complessivo degli aerosol antropogenici è stimato pari solo a 0,5-0,75 W/m².



L'equilibrio energetico del sistema climatico

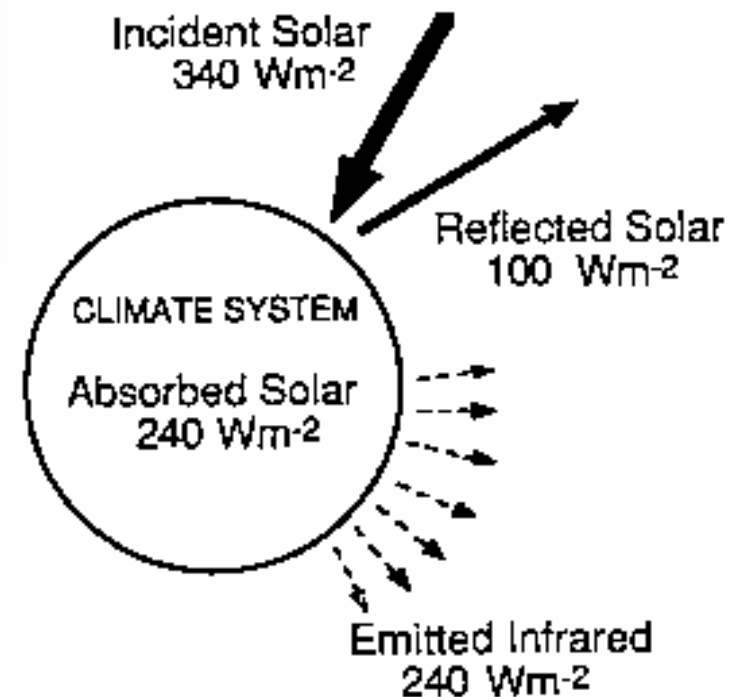




L'equilibrio energetico del sistema climatico

**Illustrazione
schematica del bilancio
globale di radiazione
al “top” dell’atmosfera.**

Global Radiation Budget



La radiazione solare
a causa delle macchie solari può variare del 0,1%
cioè con una variazione della radiazione assorbita
dalla Terra di $0,24 \text{ W/m}^2$.

Il forcing dei gas serra antropici è stimato sui $2\text{-}2,5 \text{ W/m}^2$!



L'equilibrio energetico del sistema climatico

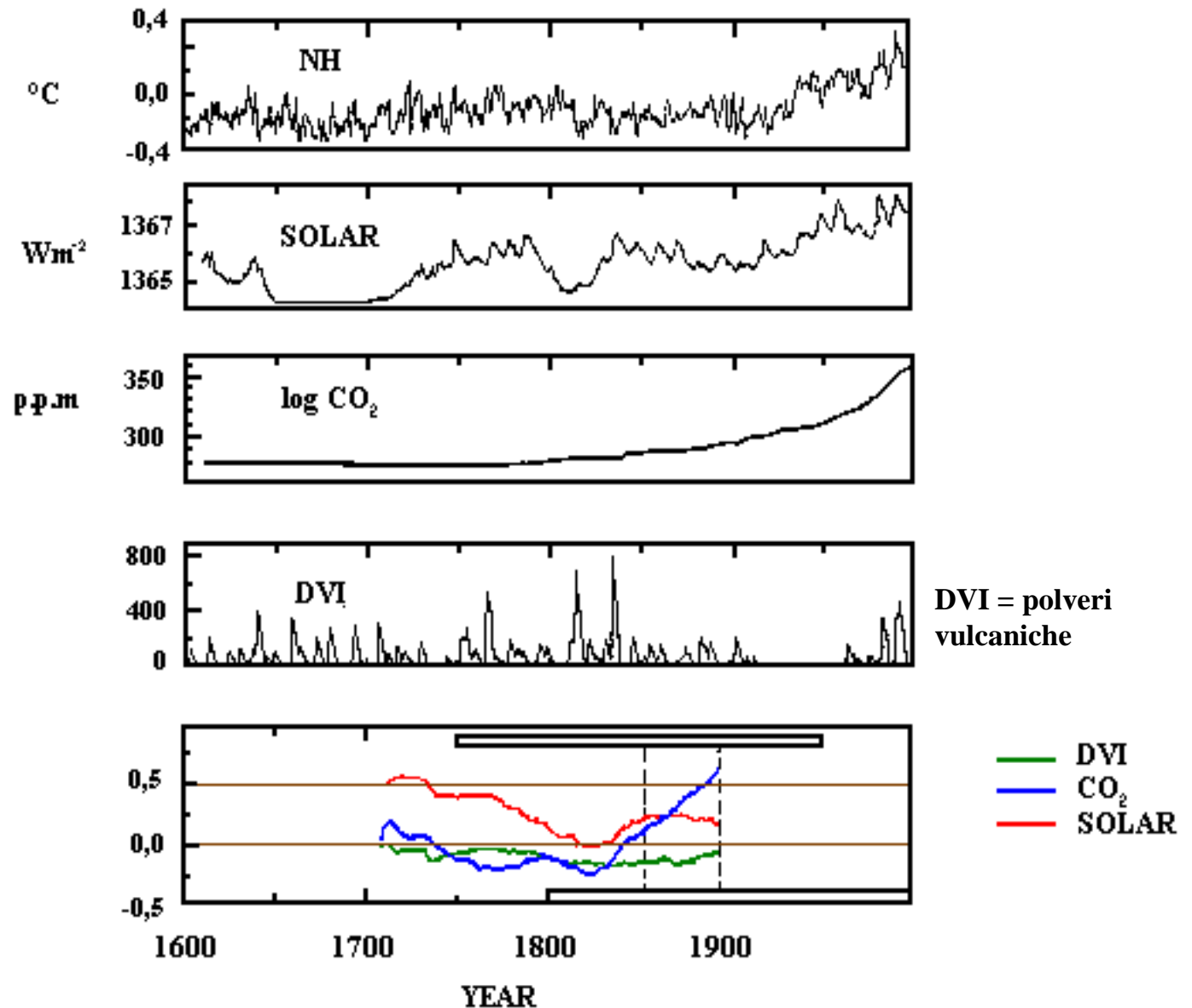
- Variazione naturale della **radiazione solare** = $0,24 \text{ W/m}^2$,
- Forcing degli **aerosol** = $0,5-0,75 \text{ W/m}^2$
(ad es. responsabili della Piccola Era Glaciale del 1550-1850
con un calo della temperatura media globale di $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$)
- Forcing dei **gas serra** di origine antropogenica = $1,17-2,5 \text{ W/m}^2$.

*Allora è ragionevole pensare che i gas serra antropogenici
sono un parametro di forzatura climatica predominante...?*



L'equilibrio energetico del sistema climatico

Dal 1850 in avanti
aumenta la correlazione
tra andamento
della temperatura e
concentrazione di CO_2 ,
superando gli altri
forcing naturali
(Sole e aerosol vulcanici).





Allora è ragionevole pensare che i gas serra antropogenici sono un parametro di forzatura climatica predominante...!