

BILANCIO AL TOP DELL'ATMOSFERA

RADIAZIONE SOLARE

99% dell'energia compresa in λ 0.15 – 4 μ :

9% nell'uv ($\lambda < 0.4\mu$)

49% nel visibile ($0.4 < \lambda < 0.8\mu$)

42% nell'IR ($\lambda > 0.8\mu$)

L'intensità della radiazione solare non è cambiata sostanzialmente, come risulta da osservazioni su periodi estesi, quindi ha senso parlare di costante solare il cui valore è $S_0=1360 \text{ W/m}^2$

La distribuzione della radiazione solare al top dell'atmosfera dipende da:

- geometria del globo
- rotazione della terra
- orbita ellittica

Quindi risulta essere una funzione di:

- inclinazione dell'asse terrestre
- eccentricità dell'orbita
- longitudine del perielio (= minima distanza dalla terra)

Asse di rotazione inclinata di circa 23° rispetto alla normale al piano dell'eclittica

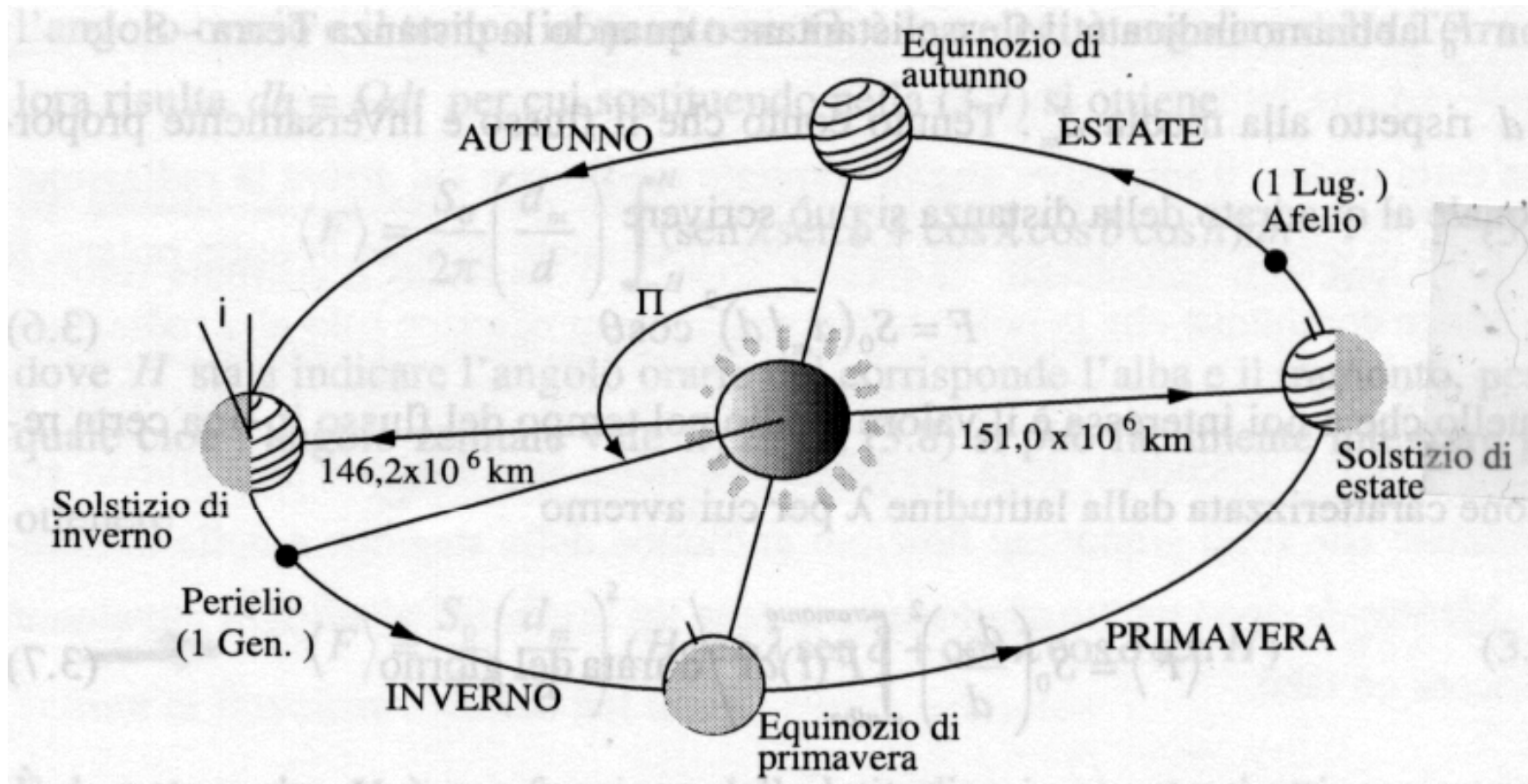
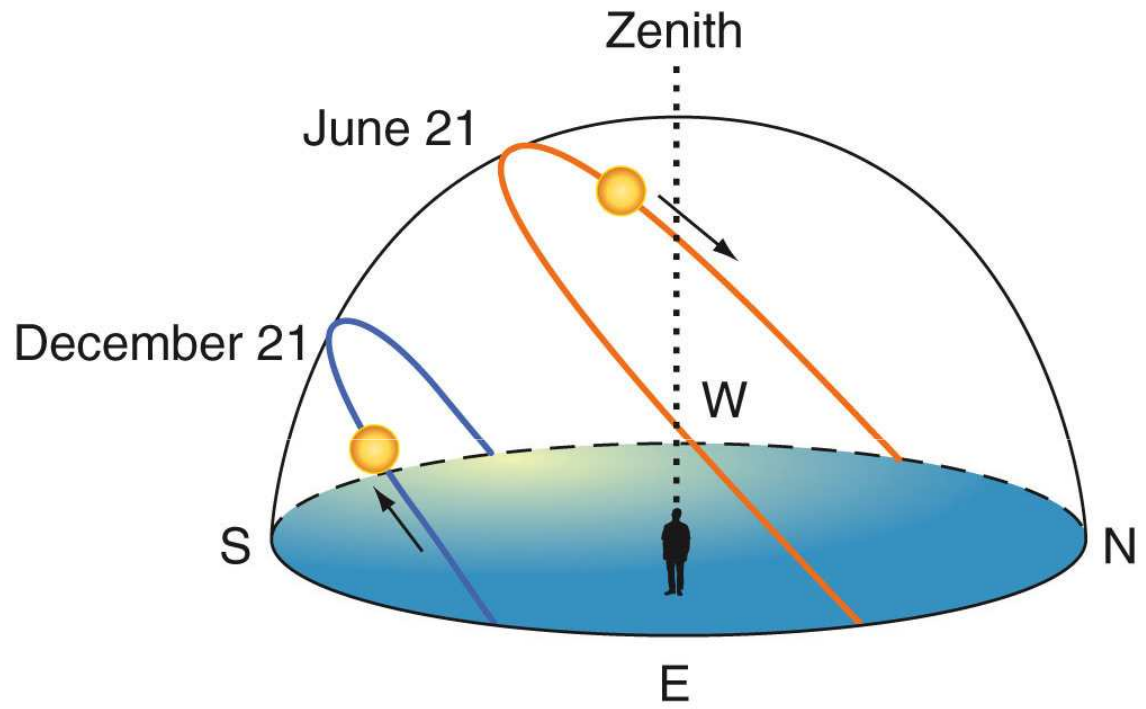
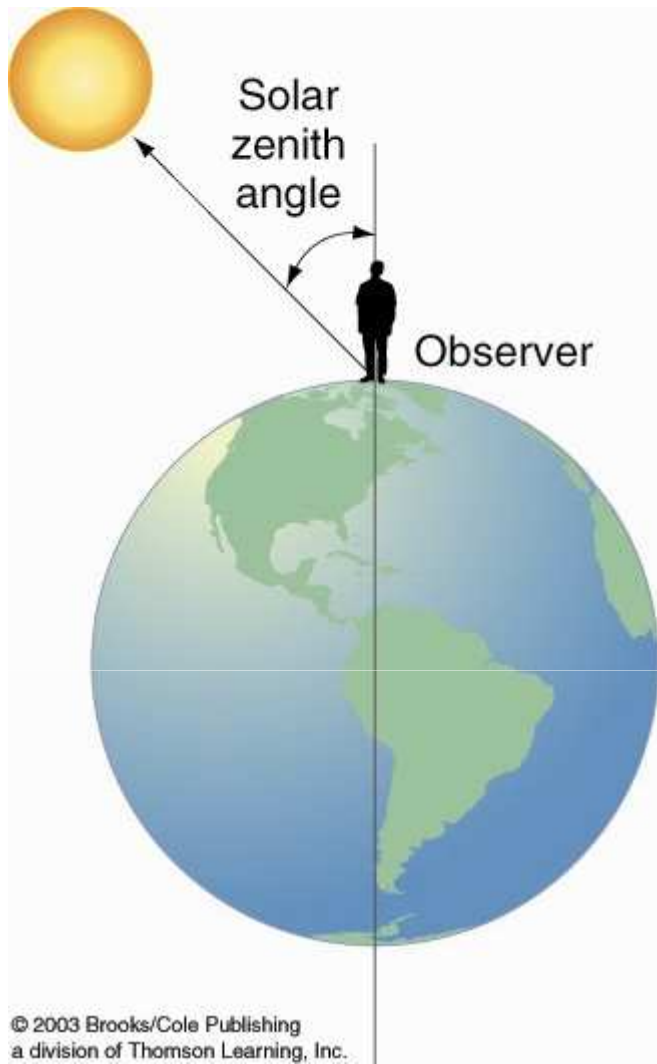


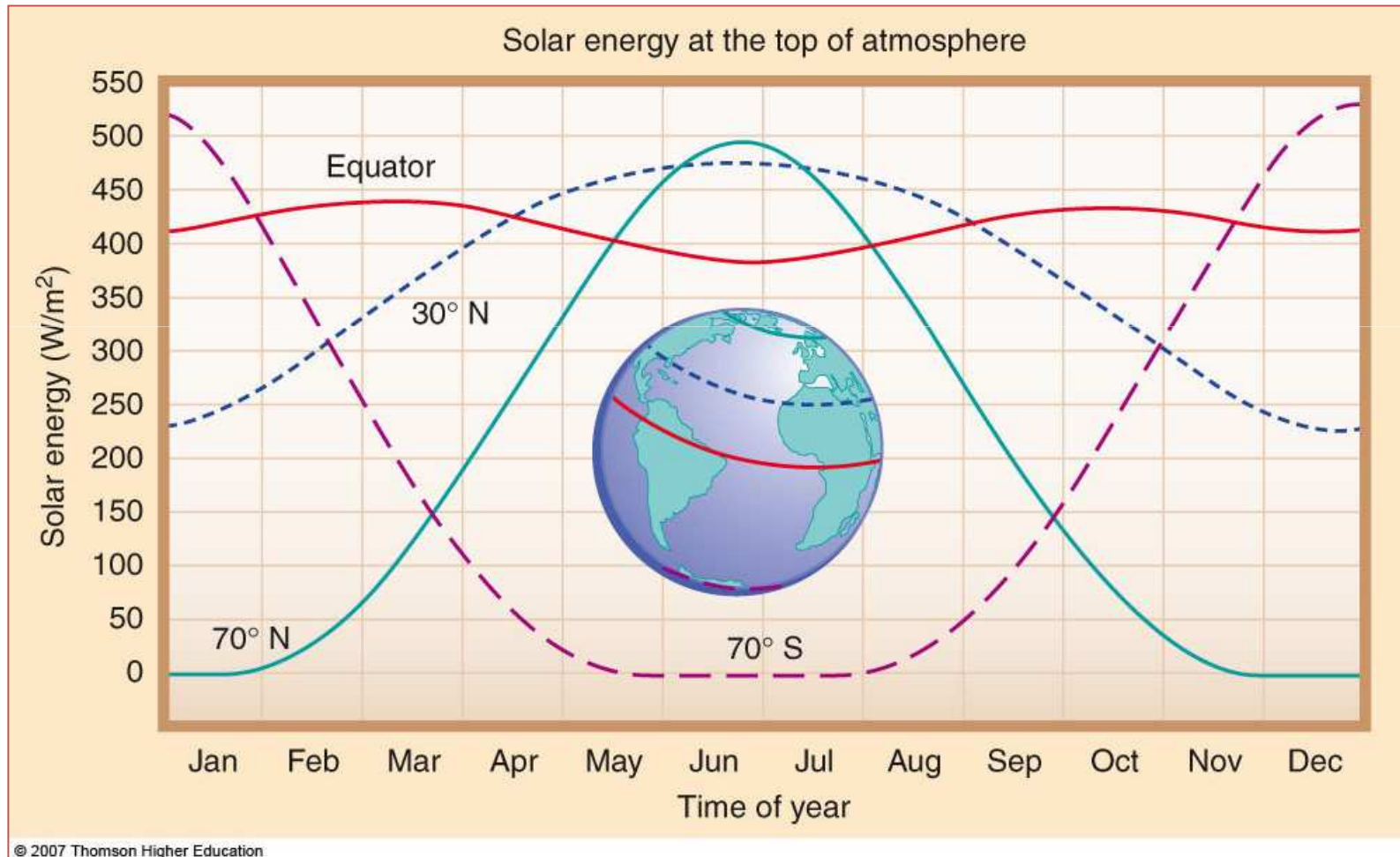
Figura 3.3 La geometria della rotazione della Terra rispetto al Sole durante le varie stagioni. Ai solstizi, l'asse di rotazione è contenuto nel piano normale all'eclittica che passa per la Terra e per il Sole. Agli equinozi, l'asse di rotazione e la normale all'eclittica sono contenuti in un piano normale alla congiungente Terra-Sole. Sulla figura sono segnate le distanze della Terra all'afelio e al perielio e la lunghezza del perielio, Π .

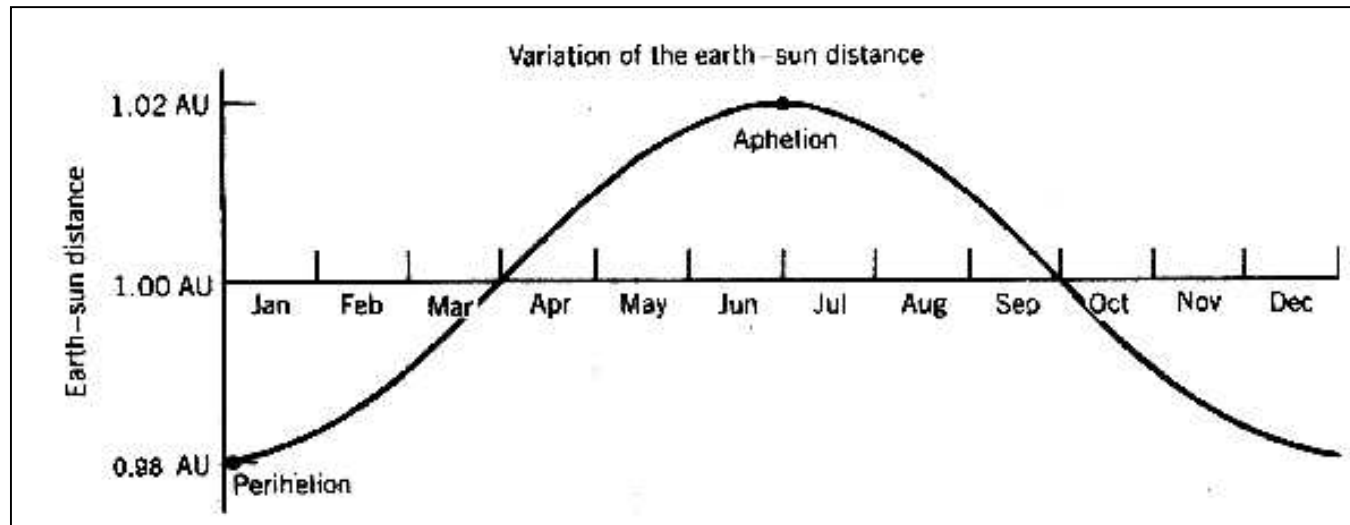


Northern Hemisphere midlatitudes

© 2007 Thomson Higher Education

La terra è più vicina al sole durante l'inverno (emisfero nord) che durante l'estate, ma questo non ha un impatto rilevante in termini di energia che raggiunge la terra. L'aspetto dominante è infatti l'altezza del sole sull'orizzonte.





Alcuni riferimenti quantitativi:

Distanza media terra-sole = 1 U.A. = $1.496 \times 10^{11} \text{m}$

Distanza max terra-sole = $1.521 \times 10^{11} \text{m}$

Distanza min terra-sole = $1.471 \times 10^{11} \text{m}$

Eccentricità = $1 - (\text{max distanza terra-sole} / \text{dist media terra-sole}) = 0.0167$

La radiazione che entra in atmosfera viene attenuata da assorbimento e scattering. La radiazione assorbita entra nel budget radiativo; la radiazione che subisce scattering in parte si perde nello spazio, in parte subisce ulteriore scattering ed assorbimento in atmosfera.

La massima attenuazione della radiazione solare si ha alle alte latitudini dove è più lungo il cammino attraverso l'atmosfera (spessore ottico).

Al top dell'atmosfera la radiazione solare incidente dipende da:

-angolo zenitale (Z), a sua volta funzione della latitudine Φ , della declinazione solare δ e dell'ora locale h

-distanza terra-sole, con il quadrato della distanza (d) con una formula del tipo $f(d) = (d_m/d)^2$ con $d_m = \text{dist. media}$ $f(d)$ varia da 1.0344 a gennaio a 0.9646 a luglio

Quindi ad un dato istante il flusso di radiazione solare incidente su una superficie orizzontale al top dell'atmosfera è:

$$F_{sw} = S_0 \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \cos z$$

$f(d) = 1.0344$ a gennaio

$f(d) = 0.9646$ a luglio

Integrando ottengo l'insolazione totale giornaliera al top dell'atmosfera:

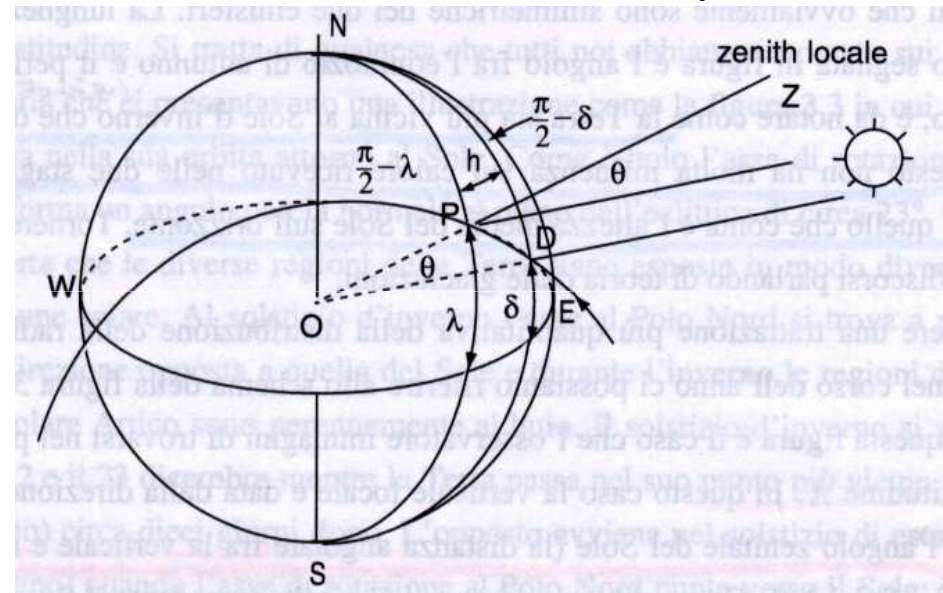
$$Q_0 = S_0 \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \int_{\text{sunrise}}^{\text{sunset}} \cos z dt \Rightarrow Q_0 = \frac{24}{\pi} S_0 \left(\frac{d_m}{d} \right)^2 \sin \phi \sin \delta (H - \tan H)$$

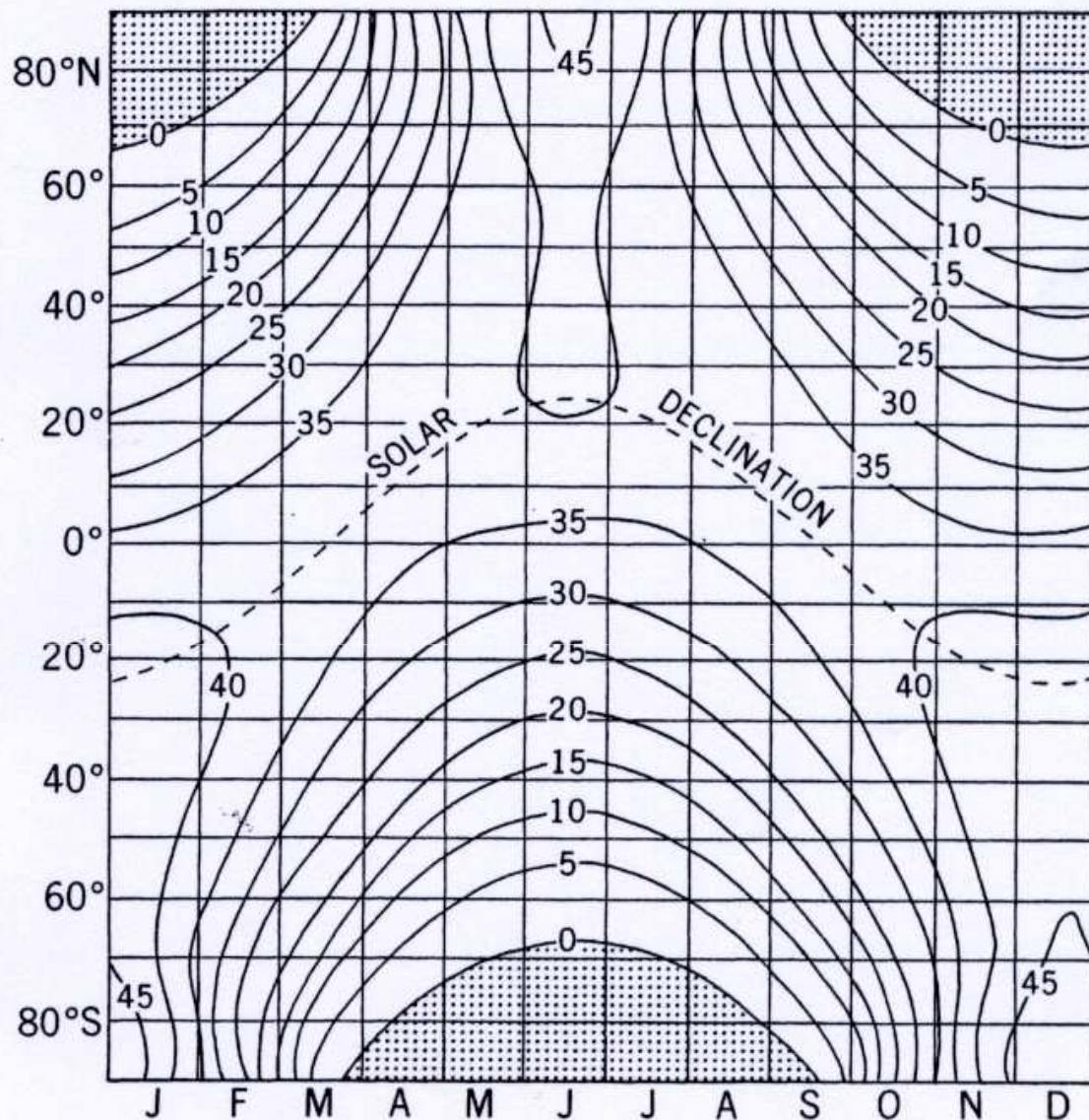
dove $\Phi = \text{latitudine}$

$\delta = \text{declinazione solare} \rightarrow \text{stagione}$

$H = \text{angolo orario all'alba o al tramonto}$

$[Q_0] = \text{W/m}^2 \text{ al giorno}$





Andamento di Q_0 (radiazione solare giornaliera incidente su una superficie orizzontale al top dell'atmosfera) in funzione della latitudine e del periodo dell'anno.

Simmetria rispetto al solstizio d'estate.

Piccola asimmetria negli equinozi in quanto la terra è più vicina al sole in inverno.

Le regioni polari in estate sono quelle che registrano massima insolazione (al top dell'atmosfera!).

In inverno l'insolazione aumenta verso l'equatore e i poli sono bui.

FIGURE 6.4. Daily total of the solar radiation incident on a unit horizontal surface at the top of the atmosphere as a function of latitude and date in 10^6 J m^{-2} ($1 \times 10^6 \text{ J m}^{-2}$ for one day $\approx 11.6 \text{ W m}^{-2}$). Shaded areas represent the areas that are not illuminated by the sun (from Wallace and Hobbs, 1977; after List, 1951).

Se medio la radiazione solare sull'intero anno, resta la dipendenza dalla sola latitudine. L'insolazione annuale ai poli è meno della metà di quella all'equatore.

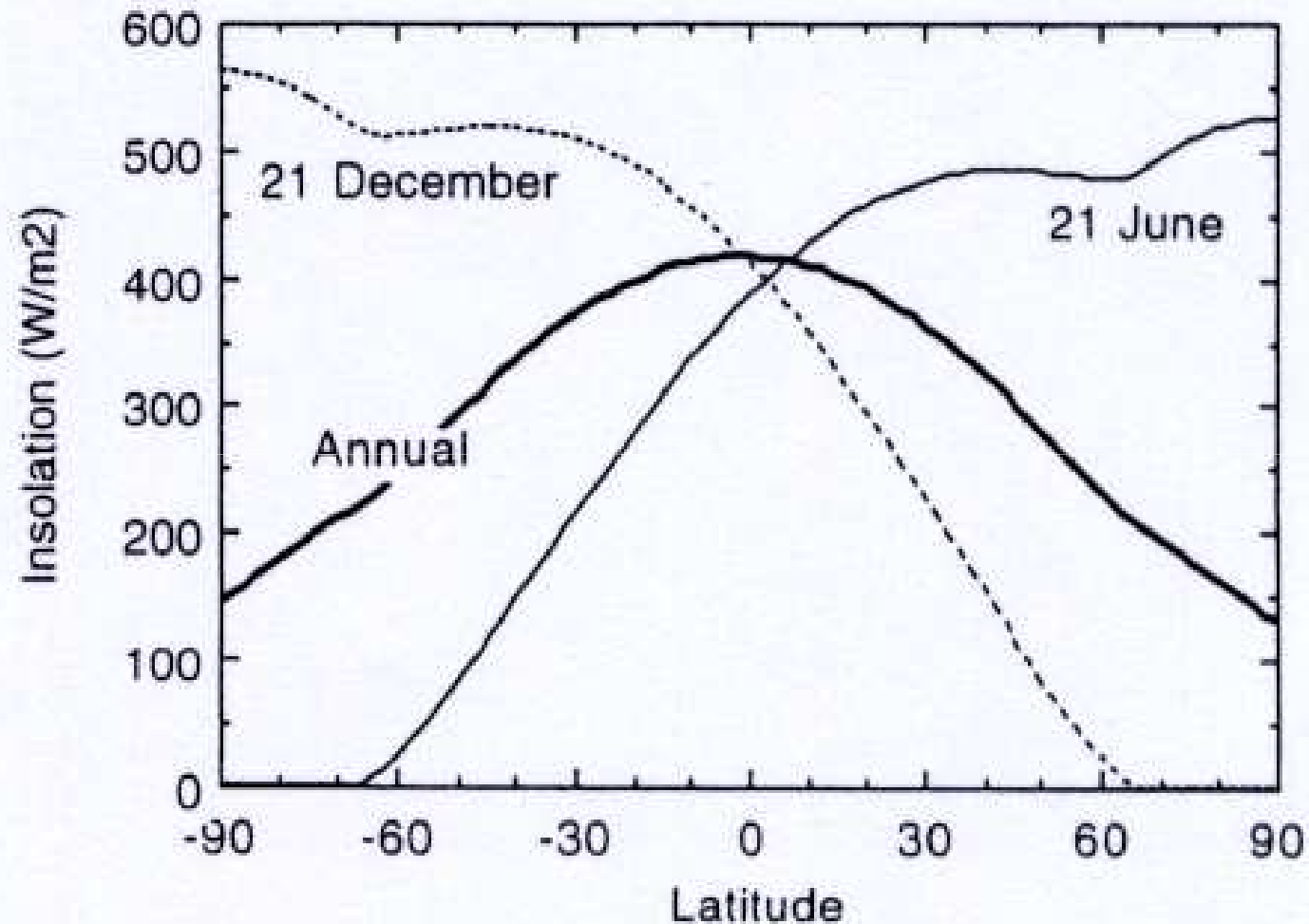


Fig. 2.7 Annual-mean and solstice insolation as functions of latitude.

BILANCIO ENERGETICO AL TOP DELL'ATMOSFERA

Si tratta di un bilancio puramente radiativo, ricavabile da misure da satellite. Il satellite vede il sistema terra + atmosfera complessivamente ed è in grado di valutare la radiazione IR uscente e l'albedo planetario attraverso la misura della radiazione solare riflessa verso lo spazio. Essendo nota l'insolazione si può ricavare il bilancio.

Il sistema Terra è sicuramente in equilibrio radiativo se analizzato su scale di alcuni anni. Lo è ancora su scala mensile/stagionale?

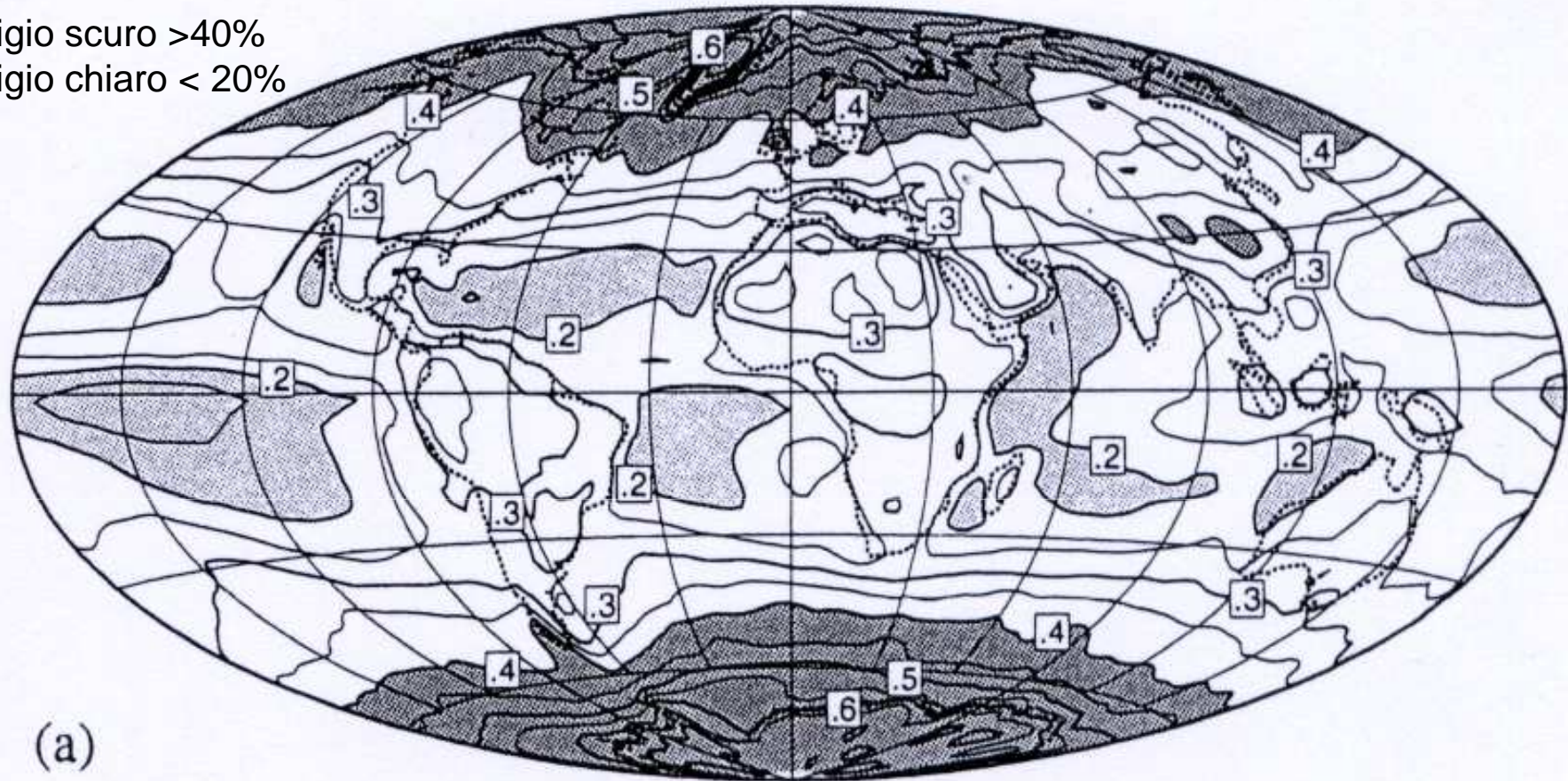
Componenti del bilancio radiativo

- 1) RADIAZIONE SOLARE (insolazione) → già analizzata
- 2) ALBEDO da cui si determina la radiazione solare assorbita
- 3) OLR (Outgoing Longwave Radiation)

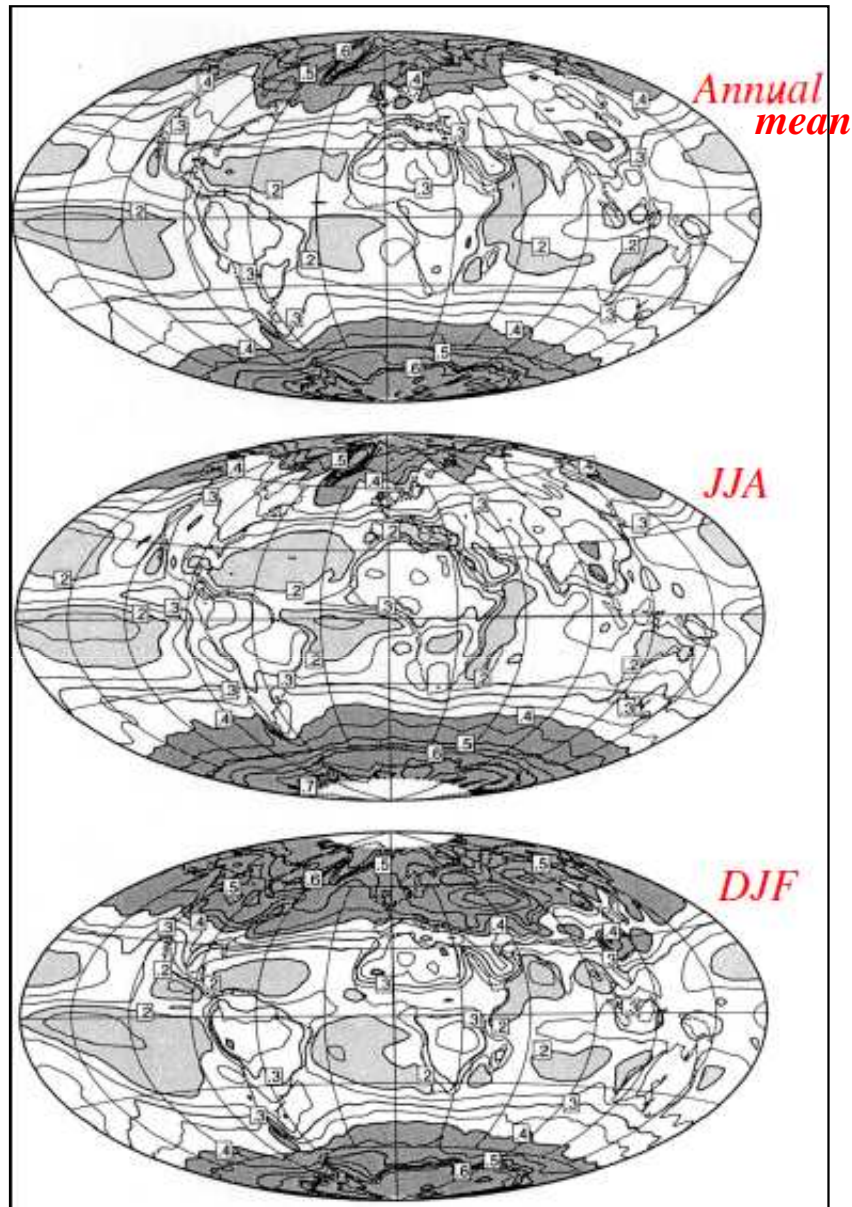
→ RADIAZIONE NETTA

ALBEDO

grigio scuro >40%
grigio chiaro < 20%

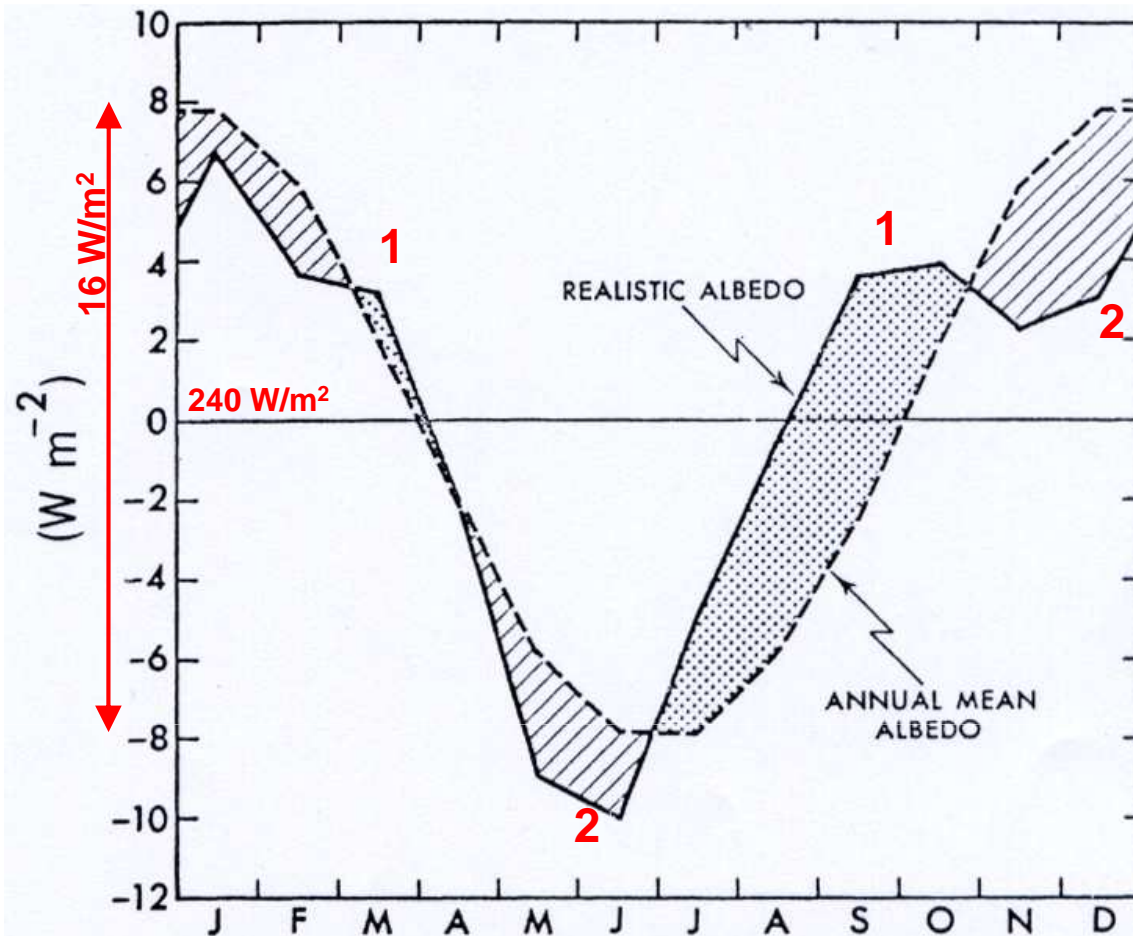


Non è solo l'albedo della superficie, ma tiene conto di nubi, aerosol, geometria solare)
Massimo nelle regioni polari (neve, nubi e angolo zenitale)
Massimi secondari in alcune regioni tropicali e sub-tropicali (aree desertiche o nubi spesse)
Minimo sugli oceani tropicali (poche nubi)



L'albedo mostra una forte variazione stagionale a causa delle variazioni di copertura nuvolosa, di ghiaccio e neve

Quindi, in termini di radiazione solare in ingresso che dipende strettamente dall'albedo ...



Variazione stagionale della radiazione solare incidente, misurata da satellite rispetto alla curva teorica (tratteggiata) ottenuta assumendo un valore medio annuale per l'albedo. Il valore medio di radiazione incidente (240 W/m^2) è stato sottratto in modo da vedere le anomalie.

Ricordo che:

$$f(d) = (d_m/d)^2$$

$$f(d) = 1.0344 \text{ a gennaio}$$

$$f(d) = 0.9646 \text{ a luglio}$$

I fattori geometrici sono responsabili della maggior parte dell'anomalia

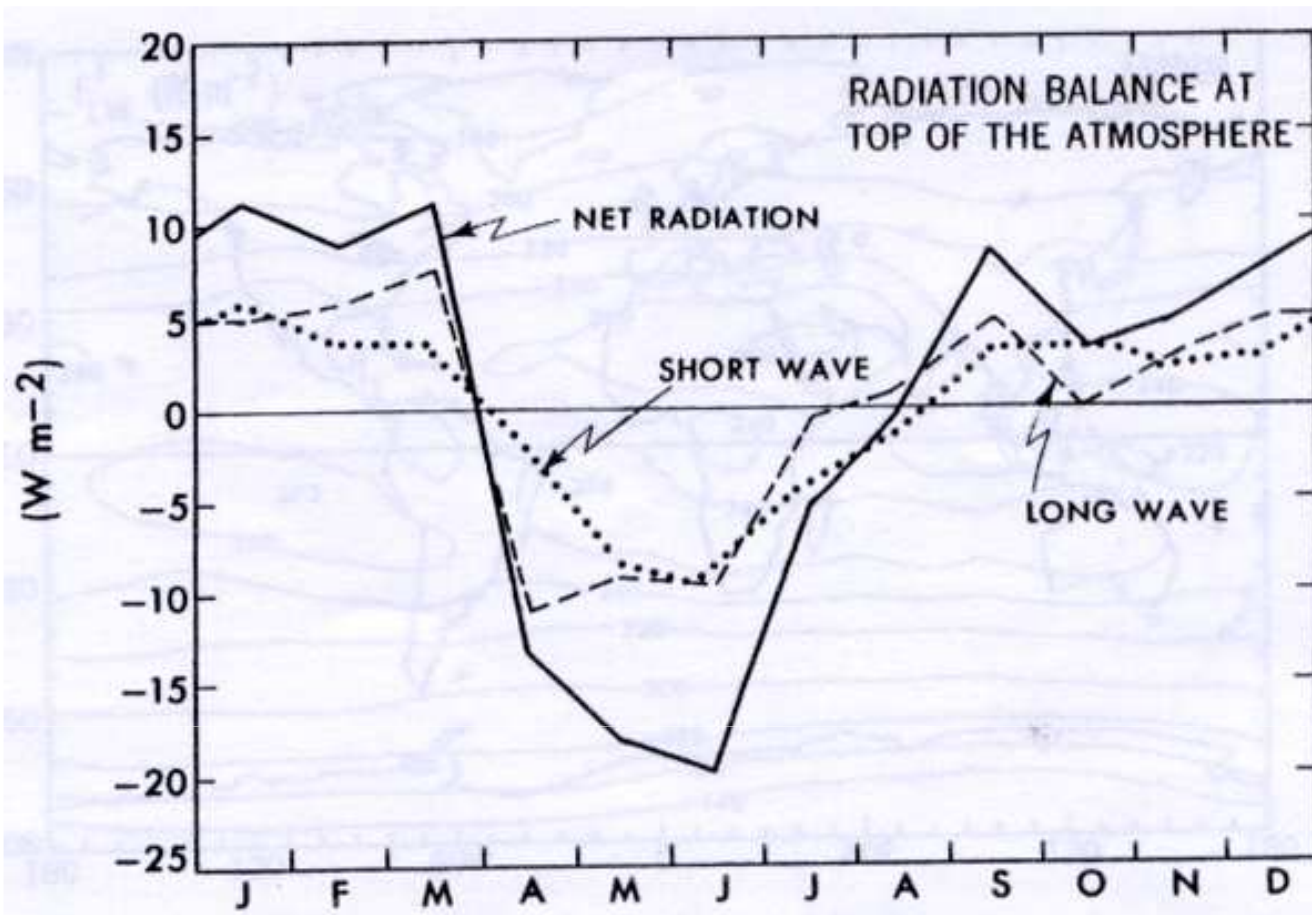
Se l'albedo fosse costante otterrei un andamento regolare modulato da $(d_m/d)^2$ responsabile per una variazione di 16 W/m^2 su un totale di 240 W/m^2 (variazioni legate solo alla distanza terra-sole)

In realtà: l'albedo varia \rightarrow max positivo meno pronunciato e risposta asimmetrica:

- durante gli equinozi la radiazione solare è perpendicolare all'equatore (oceani tropicali) dove l'albedo è basso \rightarrow grande assorbimento che genera due massimi secondari, più marcato nell'emisfero sud (1)

- durante i solstizi i poli sono maggiormente illuminati, ma riflettono molta della radiazione solare incidente \rightarrow la radiazione solare risulta minore di quanto atteso (2)

Asimmetria tra gli emisferi dovuta alla diversa variazione stagionale di copertura nevosa.



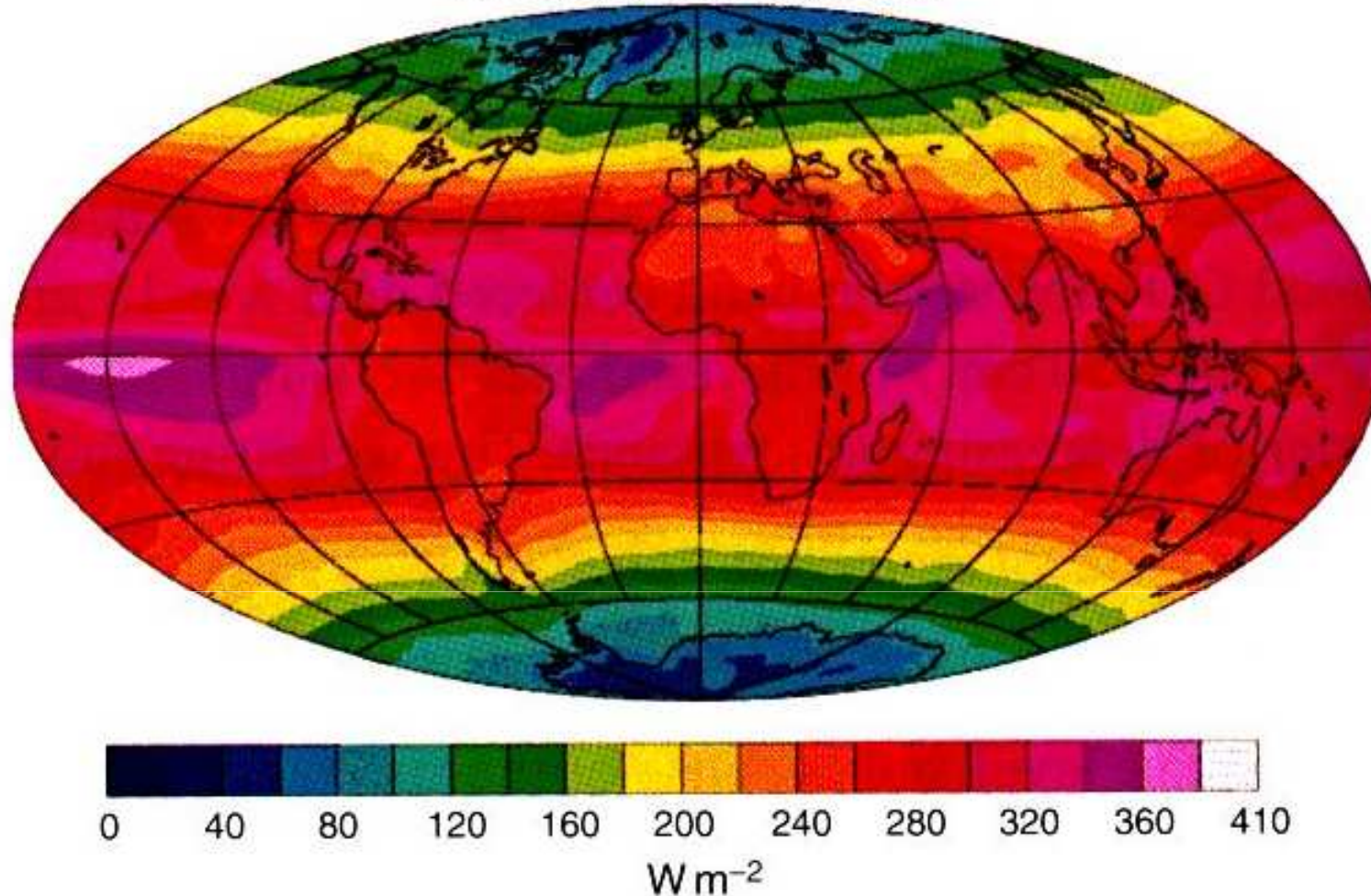
Anomalie rispetto alla media annuale

L'andamento stagionale della radiazione IR non bilancia quello della radiazione solare, anzi sono correlati. L'emissione IR è massima in giugno.

Asimmetria della distribuzione delle terre emerse → maggiore escursione termica stagionale nell'emisfero nord (terre emerse hanno minore inerzia termica degli oceani) → ciclo annuale dominato dall'emisfero nord dove in inverno la temperatura è più fredda e quindi riduce l'IR uscente (anomalia positiva, cioè meno emissione della media annuale).

Il sistema Terra non è in equilibrio su scale stagionali.

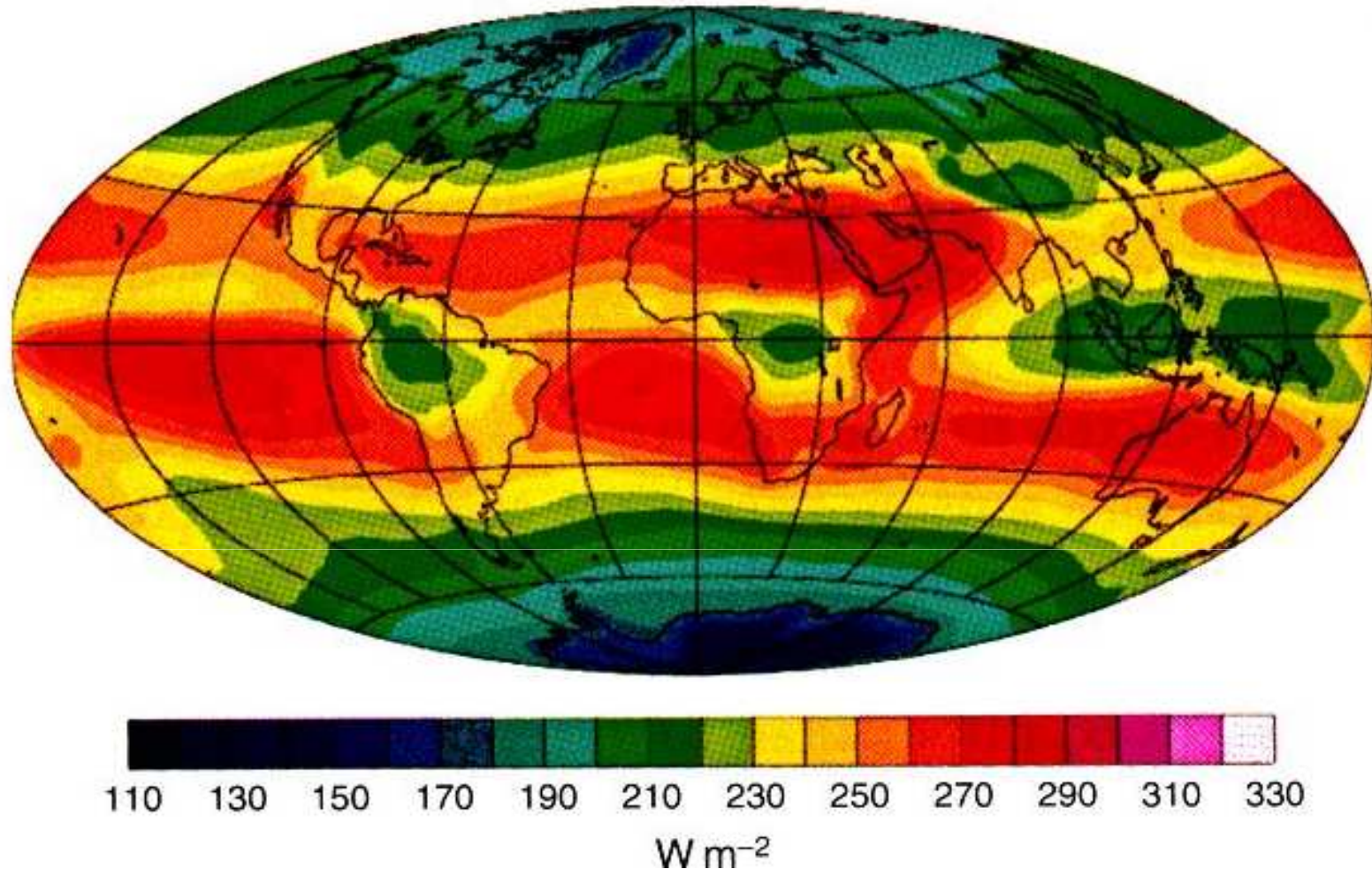
Absorbed Solar Radiation



Radiazione solare assorbita: tiene conto dei fattori geografici, astronomici e albedo
Massimi nelle aree oceaniche tropicali ed equatoriali: poca copertura nuvolosa, basso angolo zenitale, piccolo albedo degli oceani.

Minimi ai poli: inverno buio, riflessione per nubi e ghiaccio, angolo zenitale grande
Marcato gradiente equatore-poli: al calo dell'insolazione si aggiunge un aumento dell'albedo

Outgoing Longwave Radiation

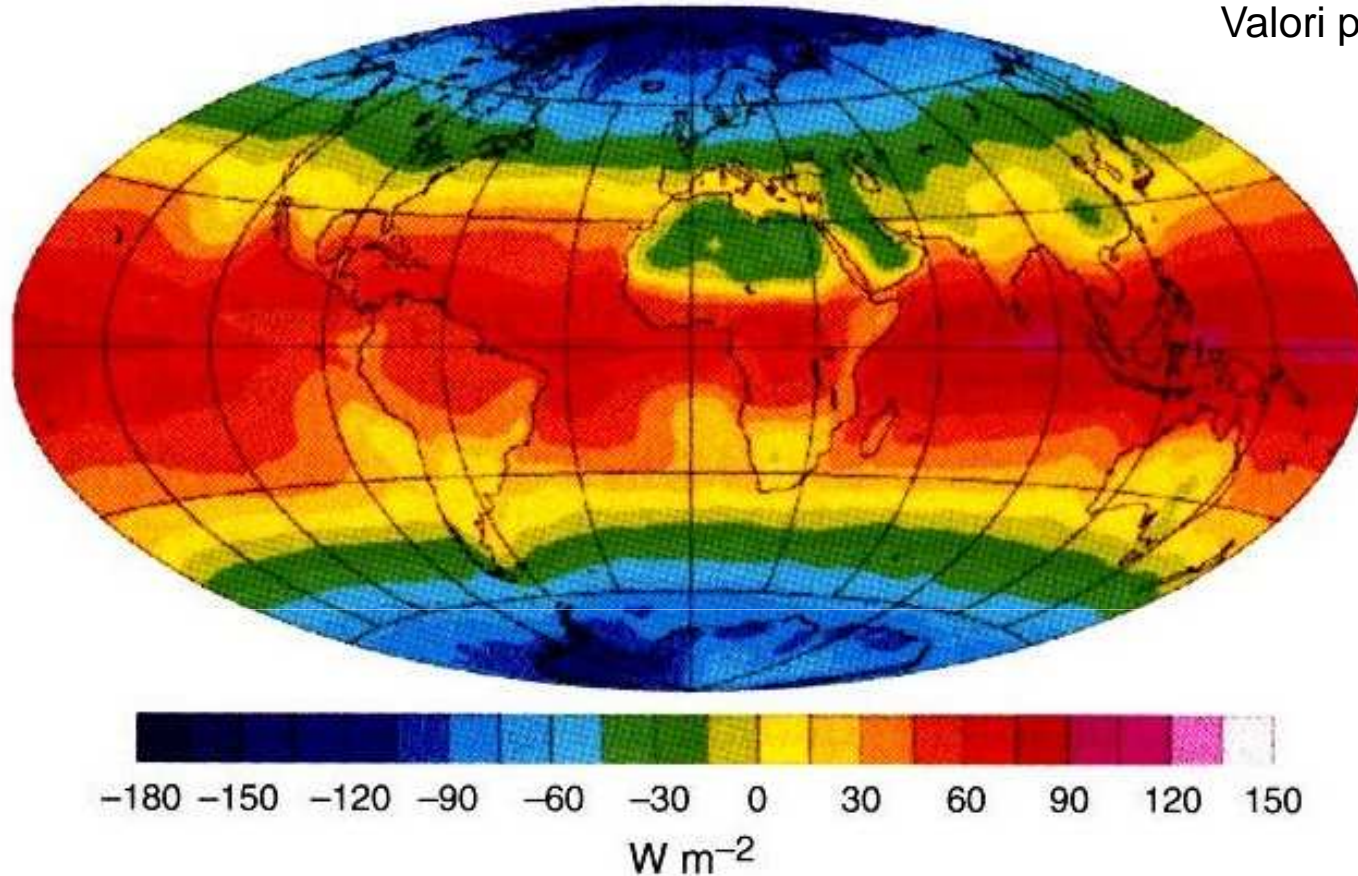


OLR viene misurata da satellite, ed è modulata dalla T del corpo che emette, quindi si avranno minimi ai poli e laddove sono presenti nubi con sommità molto elevate (convezione). Massimi invece in corrispondenza dei deserti, oceani tropicali e aree calde sgombre da nubi. Deserti e aree secche equatoriali hanno emissione alta in quanto l'atmosfera è libera da nubi. Il gradiente equatore-poli è meno marcato rispetto alla radiazione solare e il pattern generale mostra maggiore variabilità regionale nelle aree intertropicali.

Net Radiation

Bilancio netto, media annuale

Valori positivi → flussi verso la superficie

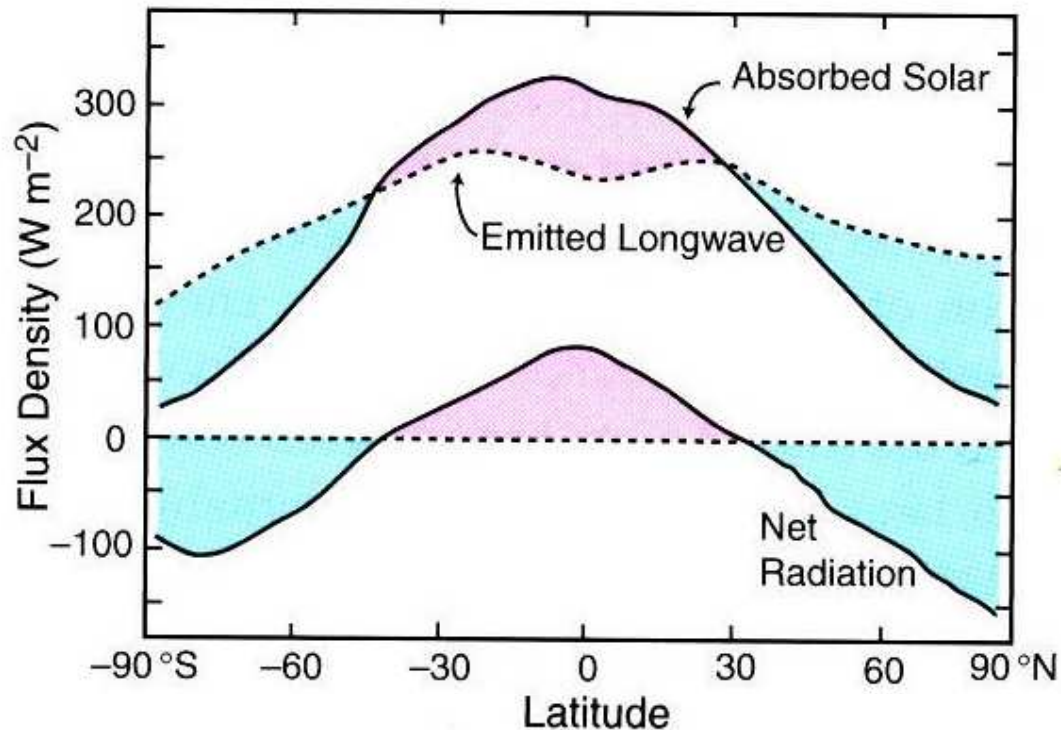


Il bilancio radiativo netto risulta essere negativo ai poli e positiva nei tropici.

Massimi sugli oceani sub-tropicali dovuti alla forte insolazione nei mesi estivi favorita da bassi albedo

Minimi (max perdita energetica) ai poli dovuti alla forte perdita di OLR nei mesi invernali, quando non è compensata dalla radiazione solare.

Interessanti le zone desertiche in cui si ha perdita energetica radiativa a causa dell'albedo piuttosto alto e dell'aria secca che favorisce la fuga di OLR



Bilancio radiativo netto annuale
 (media latitudinale)
 Analisi delle tre componenti

Netta influenza del forte gradiente latitudinale della radiazione solare assorbita, mentre l'OLR ha un gradiente meno intenso. Ne consegue un bilancio energetico complessivo:

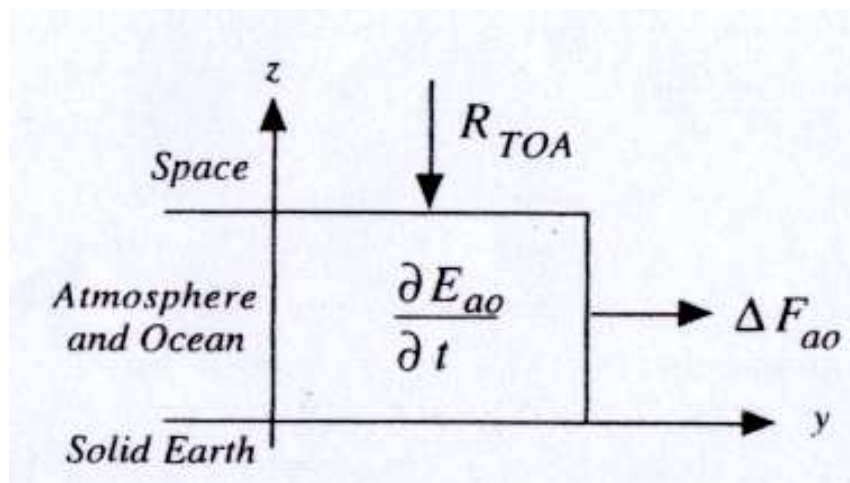
- positivo nelle zone tropicali
- negativo sopra i 40° di latitudine

Questo era ben visibile anche dalla distribuzione globale della radiazione netta che presenta un marcato gradiente equatore-poli (maggiore nell'emisfero invernale)

Tale gradiente nel bilancio netto è responsabile della differenza di T tra equatore e poli Poiché non si assiste ad un continuo aumento di questa differenza di T, nonostante lo squilibrio radiativo, ci deve essere un MECCANISMO DI TRASPORTO

DELL'ENERGIA verso i poli.

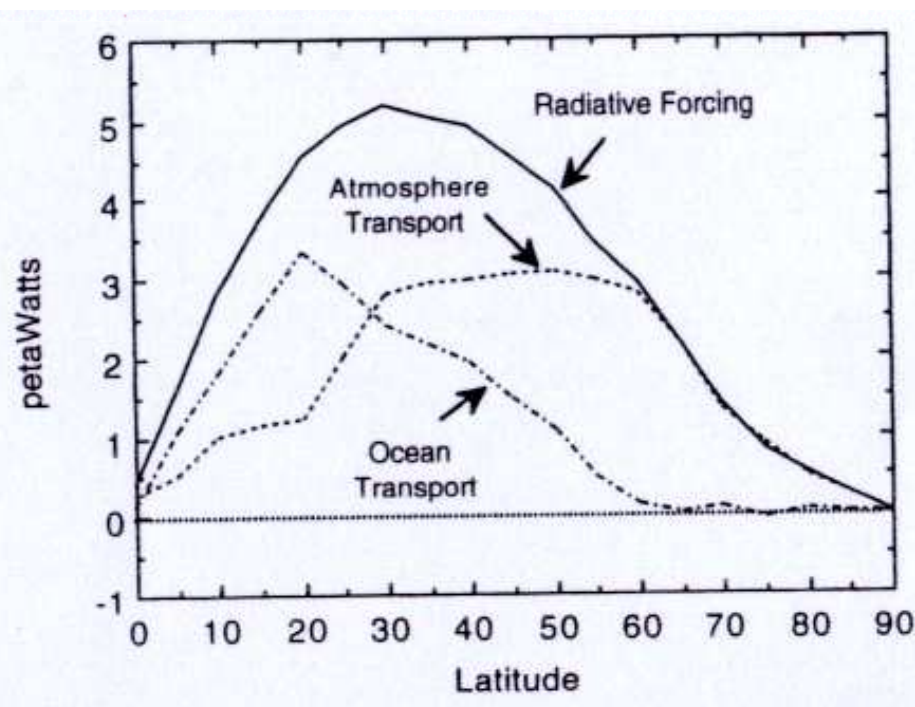
TRASPORTO DI ENERGIA VERSO I POLI



La radiazione netta è positiva sotto i 40° di latitudine e negativa verso i poli

Il bilancio del sistema climatico coinvolge solo lo scambio al top dell'atmosfera, il trasporto attraverso i bordi della regione considerata da parte di atmosfera e oceano e la variazione temporale di energia nella regione

$$\frac{\partial E_{ao}}{\partial t} = R_{TOA} - \Delta F_{ao}$$



Mediando su un anno, il termine temporale diventa piccolo (non ci sono trend per periodi lunghi) e posso considerare un bilancio tra il flusso al top ed il trasporto orizzontale. Siccome R_{TOA} è nota, ne calcolo l'integrale cumulativo su un emisfero, partendo da 0 all'equatore e ottengo i valori dei flussi meridionali di energia attraverso un circolo di fissata latitudine.

Il flusso di energia in atmosfera può essere stimato da misure di vento, umidità e temperatura da satellite o palloni. E' massimo tra i 30° e i 60° (instabilità baroclinica)

Il flusso di energia negli oceani ha un picco attorno ai 20° nella fascia subtropicale.