



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO

Il sottosistema atmosfera parte 2

Prof. **Manuela Pelfini**

1

quindi riassumendo.....

Il sole

La **luminosità** è il tasso totale di energia rilasciata dal sole.

Sono note stelle 10^{-4} volte meno luminose del sole e 10^5 volte più brillanti.

Le loro **temperature di emissione** vanno dai 2 000 ai 30 000 K mentre le temperature della fotosfera solare sono di circa 6 000 K.

La fotosfera è la regione del Sole dalla quale la maggior parte dell'energia emessa è rilasciata nello spazio

Il **raggio** delle altre stelle varia da 0.1 a 200 volte quello del Sole (pari a 6.9×10^8 m). L'energia del Sole è prodotta dallo stesso a seguito di processi di fusione nucleare che avvengono nel cuore della stella



2

La Terra nel sistema solare

Il Sole

Oltre la fotosfera

Cromosfera (visibile durante le eclissi totali) – involucro di gas incandescenti
Punte luminose = *spicole*.

Corona – parte più esterna dell'atmosfera solare – gas ionizzati sempre più rarefatti.

Visibile solo con eclissi totale (alone tenue con luminosità circa $\frac{1}{2}$ di quella della luna piena)

Parte più esterna della corona: particelle ionizzate sfuggono ad attrazione gravitazionale – si disperdono (*vento solare*)



<https://it.wikipedia.org/wiki/Cromosfera>

https://it.wikipedia.org/wiki/Corona_solare

3

Attività solare

Attività solare

=

Radiazione
stazionaria: energia
irradiata dalla
superficie legata alla T

+

vento
solare

Altri aspetti dell'attività del sole:

- Macchie solari
- Protuberanze (nubi di idrogeno che partono dalla cromosfera e penetrano nella corona)
- Brillamenti – *flares* (lampi di luce associati a scariche elettriche – derivano da esplosioni di energia con ampia gamma di radiazioni da raggi x a onde radio. Emettono flusso di particelle atomiche)

4

Dopo 26 ore da esplosione di un flares al centro del disco il flusso di particelle raggiunge la Terra....



Corpuscoli solari
impattano con alta
atmosfera spingendo
le particelle ionizzate
verso la bassa
atmosfera



**Aurore polari
boreali e
australi**
Tra 20 e 100 km

Contemporaneamente
tempeste magnetiche



<https://www.newenca.com/2019/06/01/aurora-boreale-un-fenomeno-tanto-spettacolare-quanto-minaccioso/>

5



<https://blog.earthviaggi.it/alla-scoperta-dellaurora-australe/>

6

Bilancio energetico globale

Radiazione solare

All'interno di Sole per temperatura e densità della materia elevate si producono un gran numero di reazioni di fusione.
L'idrogeno (H), viene convertito in elio (He), sprigionando una quantità enorme di energia termica, radiazione elettromagnetica, flusso di particelle (vento solare) e neutrini.

Tasso di produzione energia solare pressoché costante
Quindi pressoché invariata l'emissione di radiazione
Quindi pressoché invariata la quantità di energia ricevuta dalla Terra =
Costante solare

Calcolata oltre i limiti esterni dell'atmosfera

7

Bilancio energetico globale

Costante solare:

C= Quantità di energia ricevuta dalla Terra ovvero la quantità di radiazione (potenza per unità di superficie) che incide su una superficie normale alla direzione di propagazione posta ad una distanza di 1 U.A.

Calcolata oltre i limiti esterni dell'atmosfera
1361 W/m² (Watt per metro quadro) – **1367** W/m² (1372 W/m²)

Per radiazione ricevuta/emessa bisogna tenere cioè conto della potenza della radiazione e dell'area che la riceve/emette

8

La Terra nel sistema solare

Il Sole **Attività solare**

La Terra riceve energia dal sole come luce e calore. Quando è allo Zenit circa 1000 W (watt)/m²

Se misurato fuori dall'atmosfera circa 1360 W/m² (1366 e 1380) → **1367**

Costante solare: potenza di irraggiamento del Sole per unità di superficie

Ovvero la quantità di radiazione solare in arrivo sulla Terra, misurata sulla superficie superiore dell'atmosfera terrestre su di un piano perpendicolare ai raggi.

9

Come si calcola...

Il Sole irradia ogni secondo un'energia di 3.90×10^{26} J nello spazio, ovvero:

L_0 = luminosità = 3.90×10^{26} W = potenza emessa dal Sole

Il sole irradia in tutte le direzioni. Nello spazio l'energia si conserva quindi su ogni superficie sferica centrata sul sole avrò uguale energia, mentre il flusso cala.

Il flusso è dato da

$$S_d = \frac{L_0}{4\pi d^2} \quad \text{dove } d = \text{raggio della sfera} \\ 4\pi d^2 = \text{superficie della sfera}$$

Considerando $d = 1$ U.A. (circa $1,5 \times 10^{11}$ m)

$3,90 \times 10^{26} / 4\pi (1,5 \times 10^{11})^2 = 3,90 \times 10^4 / 4\pi \times 2,25 \text{ m}^2 \dots$

allora la **costante solare: $S_0 = 1367 \text{ W/m}^2$**

Valori leggermente diversi nelle varie fonti

10

joule (simbolo **J**): unità di misura del Sistema internazionale. E' l'unità di misura dell'energia, del lavoro e del calore (per il calore si usa anche la caloria)

Un **joule** è il lavoro svolto esercitando la forza di un newton per una distanza di un metro.

Circa pari al lavoro richiesto per sollevare una massa di 102 g per un metro, opponendosi alla forza di gravità terrestre.

Un joule è anche il lavoro svolto per erogare la potenza di un watt per un secondo

Il **watt (W)** è l'unità di misura della potenza del Sistema Internazionale. Un watt equivale a 1 joule al secondo (1 J/s)



Bilancio energetico globale



Processi fondamentali di riscaldamento e raffreddamento dell'atmosfera

INSOLAZIONE = quantità di energia ricevuta dal sole sulla superficie della Terra (costante solare)



Serie di eventi:
Parte dell'irraggiamento viene riflesso – il resto attraversa l'atmosfera – trasformazioni prima e dopo aver raggiunto il suolo

IRRAGGIAMENTO

Processo con cui energia elettromagnetica viene emessa da corpo radiante ($>$ calore oggetto, $>$ è la radiazione – minore è la lunghezza d'onda) - intensità di irraggiamento W/m^2

Buon corpo radiante detto corpo nero

ASSORBIMENTO

Radiazioni elettromagnetiche possono essere assorbite in modo diverso dai materiali. Un buon corpo radiante è anche un buon corpo assorbente

Le molecole sono messe in vibrazione e aumenta la T del corpo
Superfici scure assorbono maggiormente

Vapore acqueo e CO_2 assorbono energia radiante messa dalla Terra

13

INSOLAZIONE = quantità di energia ricevuta dal sole sulla superficie della Terra (costante solare)



Serie di eventi:
Parte dell'irraggiamento viene riflesso – il resto attraversa l'atmosfera – trasformazioni prima e dopo aver raggiunto il suolo

IRRAGGIAMENTO

Processo con cui energia elettromagnetica viene emessa da corpo radiante ($>$ calore oggetto, $>$ è la radiazione – minore è la lunghezza d'onda) intensità di irraggiamento W/m^2

Buon corpo radiante detto corpo nero

ASSORBIMENTO

Radiazioni elettromagnetiche possono essere assorbite in modo diverso dai materiali. Un buon corpo radiante è anche un buon corpo assorbente

Le molecole sono messe in vibrazione e aumenta la T del corpo
Superfici scure assorbono maggiormente

Vapore acqueo e CO_2 assorbono energia radiante messa dalla Terra

RIFLESSIONE

Capacità di riflettere le onde elettromagnetiche senza alterarle (reinvia verso lo spazio con stesso angolo e stessa lunghezza d'onda)
Se riflessa non viene assorbita (opposto dell'assorbimento)

Albedo: riflettività complessiva di un oggetto

Es neve 95% foresta 14% influiscono angolo di incidenza e rugosità

DIFFUSIONE (o scattering)

Capacità di deviare le onde (luce) senza modificare la lunghezza d'onda (è una forma di riflessione)

Ne consegue radiazione diffusa

Quantità di radiazione diffusa dipende da lunghezza d'onda e da dimensione, forma e tipo di molecole/particelle

Onde corte diffuse più facilmente (cielo blu) (viola e blu deviati più facilmente)

Con sole basso e diffusione del blu le onde che arrivano al suolo sono più lunghe _ Cielo rosso

TRASMISSIONE

Se le onde non vengono riflesse o assorbite possono attraversare il mezzo

Grande variabilità dei mezzi

Roccia bassa capacità (non penetrano in profondità - si scaldano solo in superficie)

Acqua trasmette bene

In alcuni casi dipende dalla lunghezza d'onda incidente (vetro buona trasmissione onde corte ma no per le onde lunghe (es auto in estate, effetto serra)

14

CONDUZIONE

Passaggio di calore da una molecola all'altra senza che queste modifichino la loro posizione relativa

Molecole a contatto: la più calda vibra sempre meno cedendo energia e la più fredda sempre di più

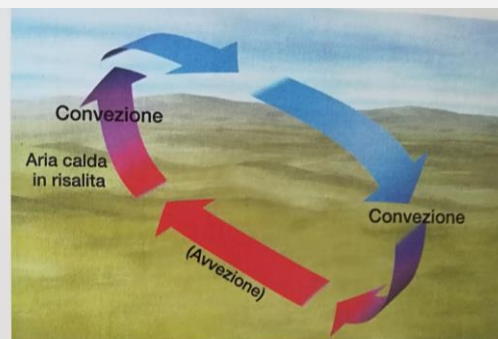
Grandi differenze nei materiali: buoni conduttori es metalli, cattivi conduttori es ceramica, roccia, aria)

CONVEZIONE

Energia trasferita con il movimento (circolazione verticale di un fluido – aria, acqua) – celle convettive

AVVEZIONE

Direzione dominante nel trasferimento di energia (orizzontale) es vento può trasferire calore o aria fredda



▲ **Figura 4-15** Convezione nell'atmosfera. L'aria riscaldata dalla superficie terrestre si solleva e aria più fresca confluisce per rimpiazzarla, producendo una *cella convettiva*. Il movimento orizzontale dell'aria nella cella convettiva viene chiamato *avvezione*.

15

RAFFREDDAMENTO E RISCALDAMENTO ADIABATICO

Quando aria sale o scende - cambiamenti in relazione ai cambiamenti di pressione

Espansione e raffreddamento adiabatico

Raffreddamento di massa d'aria senza perdita di calore – energia viene sottratta alle molecole per disperderle in volume maggiore

Adiabatico: senza scambi di calore con l'esterno

Compressione e riscaldamento adiabatico

Riscaldamento dell'aria perchè sottoposta a pressione maggiore

CALORE LATENTE

Cambiamenti di stato dell'acqua comportano rilascio o assorbimento di energia

(scambio di energia sotto forma di calore latente)

Evaporazione: calore assorbito – processo di raffreddamento

Condensazione: rilascio calore latente – processo di riscaldamento

16

riassumendo: trasferimento di energia

Temperatura: data dall'energia cinetica delle molecole all'interno di una sostanza (aumenta all'aumentare della velocità delle particelle)

Gli oggetti possiedono diversi livelli di energia che possono aumentare o diminuire.

Il calore fluisce dall'oggetto se perde energia e verso l'oggetto se l'acquiesce

Forme di trasmissione del calore:

Conduzione: tra due corpi a contatto con diverse temperature - parte dell'energia cinetica (moto particelle) viene trasferita al corpo più freddo fino al raggiungimento della stessa T

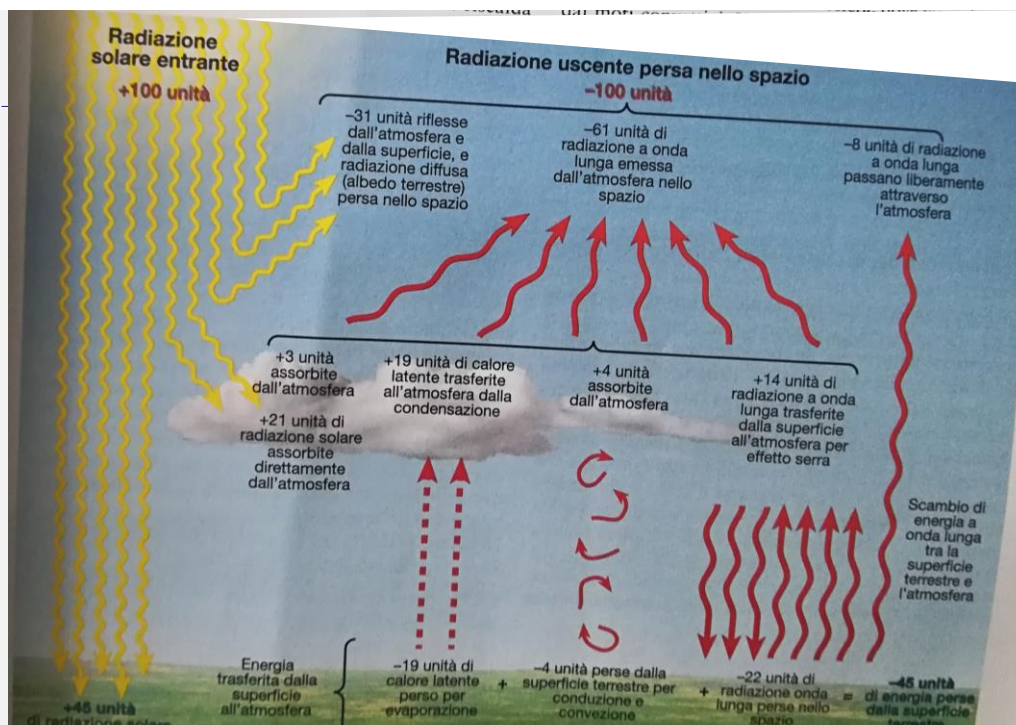
Convezione: flusso di energia che si attiva per spostamento della materia (fluidi, liquidi e gas che hanno temperature e densità diverse)

Responsabile della circolazione in atmosfera e negli oceani con trasferimento del calore da aree intertropicali a latitudini maggiori

Calore latente: nei passaggi di stato: assorbimento energia per passaggio dallo stato solido a liquido o a gassoso o liberazione (es da vapore a pioggia)

→ in atmosfera raffreddamento o riscaldamento in occasione dei passaggi di stato

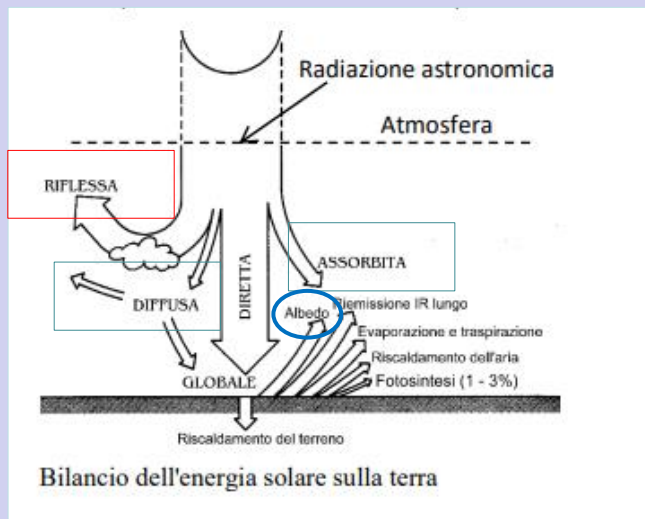
17



18

Sistema energetico globale

Dissipazione dell'energia solare in atmosfera



19

Sistema energetico globale

Albedo

Rapporto tra radiazione a onde corte emessa e radiazione incidente



Neve e ghiaccio albedo elevata (0,45-0,85 – riflettono la maggior parte energia solare)
Superficie nera albedo = 0,03

Acqua albedo 0,2

Campi coltivati, terreni nudi, foreste: valori tra 0,03 e 0,25

L'energia assorbita da una superficie riscalda per conduzione e convezione l'aria vicina



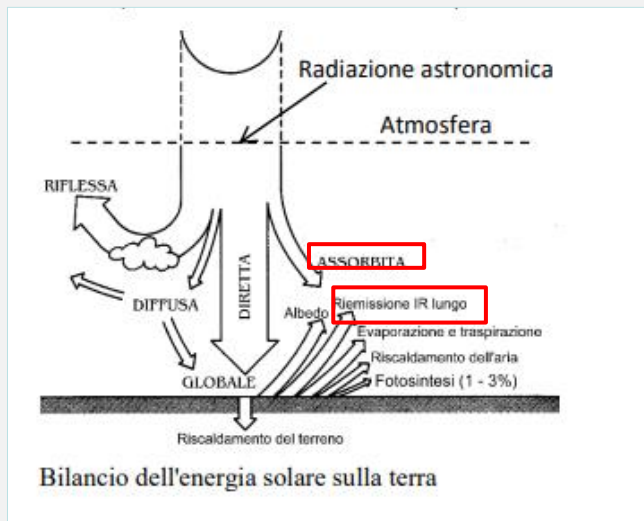
Temperature dell'aria vicino ad una superficie sono maggiori se albedo bassa – Sistema Terra: albedo complessiva tra 0,29 e 0,34 quindi la Terra riflette nello spazio poco meno di 1/3 della radiazione solare ricevuta e ne assorbe i 2/3

Rapporto tra radiazione riflessa e assorbita è tra i principali fattori che determinano la temperatura media della Terra

20

Sistema energetico globale

Dissipazione dell'energia solare in atmosfera



21

Sistema energetico globale

Radiazione di ritorno ed effetto serra

La superficie della Terra è riscaldata da radiazione

La Terra emette radiazione a onde lunghe (**infrarosse** verso l'alto) – in parte vanno nello spazio, in parte **assorbite** da atmosfera che a sua volta assorbe ed emette radiazioni infrarosse in tutte le direzioni – **anche verso il suolo**

= **flusso discendente** o **radiazione di ritorno**

Bilancia parte del calore emesso dalla superficie = **effetto serra**

Radiazione di ritorno dipende da prevalentemente CO₂ e vapore acqueo (assorbono radiazione infrarossa)

L'assorbimento aumenta temperatura dell'atmosfera e causa maggiore radiazione di ritorno. In questo modo la bassa atmosfera con i gas che assorbono IR agiscono come una coperta. Il vapore acqueo nelle nubi assorbe radiazioni IR.

Effetto serra fondamentale per la vita sulla Terra – se non ci fossero i gas serra la T media del pianeta sarebbe -18° C (attualmente 15° C)

22

Gocce d'acqua nelle nubi

Vapore acqueo

CO₂

Altri gas serra

Contribuiscono al riscaldamento della Terra (alcuni con potere di assorbimento > della CO₂ ma presenti in concentrazioni molto limitate)

L'energia non si crea non si distrugge ma si trasforma



Il bilancio entrate/uscite deve essere in pareggio

La Terra è riscaldata dal basso

23

Bilancio radiativo del Sistema Terra: componenti fondamentali

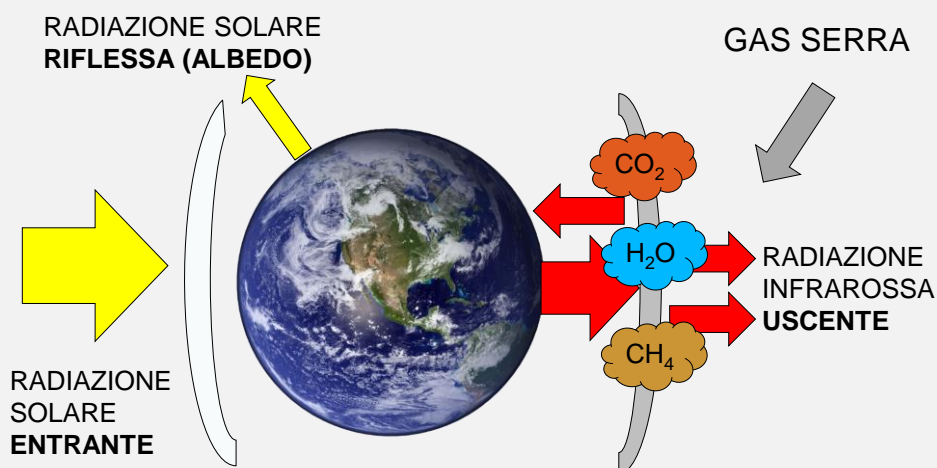


Figura proposta dal Prof. Maugeri

24

Bilancio energetico globale

Radiazioni infrarosse emesse dalla Terra

L'intensità della radiazione e la gamma delle lunghezze d'onda dipendono dalla temperatura
Terra e atmosfera sono più fredde del Sole



Terra emette meno energia del Sole



Terra emette nelle lunghezze d'onda dell'infrarosso

Lunghezze d'onda comprese tra 6-8, 14-17 e $>21 \mu\text{m}$ quasi completamente assorbite dall'atmosfera prima della ri-emissione nello spazio

Vapore acqueo e CO_2 svolgono il ruolo principale nell'assorbimento e nell'effetto serra

Lunghezze d'onda di 426, 8214, 17721 μm emissioni più significative = finestre che consentono all'energia di uscire dall'atmosfera

25

Sintesi:

La radiazione solare che raggiunge la Terra viene in parte riflessa (circa 30-31%), in parte assorbita (18%) e solo la metà (media) raggiunge la superficie.

L'albedo riflette circa il 35% della radiazione in arrivo
La radiazione assorbita viene riemessa come onda lunga (Infrarosso)

L'atmosfera si riscalda dal basso e si mantiene calda grazie all'effetto serra (assorbimento della radiazione emessa dalla superficie terrestre da parte di gas serra e vapore acqueo)

Il sistema Terra-atmosfera restituisce allo spazio la stessa quantità di energia che riceve dal Sole

Nel complesso il bilancio è in pareggio – equilibrio termico

La concentrazione dei gas serra è importantissima per definire la temperatura media del pianeta

26

Sistema energetico globale

Clima e cambiamento climatico globale

Il bilancio energetico globale consente di capire cambiamenti climatici globali



Es: taglio foreste e urbanizzazione → riduzione albedo → maggiore assorbimento energia → innalzamento temperatura



Maggiore flusso emissioni infrarosse dalla superficie verso atm



Assorbimento radiazioni nell'infrarosso → aumento della radiazione di ritorno → **incremento del riscaldamento per effetto serra**

Fondamentale il ruolo dei gas serra!

27

Bilancio energetico globale

Bilancio globale delle radiazioni

Terra: assorbe continuamente radiazioni onde corte ed emette radiazioni onde lunghe (infrarosso)

Particelle in atmosfera e riflessione sulla superficie terrestre rimandano nello spazio una parte della radiazione

Energia rimanente è assorbita da atmosfera – terre emerse, oceani – e viene riemessa come infrarossa

A lungo termine bilancio costante – temperatura media della Terra tende a rimanere costante

28

Sistema energetico globale

Radiazione netta, latitudine e bilancio energetico

Tra 40° N e 40° S
eccedenza di energia

Oltre i 40° N e S deficit
energia

Le aree nel grafico sono = quindi
bilancio in pareggio

L'energia si trasferisce verso le zone a bilancio negativo
come calore sensibile o calore latente

= *spostamento masse d'acqua e masse d'aria
calde verso i Poli, fresche verso equatore*

→ lo squilibrio di insolazione alle diverse latitudini è il motore del
trasferimento di energia e quindi dei movimenti delle masse d'aria e di acqua

29

Sistema energetico globale

Radiazione netta, latitudine e bilancio energetico

Il bilancio energetico alla superficie della Terra è complessivamente in
pareggio ma diverso da luogo a luogo e nel tempo (es giorno-notte:
mentre la radiazione proveniente dal Sole di notte è assente, superficie
terrestre e atmosfera continuano ad emettere energia)

Radiazione netta: differenza tra energia ricevuta ed energia irradiata



Eccedenza di energia dove flusso energia incidente più veloce di quello
relativo all'energia irradiata (radiazione netta positiva)
Deficit dove flusso incidente < di flusso in uscita (radiazione netta
negativa)

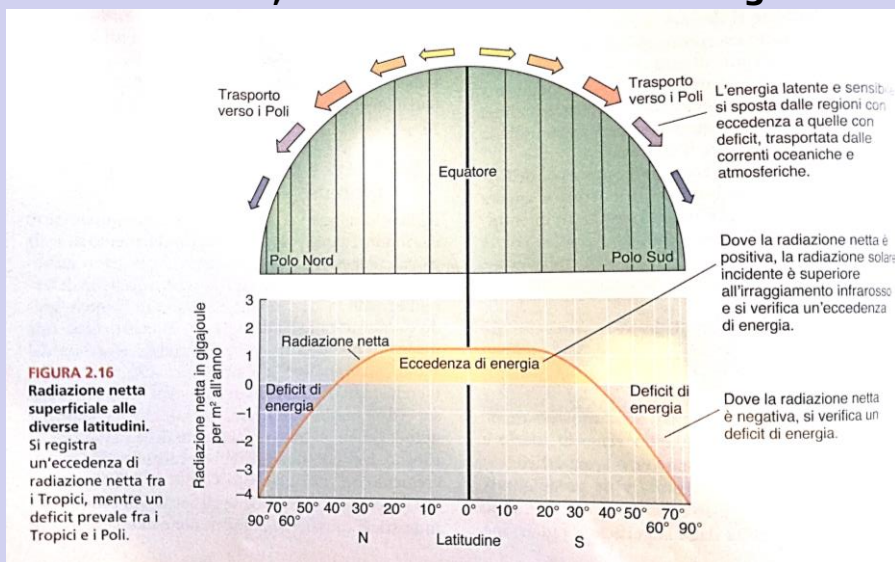
MA

Nel complesso bilancio annuo = 0

30

Sistema energetico globale

Radiazione netta, latitudine e bilancio energetico



31

Bilancio energetico globale

Flusso (W/m^2) costante sulla superficie della Terra ma:

Luoghi diversi ricevono **quantità** diverse di energia in **tempi** diversi

In ogni momento **insolazione** dipende dall'angolo di incidenza dei raggi solari rispetto al piano orizzontale

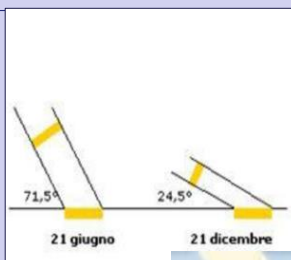
Impatto maggiore quando il Sole è allo zenit
Impatto via via minore all'abbassarsi della posizione del Sole

Insolazione: flusso di radiazione solare in arrivo (valutato al di sopra dell'atmosfera)

32

Bilancio energetico globale

Quantità di energia trasmessa a ciascun punto della Terra **dipende dall'angolo di incidenza dei raggi solari** (oltre che dalla trasparenza locale dell'atmosfera)



L'angolo di incidenza dei raggi solari dipende da:

- **Altezza del Sole** sull'orizzonte (che dipende dalla stagione e dall'ora del giorno)
- **Inclinazione locale** della superficie terrestre
- **orientamento del versante**



<https://www.autori.com/story/angolo-di-incidenza-dei-raggi-solari-De9AL2z5Q146T8Vd75qD2ae>

33

Bilancio energetico globale

Variazione dell'insolazione giornaliera nel corso dell'anno

Nelle 24 ore dipende da:

- Angolo di incidenza dei raggi del Sole sulla superficie nell'arco della giornata
- Durata dell'esposizione

Entrambi i fattori dipendono dalla latitudine e dalla stagione (ovvero direzione di inclinazione dell'asse terrestre rispetto al Sole)

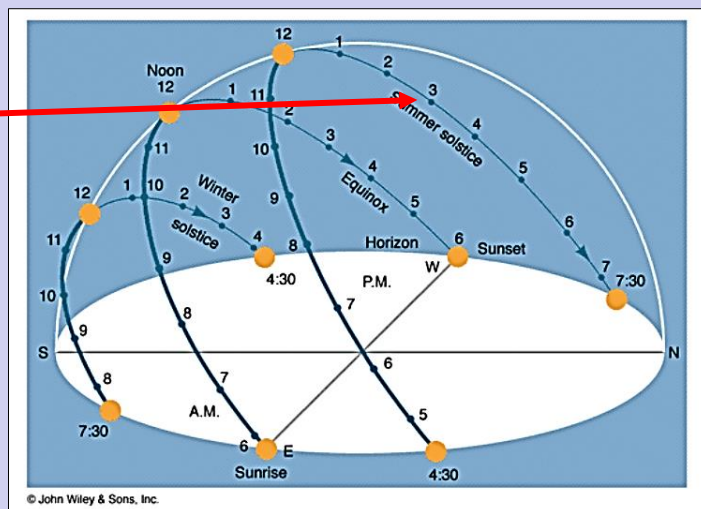
34

Conseguenze dei moti della Terra + Bilancio energetico globale

Medie latitudini -
Estate: giornate più
lunghe, inclinazione
più alta del Sole

Durante il giorno:
mezzogiorno -
max altezza del
Sole - max
insolazione

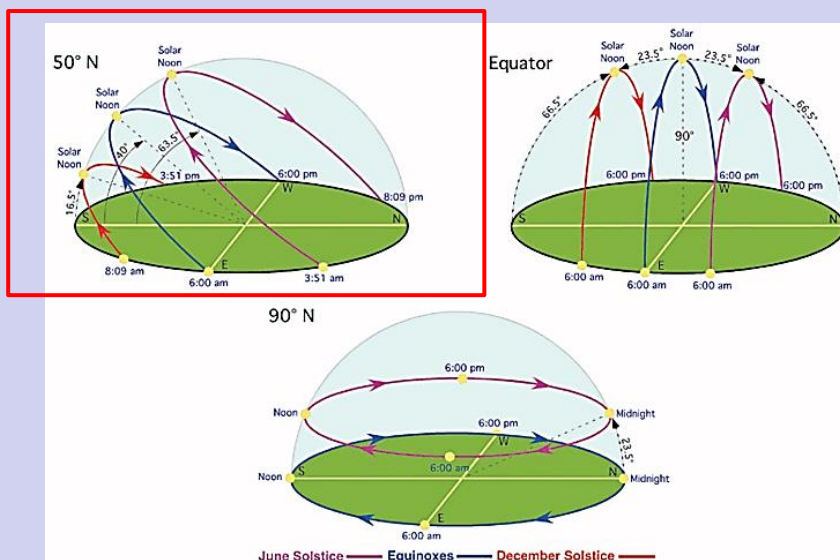
*La lunghezza della
traiettoria e l'altezza
angolare del sole durante la
giornata cambiano nel corso
dell'anno*



Traiettoria del Sole nel cielo a 40° N

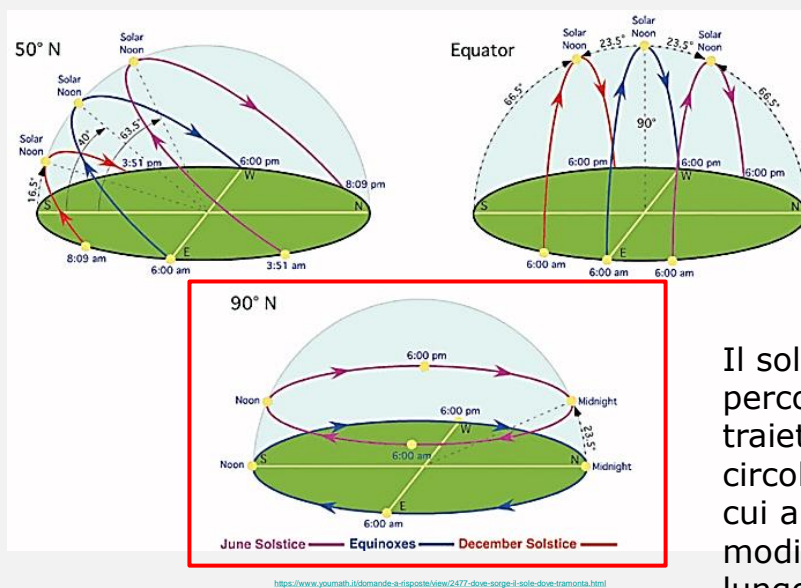
35

Angoli
minori
anche
durante il
solstizio



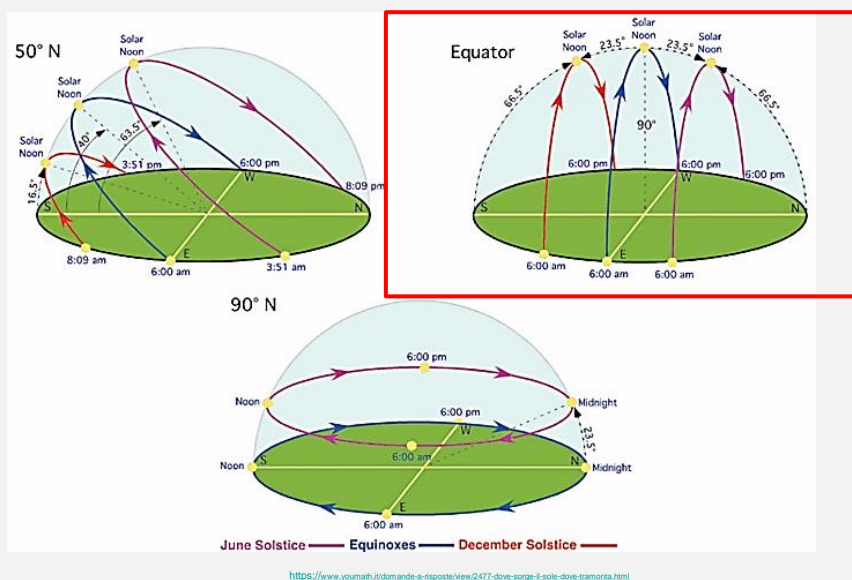
<https://www.yourmaths.com/la-diposizione/2477-dove-sorge-il-sole-dove-tramonta.html>

36



Il sole percorre una traiettoria circolare al cui altezza si modifica lungo l'anno

37



38

Riassunto variazione insolazione (W/m^2) alle diverse latitudini

Diurna

Alte latitudini: grandi variazioni diurne a seconda della stagione

Equatore: minime variazioni

Polo N: insolazione si annulla all'equinozio di settembre

(Sole scompare sotto l'orizzonte fino all'equinozio di primavera)

Annua:

Varia gradualmente da Equatore ai Poli (è maggiore alle basse latitudini)

Alte latitudini ricevono comunque globalmente un considerevole flusso di energia solare (al polo 40% di quella all'equatore)

Se l'asse di rotazione non fosse inclinato: no stagioni, insolazione molto alta all'equatore e nulla ai Poli (raggi solari sempre tangenti)

Fasce latitudinali del globo

Dal modello stagionale dell'insolazione giornaliera: suddivisione del globo in **fasce latitudinali**

Zona equatoriale: compresa tra 10°N e 10°S
Intenso irraggiamento tutto l'anno.
Durata dì e notte circa uguali

Zone tropicali: comprese tra 10°N e 25°N – 10°S e 25°S
Marcato ciclo stagionale
Tropico del Cancro
Tropico del Capricorno
Alternanza tra alto e basso irraggiamento nel corso dell'anno

Zone subtropicali: tra 25 e 35° (N e S)
Forte ciclo stagionale con elevata insolazione annua

Zone delle medie latitudini: tra 35 e 55° (N e S)
Grandi variazioni nell'insolazione e nella durata del dì nel corso dell'anno – grandi differenze annuali della temperatura media superficiale

segue

Fasce latitudinali del globo

Dal modello stagionale dell'insolazione giornaliera: suddivisione del globo in **fasce latitudinali** (*segue*)

Subartica e subantartica: compresa tra 55° e 60° N e S

Zone artica e antartica: comprese tra 65° e 75° N e S
Grande variazione annuale della lunghezza del dì
Enormi contrasti di insolazione lungo il corso dell'anno

Zone polari: da 75°(N e S) ai Poli N e S
Maggior contrasto stagionale di insolazione
Dì durata 24 ore per 6 mesi anno
Notte durata 24 ore per 6 mesi anno

In sintesi

Mediando su un intero anno, la quantità di energia assorbita non è uguale su tutto il pianeta ma risulta marcatamente maggiore all'Equatore rispetto ai Poli.

L'atmosfera e gli oceani trasportando l'energia dall'Equatore verso i due Poli contribuiscono a ridurre gli effetti sulla temperatura superficiale di questo gradiente del riscaldamento.



I processi alla superficie
sono alimentati
dall'energia del Sole

Esempi

Movimento delle aria (vento)
Movimento dell'acqua (fiumi –
onde)



azione di erosione
trasporto deposito.....