

POLITECNICO DI MILANO

Corso di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



ANALISI DEL VISIBILE E CAMBIAMENTO CLIMATICO

Relatore: prof. Antonio Ghezzi

Elaborato di laurea di:

Elisa DUCHINI matr.680959

Anno accademico 2010/2011

Indice

CAPITOLO 1.....	3
CAPITOLO 2.....	6
CAPITOLO 3.....	10
CAPITOLO 4.....	26
CAPITOLO 6.....	68
CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	68
NOTE BIBLIOGRAFICHE	70

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Il Sole rappresenta la principale fonte di energia vitale dell'intero sistema solare. La vita sulla Terra è strettamente legata all'interazione di due energie: l'energia che si libera attraverso la radiazione solare e l'energia che la Terra riemette nello spazio per effetto della riflessione e della rifrazione della radiazione solare incidente.

Il Sole è fondamentale non solo per la vita degli esseri viventi, ma garantisce anche l'esistenza del ciclo idrologico della Terra: la radiazione solare riscalda le grandi masse d'acqua della Terra generando il vapore acqueo presente in atmosfera, il vapore a mano a mano che si innalza di quota torna dallo stato vapore allo stato liquido o stato solido generando piogge o neve.

Un altro aspetto fondamentale del Sole e del suo ciclo di rivoluzione è strettamente legato alla variazione climatica: attraverso la radiazione le grandi masse si riscaldano e tendono a scendere verso la superficie terrestre, mentre le masse fredde tendono ad innalzarsi per riscaldarsi generando i moti convettivi delle masse d'aria.

Oltre alla radiazione solare, un altro effetto molto importante del Sole è la luce. La luce è una porzione di radiazione solare con lunghezze d'onda che ricadono all'interno dello spettro del visibile (λ compresa tra i 400 e i 700

μm). Quando all'interno della radiazione sono presenti tutte le lunghezze dello spettro si parla di luce bianca.

La presenza della luce è importantissima per l'esistenza degli esseri viventi in quanto è la base delle più importanti attività vitali: le piante crescono e vivono attraverso la fotosintesi clorofilliana che avviene per esposizione delle foglie con la luce.

La luce solare ha proprietà terapeutiche per gli esseri viventi garantendo una maggiore efficienza nel metabolismo del corpo umano, un aumento delle difese immunitarie, una riduzione dello stato di stress emotivo e psicologico e tanti altri effetti sul nostro corpo umano.

La luce è strettamente correlata al clima ed ai cambiamenti climatici che si verificano in questi ultimi decenni: nella Terra si sta assistendo ad un fenomeno di riduzione della luce solare sulla Terra (definito oscuramento globale) generato dalla presenza di particolato o di aerosol in atmosfera che assorbono la luce e surriscaldano la Terra. Il particolato e i gas presenti aumentano la temperatura terrestre per il fenomeno detto effetto serra.

Recenti studi sottolineano uno stretto legame tra variazioni di luce solare e clima sugli ecosistemi nelle aree polari: attraverso analisi della composizione biochimica di sedimenti dei laghi in Alaska sono state valutate variazioni nelle caratteristiche geochimiche e biologiche dei sedimenti in corrispondenza di variazioni climatiche e di luce solare.

Le osservazioni sulla luce solare e sulla sua intensità sono aspetti fondamentali che vengono valutati al fine di descriverne la sua variabilità e

sviluppare dei modelli di previsione predittiva e, in alcuni casi, vengono impiegati in supporto alle correzioni di misure eseguite da sensori satellitari.

CAPITOLO 2

IL CICLO SOLARE E I MUTAMENTI CLIMATICI

Il ciclo solare è uno dei fattori principali che interagiscono sui cambiamenti climatici: il Sole, infatti, è il motore principale dei fenomeni atmosferici più importanti: i raggi solari che colpiscono l'atmosfera generano i principali moti convettivi delle masse d'aria definendone, quindi, le precipitazioni atmosferiche (sottoforma di pioggia o neve), il vento e tanti altri fattori.

2.1 L'ATTIVITA' SOLARE

La temperatura media della Terra dipende, in gran misura, dall'attività solare che influisce in minima parte con una variazione del flusso di radiazione emesso dal Sole verso la Terra e soprattutto dalla variazione dei fenomeni climatici terrestri ad esso collegato (variazione dell'annuvolamento, precipitazioni, flusso dei raggi cosmici,...). Da sola la variazione del flusso energetico, che varia lentamente nel tempo, non è considerato un contributo importante per la variabilità climatica. Questo avviene perché il Sole è una stella di tipo G in fase di sequenza principale, risultando quindi molto stabile. Tuttavia il flusso radiativo è il motore dei fenomeni atmosferici poiché apporta all'atmosfera l'energia necessaria perché essi si producano. Quindi piccole variazioni nell'attività solare possono apportare più grandi variazioni in alcuni importanti fenomeni legati al clima (ad esempio evaporazione degli oceani,

copertura nuvolosa, precipitazioni e molteplici altri fattori).

Per altro, nel lungo periodo le variazioni del flusso radiativo divengono percettibili poiché il Sole aumenta la sua luminosità con una proporzione del 10% ogni 1.000 milioni di anni. Per questo, sulla Terra primitiva che permise la nascita della vita, 3.800 milioni di anni fa, la luminosità solare era del 70% rispetto a quella attuale. Attualmente la costante solare alle soglie dell'atmosfera è di circa 1366 W/m^2 con variazioni di appena 0,1% misurate dai satelliti in orbita negli ultimi 40 anni in relazione ai cicli solari.

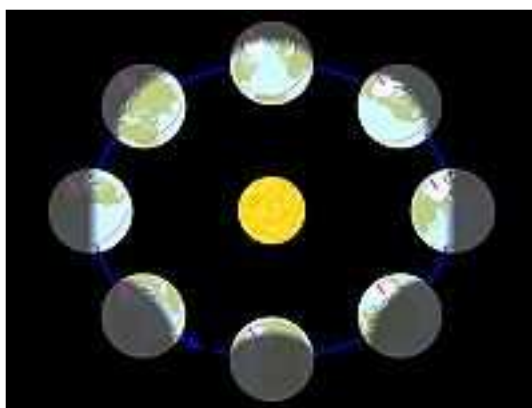


Figura 1 Variazione orbitale della Terra

Le variazioni nel campo magnetico solare e le correlate emissioni di vento solare sono importanti, poiché l'interazione dell'alta atmosfera terrestre con le particelle provenienti dal Sole può generare reazioni chimiche in un senso o nell'altro, modificando la composizione dell'aria e delle nubi così come la loro formazione.

In generale si sospetta che variazioni dell'attività solare possano aver

determinato le variazioni climatiche su scala ultracentenaria nel recente passato evidenziate dai dati climatici indiretti.

2.2 VARIAZIONI ORBITALI

Sebbene la luminosità solare si mantenga praticamente costante nei millenni, varia invece l'orbita terrestre. Questa oscilla periodicamente, modificando la quantità media di radiazione che riceve ogni emisfero nel tempo, e queste variazioni provocano le glaciazioni e i periodi interglaciali. Ci sono tre fattori che contribuiscono a modificare le caratteristiche orbitali facendo in modo che l'insolazione media degli emisferi vari sebbene il flusso globale di radiazione rimanga lo stesso. Si tratta della precessione degli equinozi, dell'eccentricità orbitale e dell'obliquità dell'orbita o inclinazione dell'asse terrestre. Tali studi vennero per la prima volta affrontati e parzialmente risolti dal geofisico serbo Milutin Milankovitch e tali cicli orbitali vanno sotto il nome appunto di cicli di Milankovitch. Tali cicli sarebbero in grado di spiegare i cambiamenti climatici globali su scala temporale di 100.000 anni ovvero pari al periodo delle glaciazioni/deglaciazioni in linea con quanto osservato negli studi dei carotaggi antartici.

2.3 MINIMO DI MAUNDER

Da quando nel 1610 Galileo mise a punto il telescopio, il Sole e le sue macchie sono state osservate con assiduità. Nel 1851 l'astronomo Heinrich Schwabe osservò che l'attività solare variava secondo un ciclo di

undici anni, con massimi e minimi. L'astronomo solare E.W. Maunder si accorse che tra il 1645 e il 1715 il Sole interruppe il ciclo undecennale e ci fu un'epoca in cui quasi non ci furono macchie, denominato minimo di Maunder. Il Sole e le stelle passano un terzo della loro vita in periodi analoghi a questo, che corrispondono a minimi di emissione dell'energia e quindi a periodi freddi nel clima terrestre. Inoltre, in questi periodi le aurore boreali o australi causate dall'attività solare scompaiono o sono rare.

In questi periodi di riduzione delle macchie solari il sole emette una minore radiazione solare e sulla Terra arriva una minore quantità di energia.

Un rapporto di causa-effetto tra la bassa attività delle macchie solari e gli inverni più freddi è ancora oggetto di discussione. Alcuni scienziati credono che l'attività solare influenzi il cambiamento climatico più del diossido di carbonio (vedi riscaldamento globale). Ultimamente nuovi studi sembrano effettivamente dimostrare una correlazione tra macchie solari (e quindi attività del sole) con mutazioni del clima.

CAPITOLO 3

LUCE E RADIAZIONE

Il sole è la fonte principale della luce e della radiazione che arriva sulla Terra.

La luce (dal latino lux) è la porzione dello spettro elettromagnetico visibile all'occhio umano, ed è approssimativamente compresa tra 400 e 700 nanometri di lunghezza d'onda, ovvero tra i 750 e i 430 THz di frequenza. Questo intervallo coincide con il centro della regione spettrale della luce emessa dal sole che riesce ad arrivare al suolo attraverso l'atmosfera. La presenza contemporanea di tutte le lunghezze d'onda visibili, in quantità proporzionali a quelle della luce solare, forma la luce bianca.

La radiazione solare, invece, è l'energia radiante emessa dal Sole a partire dalle reazioni termonucleari di fusione che avvengono nel nucleo solare e producono radiazioni elettromagnetiche le quali si propagano poi nello spazio interplanetario.

3.1 LE LEGGI FISICHE DELLE RADIAZIONI TERMICHE

Di seguito si riportano le principali leggi che regolano il fenomeno di scambio energetico tra le radiazioni termiche.

3.1.1 LA LEGGE DI KIRCHHOFF

Due corpi con superficie esterna A_1 e A_2 rispettivamente sono inserite in

una scatola perfettamente isolata all'esterno. Una volta che sia la scatola, sia i due corpi hanno raggiunto l'equilibrio termico, entrambi i corpi emettono energia radiante proporzionalmente alla loro superficie di emissione. Se si indicano W_1 e W_2 le rispettive potenze emmissive, il flusso di energia radiante sarà dato da A_1W_1 e A_2W_2 . Se si definisce W_B l'intensità della radiazione emessa dalla scatola, una quota parte viene assorbita dai due corpi in relazione alle proprie capacità di assorbimento a_1 e a_2 . Per il principio di conservazione dell'energia, in condizioni di equilibrio termico, valgono le seguenti relazioni:

$$W_B A_1 a_1 = W_1 A_1$$

$$W_B A_2 a_2 = W_2 A_2$$

Dividendo i entrambi i membri delle equazioni per le relative superfici A_1 e A_2 e ricavando W_B , si ottiene la seguente relazione:

$$W_1 a_1 = W_2 a_2 = \text{cost.}$$

Dalla relazione precedente, si evince che per un qualunque corpo in condizioni di equilibrio termico, il rapporto tra l'intensità delle radiazioni W_i e la sua capacità di assorbimento a_i risulti costante.

Poiché i valori di potenza emmissiva sono pari al flusso di energia radiante secondo la seguente relazione:

$$W_i = a_i \quad 0 \leq a_i \leq 1$$

Il valore W_1 sarà massimo per $a=1$, valore caratteristico di un corpo avente capacità di assorbimento totale (definito *corpo nero*). Il rapporto tra la potenza emmissiva di un certo corpo e quella di un corpo nero si definisce remissività che, in condizioni di equilibrio, è uguale al coefficiente di assorbimento.

3.1.2 LA LEGGE DI PLANCK

La distribuzione spettrale dell'energia irradiata da un corpo nero viene definita e descritta dalla legge di Planck. Se definisco con W_B la potenza emissiva di un corpo nero, la potenza emissiva monocromatica per la lunghezza d'onda λ è data dalla relazione $w_{B\lambda} = dW_B/d\lambda$ e il prodotto $w_{B\lambda}d\lambda$ descrive l'energia emessa dalla superficie di un corpo nero per unità di tempo e per unità di area nell'intervallo di lunghezza d'onda compreso tra λ e $\lambda+d\lambda$.

La legge di Planck esprime la potenza emissiva monocromatica normalizzata B secondo la relazione:

$$B = \frac{w_{B\lambda}}{T^5} = \frac{2\pi hc^2 (\lambda T)^{-5}}{e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1}$$

dove:

T = temperatura del corpo nero;

c = velocità della luce ($c = 2,998 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$);

k = costante di Stefan-Boltzmann ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$);

h = costante di Plank ($h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}$).

La potenza emissiva normalizzata dipende sia dalla lunghezza d'onda sia dalla temperatura del corpo: è possibile concludere, quindi, che esiste una dipendenza tra la potenza emissiva monocromatica della radiazione emessa e la temperatura del corpo radiante.

La potenza emissiva complessiva di un corpo nero fornito per tutte le lunghezze d'onda è data dalla relazione:

$$W_B = \int_0^{+\infty} w_{B\lambda} d\lambda = \int_0^{+\infty} \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1}$$

dove:

T = temperatura superficiale del corpo emittente.

3.1.3 LA LEGGE DI WIEN

Sulla base della legge di Planck che definisce la potenza emessa normalizzata secondo la seguente relazione:

$$W_B = \int_0^{+\infty} w_{B\lambda} d\lambda = \int_0^{+\infty} \frac{2\pi hc^2 \lambda^{-5}}{e^{\frac{ch}{k\lambda T}} - 1}$$

È nulla per valori di $\lambda=0$ e per $\lambda \rightarrow \infty$ e assume un valore massimo per

$$\lambda T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

Questa relazione è nota come legge di Wien e definisce che la radiazione di un corpo a una certa temperatura viene emessa in un intorno della lunghezza d'onda modale definita dalla relazione:

$$\lambda_m = \frac{2,898 \times 10^{-3}}{T}$$

La lunghezza d'onda modale della radiazione solare è più corta di quella che caratterizza la radiazione emessa dalla Terra.

3.1.4 LA LEGGE DI STEFAN-BOLTZMANN

La potenza emissiva di un corpo nero è data dal contributo energetico complessivo fornito da tutte le lunghezze d'onda valutabile attraverso la legge di Stefan-Boltzmann

$$\frac{W_B}{T^4} = \int_0^{+\infty} \frac{W_{B\lambda}}{T^5} d(\lambda T) = \sigma$$

dove σ è la costante di Stefan Boltzmann pari a $5,67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

La radiazione di un corpo nero risulta essere proporzionale alla quarta potenza della sua temperatura. Per un qualsiasi di un *corpo grigio* dotato di un valore di emissività $\epsilon < 1$, la potenza emissiva è data dalla relazione:

$$W_i = \epsilon \sigma T_i^4$$

Evidentemente, maggiore è la temperatura del corpo, maggiore è la densità del flusso radiante che viene emesso: il Sole, infatti, ha una potenza emissiva più elevata della Terra.

3.2 BILANCIO ENERGETICO DELLA TERRA

La Terra e l'atmosfera assorbono continuamente energia dal sole sotto forma di radiazione elettromagnetica e la riammettono nello spazio sotto la stessa forma. Sui lunghi periodi di tempo le due quantità si uguagliano e si può affermare che il sistema terra-atmosfera sono in equilibrio radiativo con il sole e l'universo.

La radiazione solare e il suo trasferimento sono i fattori principali degli scambi energetici che avvengono tra la superficie della Terra e i diversi strati dell'atmosfera.

3.2.1 LE EMISSIONI DI ENERGIA DEL SOLE E DELLA TERRA

L'energia del sole è emessa sotto forma di radiazione ad onda corta nelle bande del visibile (VIS) e dell'ultravioletto (UV). Il flusso totale di energia emessa dal Sole

Solo una piccola parte di energia totale emessa dal Sole raggiunge la Terra: infatti rispetto al flusso totale che viene emesso dal Sole pari a $73,5 \times 10^6 \text{ Wm}^{-2}$ solo una minima quantità raggiunge la Terra definita dalla costante solare S_0 pari a 1367 Wm^{-2} . In realtà l'insolazione della superficie esterna dell'atmosfera è assai inferiore rispetto alla costante

solare in funzione dell'angolo d'incidenza tra la superficie terrestre e la radiazione incidente.

L'insolazione incidente viene in parte riflessa, rifratta ed in parte assorbita dall'atmosfera così che la radiazione netta incidente al suolo sia inferiore.

A sua volta, la Terra emette energia radiante. Per la legge di Planck e di Wien, maggiore è la temperatura del corpo radiante, minore risulta essere la lunghezza d'onda della radiazione emessa: lo spettro di emissione della Terra varia da 5 a 60 μm . In relazione della legge di Stefan Boltzmann , la potenza emissiva del nostro pianeta è pari a circa 390 W m^{-2} e, poiché la maggior parte dell'energia radiativa terrestre viene emessa tra i 7 e i 20 μm , il nostro pianeta emette energia radiante in maggior parte nel campo dell'infrarosso termico.

3.2.2 LA RADIAZIONE SOLARE INCIDENTE AL SUOLO

Lo spettro teorico delle emissioni solari non corrisponde al contributo energetico che si può misurare al suolo, poiché l'atmosfera modifica la radiazione solare per via dei processi di riflessione, di assorbimento e di rifrazione che si verificano nell'aria.

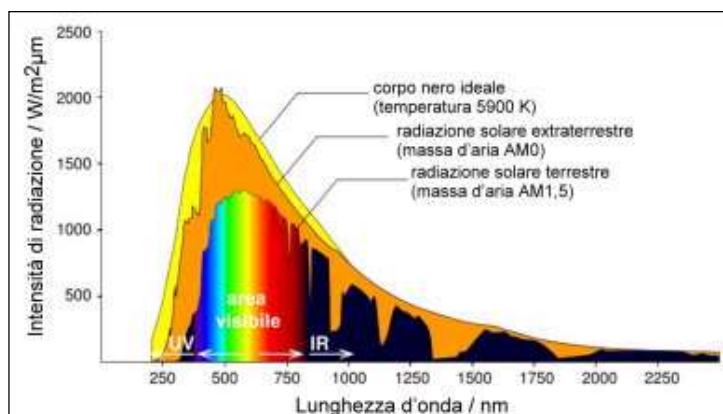


Figura 2 Spettro di emissione del Sole

La rifrazione molecolare è un processo che dipende dalla lunghezza d'onda e risulta essere inferiore a λ^{-5} : l'azzurro del cielo, ad esempio, è strettamente legato alla rifrazione delle radiazioni a breve lunghezza d'onda da parte delle molecole dell'aria. La rifrazione particellare, invece, è dovuta alla presenza nell'aria del particolato atmosferico e delle gocce di acqua. Essa risulta trascurabile sia per le radiazioni a lunghezza d'onda maggiore della dimensione delle particelle sia per quelle con lunghezza d'onda inferiore: è il fenomeno che fa apparire rossa una nube di grosse particelle (ad esempio una nuvola di fumo o di polvere), poiché mentre la luce azzurra viene riflessa, quella rossa viene rifratta.

Le radiazioni a breve lunghezza d'onda vengono riflesse non solo dalle nuvole, ma anche dalle distese innevate o ghiacciate, dagli specchi d'acqua, dalle superfici di sabbia, dal suolo e dalla vegetazione. A differenza dei due processi precedenti, questo fenomeno non è di tipo selettivo e il coefficiente di riflessione è definito albedo il cui valore dipende dalla natura e dalle condizioni della superficie interessata.

L'assorbimento molecolare è un altro fenomeno fortemente selettivo ad alcune lunghezze d'onda. Si crea per effetto dell'eccitazione delle molecole dei gas atmosferici secondo fenomeni di risonanza generata dalle onde luminose.

3.2.2 LA LEGGE DI BEAR

Tali effetti atmosferici possono essere definiti studiando il rapporto che intercorre tra i trasporti di energia radiante monocromatica attraverso un corpo di densità ρ in uno spessore Δs . La variazione di intensità radiante dI_λ che subisce una radiazione di intensità I_λ nell'attraversare uno strato infinitesimo ds , è proporzionale all'intensità stessa e alla densità dello strato, ossia:

$$dI_\lambda = -k_{\lambda a} I_\lambda \rho ds$$

dove:

$k_{\lambda a}$ = coefficiente di assorbimento della radiazione a lunghezza d'onda λ .

Se la radiazione attraversa uno strato di lunghezza finita Δs , vale la seguente legge:

$$I_{\lambda \Delta s} = I_{\lambda 0} \exp \left(- \int_0^{\Delta s} k_{\lambda a} \rho ds \right)$$

dove:

$I_{\lambda 0}$ = radiazione incidente;

$I_{\lambda \Delta s}$ = radiazione in uscita dallo strato esaminato.

La legge di Beer-Bourger-Lambert può essere estesa anche al caso della rifrazione, introducendo il coefficiente di scattering $k_{\lambda s}$ e, quando l'assorbimento e scattering avvengono contemporaneamente, il coefficiente di proporzionalità, detto coefficiente di estinzione, diventa:

$$K_{\lambda} = k_{\lambda a} + k_{\lambda s}$$

Il rapporto tra radiazione incidente, $I_{\lambda 0}$, e trasmessa, $I_{\lambda \Delta s}$ viene chiamato trasmissività dell'atmosfera. Se con ξ indichiamo l'angolo zenitale del Sole, si può scrivere $ds = \sec \xi dz$, e la trasmissività, τ_{λ} , si può quindi esprimere come:

$$\tau_{\lambda} = \frac{I_{\lambda \Delta s}}{I_{\lambda 0}} = \exp\left(-\sec \xi \int_0^{\Delta s} k_{\lambda} \rho dz\right) = \exp(-u \sec \xi)$$

dove:

z = direzione verticale ;

u = profondità ottica o spessore ottico dell'atmosfera.

Lo spessore ottico u dipende dalla lunghezza d'onda incidente e dallo spessore Δs dello strato di atmosfera attraversato.

Lo spessore ottico medio si ricava calcolando la radiazione globale in uscita dallo strato di spessore Δs come:

$$I_{\Delta s} = S_0 \exp\left(-\int_0^{\Delta s} k \rho ds\right)$$

Dove S_0 è la costante solare e k il coefficiente di estinzione globale.

La trasmissività globale può essere definita come:

$$\tau_{\lambda} = \frac{I_{\Delta s}}{S_0} = \exp(-u \sec \xi)$$

dove :

z = direzione verticale;

u = spessore ottico medio.

Il valore dello spessore ottico è tendenzialmente inferiore all'unità in giornate serene e può assumere valori superiori all'unità in giornate caratterizzate da nuvolosità accentuate.

3.3 IL BILANCIO ENERGETICO DELLA TERRA

Il Sistema fisico costituito dalla Terra e dalla sua atmosfera viene riscaldato dalla radiazione solare, emessa sottoforma di radiazioni a breve lunghezza d'onda. Il flusso energetico medio dovuto a tali radiazioni si può valutare in:

$$\gamma S_0 (1 - \alpha)$$

Ottenuto come prodotto tra la costante solare S_0 (cioè il flusso di energia solare che investe, dall'esterno, l'atmosfera), il fattore di assorbimento, $1-\alpha$ (dove l'albedo α rappresenta la frazione di radiazione riflessa dalla Terra verso l'atmosfera), e un fattore geometrico γ , che descrive la forma della terra (pari a $\frac{1}{4}$ per una geometria sferica). Questo flusso viene bilanciato dalle radiazioni a onde lunghe, termiche e infrarosse, che la

Terra emette verso lo spazio. Secondo la relazione di Stefan Boltzmann, il flusso di raffreddamento della Terra è uguale al prodotto

$$\sigma T_e^4$$

dove:

σ = costante universale di Stefan- Boltzmann;

T_e = temperatura effettiva di irradiazione della Terra.

In condizioni di equilibrio, il bilancio energetico impone che i due flussi si compensino; ottenendo la seguente equazione:

$$\gamma S_0(1 - \alpha) = \sigma T_e^4$$

Da questa relazione è possibile ricavare la temperatura di irradiazione della Terra in condizioni di equilibrio.

Ogni corpo emette radiazioni caratterizzate da uno specifico spettro di frequenze, cui corrisponde un certo intervallo di lunghezze d'onda. La distribuzione dell'energia emessa con una particolare lunghezza d'onda dipende dalla temperatura del corpo: maggiore la temperatura, minore è la lunghezza d'onda del picco di emissione. Il Sole emette, avente una temperatura superficiale pari a 6000 K, gran parte della sua energia a lunghezze d'onda compreso tra 0,2 e 4 μm . Alla temperatura di 255 K, la Terra emetterebbe radiazioni a onda lunghe comprese nell'intervallo tra 4 e i 100 μm .

I gas, inoltre, presenti nell'atmosfera, come il vapore acqueo e l'anidride carbonica, non sono capaci di assorbire in modo efficace le radiazioni a breve lunghezza d'onda e, quindi, la radiazione solare. Al contrario, essi sono in grado di assorbire le radiazioni ad onde lunghe emesse dalla superficie terrestre: una volta assorbite le irradiano di nuovo verso la Terra e verso lo spazio.

3.4 LA LUCE SOLARE E LO SPETTRO DEL VISIBILE

La luce solare è una forma di energia caratterizzata da due componenti : la prima è un'onda elettromagnetica ondulatoria e una seconda corpuscolare attraverso i fotoni.

La luce, come tutte le onde elettromagnetiche, interagisce con la materia. I fenomeni che più comunemente influenzano o impediscono la trasmissione della luce attraverso la materia sono: l'assorbimento, la diffusione (scattering), la riflessione speculare o diffusa, la rifrazione e la diffrazione.

La riflessione diffusa da parte delle superfici, da sola o combinata con l'assorbimento, è il principale meccanismo attraverso il quale gli oggetti si rivelano ai nostri occhi, mentre la diffusione da parte dell'atmosfera è responsabile della luminosità del cielo.

La luce, quindi, è una sensazione del nostro cervello che viene stimolata da una reazione fotochimica nella retina dell'occhio, che attiva la sensazione celebrale.

La sensazione celebrale della luce viene stimolata da un insieme di onde elettromagnetiche dette "visibili", le quali si propagano nel vuoto da una sorgente di energia con una velocità costante e finita, corrispondente a circa 300.000 km/s.

I nostri occhi percepiscono i cambiamenti di frequenza delle radiazioni ed attivano la percezione celebrale sotto forma di cambiamenti di colore. Le lunghezze d'onda a cui risulta sensibile il nostro sistema percettivo sono comprese in un intervallo limitato di lunghezze d'onda, che è collocato all'incirca tra i 380 nm (sensazione corrispondente al colore viola) ed i 780 nm (sensazione relativa al colore rosso) tale spettro di frequenze è definito spettro della "luce visibile" ; oltre questi estremi, il nostro occhio, non è più in grado di discriminare le variazioni di lunghezza d'onda del campo elettromagnetico.

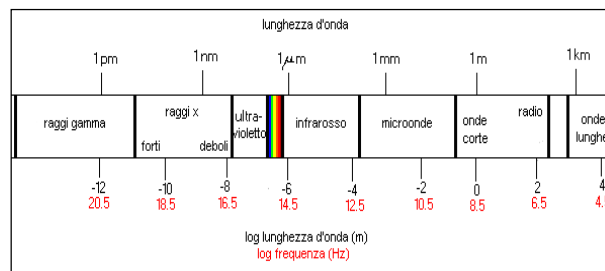


Figura 3 Spettro della radiazione visibile

Le frequenze immediatamente al di fuori dello spettro percettibile dall'occhio umano vengono chiamate ultravioletto (UV), per le alte frequenze, e infrarosso (IR) per le basse. Anche se l'uomo non può vedere l'infrarosso, esso viene percepito dai recettori della pelle come calore. Tutte le lunghezze d'onda dello spettro elettromagnetico a partire

dalla LUCE VISIBILE, escludendo le parti minoritarie dei raggi x, delle onde radio e solo una porzione degli ultravioletti, sono fonte di calore.

Le radiazioni elettromagnetiche trasportano nello spazio e nel tempo l'energia prodotta da una sorgente luminosa.

Quando il campo elettromagnetico interagisce con la materia l'onda si trasforma in particella e cede l'energia sotto forma di quanti ai quali è contenuta una quota parte di energia. Se si tratta del campo elettromagnetico della "luce visibile", tali quanti di energia sono detti "fotoni di luce visibile"; essi si comportano come particelle di materia.

L'energia delle particelle fotoniche dipende dalla frequenza delle radiazioni: tanto maggiore è la frequenza di una radiazione, tanto maggiore è l'energia di un singolo fotone. La quantità di energia discreta del fotone è proporzionale alla frequenza dell'onda elettromagnetica; pertanto un fotone di raggi X, trasporta più energia di un fotone di raggi ultravioletti o di una qualsiasi radiazione del campo del visibile; quindi l'energia associata al fotone non dipende dalle dimensioni della sorgente, in quanto quest'ultima influenza la forza del campo elettromagnetico e il numero di fotoni emessi nell'interazione con la materia, ma la quantità di energia inclusa da ciascuno di essi.

3.4.1 LA LUCE VISIBILE ED ENERGIA

La luce ha una componente corpuscolare attraverso i fotoni del visibile.

Il fotone viene valutata come una particella che emette una quantità finita di energia detto quanto di energia.

L'energia associata ad un quanto di frequenza ν è data dalla relazione :

$$E = h \cdot \nu$$

Ed essendo $c = \lambda \cdot \nu$

La seguente relazione può essere così riscritta :

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Dove:

h = costante di Plank (pari a $6,625 \times 10^{-34}$ Js);

c = velocità di propagazione della luce (pari a 299.792.458 m/s).

Si definisce, quindi, il quanto un quanto di azione che assume valori pari alla costante di Plank.

In base a ciò, i quanti che formano una radiazione azzurra sono più ricchi di energia dei quanti di luce rossa, poichè la loro frequenza è più elevata.

E' possibile, quindi, dedurre che anche la luce visibile trasporta una certa quantità di energia in funzione della frequenza per la quale ci soffermiamo.

La luce bianca è caratterizzata dall'unione di più onde a diversa frequenza e, di conseguenza, avrà una quantità di energia trasportata superiore.

CAPITOLO 4

ELEMENTI DI MISURA DELLA LUCE

La luce del visibile è misurata in due differenti set di misure: la radiometria consente di effettuare la misura dell'energia su tutte le lunghezze d'onda, mentre la fotometria misura la luminosità così come percepita dall'occhio umano.

4.1 LA FOTOMETRIA

La fotometria è la disciplina che consente di definire l'energia della luce sensibile all'occhio umano. Si sono studiati diversi sensori di luce che si basano sulla rilevazione e misura del flusso luminoso .

Per flusso luminoso si intende l'energia trasportata da onde elettromagnetiche la cui lunghezza d'onda sia compresa tra i 10nm (ultravioletto) e 1 mm(infrarosso).

Il flusso luminoso, però, non viene misurato con le stesse unità con cui si misura un flusso di energia radiante per via di motivazioni strettamente correlate alla percezione visiva umana.

L'occhio umano, infatti, non solo è sensibile ad una parte dei fotoni che chiamiamo luce, ma ha anche una sensibilità che è fortemente modulata in un piccolo intervallo di luce visibile.

La sensibilità dell'occhio umano alla luce è differente alle diverse lunghezze d'onda come definito dal diagramma sottostante.

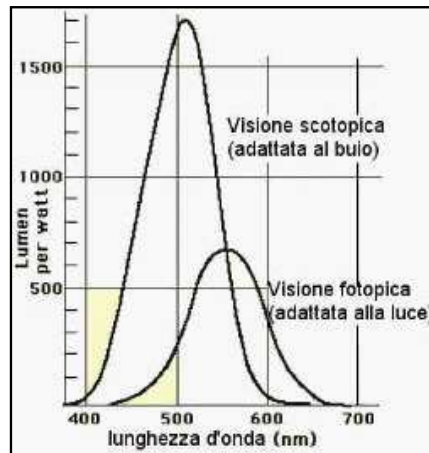


Figura 4 Curva di sensibilità dell'occhio umano alla luce

La curva per la visione scotopica (sensibilità in condizioni di penombra) è principalmente dovuta ai recettori detti bastoncelli, e quella fotopica (in condizioni di grande illuminamento) invece include i recettori detti coni.

La curva di sensibilità fotopica è stata adottata in fotometria come sensibilità spettrale della retina umana, ovvero come funzione risposta media del sensore di

luce di cui è dotato l'occhio.

Di conseguenza il flusso luminoso che noi associamo a un fascio di luce monocromatica centrata nel vicino o lontano infrarosso o nel vicino o lontano ultravioletto è rigorosamente nullo, per quanto intensa sia l'energia che esso trasporta .

Nel definire la quantità di luce, inoltre, bisogna distinguere tra energia emessa da una sorgente (intensità) e un flusso di energia che attraversa una determinata sezione o che raggiunge una determinata superficie.

Per la luce totale emessa da una sorgente come unità di misura si utilizza una sorgente standard: la candela.

La candela, quindi, è l'unità di misura, in una certa direzione, di una sorgente che emette la radiazione monocromatica di frequenza 540×10^{12} Hz con intensità radiante in quella direzione pari a :

$$F = \frac{1}{683} \text{ sr}$$

Lo steradiano (sr) è definito come l'angolo solido che sottende un'area sulla superficie di

una sfera uguale al quadrato del raggio della sfera stessa.

Il lumen è l'unità di misura del flusso luminoso ed equivale al flusso luminoso rilevabile in un angolo solido di un steradiano emesso da una sorgente isotropica con intensità luminosa di una candela.

Il lux, invece, è l'unità di misura dell'illuminamento ed è pari a un lumen per un metro quadrato di superficie emittente ed espresso dimensionalmente dalla seguente relazione:

$$lx = \frac{cd \cdot sr}{m^2}$$

Il lumen e il lux sono entrambi misure del flusso luminoso, ma mentre il lumen è una misura della quantità di luce su una porzione sferica (generalmente incentrata sulla sorgente di emissione), il lux è una misura relativa al piano tangente la porzione sferica: infatti un lumen su un'area di un metro quadro corrisponde ad un lux, mentre lo stesso lumen concentrato in un cm^2 corrisponde a 10.000 lux.

Altre grandezze importanti, oltre il flusso luminoso, in fotometria sono la brillantezza L , l'illuminamento E e il rendimento luminoso η .

Si riportano nella tabella sottostante, a titolo esemplificativo, i valori di luminosità del cielo espressi in lux.

Cielo sereno a mezzogiorno	10^5
Cielo nuvoloso a mezzogiorno	10^3
Cielo sereno a mezzanotte con luna piena	10^{-1}
Cielo sereno notturno senza luna	10^{-3}

Il raccordo tra unità radiometriche e le unità fotometriche sono espresse dall'efficienza luminosa (espressa in lumen/Watt) ed espressa come frazione della potenza raggiante che cade nel visibile.

Il flusso luminoso, quindi, è ottenuto dal prodotto tra energia raggiante $\times 683(\text{lumen/Watt}) \times \eta$.

Il fattore moltiplicativo 683 dipende dalla sensibilità della retina a $\lambda=540$ nm corrisponde al massimo valore della curva della sensibilità scotopica ed l'efficienza luminosa è unitaria.

4.1.1 I SENSORI OTTICI

I sensori di luce , misurando il flusso luminoso, dovrebbero essere tarati in lumen o lux, ma spesso i sensori di luce hanno una sensibilità espressa in unità di energia di flusso per unità di area.

Generalmente per un sensore generico la sensibilità viene definita come rapporto tra un'unità di misura di stimolo per unità di misura della risposta: nel caso dei sensori ottici la risposta è definita dalla corrente elettrica (espressa in Ampere), mentre lo stimolo è il flusso luminoso .

Generalmente la sensibilità dovrebbe essere costante (il sensore , in questo caso, si definisce lineare) , in realtà, però i sensori danno una risposta che dipende anche da altri parametri: gran parte dei sensori ottici, infatti, hanno una risposta diversa in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Questa caratteristica si considera un pregio per sensori di flusso luminoso in quanto la risposta viene modulata nella banda della luce visibile: il sensore ottico contiene un filtro nelle quali si escludono i fotoni con energia pari a quella dei raggi X e i fotoni di energia tipica alle onde radio. I sensori ottici si possono distinguere in quattro grandi categorie: fototubi, fotoresistenze, foto-transistor e foto-diodi e termici.

4.1.1.1 I FOTOTUBI

I foto-tubi sono diodi a valvola (in bulbo sotto vuoto), con un catodo di grande superficie ricoperto di un metallo alcalino (spesso Cesio) e un anodo a filamento. Essi sfruttano l'effetto fotoelettrico "esterno", ovvero l'emissione di elettroni dalla superficie metallica colpita da fotoni di energia superiore ad un valore di soglia, e furono i primi dispositivi usati per rivelare luce, ma oggi vengono utilizzati essenzialmente in situazioni ove sia necessario rivelare flussi luminosi molto deboli, o in altri casi speciali, per lo più nei laboratori di ricerca.

Questo perché sono dispositivi fragili, ingombranti e costosi. Possono essere resi molto sensibili sfruttando un effetto di "moltiplicazione" degli elettroni estratti dai fotoni incidenti, aggiungendo una serie di elettrodi intermedi, tra anodo e catodo, tra cui viene stabilito un elevato campo

elettrico. Il campo elettrico tra ogni coppia successiva di elettrodi fornisce agli elettroni estratti una energia sufficiente ad estrarre altri elettroni e quindi si genera un processo a valanga che produce un impulso di corrente (anche di milioni di elettroni per fotone) e che spiega il nome di “foto-moltiplicatori” dato a questi dispositivi.

4.1.1.2 LE FOTOESISTENZE

Si tratta di resistenze costituite da materiale la cui resistività elettrica cala quando viene illuminato. In questo caso si tratta di effetto fotoelettrico “interno” cioè la produzione di coppie elettrone -lacuna da parte di fotoni con energia sopra un valore di soglia.

I materiali di questo tipo (spesso CdS , CdSe) sono detti semiconduttori ed in

essi il trasporto di carica elettrica è assistito non solo dalla migrazione di elettroni, ma anche da “mancanze di elettroni” in siti particolari del reticolo (che vengono dette lacune). Un altro modo di illustrare l’effetto fotoelettrico “interno” è dire che l’energia associata ad un fotone incidente promuove un elettrone in “banda di valenza” (BdV) alla “banda di conduzione” (BdC) , lasciando una lacuna in BdV.

Le coppie elettrone-lacuna così generate aumentano la densità di portatori di carica e quindi la conducibilità elettrica del materiale.

La differenza di energia tra il massimo della BdV e il minimo di BdC, detta Energy gap (Eg) è la minima energia che un fotone può avere perché avvenga l’effetto fotoelettrico.

Caratteristica del sensore a fotoresistenza è che la sua prontezza è inversamente proporzionale alla sua sensibilità. Quando le coppie sono state generate dai fotoni assorbiti esse continuano a contribuire alla conducibilità fino a che si ricombinano, e tanto maggiore è la vita media t delle coppie fotoprodotte, tanto maggiore è la sensibilità S . Si deve tenere conto anche del tempo t di transito dei portatori di carica attraverso il dispositivo in modo che: $S \propto \frac{\tau}{t}$

Il tempo di risposta (t) è tipicamente dell'ordine dei ms, ma può arrivare a vari secondi. Si tratta tuttavia di un sensore molto compatto, robusto ed economico.

Le fotoresistenze vanno alimentate (ad esempio in una configurazione a partitore resistivo in corrente continua o alternata) e il segnale prodotto è una variazione di tensione proporzionale alla luce ed alla tensione di polarizzazione.

4.1.1.3 FOTOTRANSISTOR E FOTODIODI

I materiali semiconduttori possono essere puri (Germanio, Silicio) o leghe (GaAs, InAs, InP, GaP, InGaAs, GaAsP...) ed in generale appartengono ai gruppi IV, II e VI, III e V della tavola di Mendeleiev. Le loro proprietà possono essere modificate introducendo delle impurezze nel reticolo cristallino : si ottengono così semiconduttori "drogati" che si dicono di tipo P o di tipo N a seconda del tipo di impurezze.

Se si costruisce un dispositivo con due semiconduttori (P e N) adiacenti, la loro superficie di separazione costituisce ciò che viene chiamata una giunzione PN. Una giunzione PN si comporta elettricamente come un

diodo rettificante, ovvero esibisce conducibilità molto diversa a seconda del segno della sua polarizzazione.

Due giunzioni PN adiacenti ovvero una doppia giunzione PNP o NPN costituiscono un transistor. Ma le proprietà rettificanti della giunzione PN non sono le sole interessanti dal punto di vista tecnologico: quelle che qui ci interessano sono le sue proprietà opto-elettroniche.

In uno strato sottilissimo adiacente alla giunzione (strato di svuotamento) la

distribuzione dei portatori di carica (elettroni e lacune) cambia rispetto alla

situazione esistente nel volume del semiconduttore P o N: in esso si crea un

campo elettrico (sostenuto da un doppio strato carico e fisso nel reticolo) cui sono soggette le coppie elettrone-lacuna che vengono prodotte al suo interno, ad esempio per effetto di un fotone incidente.

Questo fenomeno si può tradurre in una foto-corrente prodotta da un flusso di fotoni con energia superiore all'energia di soglia ($h\nu > E_g$) che possa raggiungere lo strato di svuotamento. Si capisce quindi come si possa ottenere un sensore di luce da un fotodiodo o un fototransistor: basta che la giunzione PN sia esposta alla luce perché attraverso di essa si stabilisca una corrente elettrica proporzionale al flusso luminoso.

Il fototransistor differisce dal fotodiodo perché la fotocorrente generata da una giunzione viene moltiplicata per un fattore di guadagno (tipicamente 100) dalla seconda giunzione (ciò che fa del transistor un

amplificatore). Quanto si acquista in sensibilità tuttavia lo si perde in linearità: il fotodiodo può essere molto lineare (fotocorrente proporzionale al flusso luminoso) mentre il fototransistor non lo è affatto.

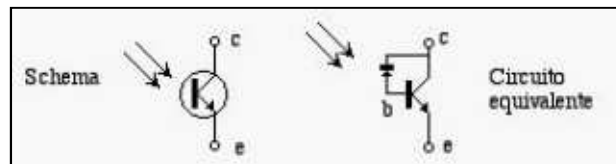


Figura 6 Struttura di un fototransistor

La fotocorrente di una giunzione PN può essere sfruttata per convertire energia luminosa in energia elettrica: i fotodiodi ottimizzati per questa funzione vengono chiamati celle fotovoltaiche (o anche celle solari).

4.1.1.3 SENSORI TERMICI

Vengono detti bolometri i sensori di luce che sfruttano il riscaldamento prodotto dall'assorbimento di fotoni per generare un segnale utile (variazione di polarizzazione dielettrica o di forza elettromotrice per effetto Seebeck). Appartengono al primo tipo i sensori piroelettrici, al secondo tipo le termopile.

Caratteristiche comuni sono:

- i) una sensibilità spettrale praticamente piatta, in un intervallo di lunghezze d'onda limitato solo dalle caratteristiche delle finestre ottiche di protezione utilizzate;

- ii) risposta solo a variazioni di illuminamento: soggetti a illuminamento costante si portano in equilibrio termico e il segnale in uscita si azzerava.

La termopila è una versione miniaturizzata di termocoppia, costituita di numerose coppie di giunzioni in serie, con le giunzioni di riferimento mantenute al buio e le giunzioni di misura esposte alla luce.

I sensori piroelettrici sono costruiti con materiali che presentano una polarizzazione dielettrica spontanea che varia con la temperatura (ad esempio da un sottile strato di Tantalato di Litio con elettrodi metallici depositati sulle due facce). Poichè il materiale è un ottimo isolante questo oggetto si può pensare come un condensatore le cui armature hanno carica indotta dal dielettrico polarizzato. Quando la temperatura del sensore varia anche la polarizzazione (e la carica del condensatore) varia, producendo una debole corrente alternata (dell'ordine di 10^{-12} , 10^{-10} A).

Questa corrente può essere convertita in tensione mediante un amplificatore operazionale con elevata resistenza di retroazione ($R_o \sim 2 \cdot 10^9$ W). L'operazionale deve avere elevata impedenza d'ingresso in modo da assorbire una minima frazione della corrente generata dal piroelettrico.

Il sensore piroelettrico è schematizzabile come un generatore di corrente con in parallelo una capacità parassita, e una resistenza di perdita.

4.2 LA RADIOMETRIA

La radiometrica considera la luce solare come un insieme di radiazioni; ciascuna avente la propria lunghezza d'onda e frequenza.

Attraverso la radiometria si valuta l'aspetto spettrale della luce e per la quale si definiscono le grandezze più impiegate.

Si definisce energia radiante l'energia trasportata da un qualunque campo di radiazione elettromagnetica, si indica con Q e si misura in joule.

Si definisce energia spettrale radiante l'energia trasportata dalla radiazione elettromagnetica per unità di spettro radiante ed è espressa in funzione della lunghezza d'onda dalla seguente relazione:

$$Q_\lambda = \frac{dQ}{d\lambda}$$

E' misurata in joule per nanometri.

Il flusso radiante è l'energia radiante per unità di tempo e viene definita dalla relazione:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}$$

Il flusso radiante si misura in Watt.

La densità di flusso radiante (definita come irradianza o emissività radiante) è il flusso radiante per unità di area in un punto della superficie (reale o immaginaria). Ci sono due possibili condizioni:

- i) la prima considera che il flusso è incidente ad una superficie e, in questo caso, si parla di irradianza ed è definita dalla relazione:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}$$

dove ϕ è la densità di flusso radiante e dA è il differenziale dell'area colpita attorno al punto d'incidenza;

- ii) la seconda condizione, invece, considera che il flusso può essere emesso o riflesso dalla superficie. In questo caso si parla di emittanza radiante ed è ottenuta dalla relazione:

$$M = \frac{d\Phi}{dA}$$

dove ϕ è il flusso radiante emesso dal punto della superficie, mentre dA è il differenziale dell'area attorno al punto di emissione.

La densità di flusso radiante è misurato in Watt per metro quadro.

La radianza è la grandezza più utilizzata in radiometria; si considera un cono di dimensioni infinitesime che ha vertice in un punto appartenente ad una superficie reale o elementare; le direttrici del cono sono i raggi che ne fuoriescono. Il cono descrive un angolo solido $d\omega$ espresso in steradiani. E' possibile notare che il raggio interseca la superficie in un angolo, se l'area del cono è intersecata da una superficie di area dA , l'area della sezione che interseca il raggio e una superficie normale è data dalla relazione $dA \cos\theta$, dove θ è l'angolo tra il raggio e la superficie normale.

E', quindi, possibile descrivere l'area del cono determinato da un raggio emesso o incidente ad un punto della superficie; attraverso questa definizione è possibile definire la radianza dalla relazione:

$$L = \frac{d^2\Phi}{[dA(d\omega \cos\theta)]}$$

dove:

ϕ = flusso radiante ;

dA = differenziale dell'area attorno al punto della superficie di emissione o di incidenza;

$d\omega$ = differenziale angolo solido descritto dal cono elementare

θ = angolo di inclinazione del raggio rispetto alla normale del punto di emissione o di incidenza.

La radianza è misurata in Watt per metro quadro di area e per steradiano.

La radianza spettrale è la radianza per unità di intervallo spettrale e lunghezza d'onda λ , è definita dalla relazione:

$$L_\lambda = \frac{d^2\phi}{[dA(d\omega \cos\theta)d\lambda]}$$

La radianza spettrale è misurata in Watt per metro quadro di superficie , steradiano e nanometri.

Se si immagina una sorgente definita da un punto di dimensioni infinitesime che emette un flusso radiante in ogni direzione, una parte del flusso può essere descritto dal raggio che descrive il cono. Questa è la definizione di intensità radiante ed è data dalla relazione:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega l}$$

dove $d\omega$ è l'angolo solido differenziale descritto dal cono elementare del flusso radiante e , dalla definizione di angolo solido differenziale , l'intensità radiante può essere descritto dalla seguente relazione:

$$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{d\Phi}{r^2} d\omega = \frac{I}{r^2}$$

dove dA è il differenziale dell'area di una sfera centrata nel punto e a distanza r dalla sorgente e E è l'irradianza della superficie.

Il flusso radiante intercetterà la superficie dA in un angolo θ , l'irradianza può essere riscritta dalla seguente relazione:

$$E = \frac{I \cos\theta}{d^2}$$

dove:

I = intensità della sorgente in quella determinata direzione;

d = distanza tra la sorgente e la superficie elementare dA .

Si potrebbe immaginare una superficie immaginaria o reale come un continuo di sorgenti puntuali dove ogni sorgente occupa un'area elementare dA . L'angolo θ di inclinazione rispetto alla normale e alla superficie, la sorgente ha una proiezione pari a $dA \cos\theta$. Combinando le relazioni della radianza e della intensità radiante, è possibile avere una nuova relazione che definisce la radianza secondo la formula:

$$L = \frac{dI}{dA \cos\theta}$$

dove dI è l'intensità di una sorgente puntuale che irradia in una determinata direzione.

L'intensità radiante è misurato in Watt per steradiante.

Tra le applicazioni più importanti che utilizza la radiometria e le grandezze radiometriche sono i sensori satellitari quali lo spettroradiometro, il SIM e il TIM. Si riportano, di seguito, i più importanti sensori satellitari che "catturano" lo spettro del visibile.

4.2.1 I SENSORI SATELLITARI

I sensori satellitari si distinguono sono sensori passivi in quanto non hanno una propria sorgente di emissione, le loro misurazioni, quindi, si basano su radiazione riflessa o diffusa (radiazioni appartenente allo spettro visibile, al vicino infrarosso), emissioni di temperatura o fluorescente. In questa categoria fanno parte i radiometri, spettroradiometri e radiometri multi spettrali (che si differenziano dai radiometri in quanto rilevano radiazioni con spettri a banda più larga).

Tra i sensori installati sui satelliti i più conosciuti ci sono il radiometro ,il SIM e il TIM.

4.2.1.1 IL RADIOMETRO

Un radiometro è un dispositivo (sensore passivo) utilizzato in radiometria per misurare il flusso della radiazione elettromagnetica emesso da una superficie o un oggetto per effetto della sua temperatura ovvero la sua radianza. Sebbene il termine sia spesso usato per dispositivi che misurano la radiazione infrarossa, si può usare anche per ogni rilevatore che operi ad ogni lunghezza d'onda dello spettro elettromagnetico; un

dispositivo che misuri una specifica banda dello spettro elettromagnetico è detto spettroradiometro. Ad esempio un radiometro a microonde lavora nel campo delle microonde.

Il radiometro basa il suo funzionamento sulle leggi dell'emissione termico-elettromagnetica dei corpi ovvero la legge del corpo nero applicata ai corpi grigi e le due leggi ad essa derivanti ovvero la legge di Wien e la legge di Stefan-Boltzmann. Qualunque corpo al di sopra dello zero assoluto (0 K)(quindi tutti) emette radiazione elettromagnetica la cui intensità è funzione della temperatura del corpo. In particolare la temperatura di un corpo è direttamente connessa alla potenza elettromagnetica emessa secondo la legge di Stefan-Boltzmann, per cui misurando il flusso di energia ricevuto nell'unità di tempo da una porzione di superficie, o anche la forma esatta dell'intero spettro elettromagnetico emesso, è possibile risalire alla temperatura della porzione di superficie d'interesse.

le caratteristiche salienti sono:

- i) l'ampiezza di banda
- ii) la sensibilità spettrale
- iii) il campo di vista e risoluzione spaziale
- iv) la risposta direzionale

I radiometri possono usare diversi tipi di rilevatori. Alcuni rilevano la radiazione elettromagnetica convertendola in calore e quindi in un segnale, altri rilevano i fotoni tramite un fotodiodo con una specifica efficienza quantica. Nelle applicazioni più comuni il rilevatore di

radiazione è un bolometro che converte l'assorbimento di radiazione in calore, che può essere misurato attraverso un termometro. L'aumento di temperatura può essere correlato alla potenza della radiazione incidente.

Uno dei primi radiometri operanti nel campo della radiazione visibile fu il radiometro di Crookes. Un dispositivo più efficiente e con differenti principi di base è il radiometro di Nichols.

Il radiometro può essere montato su satelliti in orbita o aviotrasportato come strumento per il telerilevamento della Terra. A differenza del radar che invia potenza elettromagnetica captando la potenza retrodiffusa da oggetti e superfici ed è quindi uno strumento (sensore) "attivo", il radiometro è invece uno strumento puramente passivo ovvero un semplice rivelatore elettromagnetico senza alcuna emissione di potenza elettromagnetica. Un radiometro nel campo del visibile può essere o un 'radar ottico passivo' che capta la radiazione visibile scatterata all'indietro dall'oggetto (funziona quindi solo in presenza di luce) oppure un radiometro che capta l'emissione termica sempre nel visibile dell'oggetto stesso.

I radiometri hanno applicazioni tipiche nel telerilevamento ambientale della Terra dallo spazio. Ad esempio radiometri sono presenti sui satelliti meteorologici Meteosat come strumenti per l'osservazione meteorologica della Terra sia nel campo del visibile (backscattering ottico della superficie solo di giorno) sia nell'infrarosso per la rilevazione del vapore acqueo e delle nubi (di giorno e di notte)

La radiazione che il radiometro riceve non è soltanto la radiazione emessa dall'oggetto osservato, cioè la temperatura apparente mediata con la direttività d'antenna (temperatura di antenna ottenuta dall'integrazione della temperatura apparente sull'intero angolo solido e mediata dalla direttività dell'antenna), ma a questa si deve sommare la temperatura di rumore prodotta dal sistema ricevente ovvero dall'antenna, dal ricevitore e dalla guida d'onda che collega il ricevitore all'antenna: un insieme di dispositivi che sono a loro volta rumorosi e quindi introducono del rumore. Pertanto è chiaro che rispetto ad un ricevitore convenzionale che opera in genere su banda molto stretta e, proprio in questo modo, riesce a rendere accettabile il rapporto segnale-rumore (S/N) e a ricevere il segnale distinguendolo dal rumore di fondo, nel caso del radiometro che deve osservare la radiazione incoerente emessa da un oggetto o una superficie ed in generale estesa su tutto lo spettro elettromagnetico (con caratteristiche simili quindi al rumore bianco) è più difficile distinguere il segnale puro dal rumore.

L'atmosfera che è il mezzo trasmissivo a sua volta genera/introduce rumore dal punto di vista del segnale informativo, qui invece questo rumore (emesso dal mezzo naturale), noi lo vogliamo captare, lo vogliamo ricevere e da questo rumore vogliamo anche ricavare informazioni legate alla grandezza geofisica in esame. Si capisce allora come questi ricevitori radiometrici debbano essere molto sensibili, e soprattutto la larghezza di banda va valutata opportunamente perché essendo un segnale molto basso più è larga la banda più potenza di segnale arriva quindi meno sensibile deve essere il ricevitore, meno

critica è la sensibilità del ricevitore. Quindi in telerilevamento dovremo usare una banda abbastanza larga per avere il segnale ad un livello di potenza accettabile ovvero misurabile tenendo conto allo stesso tempo che la larghezza di banda non deve essere troppo grande da mascherare l'interazione tra la radiazione elettromagnetica e il parametro geofisico da osservare, ovvero cercando di mantenere la selettività in frequenza. Ad esempio se stiamo osservando l'atmosfera per stimarne il contenuto di vapore acqueo (frequenza intorno a 22 GHz) dobbiamo usare un larghezza di banda che ci dia un segnale abbastanza forte da poterlo misurare, ma non troppo larga per non far entrare l'influenza dell'acqua liquida perdendo l'informazione cercata. Bisogna dunque operare tenendo presente queste esigenze contrastanti. Il ricevitore radiometrico deve lavorare a larga banda senza mascherare la selettività della misura che vogliamo fare e poiché la potenza in generale è molto piccola va considerata un'elevata sensibilità.

Le prestazioni di un radiometro sono valutate in termini di calibrazione e sensibilità della misura.

La calibrazione dello radiometro è quella procedura necessaria per legare la grandezza d'uscita dello strumento, che è una tensione elettrica, con la causa generante cioè la potenza elettromagnetica in ingresso allo strumento, ovvero la temperatura d'antenna (T_a). Queste due grandezze sono legate da un 'coefficiente di guadagno' G ovvero da una relazione di proporzionalità: il sistema riceve una T_a moltiplicata per un certo guadagno G cui si somma un termine di polarizzazione del segnale (bias). L'accuratezza si calcola prendendo due valori noti di T_a ,

misurando l'uscita, ovvero il livello di tensione, e infine tracciando la retta di calibrazione la cui pendenza rappresenta il guadagno G mentre l'intercetta è il bias.

La sensibilità o risoluzione radiometrica è la minima variazione del segnale, in termini di temperatura di ingresso, capace di produrre una variazione di tensione rilevabile in uscita: tutte le variazioni più piccole della risoluzione radiometrica sono fluttuazioni del segnale che non vengono rilevate.

Poiché in genere sia il segnale puro che il rumore ad esso associato fluttuano molto, usualmente a valle del ricevitore è presente un filtro passa basso ovvero un 'integratore' che appiattisce il segnale diminuendone le fluttuazioni che altrimenti tenderebbero a mascherarlo. La risoluzione radiometrica dipenderà dal tempo di media (tempo di integrazione del segnale di uscita) e dal tipo di schema radiometrico che si utilizza. Lo schema radiometrico viene scelto in base all'applicazione desiderata.

4.2.1.2 IL SIM

Il sensore SIM (acronimo di Spectral Irradiance Monitor) è uno spettrometro di nuova concezione che fornisce le prime misurazioni di irradianza spettrale a lunga durata nel campo del visibile e del vicino infrarosso (Vis / NIR). La copertura di lunghezza d'onda è principalmente tra i 300 e i 2400 nm, con un ulteriore canale per coprire la regione ultravioletta dello spettro che va dai 200 fino ai 300 nm e si sovrappone alle misurazioni con il sensore SOLSTICE, un altro strumento a bordo del

satellite Sorce. SIM è caratterizzato da un singolo elemento ottico formato da spettrometro di tipo prisma Fery, necessario per mettere a fuoco e disperdere la luce su una serie di rivelatori nel piano focale dello spettrometro stesso. In questo piano focale ci sono quattro rivelatori a fotodiode e una presa elettrica posti in sostituzione del radiometro e sono utilizzati per registrare le radiazioni solari. SIM contiene due spettrometri completamente indipendenti e identici (immagine speculare) per fornire una ridondanza nella misurazione e per poter migliorare la capacità di auto-calibrazione.

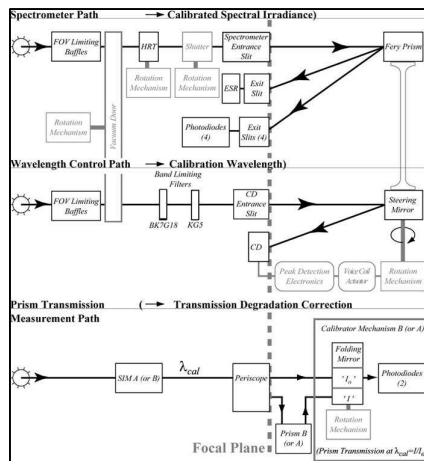


Figura 7 Struttura a blocchi di funzionamento

La figura sovrastante è uno schema a blocchi che descrive il funzionamento del sensore: è richiesto l'ausilio di 3 percorsi ottici indipendenti.

Il percorso della luce di misura (in rosso) è il percorso che la luce segue quando va dal Sole attraverso una fessura d'ingresso misurata con una certa precisione al prisma in cui si disperde per dare lo spettro su ciascuno dei rivelatori posti sul piano focale. In blu è il percorso della luce che illumina il CCD all'interno del piano focale e che consente di

calibrare l'angolo di rotazione del prisma. Visualizzati in verde si considera il percorso della luce che tocca le coppie dei due strumenti impiegati per la calibrazione diretta della trasmissione prisma.

Il prisma ottico è il prisma di Fery (1910) ed è caratterizzata da una superficie concava davanti ed una convessa posteriore alluminizzata che si concentra e disperde il fascio di luce sul piano focale dello strumento. Quindi solo un elemento ottico è utilizzato nella misurazione della radiazione solare. Il piano focale contiene l'ESR (acronimo di Electrical Substitution Radiometer) e quattro rilevatori fotodiodi aggiuntivi che in concomitanza con la rilevazione della radiazione solare definisce come il prisma viene ruotato. La risoluzione dello spettrometro dipende dalla geometria degli spettrometri e dall'indice di rifrazione del vetro del prisma. Il prisma dello spettrometro ha una risoluzione variabile da 0,25 nm nell'ultravioletto a 33 nm nell'infrarosso. Il prisma è costituito da materiale con elevata purezza e basso contenuto di OH che offre ottime proprietà di resistenza alle radiazioni. Il basso contenuto di OH del vetro garantisce una buona trasmissione ottica in tutta la parte infrarossa dello spettro.

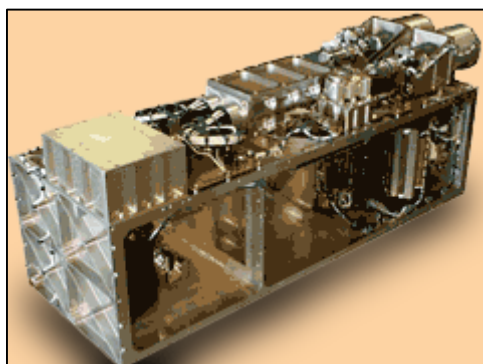


Figura 8 Sensore SIM

SIM è formato da due spettrometri completamente indipendenti e identici e posizionati in modo speculare. Questi due spettrometri sono

in grado di fornire in volo misure ridondanti per garantirne l'auto-calibrazione. Ogni spettrometro SIM è inoltre dotato di HRT per evitare l'eccessiva esposizione alle radiazioni energetiche che degradano la trasmissione del prisma nel tempo. La HRT è un filtro a scomparsa che verrà spostato dal percorso ottico quando vengono eseguite le misure in assoluto delle radiazioni solari, ma inserito in altri momenti così che l'acquisizione degli spettri può continuare in una modalità protetta. Il filtro è incastrato e inclinato rispetto all'asse di dispersione dello strumento per evitare la comparsa di effetti indesiderati nello spettro solare quando il filtro si trova nel fascio di luce in arrivo.

I rilevatori ed gli elementi ottici nel SIM sono protetti dall'esposizione delle particelle di aerosol e dai vapori organici volatili attraverso la realizzazione della cassa dello strumento come un vaso chiuso in pressione. Questo serve a prevenire la contaminazione ambientale di dover cambiare il volo di calibrazione e di inibizione da parte dei materiali organici che se si depositassero sugli elementi ottici che sono a contatto con la radiazione UV potrebbero modificare irreversibilmente la trasmissione dei componenti ottici.

L'ESR del SIM funziona con lo stesso principio e utilizza la stessa metodologia del rivelatore della cavità del radiometro attivo nel TIM. Tuttavia, i segnali di luce che emergono dallo spettrometro sono ~ 1000 volte più piccoli, così, un design diverso a livello termico / meccanico è necessario per questo rivelatore. Invece di usare un cono per assorbire le radiazioni, un bolometro di diamante è annerito con fosforo bianco nichel (NIP) per assorbire la radiazione in arrivo dallo spettrometro, e il

cambiamento di temperatura indotta da questa radiazione è rilevata da termistori posti alle estremità della strisci del diamante . Questo bolometro è poi centrato in una sfera con una qualità ottica elevata per aumentare l'oscurità del bolometro, consentendo che la piccola frazione di luce riflessa dalla superficie nera sia ripresa nuovamente dal bolometro. Ci sono due bolometri situati all'interno della cavità sferica; il bolometro attivo vede la luce dello spettrometro mentre l'altro è inattivo. I termistori sui due bolometri fanno parte di un circuito di precisione che mantiene la stessa sui due bolometri, e l'equilibrio è ottenuto variando il duty cycle del potere applicata al bolometro attivo. Come nello strumento TIM, un otturatore modula il fascio di luce in ingresso e la serie temporale dei dati VES vengono analizzate nel dominio della frequenza alla frequenza di scatto fondamentale. Tipicamente, due cicli di scatto vengono acquisiti e l'otturatore viene azionato a 0,01 Hz, dando così un riconoscimento minimo di 2,5 nW in un periodo di 200 integrazione secondo. I fotodiodi del piano focale per SIM vengono utilizzati per acquisire lo spettro solare in modalità "scansione veloce" in cui è intensificato l'unità prisma di $1/3$ della larghezza della fessura per ciascun passo. In questo modo, la risoluzione dello spettrometro soddisfa i requisiti minimi di campionamento. Per misurare i raggi UV e la componente blu dello spettro visibile, sono utilizzati i fotodiodi di tipo n-on-p in silicio , per la parte rossa dello spettro visibile, invece, vengono impiegati fotodiodi di tipo p-on-n in silicio e InGaAs è utilizzato per misurare infrarossi fuori dello spettro a 1,7 micron. Al di là di questa lunghezza d'onda, la VES è

usato per misurare a 2,4 micron di una speciale modalità di funzionamento dello strumento.

Il SIM è installato sul satellite SOURCE mandato in orbita nel 2003 e consente di effettuare misurazioni delle radiazioni nello spettro del visibile al fine di valutare la presenza degli aerosol nell'atmosfera e l'innalzamento della temperatura della Terra.

Lo strumento SIM sta effettuando le prime registrazioni in continuo della irradianza nella regione del visibile e nel vicino infrarosso dello spettro nella parte più alta dell'atmosfera della Terra. Ad oggi, i dati storici della variabilità di irradianza spettrale in questa parte dello spettro non è così completo come l'irradianza solare totale e i dati registrati della radiazione ultravioletta.

Le misurazioni dell'irradianza spettrale nella regione del visibile e del vicino infrarosso sono importanti perchè l'assorbimento della radiazione solare nell'atmosfera, nella superficie terrestre, nelle acque degli oceani dipendono fortemente dalla lunghezza d'onda delle radiazioni.

Quindi, uno studio della variabilità solare in funzione della lunghezza d'onda è importante negli studi climatici.

I modelli di variabilità solare, in aggiunta alle osservazioni dell' Irradianza solare totale (TSI), predicono dei cambiamenti dell'ordine di 0,1-0,01 % dell'output nel range dello spettro del visibile e del vicino infrarosso richiedendo, quindi, una strumentazione ad alta precisione.

4.2.1.3 IL TIM

Il TIM (acronimo di Total Irradiance Monitor) è un sensore installato nel satellite nel Gennaio del 2003 nell'esperimento Sorce della Nasa. Effettua misurazioni della Irradianza Solare Totale (TSI), la radiazioni spazialmente e spettralmente integrata ed incidente nel primo strato dell'atmosfera.

Il TIM (il primo fu lanciato nel 1978) arricchisce le serie storiche di dati solari in nostro possesso per poter spiegare maggiormente le interazioni tra il clima e la radiazione solare.



Figura 9 Sensore TIM

Le misure di irradianza solare totale del TIM prende in considerazione le radiazioni solari incidenti in atmosfera utilizzando un radiometro cavo che lavora a temperatura ambiente. Impiegando dei radiometri elettrici (ESR) e ,sfruttando i nuovi materiali e l'elettronica moderna, il TIM effettua misure STI con una precisione assoluta di circa 350 ppm (0,035%). Queste variazioni relative all'irraggiamento solare sono misurate a meno di 10 ppm / anno (0,001% / anno), consentendo,

quindi, la determinazione dei possibili effetti a lungo termine delle variazioni nella produzione del sole.

Il TIM contiene al suo interno quattro radiometri elettrici (ESR) per misurare la radiazione solare incidente, nella parte frontale un NIST calibra l'apertura al fine di definire con un'elevata precisione l'area che viene colpita dalla radiazione solare. Il rapporto tra la potenza radiante e la superficie di apertura definisce STI, espressa in W/m^2 , questi valori sono valutati quattro volte nell'intero arco della giornata ricavate da una stima media della potenza radiante registrata ad intervalli di 50 secondi.

In funzionamento normale, l'otturatore di ciascun radiometro lavora in maniera ciclica lasciando aperta la cavità per il 50% e la richiude per intervalli temporali di almeno 100 secondi, garantendo una misurazione effettiva della radiazione incidente solare all'interno della cavità.

Anche la fase di chiusura della cavità è necessaria in quanto è possibile effettuare una calibrazione dello strumento e valutare l'effettivo guadagno del radiometro.

L'installazione dei quattro radiometri consentono di avere una ridondanza di dati necessari per la continua calibrazione dei radiometri stessi che viene effettuata direttamente a terra.

La teoria di funzionamento dei radiometri elettrici (ESR) si basa sulla misurazione dell'energia elettrica erogata e necessaria per mantenere la temperatura del rilevatore costante rispetto alla temperatura della radiazione solare incidente. Al suo interno sono posizionati due sensori

di temperatura identici: uno è attivo, mentre l'altro è utilizzato come riferimento termico.

Entrambi i sensori hanno una capacità di assorbimento molto elevato ed, essendo a precisione nota, sono in grado di raccogliere in maniera efficiente la radiazione incidente in modo tale che l'energia della radiazione espressa dai fotoni sia convertita in calore. Una parte di calore costante viene fornito dal sensore di temperatura di riferimento attraverso un circuito di riscaldamento resistivo elevando la temperatura di riferimento.

Il sensore attivo viene mandato alla stessa temperatura attraverso un sistema servo che definisce l'energia elettrica necessaria per raggiungere la stessa temperatura del sensore di riferimento.

Questo bilancia termicamente i due sensori ed è possibile effettuare la registrazione dell'energia elettrica impiegata per riscaldare i sensori attivi che non sono colpiti dalla radiazione incidente (nel caso, ad esempio, che la cavità sia chiusa ad opera dell'otturatore).

Quando la cavità viene aperta, parte della radiazione solare incidente nel sensore trasmette dell'energia, il sistema resistivo trasmette solo una quota parte dell'energia elettrica necessaria per far raggiungere la temperatura di riferimento.

Attraverso le registrazioni dell'energia elettrica impiegata, è possibile risalire alla radiazione solare totale con una certa precisione.

CAPITOLO 5

LUCE E CLIMA

E' interessante valutare come,attraverso le osservazioni della luce visibile, è possibile avere informazioni sul clima e come quest'ultima può interagire con il clima stesso.

Un' applicazione importante è definita dalla presenza degli aerosol e di gas atmosferici che generano un innalzamento della temperatura della Terra.

Si dovrebbe iniziare a definire, innanzitutto, il fenomeno di oscuramento globale inteso come una riduzione della luminosità iniziato attorno agli anni '50 fino ai giorni nostri dovuto alla presenza degli aerosol in atmosfera.

5.1 OSCURAMENTO GLOBALE

Con la locuzione oscuramento globale o offuscamento globale (in inglese global dimming) viene indicata la riduzione graduale dell'irraggiamento solare sulla superficie terrestre, osservata a partire dagli anni 1950. Al rovescio è stato osservato un aumento di luminosità della Terra verso lo spazio tramite le apparecchiature (radiometri) in dote ai satelliti in orbita proprio per l'aumentata riflettanza dell'atmosfera.

L'entità del fenomeno varia a livello geografico, ma globalmente è stata stimata una riduzione complessiva della radiazione solare al suolo tra il

2% ed il 5% nel periodo tra gli anni 1960 e gli anni 1990. Questo trend è rallentato nell'ultimo decennio, e localmente sembra essersi invertito. L'oscuramento globale potrebbe aver mascherato parzialmente gli effetti del riscaldamento globale e, analogamente, la recente inversione di tendenza potrebbe averli accentuati

Si pensa che la causa principale dell'oscuramento globale sia da imputare all'aumentata presenza in atmosfera di particolato sospeso in forma di aerosol come effetto dell'inquinamento. Questo particolato ha il doppio effetto di diffondere la luce, rifletterla parzialmente e di fungere da nucleo di condensazione per le gocce d'acqua che formano le nubi.

L'aerosol e altri particolati assorbono la radiazione solare riflettendola parzialmente verso lo spazio; possono fungere, inoltre, da nuclei di condensazione per le gocce d'acqua che formano le nuvole. L'incremento dell'inquinamento atmosferico causa l'aumento di particelle sospese e la formazione di nuvole costituite da gocce di piccole dimensioni. Il conseguente maggior numero di punti di riflessione aumenta l'albedo dell'atmosfera.

Le nuvole assorbono sia il calore irradiato dalla superficie terrestre che quello del Sole. L'effetto combinato di questi fattori varia, in modo complesso, a seconda dell'altitudine, della località, della luminosità e del tempo atmosferico (notte, giorno, stagioni). In genere durante il giorno predomina l'assorbimento della luce solare (con l'effetto di mitigare il riscaldamento sulla superficie terrestre); di notte invece la

retroreflessione della radiazione terrestre rallenta la perdita di calore della Terra

Tra i primi a studiare gli effetti della radiazione solare sul clima vi fu Mikhail Ivanovich Budyko, nel 1969, che tramite semplici modelli climatici bidimensionali investigò l'impatto dell'albedo glaciale nel bilancio energetico atmosferico. Budyko riscontrò una correlazione positiva tra l'aumento delle precipitazioni nevose e del ghiaccio, e la quantità di radiazione solare riflessa nello spazio. L'aumentata riflessione causa una diminuzione della temperatura globale del pianeta. Altre ricerche successive indagarono il ruolo - nelle variazioni climatiche - dell'inquinamento atmosferico e delle eruzioni vulcaniche. Nel 1989, Atsumo Ohmura, geografo dell'ETH Zürich, pubblicò uno studio dove analizzava i dati statistici sull'irraggiamento solare della superficie terrestre, ed evidenziava una diminuzione del 10% avvenuta nel corso dei precedenti tre decenni. L'effetto della diminuzione avrebbe dovuto condurre ad un raffreddamento dell'atmosfera, un risultato apparentemente in contraddizione con gli effetti del riscaldamento globale. Ben presto furono effettuate nuove ricerche che confermarono il trend individuato da Ohmura. Nel 1992, Gerry Stanhill descrisse per la prima volta il fenomeno con la parola dimming.

L'incidenza dell'oscuramento globale varia localmente e nel corso dell'anno, ma è stato stimato un aumento medio annuale dell'oscuramento di circa il 2-3% (un valore molto superiore alla riduzione della radiazione solare) fino agli anni 1990 quando il fenomeno ha mostrato una inversione di tendenza.

Negli anni novanta fu effettuato un esperimento alle isole Maldive, in modo da comprovare che le cause dell'oscuramento fossero effettivamente dovute all'inquinamento atmosferico. Fu registrata una riduzione del 10% dell'irraggiamento (contro l'1% inizialmente previsto) nelle isole coperte dai venti stagionali (molto inquinati) provenienti dall'India meridionale .

Anche le scie di condensazione degli aeromobili hanno un impatto sul fenomeno: un'evidenza di questo la si è avuta durante gli attentati dell'11 settembre 2001. La sospensione dei voli aerei durante quella giornata è stata associata ad una diminuzione dell'emissione in atmosfera, dando evidenza empirica di un anomalo aumento dell'escursione termica tra notte e giorno (ca. 1 °C) in alcune zone degli USA normalmente interessati da traffico aereo .

Nel 2005 Wild, Pinker e altri hanno registrato una inversione dell'effetto (localmente fino al 4%), a partire dagli anni novanta.

Sembra che una fra le cause di ciò sia la diminuzione di particolato e SO_x disperso in atmosfera (non di gas serra) che si è cominciato a registrare grazie a legislazioni favorevoli al contenimento dell'inquinamento, in particolare in Europa

L'irraggiamento solare provoca il riscaldamento degli oceani e la conseguente evaporazione dell'acqua che ricade successivamente come pioggia. La riduzione dell'irraggiamento causata dalla presenza di aerosol nell'aria, può quindi avere un'influenza negativa sul ciclo idrogeologico del pianeta. L'offuscamento globale potrebbe avere perciò effetti su larga scala sul clima.

Alcuni modelli climatici sembrano indicare che una riduzione dell'irraggiamento superficiale può aver contribuito alla mancata formazione dei monsoni nell'Africa subsahariana durante gli anni settanta e ottanta, con conseguenti carestie come quella provocata dalla tragica Siccità del Sahel. Allo stesso modo tramite l'offuscamento da parte degli aerosol si tende a spiegare buona parte del lieve raffreddamento climatico globale registrato nel trentennio compreso tra il 1945 e il 1975.

Nel complesso sembra che l'oscuramento globale abbia contenuto i flussi energetici fra l'atmosfera e la superficie terrestre, con un relativo calo dell'evaporazione ed aumento dell'umidità atmosferica, ma una conseguente riduzione delle precipitazioni

Alcuni scienziati ritengono che l'offuscamento globale mascheri parzialmente gli effetti del riscaldamento globale, al punto che una risoluzione dell'oscuramento globale potrebbe portare ad un aumento delle temperature superiore a quanto ipotizzato.

La riduzione del particolato in atmosfera è relativamente veloce una volta fermata l'immissione degli inquinanti in atmosfera, mentre l'inerzia degli effetti del riscaldamento globale è molto superiore e più difficilmente controllabile.

Il fenomeno è globale, ma i suoi effetti sono locali: infatti, mentre gran parte del globo si è riscaldata, le regioni investite da venti inquinati si sono raffreddate. Questo potrebbe spiegare il relativo raffrescamento della parte est degli Stati Uniti rispetto alla costa ovest.

La stima degli aerosol in atmosfera viene effettuata da una duplice misurazione: una misurazione a terra attraverso spettro-radiometri, spettro-fotometri e radiometri che “catturano” le radiazioni nello spettro del visibile e una misurazione ad opera dei sensori satellitari che valutano la presenza degli aerosol che assorbono e riemettono una maggiore quantità di radiazione.

Attraverso lo sviluppo di particolari modelli (come ad esempio lo studio GEMS sull'interazione tra i dati satellitari e le misure in situ) è possibile mettere a confronto le due misurazioni ed effettuare una stima della presenza degli aerosol in atmosfera.

5.1.1 CONSEGUENZE OSCURAMENTO GLOBALE: AUMENTO CONSUMO ELETTRICO ILLUMINAZIONE PUBBLICA

In termini globali, si è potuto valutare una riduzione della luminosità e della radianza solare sulla superficie della Terra per opera della presenza di particolato e di aerosol all'interno delle nubi che sono in grado di assorbire una grandissima quantità di luce e radiazione a diverse lunghezze d'onda.

Una riduzione della luminosità terrestre mi genera un notevole incremento nei consumi elettrici dovuti all'illuminazione pubblica.

Nel caso dell'Italia la valutazione è molto complessa in quanto è un paese caratterizzato da un'estrema variabilità territoriale: la sua morfologia territoriale è di tipo longitudinale e descrive, quindi, variazioni climatiche e territoriali.

La Lombardia, ad esempio, è caratterizzata da un clima freddo e rigido in inverno e in estate da climi caldi ed umidi; la Sicilia, invece, è caratterizzata da un clima meno rigido in inverno e da clima arido in estate. Questa variabilità è legata strettamente al fatto che la Sicilia è molto più vicina all'equatore rispetto alla Lombardia.

E' interessante valutare i dati annuali dei consumi elettrici per illuminazione pubblica in un intervallo temporale compreso tra il 1963 e il 2010 riportato nel grafico sottostante.

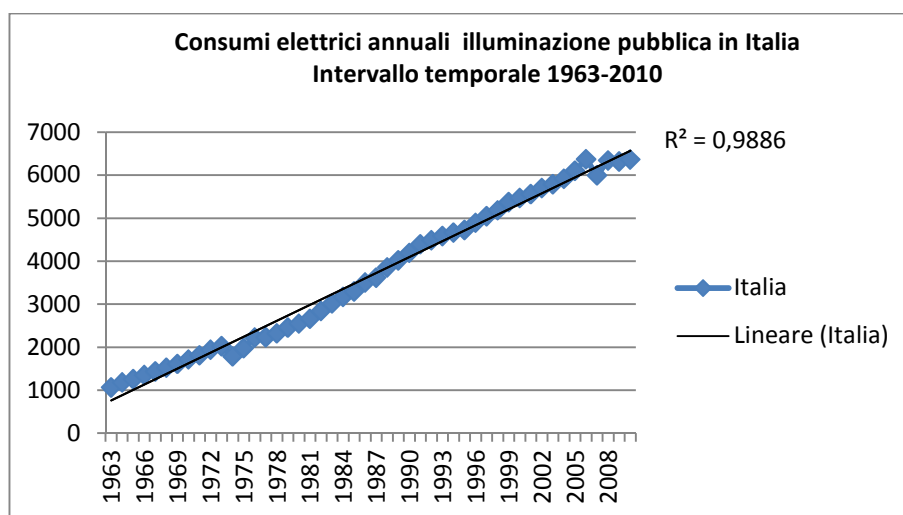


Grafico 1 Consumi elettrici per illuminazione pubblica in Italia

Da questo grafico, è possibile notare come i consumi elettrici per illuminazione pubblica in Italia descriva un trend in fortissima crescita soprattutto dal 1975 in poi, in accordo con la riduzione della luminosità terrestre dovuto alla presenza di inquinanti in atmosfera.

E' possibile analizzare i consumi elettrici per illuminazione in Lombardia e in Sicilia in un intervallo temporale tra il 1977 e il 2010 riportati nei grafici sottostanti.

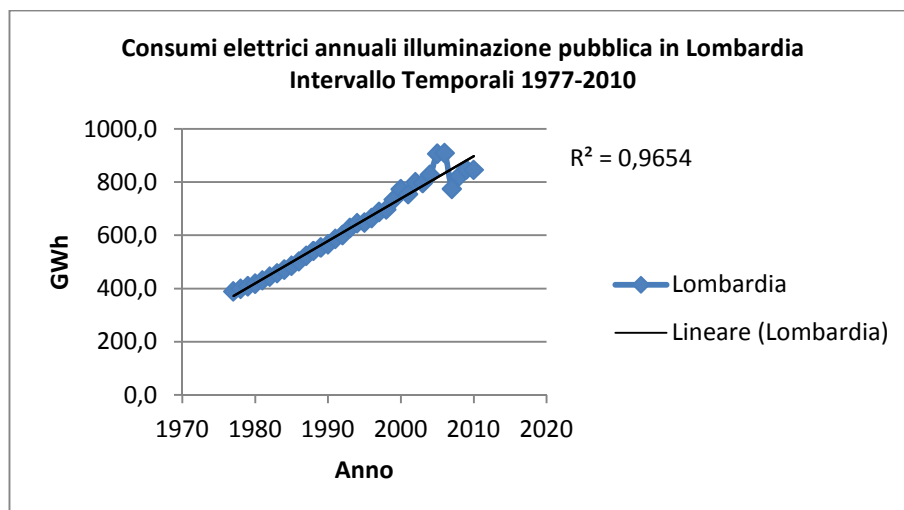


Grafico 2 Consumi elettrici per illuminazione pubblica in Lombardia

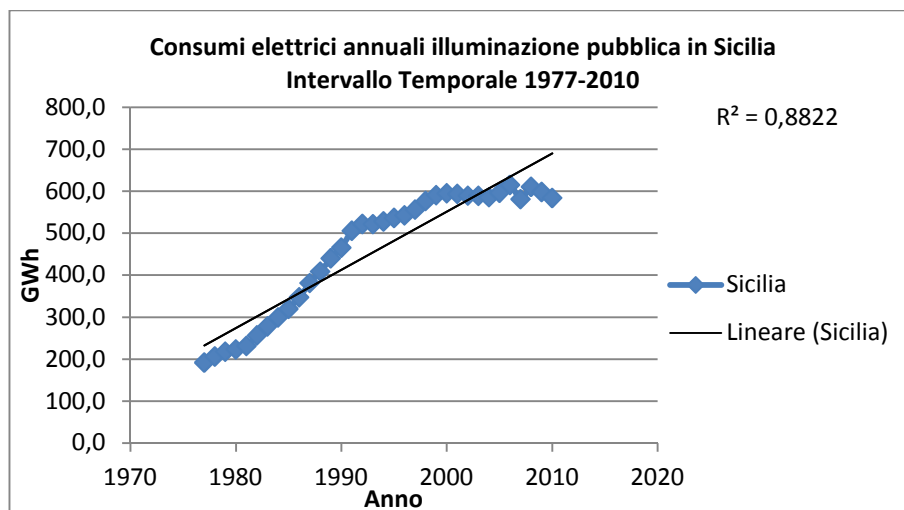


Grafico 3 Consumi elettrici per illuminazione pubblica in Sicilia

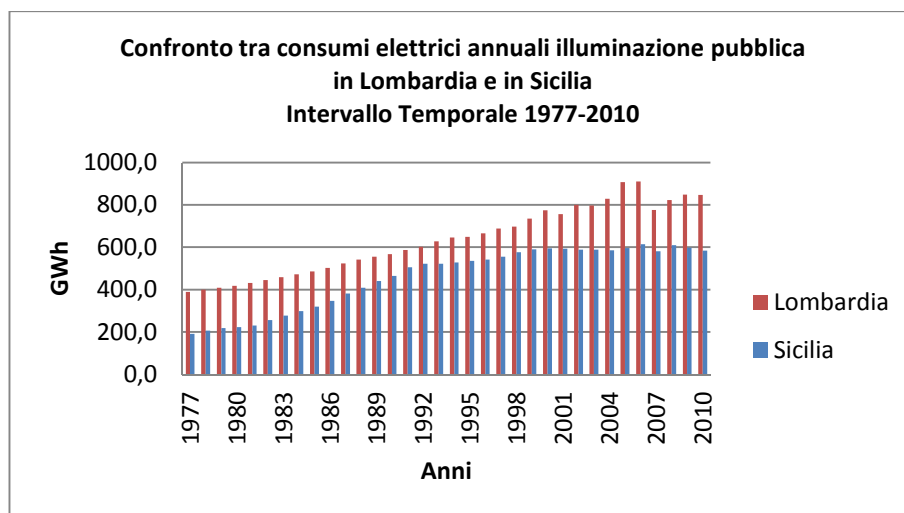


Grafico 4 Confronto tra consumi elettrici per illuminazione pubblica tra la Lombardia e la Sicilia

Dall'analisi di questi tre grafici si descrive un notevole aumento dei consumi elettrici per illuminazione pubblica nell'intervallo temporale tra il 1977 e il 2010 in entrambe le regioni strettamente collegato ad una riduzione della luminosità.

Il confronto, invece, tra le due serie di dati mette in risalto il fatto che la posizione geografica delle due regioni gioca un aspetto fondamentale: la Sicilia, infatti, è più vicina all'equatore e, quindi, è caratterizzata da una luminosità superiore rispetto alla Lombardia. Questo viene sottolineato dal confronto tra i dati di consumi elettrici dovuto ad illuminazione pubblica: la Lombardia possiede dei consumi notevoli rispetto alla Sicilia.

Un analogo riscontro lo si può determinare nel caso di due città avente posizioni geografiche differenti: Brescia e Messina.

Negli anni tra il 1973 e il 2010 si riscontra, come si vede nei grafici sottostanti, da un trend in netta crescita per entrambe le città, mentre dal loro confronto è possibile valutare una netta variazione legata alla posizione geografica.

Il clima a Brescia è caratterizzato da una riduzione di luminosità maggiore rispetto a Messina: durante l'anno, infatti, si assiste a maggiore nuvolosità, nebbia,... che spiega un più elevato consumo elettrico per illuminazione pubblica rispetto a Messina.

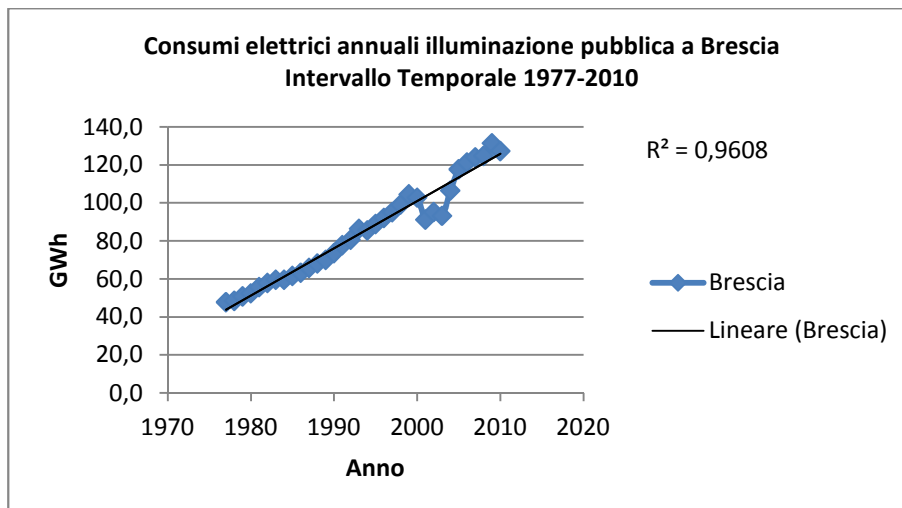


Grafico 5 Consumi elettrici per illuminazione pubblica a Brescia

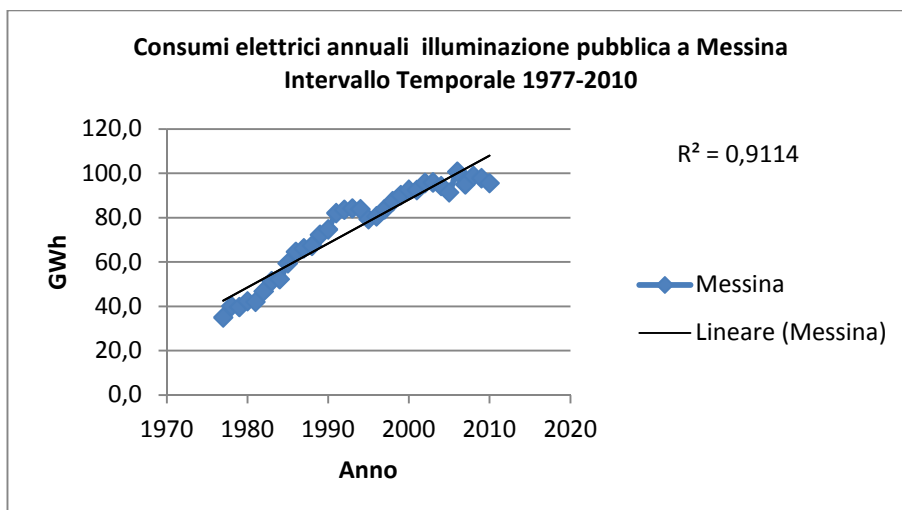


Grafico 6 Consumi elettrici per illuminazione pubblica a Messina

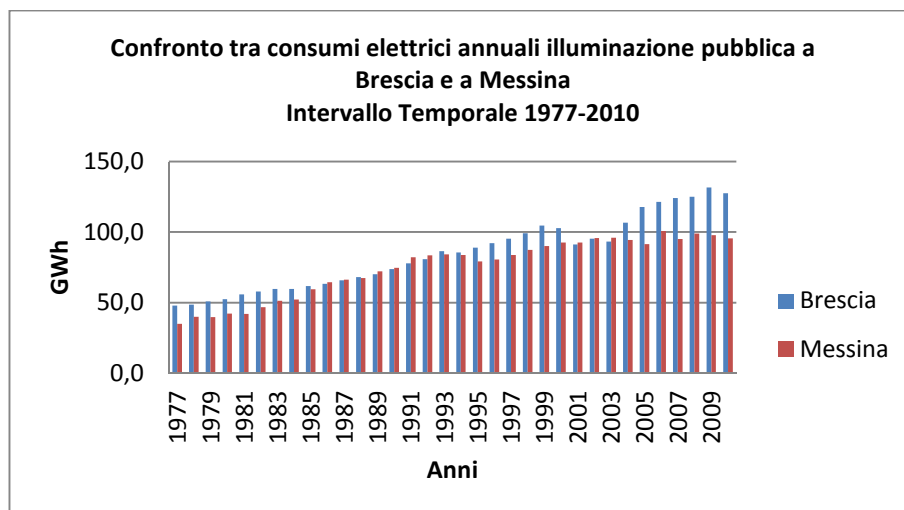


Grafico 7 Confronto tra consumi elettrici illuminazione pubblica tra Brescia e Messina

Se si considerassero , ad esempio, i dati orari dei consumi elettrici per illuminazione pubblica per entrambe le città è possibile valutare che nelle ore notturne si assiste ad un aumento di consumo elettrico dovuto ad una riduzione della luminosità rispetto alle ore diurne.

Si riporta, a titolo puramente esemplificativo , il confronto tra i consumi elettrici orari per il giorno 3 Gennaio 2010 sia per Messina che per Brescia.

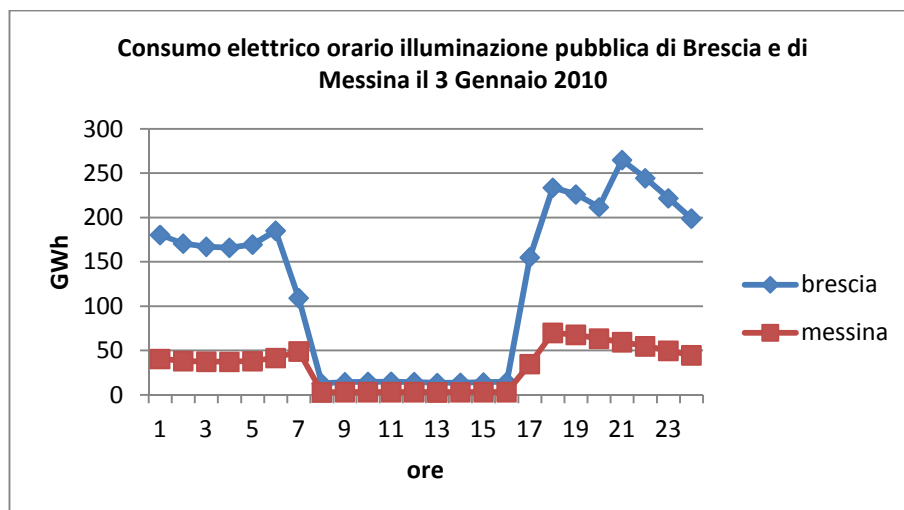


Grafico 8 Confronto consumi elettrici orari illuminazione pubblica di Brescia e Messina

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Si può concludere che la luce solare gioca un ruolo fondamentale sulla vita della Terra.

E' possibile, quindi, valutare che una riduzione della luminosità è un aspetto negativo in quanto strettamente correlato al riscaldamento globale della Terra con conseguenze gravissime : come ,ad esempio, una riduzione dei ghiacciai sulle calotte polari, un innalzamento del livello dei mari, un aumento della siccità e l'estinzione di numerose specie animali e vegetali sono solo alcuni scenari che si possono verificare.

Gli interventi possibili riguardano da un lato la riduzione delle emissioni di gas atmosferici, di particelle solide che restano in sospensione in atmosfera, dall'altro lato si dovrebbe cercare di sviluppare modelli di previsione con maggiore accuratezza che si basa, anche, sulla valutazione sia di misura satellitari che di misure a terra.

Una riduzione della luminosità genera effetti gravi anche nella vita sociale-economica della nostra società : si assiste a maggiori consumi elettrici per illuminazione pubblica. Nei periodi invernali ed autunnali caratterizzati da una riduzione della luminosità e da periodi notturni più ampi, il consumo elettrico ed energetico tende ad aumentare.

Una riduzione della luminosità genera, inoltre, effetti negativi alla salute umana: molti studi scientifici, infatti, stabiliscono che una corretta

esposizione solare dà effetti benefici sulla vita psico-fisica di ogni essere vivente.

L'analisi dello spettro visibile è importante per la realizzazione di nuovi edifici: si sviluppano modelli tridimensionali dell'edificio che descrivono la percentuale di esposizione alla luce naturale in relazione dell'orientamento dell'edificio. Attraverso questi modelli si riesce a razionalizzare la costruzione di nuovi edifici e contenere i consumi energetici futuri.

Lo studio del visibile ci consentirà, in futuro, di poter sviluppare dei modelli che ci consentono di valutare con maggior dettaglio gli strati di particolato, lo strato di ozono e dei gas serra a scala locale e globale attraverso le misure satellitari.

Lo studio dei consumi elettrici e la riduzione della luminosità giornaliera può essere la base per uno studio più dettagliato nelle valutazioni di una città "Green": esistono diversi studi ed approfondimenti per ridurre i consumi attraverso l'ausilio di nuove fonti energetiche alternative oppure attraverso l'ausilio di lampade a basso consumo energetico, con attivazione attraverso sensori di luminosità

Lo studio della luce naturale potrà garantire diverse applicazioni future in diversi campi: nella medicina attraverso lo studio di nuove tecnologie che saranno in grado di sostituire la medicina tradizionale, in edilizia attraverso lo sviluppo di modelli tridimensionali che consentiranno la costruzione di edifici a basso consumo energetico e tanti altri settori.

NOTE BIBLIOGRAFICHE

Siti internet di riferimento:

<http://www.osti.gov/energycitations/>

http://www.terna.it/default/Home/SISTEMA_ELETRICO/dispacciamento/dati_esercizio/dati_giornalieri/confronto.aspx

http://www.webgis.fondazionecariplo.it/public/auditgis/stats_list.php

http://g24ux.phys.uniroma1.it/didattica/dispense_fua

<http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/features/sun-brightness.html>

<http://www.molwick.com/it/libri/>

<http://zebu.uoregon.edu/2000/ph101/lec05.html>

<http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/properties-of-light>