

TRASMISSIONE DEL CALORE PER IRRAGGIAMENTO

Scambio termico per irraggiamento

L'irraggiamento, dopo la conduzione e la convezione, è il terzo modo in cui i corpi possono scambiare calore. Tale fenomeno non è dissimile da ciò che accade nella propagazione di onde acustiche ma, a differenza di queste ultime, le onde elettromagnetiche, responsabili dell'irraggiamento termico, non necessitano di alcun mezzo per la propagazione.

Caratteristica fondamentale dell'irraggiamento risulta quindi essere la totale indipendenza da un particolare ambiente che può comunque influenzare lo stato dei corpi. E' quindi sufficiente che due corpi si trovino a debita distanza affinché possano assorbire l'uno l'irraggiamento dell'altro.

Onde elettromagnetiche

Nelle onde elettromagnetiche si ha un trasporto di energia dovuto all'oscillazione del campo elettrico \vec{E} e del campo magnetico \vec{B} .

La propagazione dell'onda è rettilinea ed avviene lungo l'asse x , come mostrato in figura 1; l'oscillazione del vettore \vec{E} avviene in modo ortogonale alla direzione dell'onda, ed il vettore di induzione magnetica \vec{B} è a sua volta ortogonale al vettore campo elettrico, cioè i due campi si collocano su piani ortogonali.

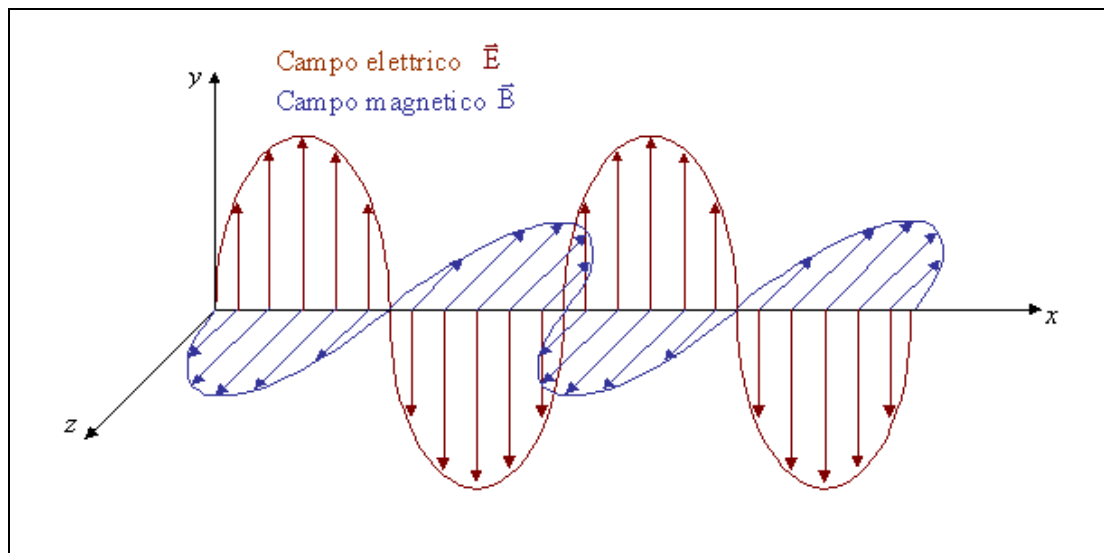


Figura 1; Rappresentazione vettoriale dell'onda elettromagnetica lungo l'asse x.

La condizione di massimo trasporto di energia si verifica quando l'oscillazione del campo magnetico e di quello elettrico sono in fase, quando si ha cioè quella che viene definita "polarizzazione rettilinea". Per tale motivo anche tramite onde elettromagnetiche si può sviluppare il fenomeno di onde stazionarie, cioè è possibile avere un campo di valore elevato che non trasporta energia.

La lunghezza d'onda e la frequenza sono legate dalla seguente relazione:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

dove λ è la lunghezza d'onda, f la frequenza e c la velocità della luce nel mezzo considerato; in particolare nel vuoto essa raggiunge il suo valore massimo

$$c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Negli altri mezzi invece tale velocità è pari a:

$$v = \frac{c_0}{n}$$

dove n è una costante tipica del mezzo nel quale si propaga l'onda ed è detta *indice di rifrazione assoluto del mezzo*. Non esistono mezzi nei quali n è minore di uno, cioè la luce nel vuoto si propaga con la massima velocità possibile.

	n
Aria	1,000294
H	1,000139
CO	1,000449
Acqua	1,33
Alcool etilico	1,36
Cloruro di sodio	1,53
Diamante	2,42

Tabella 1; tabella con alcuni indici di rifrazione.

Le onde elettromagnetiche vengono poi suddivise e classificate in base alla loro lunghezza d'onda. Le varie lunghezze d'onda che compongono lo spettro di emissione di un corpo dipendono dalla natura del corpo stesso, mentre l'intensità dell'energia alle varie lunghezze d'onda è in relazione a come le molecole vengono eccitate. Un solido caldo, ad esempio, emette tutte le lunghezze d'onda, formando uno spettro continuo il quale, a seconda della temperatura, può andare da un rosso debolmente visibile ad un bianco brillante. Una radiazione è invece detta *monocromatica* se porta energia solo ad una frequenza.

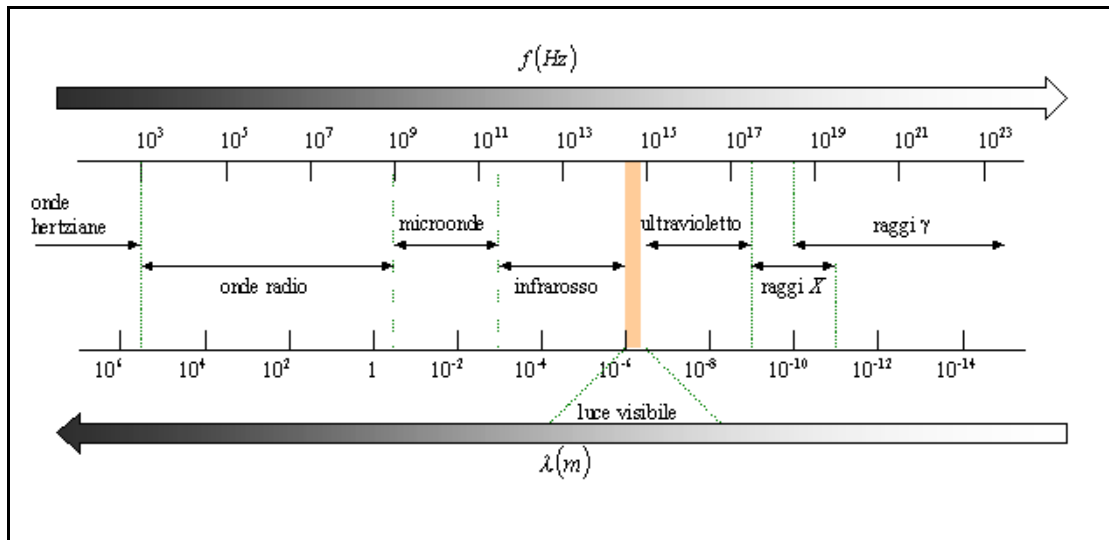


Figura 2; Spettro delle radiazioni.

Come si può notare dalla figura 2, le frequenze percepibili dall'occhio umano come luce visibile rappresentano solo una piccola parte delle onde elettromagnetiche conosciute, con lunghezza d'onda λ compresa tra i 400 e i 700 nanometri. Di seguito vengono riportate descrizioni delle onde presenti in tabella.

Onde hertziane $50 \leq f \leq 1000 \text{ Hz}$, $10^9 \geq \lambda \geq 10^6 \text{ m}$

Le onde hertziane furono scoperte da Hertz, e si trovano alle maggiori lunghezze d'onda ed alle frequenze più basse. Sono le responsabili dell'inquinamento elettromagnetico causato dalla linee elettriche dell'alta tensione.

Onde radio $10^3 \leq f \leq 10^9 \text{ Hz}$, $10^6 \geq \lambda \geq 0.3 \text{ m}$

Le onde radio sono utilizzate in prevalenza nelle trasmissioni radio ed, in particolare, per la telefonia cellulare.

Microonde $10^9 \leq f \leq 3 \cdot 10^{11} \text{ Hz}$, $0.3 \geq \lambda \geq 10^{-3} \text{ m}$

Le microonde sono utilizzate in prevalenza nelle applicazioni termiche, per esempio nei forni a microonde, oppure per comunicazioni e sistemi radar.

Infrarosso $3 \cdot 10^{11} \leq f \leq 3.8 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, $10^{-3} \geq \lambda \geq 0.78 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

Le radiazioni infrarosse sono prodotte da corpi caldi, in cui gli atomi vengono eccitati tramite gli urti causati dall'agitazione termica. Se assorbiti da una molecola i quanti hanno un'energia sufficiente a provocare un moto vibrazionale, che si traduce in un aumento di temperatura.

L'emissione infrarossa è utilizzata in medicina per terapie fisiche e, nella ricerca, per lo studio dei livelli energetici vibrazionali delle molecole.

Luce visibile $3.8 \cdot 10^{14} \leq f \leq 7.9 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, $0.78 \cdot 10^{-6} \geq \lambda \geq 0.38 \cdot 10^{-6} \text{ m}$

Il campo della luce visibile è molto stretto rispetto all'intero spettro delle radiazioni, seppure sia molto importante per gli organismi viventi, poiché l'occhio della maggior parte di essi è sensibile a queste radiazioni.

Colori della luce visibile:

Colore	$f (10^{14} \text{ Hz })$	$\lambda (10^{-6} \text{ m })$
Rosso	3.85 – 4.82	0.780 – 0.622
Arancione	4.82 – 5.03	0.622 – 0.597
Giallo	5.03 – 5.20	0.597 – 0.577
Verde	5.20 – 6.10	0.577 – 0.492
Azzurro	6.10 – 6.59	0.492 – 0.455
Violetto	6.59 – 7.89	0.455 – 0.380

Ultravioletto $7.9 \cdot 10^{14} \leq f \leq 5 \cdot 10^{17} \text{ Hz}$, $0.38 \cdot 10^{-6} \geq \lambda \geq 6 \cdot 10^{-10} \text{ m}$

Le principali sorgenti di onde ultraviolette sono: il sole, i fulmini (seppure per breve tempo) e l'arco delle saldatrici elettriche.

Una parte notevole delle radiazioni ultraviolette prodotte dal sole sono assorbite dall'atmosfera, provocando la reazione di formazione dell'ozono O_3 . Tale assorbimento è fondamentale per la vita sulla terra, in quanto questa radiazione in grandi quantità risulta letale. È noto a tutti il problema dell'assottigliamento dello strato di ozono dovuto principalmente ai clorofluorocarburi (CFC).

Tanto più i raggi ultravioletti sono ad alta frequenza, tanto più sono dannosi per gli esseri viventi; non tanto perché aumenta il loro potere penetrante nei tessuti, tanto più perché si avvicina a valori di lunghezza d'onda che mandano in risonanza i legami molecolari, portandoli alla rottura.

Il principale utilizzo delle radiazioni ultraviolette è la sterilizzazione.

Raggi X $5 \cdot 10^{17} \leq f \leq 5 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$, $6 \cdot 10^{-10} \geq \lambda \geq 6 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

Il loro principale utilizzo è in campo medico. Il loro potere penetrante è molto elevato, tanto da poter attraversare il corpo umano ed arrivare agli organi interni. L'assorbimento dei raggi X è differente nei tessuti del corpo umano e soprattutto nelle ossa; il flusso di raggi X che attraversa il corpo è quindi diverso in corrispondenza del tessuto attraversato e una lastra fotografica viene più o meno impressionata.

Raggi γ $f \geq 3 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$, $\lambda \leq 10^{-10} \text{ m}$

Queste radiazioni sono tipiche dei raggi cosmici, ma non arrivano fino alla superficie terrestre perché filtrati prima dall'atmosfera.

Sono inoltre estremamente dannose per le cellule umane, in quanto portano alla rottura delle strutture molecolari. Una prolungata esposizione ai raggi γ , dovuta a reazione nucleare, può essere letale anche se è basso il trasporto di energia.

Gli aspetti termici sono maggiormente considerati nel campo delle microonde, infrarosso e visibile, mentre per le onde radio questo aspetto è quasi trascurato. A basse frequenze invece il campo magnetico diventa predominante rispetto al trasporto di energia.

In questa sede ci si limiterà a considerare gli effetti termici dovuti alle microonde, infrarosso e visibile.

Definizioni di grandezze fondamentali

Per prima cosa definiamo il *potere emissivo integrale*: esso è la potenza emessa per metro quadrato di superficie che indichiamo con il simbolo q e la sua unità di misura è Watt su metro quadrato:

$$q \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Un'altra grandezza da definire è il *potere emissivo specifico* (o monocromatico)

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{dq}{d\lambda}$$

la cui unità di misura è $\left[\frac{W}{m^3} \right]$.

Corpo Nero

Occupiamoci ora di studiare l'energia emessa da un corpo: solo per il fatto di trovarsi ad una data temperatura, esso sarà sorgente di una radiazione elettromagnetica.

Alla stessa temperatura, corpi diversi emanano energie distinte. Non è però possibile che l'emissione superi un determinato valore; il *corpo nero* è la sorgente in grado di raggiungere tale emissione limite.

In generale lo spettro di emissione di un materiale ad una certa temperatura in funzione della lunghezza d'onda presenta un andamento curvilineo con diversi massimi e minimi; lo spettro di emissione del corpo nero si ottiene dall'involuppo di infiniti spettri di corpi diversi poiché, come già detto prima, nessun corpo, ad una qualsiasi lunghezza d'onda, può emettere più energia di esso.

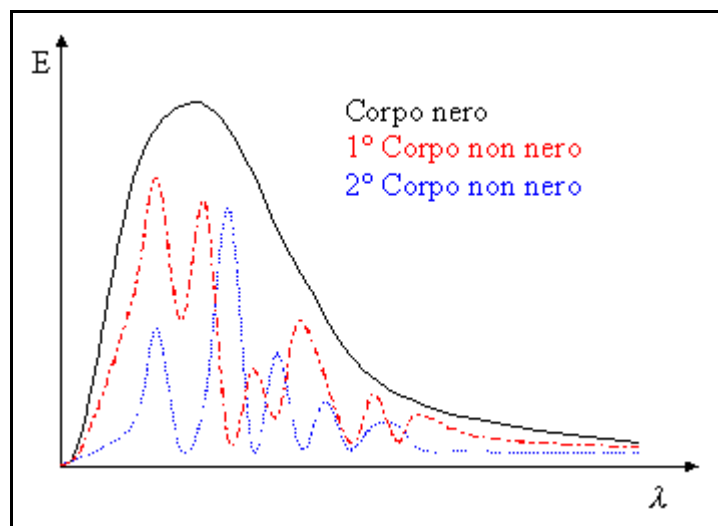


Figura 3; Spettro di un corpo nero e di due corpi qualsiasi a temperatura T .

Il corpo nero è quindi un'astrazione, poiché non può esistere rigorosamente in natura, anche se in laboratorio è possibile ricostruire un oggetto la cui caratteristica di emissività si avvicina a quella di un corpo nero.

Tale oggetto deve essere concavo, con una piccola cavità interna, di colore scuro (quasi nero), realizzato con materiale scabro ed opaco.

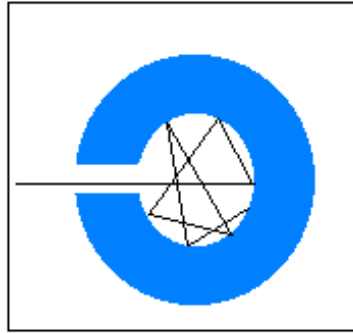


Figura 4; Possibile sezione di un corpo nero.

In termini energetici il corpo nero è un oggetto in grado di assorbire tutta l'energia incidente indipendentemente dalla lunghezza d'onda.

Una volta che un raggio di luce entra nella cavità, colpendo la superficie interna, prima di uscire nuovamente deve essere riflesso un considerevole numero di volte; in pratica, cedendo una parte della sua energia al corpo ad ogni riflessione viene interamente assorbito.

Se ora consideriamo una cavità di forma qualsiasi, con la superficie interna mantenuta a temperatura costante e vi introduciamo un corpo nero, avremo che questo, per unità di superficie, riceverà la potenza q_i ed emetterà la potenza q_{e0} .

A regime, una volta raggiunto l'equilibrio termico tra il corpo nero e la cavità, si avrà:

$$q_i = q_{e0}.$$

Data la definizione di corpo nero, la situazione definitiva è quella di un corpo che assorbe tanto calore quanto ne riceve a tutte le frequenze.

Se al posto del corpo nero mettiamo un corpo qualsiasi colorato, pur rimanendo uguale la potenza incidente q_i , la potenza assorbita per unità di superficie q'_i dipende dal coefficiente di assorbimento a secondo la legge $q'_i = a \cdot q_i$ e non è più la stessa a tutte le frequenze.

Possiamo ora definire il *coefficiente di remissività* ε come il rapporto tra il potere emissivo integrale di un corpo qualsiasi e quello di un corpo nero q_0 , ovvero:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_0},$$

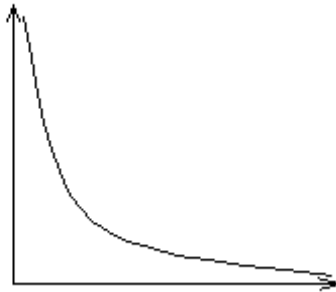
possiamo affermare che la potenza specifica irradiata dal corpo nella cavità è data da $q'_e = \varepsilon \cdot q_{e0}$, ma all'equilibrio deve essere $q'_i = q'_e$, quindi si ha che $a \cdot q_i = \varepsilon \cdot q_{e0}$.

Risulta quindi evidente che il corpo nero, oltre ad essere per definizione il corpo con il potere assorbente massimo, è anche quello con il coefficiente d'emissione maggiore.

Leggi del corpo nero

Le leggi che verranno ora enunciate hanno validità ristretta al caso di un corpo nero e in generale non varranno per gli altri materiali.

Legge di Wien



Guardando uno spettro di emissione di un corpo nero si nota che, con l'aumento della temperatura, il corpo raggiunge un valore di picco sempre più elevato, la cui lunghezza d'onda corrispondente è sempre minore.

Da questa considerazione si può enunciare la legge di Wien: la temperatura alla quale il corpo è sottoposto e la lunghezza d'onda alla quale corrisponde l'emissività massima sono inversamente proporzionali:

$$\lambda_{\max} \cdot T = k$$

Secondo tale legge più aumenta la temperatura, più la lunghezza d'onda per cui si ha un massimo di energia emessa assume valori minori all'interno dell'intervallo del visibile, a cui corrispondono valori tipici del colore violetto; viceversa, se decresce la temperatura, la lunghezza d'onda assume valori tipici del colore rosso.

In questo modo nasce la possibilità di associare il colore dello spettro visibile alla temperatura, detta appunto **temperatura di colore**.

A temperature basse si associa il colore rosso, mentre a quelle alte un colore violetto-azzurro. Ciò, paragonandolo alla normale concezione dei colori, può sembrare un paradosso, ma in realtà è così.

Definiamo ora, tramite una tabella, alcune temperature di colore per diversi tipi di illuminazione:

	Temperatura di colore
Tubo fluorescente	7000k
Lampada incandescente	3500k
Xeno	5500k
Sole	6000k

Lo xeno utilizzato nelle lampade a scarica di gas e nelle macchine fotografiche, ha una temperatura di colore simile a quella del sole. Se in un ambiente esterno, illuminato da luce solare, si utilizza una macchina fotografica con flash allo xeno, i colori della foto rimangono naturali, poiché sia lo xeno che la radiazione solare hanno la stessa temperatura di colore.

Se invece si utilizza la stessa pellicola e lo stesso flash in un ambiente chiuso con luce prodotta da un tubo fluorescente, verranno esaltati maggiormente i colori freddi (azzurri - viola), poiché il tubo fluorescente ha una temperatura di colore maggiore di quella solare.

Se l'ambiente invece è illuminato con lampada incandescente, che ha una temperatura di colore minore di quella solare, saranno messi in risalto i colori caldi, in particolare il rosso.

Per l'occhio umano non si ha predominanza di certi colori in base al tipo di illuminazione dell'ambiente, perché, dopo un certo tempo, l'occhio umano compensa la scarsità di certi colori e l'esaltazione di altri, adattandosi in modo automatico.

Per gli ambienti chiusi, secondo disposizioni di legge, non è sufficiente garantire un'adeguata illuminazione fornendo una certa energia luminosa (per tutte le aule scolastiche tale energia deve essere almeno di 200 W/m^2), ma è necessario garantire una certa qualità spettrale della luce.

Normalmente utilizzata in ambienti scolastici e lavorativi, la luce dei tubi fluorescenti, in cui si ha una predominanza dei colori freddi, è sgradevole per la vista umana, poiché l'affatica, e non favorisce la concentrazione.

In effetti le leggi sono orientate a definire dei requisiti a cui gli ambienti pubblici devono sottostare, in particolare il D.M del 1975 fornisce delle norme, oltre che in campo acustico, anche in campo d'illuminazione: è necessario favorire la corretta illuminazione dall'esterno e la temperatura di colore del sistema d'illuminazione deve essere di circa 5500k, cioè un valore simile a quello ottimale della luce solare.

Legge di Planck

Tale legge fornisce il legame che sussiste tra il potere emissivo monocromatico q'_0 del corpo nero, la lunghezza d'onda λ , e la temperatura T , ed è data dalla seguente relazione:

$$q'_0(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

in cui

$$c_1 = 2\pi \cdot c_0^2 \cdot h = 3.74 \times 10^{-16} \text{ Jm}^2/\text{s}$$

$$c_2 = h \cdot c_0 / k = 1.44 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

Legge di Stefan - Boltzmann

Tale legge fornisce una relazione che lega q_0 alla temperatura a cui il corpo è sottoposto:

$$q_0 = \delta_0 \cdot T^4$$

dove δ_0 è la *costante di Stefan - Boltzmann* tipica del corpo nero, il cui valore è

$$\delta_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^2} \right] \text{ e } T \text{ è temperatura assoluta del corpo.}$$

Legge di Prevost

La legge di Prevost afferma che l'energia scambiata è pari a quella emessa meno quella ricevuta:

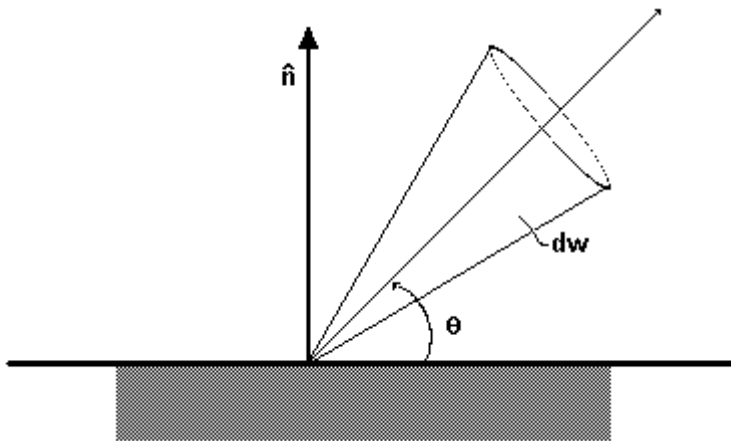
$$\dot{q}_s = \dot{q}_e - \dot{q}_r$$

Ovviamente tale legge non è valida esclusivamente per i corpi neri, ma ha carattere generale.

Potere emissivo angolare e legge di Lambert

Attraverso la legge di Planck e le sue derivate possiamo conoscere quanta energia viene emessa dal corpo per una determinata lunghezza d'onda ma non abbiamo alcuna informazione di come questa venga distribuita nello spazio.

E' per questo motivo che andiamo ad introdurre una nuova grandezza che chiameremo **potere emissivo angolare**.



Il potere emissivo angolare i sarà pari a:

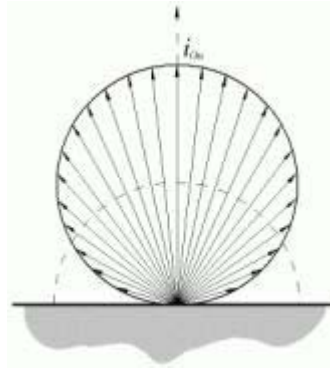
$$i = \frac{dq}{d\omega} \left[\frac{W}{m^2 \text{sterad}} \right]$$

Tale grandezza è funzione del solo angolo θ , questa caratteristica ci permette di affrontare un problema tipicamente tridimensionale in modo bidimensionale e viene generalmente rappresentato in coordinate polari: l'involuppo delle sue ampiezze è detto **solido fotometrico**.

La legge di Lambert descrive l'andamento di $i(\theta)$ per un corpo nero:

$$i_0(\theta) = i_m \cos \theta$$

Che è uguale al valore massimo nella direzione normale per il coseno di θ .



Il solido fotometrico corrispondente è perciò una circonferenza.

È necessario ricordare che tale legge vale solo per i corpi neri. Per i corpi colorati gli involucri dei vettori non sono delle circonferenze, ma assumono delle forme irregolari, in funzione del materiale e della superficie.