

**Parte II**  
**Elementi di Ottica**

# Capitolo 2

## Natura, produzione e ricezione della luce

Testi per la consultazione:

L. Lovitch, S. Rosati – Fisica Generale II

Halliday, Resnick, Krane – Fisica 2

Tipler – Corso di Fisica Volume 2

### 2.1 Fenomeni ondulatori

Nel Corso di Meccanica é stato effettuato lo studio di alcuni fenomeni di tipo ondulatorio; di seguito vengono richiamati brevemente alcuni concetti, inerenti ai fenomeni ondulatori, che é bene avere presenti nello studio dell'Ottica.

Un fenomeno ondulatorio può essere descritto come:

$$s = s(x, t) = A \sin \left[ 2\pi \left( \frac{x}{\lambda} \mp \frac{t}{T} \right) + \phi \right] = A \sin (kx \mp \omega t + \phi)$$

dove  $A$  rappresenta l'**ampiezza** dell'onda,  $\lambda$  é il periodo spaziale o **lunghezza d'onda**,  $T$  é il **periodo temporale**,  $\phi$  la **fase iniziale**;  $k$  é il **numero d'onda** ed é legato alla lunghezza d'onda dalla relazione:  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\omega$  é la **pulsazione** ed é legata al periodo dalla relazione:  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ . L'inverso del periodo fornisce il numero di cicli (o periodi) per unitá di tempo e prende il nome di **frequenza**  $\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$  e si misura in Hz ( $s^{-1}$ ). Il periodo e la lunghezza d'onda sono legati dalla relazione:  $T = \frac{\lambda}{v}$ , dove  $v$  é la velocitá di propagazione dell'onda.

Nella formula il segno  $-$  viene usato per descrivere un'onda progressiva, cioè un'onda che al passare del tempo avanza lungo la direzione di propagazione secondo il suo verso positivo, il segno  $+$  per descrivere un'onda regressiva, che procede secondo il verso negativo lungo la direzione di propagazione. L'argomento della funzione seno prende il nome di **fase** dell'onda.

Un fenomeno ondulatorio é detto di tipo **longitudinale** se l'oscillazione avviene nella direzione di propagazione dell'onda stessa, come nel caso delle onde di compressione, responsabili dei fenomeni sonori, ovvero di tipo **trasversale** se l'oscillazione avviene in direzione trasversa rispetto alla direzione di propagazione delle onde, come nel caso di una corda vibrante.

Una entità utile per lo studio dei fenomeni ondosi é il **fronte d'onda** che rappresenta il luogo geometrico di tutti i punti in cui ad un determinato istante l'onda ha la stessa fase; il fronte d'onda é perpendicolare in ogni punto alla direzione di propagazione in quel punto. Inoltre, ad ogni fenomeno ondoso é associata una **intensità**, cioè l'energia trasportata nell'unità di tempo attraverso una superficie unitaria posta perpendicolarmente alla direzione di propagazione; l'intensità di un'onda é sempre proporzionale al quadrato della sua ampiezza:  $I = K A^2$ .

Nei fenomeni ondulatori studiati in Meccanica la quantità  $s$  rappresenta lo spostamento di un elemento infinitesimo di un sistema continuo (strato di spessore infinitesimo di gas, tratto di lunghezza infinitesima della corda ...) dalla posizione di equilibrio; nel caso dei fenomeni luminosi, oggetto dell'Ottica,  $s$  rappresenta il vettore intensità di campo elettrico **E** o il vettore induzione magnetica **B** associati ad un'onda **elettromagnetica**: mentre nel caso meccanico il fenomeno ondoso descrive le vibrazioni di un mezzo, nel caso elettromagnetico descrive le variazioni spaziali e temporali dei vettori associati ad un campo elettrico e ad un campo magnetico correlati.

**La luce é radiazione elettromagnetica con frequenza compresa in un determinato intervallo di valori a cui l'occhio umano risulta essere sensibile.**

## 2.2 Natura della luce

Tutti i corpi emettono in continuazione energia poiché sono sorgenti di una radiazione elettromagnetica che é legata alla temperatura dei corpi stessi e prende nome di **radiazione termica**. Inoltre essi assorbono anche continuamente energia radiante emessa da altri corpi presenti nell'ambiente circostante. Se un corpo é piú caldo dell'ambiente in cui si trova esso emette piú radiazione di quanta non ne assorba e tende a raffreddarsi; di norma rag-

giunge un equilibrio termico con il suo ambiente, condizione in cui le quote di assorbimento e di emissione di radiazione sono uguali.

L'occhio umano percepisce la radiazione termica emessa spontaneamente dai corpi quando la loro temperatura é superiore a circa  $520^{\circ}\text{C}$ ; una parte della radiazione termica diviene allora visibile, cioé é in grado di stimolare la retina dell'occhio umano. I meccanismi attraverso i quali un corpo può emettere luce, e quindi diventare luminoso, sono molteplici; l'emissione avviene in pacchetti finiti di energia in concomitanza ad una modifica dell'energia di un atomo o di una molecola. Gli elettroni appartenenti ad atomi o molecole possono venire portati dal loro stato ad energia minima a stati di energia superiore ad esempio riscaldando la sostanza o facendola attraversare da una corrente elettrica. Quando gli elettroni ricadono sui loro livelli fondamentali gli atomi o le molecole a cui appartengono emettono radiazione che può essere visibile: l'emissione di luce visibile é particolarmente probabile quando gli elettroni che compiono le transizioni sono elettroni atomici delle orbite esterne (di valenza). Se, invece, le transizioni coinvolgono elettroni appartenenti alle orbite interne l'emissione é nel lontano ultravioletto o nella regione dei raggi X; si ha emissione nell'infrarosso in corrispondenza a transizioni tra stati eccitati di tipo rotazionale o vibrazionale delle molecole causate dall'agitazione termica a temperature superiori un migliaio di kelvin. Nel caso del Sole, la luce emessa viene prodotta nella parte superficiale (fotosfera) ad una temperatura prossima a  $6000\text{ K}$ . In figura 2.1 é riportato lo schema di una transizione con emissione di radiazione.

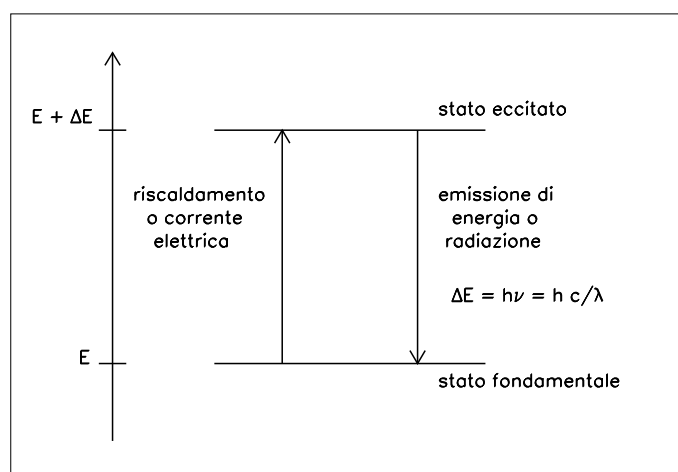


Figura 2.1:

Un corpo non luminoso può divenire visibile quando venga illuminato, cioé quando sia investito da luce emessa da altri corpi: in generale, parte della

luce incidente viene assorbita, parte attraversa l'oggetto, mentre la parte rimanente viene riflessa rendendo così l'oggetto visibile.

Isaac Newton cercò di spiegare le proprietà della luce con l'ipotesi che questa fosse costituita da particelle estremamente piccole emesse dai corpi luminosi (**teoria corpuscolare della luce**) e soggette alle leggi della meccanica; Huygens, invece, cercò di spiegare i fenomeni luminosi interpretandoli sotto l'ipotesi di una natura ondulatoria della luce (**teoria ondulatoria della luce**); questo approccio trovò conferma verso la fine dell'Ottocento quando Maxwell, studiando le equazioni fondamentali dell'elettromagnetismo, trovò delle soluzioni aventi le proprietà di onde trasversali che si propagano con una velocità che coincide, entro gli errori, col valore sperimentale della velocità della luce (il valore oggi accettato per la velocità della luce è  $c = 299792458 \text{ m/s}$  ed è una delle costanti fondamentali della Fisica). Nella teoria ondulatoria della luce le onde associate vengono quindi considerate di natura elettromagnetica ed i campi elettrici e magnetici relativi devono essere soluzioni delle equazioni di Maxwell.

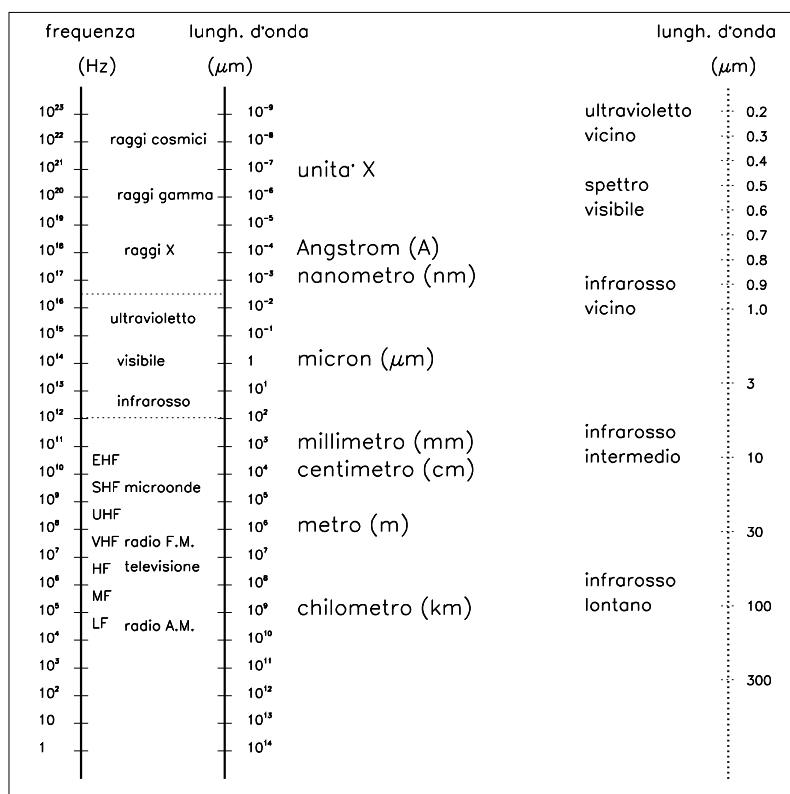


Figura 2.2:

La figura 2.2 rappresenta in modo schematico lo spettro elettromagnetico oggi conosciuto. Vediamone, a grandi linee, le componenti principali.

Le **onde a frequenza radio** hanno frequenza da pochi Hz fino a  $10^9$  Hz e comprendono le radiazioni da linee elettriche, le onde radio AM e FM e le onde TV.

Le **microonde** vanno da circa  $10^9$  Hz a circa  $3 \times 10^{11}$  Hz, corrispondenti a lunghezze d'onda da 1 mm a 30 cm circa, e comprendono onde usate per telecomunicazioni (telefonini) e onde radar.

L'**infrarosso** é compreso nella banda di frequenze da circa  $3 \times 10^{11}$  Hz a  $4 \times 10^{14}$  Hz.

La **luce** comprende una zona assai ristretta dello spettro elettromagnetico, con lunghezze d'onda da 780 nm a 380 nm, anche se, in realtà, l'occhio umano puó spesso coprire un campo leggermente piú ampio. Nella tabella 2.1 sono riportate le frequenze e le lunghezze d'onda associate ai vari colori.

Colore	lunghezza d'onda nel vuoto (nm)	Frequenza ( $10^{12}$ Hz)
Rosso	780–622	384–482
Arancione	622–597	482–503
Giallo	597–577	503–520
Verde	577–492	520–610
Azzurro	492–455	610–659
Violetto	455–380	659–769

Tabella 2.1:

L'**ultravioletto** si estende al di lá del violetto da una frequenza di circa  $7.7 \times 10^{14}$  Hz fino a circa  $3 \times 10^{17}$  Hz. La radiazione solare contiene ultravioletto in frazione piuttosto notevole; essa viene, però, assorbita in larga misura negli strati piú alti dell'atmosfera terrestre.

I **raggi X**, scoperti da Roentgen nel 1895, occupano la banda seguente all'ultravioletto fino a circa  $5 \times 10^{19}$  Hz; al di lá di questi raggi si hanno i **raggi gamma**.

La teoria ondulatoria risulta adeguata per tutti i problemi di trasmissione della luce (propagazione in mezzi omogenei e comportamento all'interfaccia tra mezzi diversi), tuttavia, come é stato stabilito dallo sviluppo della Teoria Quantistica, l'emissione e l'assorbimento della luce avvengono attraverso "pacchetti d'onde" con energia ed impulso definiti, chiamati *quanti di luce o fotoni*. Nella maggioranza dei casi il comportamento della radiazione elettromagnetica é quello tipico ondulatorio; viceversa, in certi

fenomeni le proprietà corpuscolari dei fotoni risultano predominanti. Questo comportamento particolare è noto col nome di **dualismo onda–corpuscolo**.

## 2.3 Sorgenti di radiazione luminosa

- **Il corpo nero** Lo spettro di radiazione termica emessa da un corpo caldo è continuo: i suoi dettagli dipendono decisamente dalla sua temperatura. Elevando progressivamente la temperatura di questo corpo, notiamo due cose: *(a)* quanto più è alta la temperatura, tanto più abbondante è la radiazione termica emessa e *(b)* quanto più alta è la temperatura tanto più corta è la lunghezza d'onda di quella regione dello spettro in cui irraggia con maggiore intensità; il colore predominante di un corpo incandescente si sposta dal rosso spento al giallo–arancio brillante, fino al tono bluastro del “calor–bianco”. L'occhio vede principalmente il colore corrispondente alla più intensa emissione nello spettro visibile. La radiazione emessa da un corpo non dipende solo dalla sua temperatura ma anche dal materiale di cui è fatto, dalla sua forma e dalla natura della sua superficie. Queste caratteristiche rendono difficile capire la radiazione termica sviluppandola in concetti fisici semplici; si introduce, allora, il concetto di **corpo irraggiante ideale**, per il quale lo spettro della radiazione termica emessa dipende solo dalla temperatura del corpo. Possiamo creare un simile corpo irraggiante ideale ricavando una cavità all'interno di un corpo le cui pareti siano tenute a temperatura uniforme; praticando un piccolo foro nella parete la radiazione può fuoriuscire dall'interno della cavità ed essere esaminata in laboratorio. Tale radiazione prende il nome di **radiazione di cavità o di corpo nero** e il suo spettro presenta caratteristiche che sono davvero determinate solo dalla temperatura delle pareti.

Esistono tre proprietà correlate per la radiazione di corpo nero, tutte ben verificate in laboratorio:

1. *Legge di Stefan–Boltzmann* La potenza totale irradiata per unità di area dell'apertura della cavità, estesa a tutte le lunghezze d'onda, si chiama **intensità di irraggiamento** ed è legata alla temperatura assoluta dalla relazione:

$$I(T) = \sigma T^4$$

in cui  $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$ , è una costante universale, detta *costante di Stefan–Boltzmann*. Gli oggetti caldi irradiano

sempre con minor efficienza del corpo nero; esprimiamo questo concetto generalizzando l'equazione precedente:

$$I(T) = \epsilon \sigma T^4$$

in cui  $\epsilon$  è chiamata *emittanza* del materiale che costituisce la superficie. Per il corpo nero  $\epsilon = 1$ , ma per la superficie di oggetti comuni  $\epsilon < 1$  e dipende dalla temperatura.

2. *L'irraggiamento spettrale* fornisce la composizione spettrale della radiazione di corpo nero in funzione della temperatura. La figura 2.3 mostra lo spettro di radiazione di un corpo nero, per tre diversi valori di temperatura, evidenziando la zona corrispondente allo spettro visibile. La forma analitica della curva di irraggiamento spettrale è stata ricavata dal fisico tedesco M. Planck, ipotizzando che l'emissione e l'assorbimento della radiazione da parte delle pareti della cavità avvengano secondo quantità discrete, i quanti di luce o fotoni, e prende il nome di *legge di Planck per l'irraggiamento del corpo nero*:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{kT\lambda}} - 1}$$

dove  $h = 6.62607 \times 10^{-34} \text{ J/s}$  è la *costante di Planck* e  $K = 1.38065 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  è la *costante di Boltzmann*.

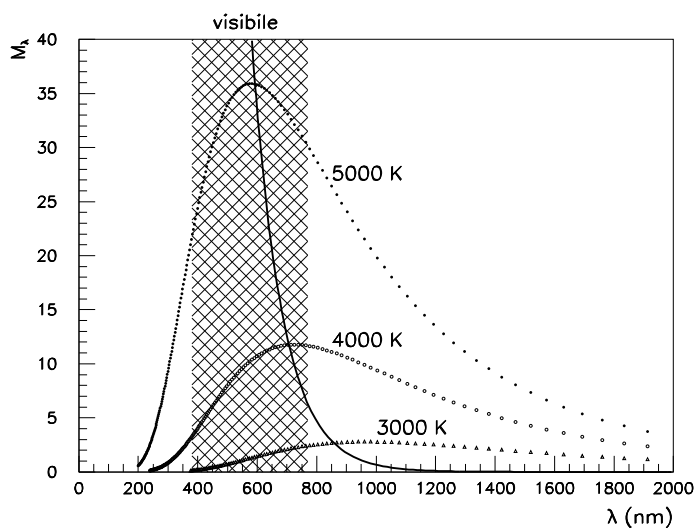


Figura 2.3:



3. *Legge dello spostamento di Wien.* Si nota dall'esame della curva di irraggiamento spettrale nella figura 2.3 che la lunghezza d'onda per la quale l'irraggiamento spettrale é massimo,  $\lambda_{max}$ , diminuisce al crescere della temperatura. Il fisico tedesco Wien dedusse che  $\lambda_{max}$  é proporzionale a  $1/T$  e che  $\lambda_{max}T$  é una costante universale. Il suo valore misurato é:

$$\lambda_{max} T = 2898 \mu m K$$

Questa relazione é detta *legge dello spostamento di Wien*.

Una sorgente di energia radiante che non sia un corpo nero ha una emissione caratteristica della propria struttura atomica e molecolare; si puó confrontare l'emissione spettrale della sorgente con quella di corpo nero a varie temperature: la temperatura per la quale lo spettro del corpo nero si avvicina maggiormente a quello della sorgente viene chiamata **temperatura di colore** della sorgente.

- **Sorgenti di luce**

- Sorgenti di luce bianca

1. **Il Sole** La luce media del giorno é per definizione la **luce bianca naturale**; la distribuzione spettrale dell'energia radiante é assai prossima a quella di un corpo nero alla temperatura di 6000 K. Si definisce, invece, **luce bianca standard** quella fornita da un corpo nero alla temperatura di fusione del platino (2042 K).
2. **Lampada elettrica ad incandescenza** Un filamento di tungsteno, con temperatura di fusione 3650 K, viene reso incandescente dal passaggio di corrente elettrica; il filamento si trova all'interno di una ampolla di vetro riempita di gas inerte con pressione prossima a quella atmosferica quando la lampada é accesa: lo scopo del gas é di ridurre la sublimazione del filamento in modo da poter portare la temperatura a 2800–3000 K, contro i circa 2400 K a cui ci si dovrebbe limitare se il filamento fosse in vuoto. La distribuzione spettrale della luce corrisponde generalmente a quella di un corpo nero alla temperatura di circa 2900–3000 K.

- Sorgenti di luce monocromatica

1. **Filtri per assorbimento** Un filtro di un dato colore assorbe quasi completamente tutto lo spettro tranne una zona con

ampiezza, in generale, di qualche decina di nanometri attorno alla lunghezza d'onda del colore in questione.

2. **Separazione spettroscopica** La luce bianca quando viene analizzata per mezzo di uno spettroscopio (prisma) produce uno spettro continuo di radiazioni monocromatiche.
3. **Laser** I laser sono sorgenti di luce monocromatica con caratteristiche eccezionali:

\* monocromaticità:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \simeq \frac{1}{10^9}$$

\* coerenza: ugual fase iniziale per tutti gli emettitori elementari; lunghezza di coerenza  $\simeq 10^2$  Km, 3 m per luce naturale;

\* direzionalità: divergenza trascurabile;

\* focalizzabilità: si può arrivare fino a intensità di  $\simeq 10^{15}$  W/cm<sup>2</sup>.

## 2.4 Grandezze radiometriche

La radiometria ha per oggetto la misurazione, effettuata con rivelatori fisici, dell'energia radiante in una regione qualsiasi dello spettro elettromagnetico.

Le grandezze radiometriche di interesse sono le seguenti:

a) **Energia radiante.** L'energia radiante  $Q_e$  é l'energia totale associata all'onda elettromagnetica considerata. L'unità di misura nel sistema SI é il joule (J).

b) **Potenza radiante.** La potenza radiante  $\Phi_e$ , detta anche **flusso radiante**, é l'energia radiante per unità di tempo:

$$\Phi_e = \frac{d Q_e}{dt}$$

L'unità di misura nel sistema SI é il watt (W).

c) **Intensità radiante.** L'intensità radiante  $I_e$  é la potenza radiante emessa da una sorgente puntiforme in una data direzione e per angolo solido attorno a quella direzione.:

$$I_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial \Omega}$$

Nel caso che  $I_e$  sia indipendente dalla direzione, la potenza radiante emessa dalla sorgente puntiforme risulta:

$$\Phi_e = \int I_e d\Omega = 4\pi I_e$$

e si parla di irraggiamento isotropo. Nel SI l'unità di misura di  $I_e$  è W/sr

d) **Irradianza**. L'irradianza  $E_e$  è la potenza radiante incidente su una superficie unitaria:

$$E_e = \frac{\partial \Phi_e}{\partial S}$$

Nel SI l'unità di misura è W/m<sup>2</sup>. L'irradianza prodotta da una sorgente puntiforme su una (piccola) superficie posta a distanza R dalla sorgente segue la **legge dell'inverso del quadrato della distanza**:

$$E_e = I_e \frac{\cos i}{R^2}$$

dove  $i$  è l'angolo di incidenza, tra la direzione di propagazione della radiazione e la normale alla superficie.

## 2.5 Grandezze fotometriche

La fotometria si occupa delle misurazioni connesse alle radiazioni luminose. La luce corrisponde ad una porzione ristretta dello spettro elettromagnetico, cosicché è conveniente introdurre le grandezze fotometriche in parallelo a quelle radiometriche. Allo stesso tempo si deve tenere presente che la sensazione luminosa provocata da una luce di irradianza fissata varia con la frequenza: cioè la sensibilità del sistema visivo varia col colore.

In accordo con quanto stabilito dalla Commissione Internazionale per l'Illuminazione (CIE), si assume che in **regime fotopico**, cioè in condizioni in cui il sistema visivo è adattato ad una luminosità elevata, il sistema visivo umano normale abbia la massima sensibilità in corrispondenza al colore di lunghezza d'onda nel vuoto  $\lambda_{max} = 555 \text{ nm}$  (corrispondente a  $\nu_{max} = 540 \times 10^{12} \text{ Hz}$ ). La sensibilità dell'occhio diminuisce rapidamente per lunghezze d'onda maggiori o minori rispetto a  $\lambda_{max}$ . La curva di sensibilità relativa, che esprime l'**efficacia luminosa relativa**  $V(\lambda)$  in funzione della lunghezza d'onda nel vuoto è data in figura 2.4.

In ordinata è riportato il rapporto:

$$V(\lambda) = \frac{w(\lambda_{max})}{w(\lambda)}$$

tra le potenze che devono emettere due sorgenti monocromatiche di lunghezze d'onda  $\lambda_{max}$  e  $\lambda$  per provocare la stessa sensazione di luminosità nell'osservatore normale. Una volta stabilito per  $\lambda = \lambda_{max}$  il rapporto tra l'unità fotometrica e radiometrica, l'efficacia luminosa relativa fornisce il fattore ulteriore necessario per rapportare i due sistemi di unità per qualsiasi lunghezza

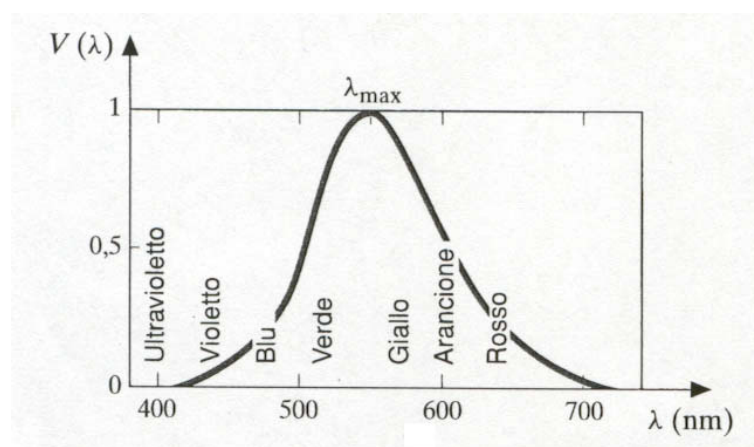


Figura 2.4:

d'onda nel visibile: in pratica le grandezze fotometriche sono costruite moltiplicando per  $V(\lambda)$  le corrispondenti grandezze radiometriche e integrando sui valori di  $\lambda$  corrispondenti allo spettro visibile; le unità di misura includono in più una costante moltiplicativa pari a  $1/683$ , che ha origine storica. Nel sistema SI l'intensità luminosa  $I_v$  è stata scelta come grandezza fotometrica fondamentale, mentre le altre grandezze fotometriche sono derivate:

a) **Intensità luminosa.** L'intensità luminosa  $I_v$  è l'equivalente in termini psicofisici dell'intensità radiante e la sua unità di misura è la candela ( $cd$ ).

b) **Potenza luminosa.** La potenza luminosa  $\Phi_v$  è l'equivalente in termini psicofisici della potenza radiante e la sua unità di misura è il lumen ( $lm$ ).

**La potenza luminosa che attraversa una superficie è pari ad un lumen quando la superficie è attraversata da una potenza radiante di  $1/683$  W nel caso di una radiazione monocromatica con  $\nu = \nu_{max} = 540 \times 10^{12}$  Hz, oppure da una potenza radiante di  $1/(683 \times V(\lambda))$  W nel caso di una radiazione monocromatica di lunghezza d'onda  $\lambda$  e  $V(\lambda)$  funzione di efficacia luminosa relativa.**

Vale la relazione:  **$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd } 1 \text{ sr}$**

c) **Energia luminosa.** L'unità di misura dell'energia luminosa  $Q_e$  è il prodotto lumen  $\times$  secondo ( $lm \text{ s}$ ).

d) **Illuminamento.** L'illuminamento  $E_v$  è l'equivalente in termini psicofisici dell'irradianza e la sua unità di misura è il lux ( $lx$ ). **Il lux ( $lx$ ) è l'illuminamento prodotto da una sorgente puntiforme, con intensità di una candela, su una superficie di area  $1 \text{ m}^2$  distante  $1 \text{ m}$  dalla**

**sorgente e disposta normalmente al raggio luminoso centrale.** Si ha quindi:  $1 \text{ lx} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}$ .

Le grandezze fotometriche e radiometriche introdotte sono riassunte nella seguente tabella.

Grandezza	Simbolo	Unitá luminosa	Unitá energetica
potenza luminosa	$\Phi_v$	lm	
potenza radiante	$\Phi_e$		W
intensitá luminosa	$I_v$	cd	
intensitá radiante	$I_e$		W/sr
illuminamento	$E_v$	lx	
irradianza	$E_e$		W/m <sup>2</sup>
energia luminosa	$Q_v$	lm s	
energia radiante	$Q_e$		J