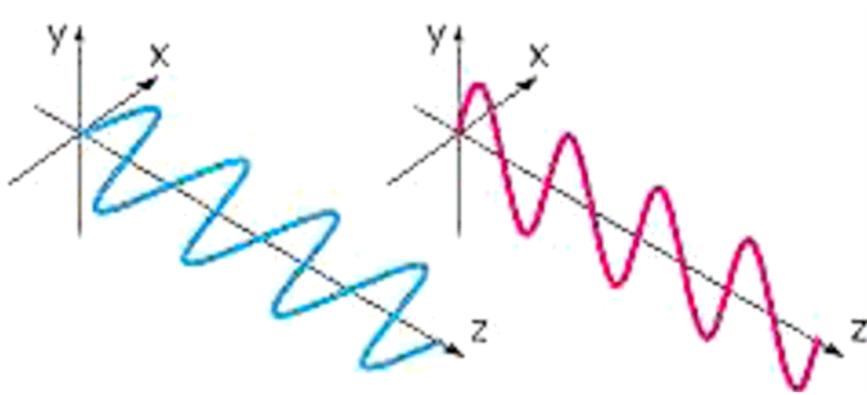


1

**LA RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA**

La radiazione elettromagnetica è un fenomeno ondulatorio dovuto alla contemporanea propagazione di perturbazioni periodiche di un campo elettrico e di un campo magnetico, oscillanti in piani tra di loro ortogonali.



**Figura 1: Oscillazione sinusoidale del campo elettrico e magnetico ortogonali alla direzione di propagazione della luce**

Essa viaggia nel vuoto alla velocità di  $2.99 \cdot 10^8$  m/s, mentre nell' acqua (mari, oceani...) si riduce a circa  $2.2 \cdot 10^8$  m/s. Tale radiazione è costituita da onde elettromagnetiche descritte dalle *equazioni delle onde*:

$$\nabla^2(E, H) = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial}{\partial t^2}(E, H)$$

dove

$$c = \frac{\omega}{k} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$H = B/\mu$$

I parametri che caratterizzano le radiazioni elettromagnetiche sono:

- **Lunghezza d 'onda ( $\lambda$ )**, ovvero lo spazio percorso da un'onda per compiere un'oscillazione completa. Essa viene definita anche come distanza tra due creste o due ventri vicini;
- **Velocità di propagazione nel vuoto ( $c$ )**, ovvero la distanza percorsa da un'oscillazione nell'unità di tempo e che, nel caso delle radiazioni elettromagnetiche, è la velocità della luce che nel vuoto raggiunge il suo valore massimo e viene indicata con  $c_0 = 3 \cdot 10^8$  m/s; negli altri mezzi invece tale velocità è pari a  $c_0 / n$ , 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  $n$  sia minore di uno, cioè la luce nel vuoto si propaga con la massima velocità possibile. Indici di rifrazione più comuni sono:

	n
Aria	1,000294
H	1,000139
CO	1,000449
Acqua	1,33

Cloruro di sodio	1,53
Alcool etilico	1.36

- **Frequenza ( $\nu$ )**, ovvero il numero di oscillazioni nell' unità di tempo. Essa è espressa in Hertz (Hz, dove  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ );
- **Periodo ( $T$ )**, ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra due passaggi consecutivi della cresta in uno stesso punto.

Tutti questi elementi caratteristici delle onde elettromagnetiche sono legati tra loro dalle seguenti relazioni:

$$\lambda = c \cdot T$$

$$\nu = \frac{1}{T}$$

$$\Rightarrow \lambda = \frac{c}{\nu} \rightarrow \nu = \frac{c}{\lambda}$$

Benché la velocità  $c$  sia la stessa per tutte le onde elettromagnetiche, la lunghezza d'onda e la frequenza possono variare notevolmente. Esse sono, naturalmente, l'una inversamente proporzionale all'altra: quanto maggiore è la lunghezza d'onda tanto minore è la frequenza.

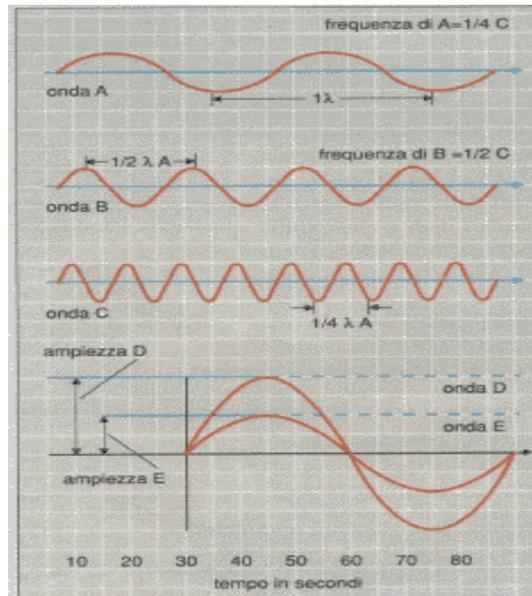


Figura 2: Tabella che illustra elementi di onde diverse

## 1.1 Lo Spettro Della Radiazione Elettromagnetica

L'insieme di tutte le lunghezze d'onda elettromagnetiche costituisce il cosiddetto *spettro elettromagnetico*, suddiviso in regioni parzialmente sovrapposte. L'intervallo di frequenza entro il quale le onde elettromagnetiche sono oggetto di applicazione e di studio è estremamente ampio essendo compreso fra un migliaio di Hertz e circa  $10^{25}$  Hertz (e oltre). A seconda della loro frequenza, le onde elettromagnetiche sono prodotte da tipi di sorgenti diverse, hanno proprietà diverse e in particolare hanno diverse modalità di interazione con la materia. 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 relazionata al modo in cui 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.

# Spettro elettromagnetico

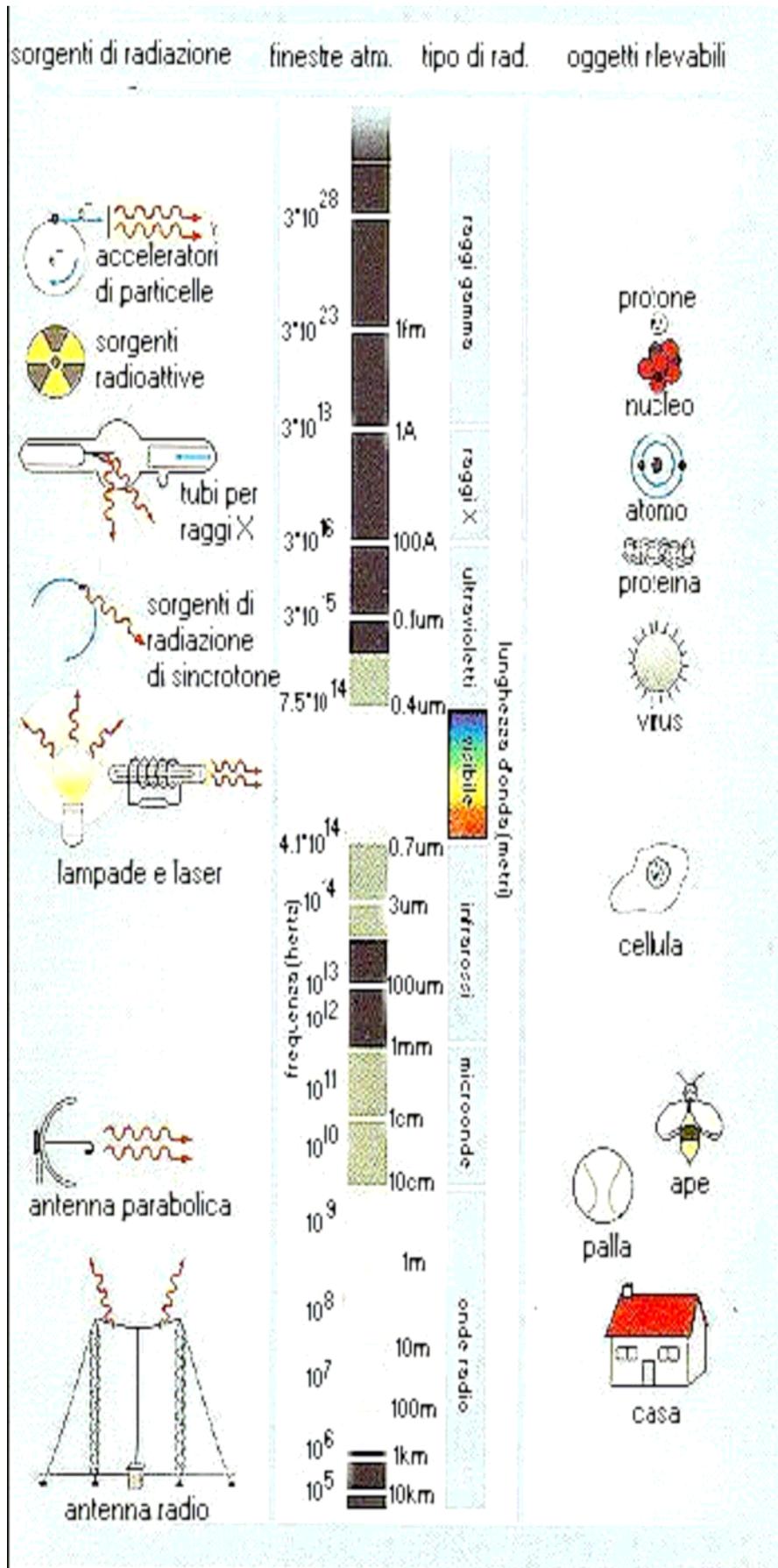


Figura 3: spettro elettromagnetico

Le onde elettromagnetiche le cui lunghezze d'onda sono molto maggiori di quelle della luce costituiscono le *radioonde*, onde invisibili del tipo generato e rivelato per la prima volta da Hertz. Esse hanno frequenza compresa tra  $10^3$  Hertz e circa  $10^9$  Hertz.. I segnali televisivi, le onde corte, le onde radar, i segnali radio AM (*amplitude modulation*, modulazione di ampiezza) e FM (*frequency modulation*, modulazione di frequenza) sono particolari tipi di radioonde. Vengono generati da circuiti elettronici che fanno oscillare cariche elettriche le quali, quando vengono accelerate, emettono energia.

Le *microonde* hanno frequenze comprese tra  $10^9$  Hz e alcune unità di  $10^{11}$  Hz e lunghezza d'onda compresa tra  $0,3 \cdot 10^9$  nm e  $10^6$  nm Sono generate anch'esse da dispositivi meccanici (cavità risonanti, guide d'onda). Sono usate nella ricerca (studi atomici e molecolari) e in telecomunicazioni (radar).Vengono inoltre facilmente assorbite dalle molecole d'acqua contenute negli alimenti, facendoli riscaldare rapidamente.

La *radiazione infrarossa (IR)* ha frequenze comprese tra circa  $3 \cdot 10^{11}$  Hz e  $3,8 \cdot 10^{14}$  Hz con lunghezza d'onda compresa tra  $10^6$  nm e  $0,78 \cdot 10^3$  nm. L'infrarosso viene rivelato soltanto dal calore che genera, ed è generalmente suddiviso in *lontano infrarosso*, *medio infrarosso* e *vicino infrarosso*. La radiazione infrarossa viene spontaneamente emessa dai 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. Molti animali, come i serpenti, sono sensibili all'infrarosso. Il vetro è opaco all'infrarosso, il che spiega il cosiddetto effetto serra. Infatti la luce che attraversa il vetro di una serra viene assorbita dalle piante e riemessa sottoforma di infrarosso, il quale rimane intrappolato provocando l'aumento di temperatura all'interno della serra.

La *radiazione visibile* (o semplicemente luce) ha frequenza compresa tra  $3,8 \cdot 10^{14}$  Hz e  $7,9 \cdot 10^{14}$  e lunghezza d'onda compresa tra 380 nm e 780 nm. Il campo della luce del visibile è molto ristretto rispetto all'intero spettro delle radiazioni, ma è estremamente importante per gli organismi viventi poiché l'occhio della maggior parte di essi è sensibile a queste radiazioni. La luce viene emessa da atomi e molecole quando i relativi elettroni compiono transizioni da uno stato metastabile o instabile allo stato fondamentale, o da cariche microscopiche in movimento per agitazione termica a temperature molto elevate. In particolare il Sole (la cui temperatura superficiale è prossima a 6000 gradi) emette uno spettro di radiazioni il cui massimo è centrato intorno ad una lunghezza d'onda di circa 5000 U.A. ( $1 \text{ U.A.} = 10^{-7} \text{ mm.}$ ) e si estende dall'ultravioletto al vicino infrarosso.

I *raggi ultravioletti (UV)* hanno frequenza compresa tra  $7,9 \cdot 10^{14}$  Hz e  $5 \cdot 10^{17}$  Hz con lunghezza d'onda tra  $0,38 \cdot 10^3$  nm e  $6 \cdot 10^{-1}$  nm. Essi sono prodotti in transizioni tra diversi stati elettronici in atomi e molecole. Invisibile, e tuttavia pericoloso per la vita, l'ultravioletto proveniente dal Sole viene assorbito quasi completamente dall'atmosfera, provocando la reazione di formazione dell'ozono,  $O_3$ , presente nelle parti di essa. Tale assorbimento è fondamentale per la vita sulla Terra, in quanto questa

radiazione in grandi quantità risulta letale. E' noto a tutti il problema dell'assottigliamento dello strato di ozono dovuto principalmente ai clorofluorocarburi (CFC). Quanto più i raggi ultravioletti sono ad alta frequenza, tanto più sono dannosi per gli esseri viventi, non solo perché aumenta il loro potere penetrante nei tessuti, ma soprattutto perché si avvicina a valori di lunghezza d'onda che mandano in risonanza i legami molecolari, portandoli alla rottura, poiché uno dei principali utilizzi delle radiazioni ultraviolette è la sterilizzazione.

I raggi X hanno frequenza compresa fra circa  $3 \cdot 10^{17}$  Hz e  $5 \cdot 10^{19}$  Hz e lunghezza d'onda compresa tra i  $6 \cdot 10^{-1}$  nm e  $6 \cdot 10^{-3}$  nm. I raggi X hanno energia sufficiente per provocare transizioni di elettroni atomici più interni, danneggiare le cellule viventi e possono penetrare nei tessuti biologici. Hanno lunghezze d'onda pari al raggio di un atomo. Il loro diverso assorbimento ad opera dei tessuti di diversa consistenza e densità rende possibile il loro impiego in diagnostica medica (radiografia e radioscopia). Trovano inoltre applicazioni in radiochimica e medicina.

Le onde elettromagnetiche con lunghezze d'onda più piccole, pari all'incirca al raggio del nucleo di un atomo, sono note come *raggi gamma*  $\gamma$ .

I raggi gamma hanno frequenze superiori a  $3 \cdot 10^{18}$  Hz con lunghezze d'onda minori a  $10^{-1}$  nm e vengono prodotti in reazioni nucleari ed in altri processi estremamente energetici con frequenze dell'ordine di  $10^{20}$  Hz.

A queste frequenze, la descrizione della fenomenologia delle interazioni fra campo elettromagnetico e materia non può prescindere dalla meccanica quantistica.

Le radioonde sono capaci di far oscillare gli elettroni, le microonde sono

capaci di cuocere gli alimenti, e i raggi gamma sono capaci di provocare reazioni nucleari. In tutti i casi, la radiazione elettromagnetica trasporta energia e quantità di moto. È questa una caratteristica di *tutte* le onde elettromagnetiche. Il flusso di energia trasportato da un'onda elettromagnetica può essere rappresentato mediante una grandezza detta *vettore di Poynting*, dal nome di John Henry Poynting, definito dall'equazione:

$$S = 1/\mu_0$$

Dove E e B rappresentano rispettivamente il campo elettrico e il campo magnetico oscillanti in accordo di fase e con entrambi i vettori perpendicolari alla direzione di propagazione dell'onda.

Il vettore di Poynting rappresenta l'energia riferita all'unità di tempo (la potenza) che attraversa un'unità di area e nel SI è espresso in watt al metro quadrato ( $W/m^2$ ).

Tale vettore è orientato nella direzione e nel verso di propagazione dell'onda che sono la direzione e il verso in cui viene trasmessa l'energia.

## 1.2 Il Dualismo Onda-Particella

Le radiazioni elettromagnetiche sono un fenomeno dalla duplice natura: quella ondulatoria, caratterizzata dall'andamento oscillante del campo elettromagnetico, e quella legata alla emissione discreta di energia radiante a carattere corpuscolare, che consente di studiare gli scambi di energia della luce con la materia. In questo senso infatti la luce viene descritta come una particolare forma di energia che, secondo le ipotesi

avanzate da Max Planck, è costituita da pacchetti discreti di fotoni, ciascuno dei quali viene denominato *quanto* e trasporta un'energia che risulta essere pari a:

$$E = h * \nu$$

dove  $h$  è detta costante di Planck e vale  $6.62 * 10^{-34}$  Joule\*s e  $\nu$  è la frequenza dell'onda elettromagnetica.

Planck, infatti, pensò che la radiazione elettromagnetica potesse essere assorbita solo in numeri interi di quanti e che l'energia di un quanto dipendesse dalla lunghezza d'onda della radiazione stessa. Minore era la lunghezza d'onda, maggiore era l'energia del quanto. Il quanto, dunque, poteva essere direttamente relazionato con la frequenza di una data radiazione, cioè con il numero di onde emesse in un secondo. L'energia di un fotone risulta allora essere proporzionale alla frequenza della radiazione. A questo punto è possibile definire alcune grandezze correlate al concetto di radiazione intesa come fotone:

la DENSITA' DI ENERGIA ( $E$  espressa in  $J/m^2$ ) che indica il numero di quanti di energia chiamati fotoni che attraversano l'unità di superficie → FLUENZA;

la DENSITA' DI POTENZA ( $P$  espressa in  $Watt/m^2$ ) che invece rappresenta la densità di energia trasportata nell'unità di tempo → IRRADIANZA.

### 1.3 Corpo Nero

Ogni corpo, per il solo fatto di trovarsi ad una certa temperatura emette energia sottoforma di radiazioni elettromagnetiche. Esse sono

strettamente legate al tipo di corpo da cui vengono prodotte. In teoria potremmo dunque pensare che esistano valori di emissioni elettromagnetiche infinite. Non è così. Bisogna tener conto del fatto che esiste un valore limite per tali emissioni, valore che viene emesso da quello che viene chiamato *corpo nero*. Esso, più che corrispondere ad un corpo effettivo o naturale, costituisce un'astrazione. La sua caratteristica è quella di assorbire tutta l'energia incidente indipendentemente dalla lunghezza d'onda. È possibile, rispettando determinati accorgimenti, ricreare in laboratorio corpi che presentino caratteristiche di remissività vicine a quelle del corpo nero. Esso deve presentare una struttura di forma concava con una piccola cavità interna, deve essere di colore scuro(quasi nero) ed essere costruito con materiale scabro, opaco, e di elevata conducibilità termica.

**Figura 4:corpo nero**

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 assorbimento 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.

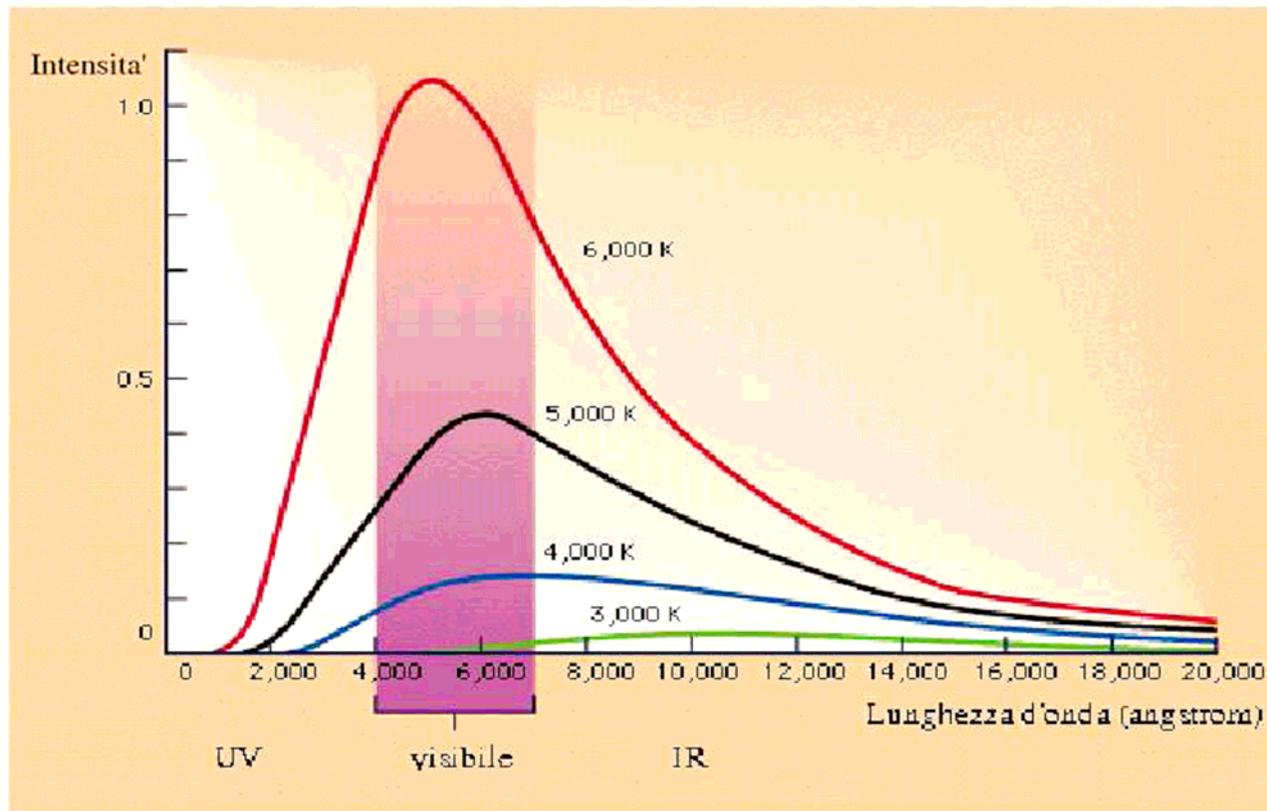


Figura 5: distribuzione spettrale emessa da un corpo nero a diverse temperature

La curva presenta una tipica forma a campana il cui massimo è in relazione alla temperatura del corpo. Inoltre, al diminuire della temperatura, la curva tende ad appiattirsi sempre di più poiché l'energia irradiata nello spazio diminuisce.

Se consideriamo una cavità di forma qualsiasi, con la superficie interna a temperatura costante e vi introduciamo un corpo nero, avremo che questo, per unità di superficie riceverà una potenza  $q_i$  ed emetterà una potenza  $q_{e0}$ . Raggiunto l'equilibrio termico tra corpo nero e cavità, sarà valida la relazione:

$$q_i = q_{e0}$$

Dunque il corpo nero assorbe tanto calore quanto ne riceve a tutte le frequenze. Introducendo nella medesima cavità un qualsiasi corpo colorato, la potenza incidente  $q_i$  rimarrà invariata, mentre la potenza assorbita per unità di superficie  $q_i'$  non sarà più la stessa a tutte le frequenze poiché dipende dal coefficiente di assorbimento  $a$ ,

$$q_i' = a * q_i$$

Il *coefficiente di remissività*  $\varepsilon$ , dunque, è dato dal rapporto tra il potere emissivo integrale di un corpo qualsiasi e quello di un corpo nero  $q_0$ , ovvero:

$$\varepsilon = q/q_0$$

Da questi assunti si può affermare che la potenza specifica irradiata dal corpo nella cavità è data da  $q_e' = \varepsilon * q_{e0}$ , ma che all'equilibrio deve essere  $q_i' = q_e'$ , per cui  $a * q_i = \varepsilon * q_{e0}$ .

Per cui risulta evidente che il corpo nero, oltre ad essere per definizione il corpo con potere assorbente massimo è anche quello con il coefficiente di emissione maggiore.

#### **1.4 Leggi Del Corpo Nero**

Lo spettro di radiazione emesso dal corpo nero è stato spiegato dalla teoria meccanicistica che descrive la radiazione elettromagnetica in termini di fotoni. Il primo ad individuare la natura discreta della radiazione elettromagnetica fu Planck nel 1900 anche se l'inquadramento di tale ipotesi in una teoria sistemica avvenne solo più tardi ad opera di Einstein (1905), di Heisenberg e di Schrodinger negli anni '20, e, infine, ad opera di Dirac intorno al 1930.

### 1.4.1 Legge di Wien

Nella legge di Wien si afferma che la temperatura alla quale il corpo è sottoposto e la lunghezza d'onda alla quale corrisponde l'emissività massima sono inversamente proporzionali:

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

dove:  $\lambda_{\max}$  è la lunghezza d'onda del picco dello spettro (m)

T è la temperatura superficiale (K)

K è la costante che vale  $2,8977685 * 10^{-3}$  mk

Figura 6: legge dello spostamento di Wien

In base a questa legge all'aumentare della temperatura, la lunghezza d'onda, alla quale si ha un massimo di energia, assume valori minori all'interno dell'intervallo del visibile, a cui corrispondono valori tipici del colore del violetto; viceversa, se decresce la temperatura, la lunghezza d'onda assume valori tipici del colore rosso. In questo modo è

possibile 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 il colore violetto-azzurro. Esistono diverse temperature di colore per diversi tipi di illuminazione: il tubo fluorescente possiede una temperatura di colore pari a 7000K; una lampadina incandescente, 3500K; lo xeno, 5500K e il 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 restano naturali, perché 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, si darà risalto ai colori freddi (azzurro e viola), avendo tubo fluorescente una temperatura di colore maggiore a quella solare. Se, infine, l'ambiente è illuminato con una lampada incandescente, la cui temperatura di colore risulta minore di quella solare, si darà risalto ai colori caldi (soprattutto al rosso).

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

### **1.4.2 Legge di Planck**

La legge di Planck fornisce il legame che sussiste tra potere emissivo monocromatico  $q_0$  del corpo nero, la lunghezza d'onda e la temperatura

assoluta T. Essa è data dalla seguente relazione:

$$q_0'(\lambda, t) = c_1/\lambda^5 (e^{c'/\lambda T} - 1)$$

dove

$$c_1 = 2\Pi * c_0^2 * h = 3.74 * 10^{-16} \text{jm}^2/\text{s}$$

$$c' = h * c_0/k = 1,44 * 10^{-2} \text{mk}$$

Tale legge è in perfetto accordo con i dati ottenuti da Wien e consente di risolvere il problema noto come “catastrofe ultravioletta” derivante dalla legge classica di Rayleigh e Jeans, i quali, ragionando su basi puramente teoriche, giunsero alla conclusione che l'intensità della radiazione sarebbe dovuta crescere al decrescere della lunghezza d'onda. Questa loro conclusione fu del tutto sconcertante poiché risultava che a frequenze molto alte ogni corpo in equilibrio avrebbe dovuto scambiare arbitrariamente grandi quantità di energia con il campo elettromagnetico. La legge di Planck, dunque, non solo si accorda con i dati sperimentali a basse frequenze ma non diverge all'infinito all'aumentare della frequenza

**Figura 7: andamento della radiazione elettromagnetica secondo la legge di Planck e di Rayleigh-Jeans**

### 1.4.3 Legge di Stefan-Boltzmann

La legge di Stefan-Boltzmann fornisce una relazione che lega il potere emissivo integrale del corpo nero e la temperatura alla quale il corpo stesso è sottoposto.

Essa è espressa dalla seguente relazione:

$$q_0 = \sigma_0 * T^4$$

dove  $\sigma_0$  è la costante di Stefan-Boltzmann ed ha un valore di  $5,67*10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>k<sup>2</sup>, mentre T rappresenta la temperatura assoluta del corpo.

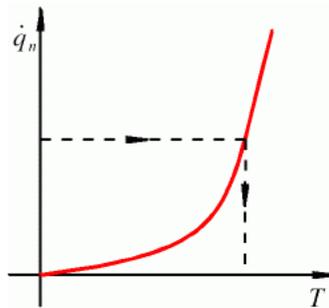


Figura 8: legge di Stefan-Boltzmann

### 1.5 Effetto Fotoelettrico

Il modello del corpo nero di Planck non ebbe grandi considerazioni nell'ambito scientifico. Nel 1905 Einstein formulò il concetto di quanto di radiazione, che più tardi verrà chiamato fotone. Egli si basò sullo studio delle fluttuazioni dell'energia elettromagnetica e dimostrò che la radiazione possedeva carattere corpuscolare. Si avvale, per dimostrare ciò, dell' *effetto fotoelettrico* che consiste nell'espulsione di elettroni da una lamina di metallo quando questa è bombardata da radiazione elettromagnetica monocromatica. Le osservazioni sperimentali furono:

1. nessun elettrone era espulso se la frequenza della radiazione

- elettromagnetica era inferiore ad un valore soglia;
2. per una radiazione elettromagnetica la cui frequenza era superiore al valore soglia il numero di elettroni espulsi era proporzionale all'intensità della radiazione;
  3. l'energia cinetica degli elettroni espulsi era linearmente proporzionale alla frequenza della radiazione

Queste considerazioni non trovarono spiegazione nell'ambito classico.

### **1.6 Effetto Compton**

Un altro esempio di come la radiazione elettromagnetica interagisce con la materia, manifestando proprietà a volte ondulatorie a volte corpuscolari è il cosiddetto *effetto Compton*. Esso è un fenomeno di scattering della radiazione elettromagnetica con la materia. Secondo la Fisica classica, quando una radiazione elettromagnetica interagisce con un elettrone, quest' ultimo dovrebbe essere accelerato e riemettere la radiazione elettromagnetica a diverse lunghezze d'onda che dipendono dall'angolo di scattering e dall'energia della radiazione incidente. Ciò che Compton notò era che il fotone incidente sembrava trasmettesse una certa energia all' elettrone, accelerandolo in una direzione che formava un angolo con la direzione di propagazione. Contemporaneamente veniva emesso un fotone.

### **1.7 La Spettroscopia**

L'analisi della luce emessa o assorbita dalle sostanze viene detta spettroscopia.

Lo spettroscopio è uno strumento inventato da Kirchhoff nel 1859, che

utilizza un prisma o un reticolo per analizzare la luce scomponendola nelle lunghezze d'onda da cui è costituita.

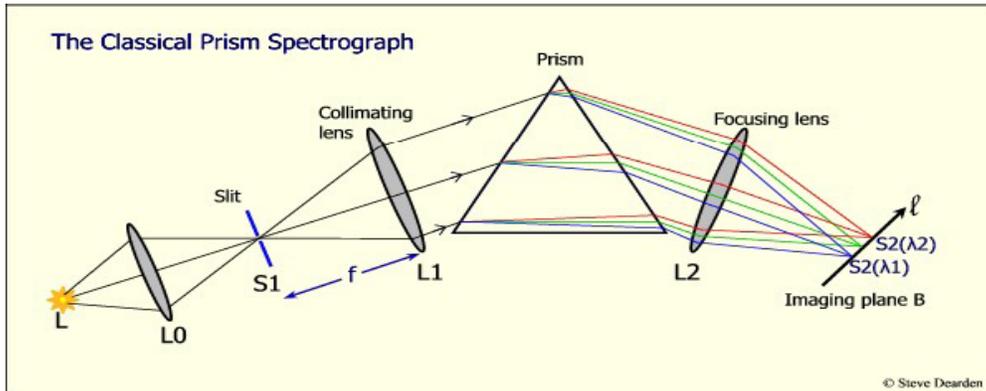


Figura 9: spettroscopio

In genere uno spettroscopio consta delle seguenti parti:

1. una sorgente di energia radiante;
2. una fenditura
3. un collimatore
4. un prisma
5. un cannocchiale
6. uno spettro

La lente collimatrice dello spettroscopio riceve la luce attraverso la fenditura e la rifrange in modo che i raggi in uscita risultino paralleli. Il prisma li rifrange e li disperde in uno spettro osservato dall'oculare. La luce solare è dispersa nei colori componenti a cui corrispondono determinate lunghezze d'onda. Poiché ogni lunghezza d'onda attraversa il prisma con velocità diverse, ad ogni lunghezza d'onda corrisponde uno specifico indice di rifrazione. Le lunghezze d'onda più deviate sono quelle più brevi.

Per essere adatta a studi spettroscopici, una sorgente deve generare radiazioni di potenza sufficiente ad essere facilmente rilevabile e misurabile. Esistono due tipi di sorgenti spettroscopiche:

*sorgenti continue* che emettono radiazione la cui intensità cambia solo lentamente in funzione della lunghezza d'onda;

*sorgenti a righe* che emettono un numero limitato di bande di radiazione, ciascuna delle quali si espande in un intervallo molto limitato di lunghezza d'onda.

Misurazioni spettroscopiche eseguite nella seconda metà del secolo scorso aiutarono ad identificare molti degli elementi noti e condussero anche alla scoperta di elementi nuovi. Le misurazioni più precise furono eseguite dallo spettroscopista svedese A. J. Angstrom, in onore del quale fu chiamata l'unità angstrom (non appartenente al SI);  $1 \text{ A} = 10^{-10} \text{ m}$ .

## **1.8 Lo Spettro Visibile**

Le diverse frequenze di luce visibile, rivelate dall'occhio, vengono tradotte dal cervello umano nella sensazione di colori diversi. Una radiazione visibile composta da una sola ben definita frequenza viene detta monocromatica. Quando lo spettro di una certa radiazione visibile comprende, in ugual misura, la luce delle varie frequenze si parla di luce bianca.

Lo spettro delle radiazioni visibili non ha dei limiti ben precisi, in quanto la sensibilità dell'occhio umano varia da individuo a individuo. Per

convenzione la sua estensione è stata fissata nell' intervallo compreso tra 380 nm e 780 nm limitato a sinistra dalle radiazioni ultraviolette e a destra da quelle infrarosse. Questo spettro visibile è diviso in sei bande, ciascuna corrispondente ad una determinata sensazione cromatica:

COLORE	FREQUENZA $f(10^{14}\text{Hz})$	LUNGHEZZA $\lambda(10^{-6})$
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

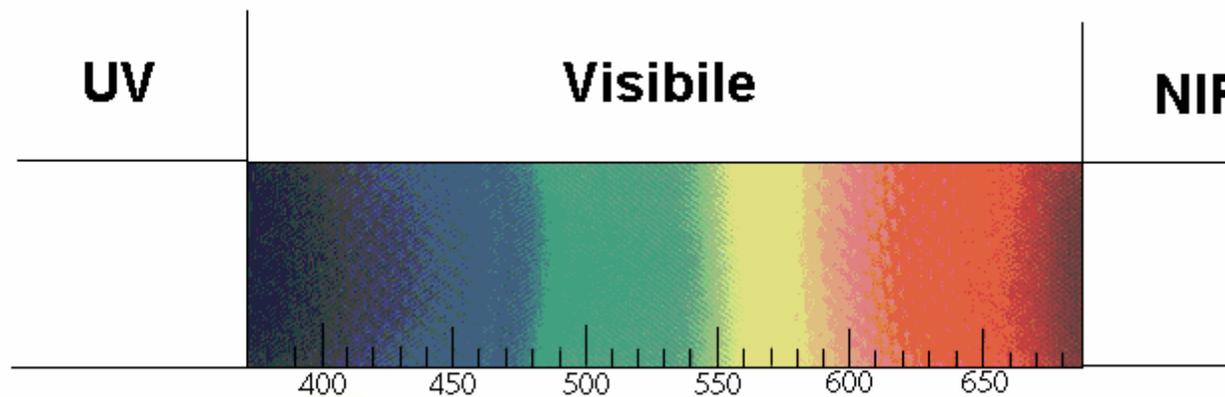


Figura 10:La luce visibile all'interno dello spettro elettromagnetico

Si deduce che il colore della luce dipende dalla sua frequenza e quindi dalla sua lunghezza d'onda. La radiazione di maggior lunghezza d'onda presenta frequenza minore e viceversa. Inoltre più la luce è intensa, maggiore è il numero di fotoni che passano per un determinato punto. Ciò che permette di percepire i diversi colori è il fatto che fotoni di diversa energia causano nel nostro occhio effetti diversi.

Il colore può essere definito un'invenzione del sistema occhio-cervello che codifica in immagini e sensazioni visive l'energia radiante emessa in un determinato intervallo di lunghezze d'onda. L'organo umano fotorecettivo deputato alla percezione dei colori è l'occhio.

## BIBLIOGRAFIA

R.P.Olenick, T.M.Apostol, D.L. Goodstein: **“Oltre l’universo meccanico dall’elettricità alla fisica moderna”**

S.Cristiano, R.Stefano, R.Roberto: **“Interazione del laser con i tessuti biologici”** – tesina per il corso di Elettronica Biomedica (Prof. S. Fonda).- Università di Modena e Reggio Emilia. – Facoltà di Ingegneria. Corso di Laurea in Ingegneria Elettronica/Informatica.

C.Mencuccini, V.Silvestrini: **“Fisica II. Elettromagnetismo - ottica”**. – Terza edizione.- Liguori Editore

I.Asimov: **“Asimov’s New Guide to Science”**, C.Sborgi, Il libro di fisica,1986 Arnoldo Mondadori Editore.TR.IT C.Sborgi

S.Rosati: **“Fisica Generale”**, seconda edizione, Casa Editrice Ambrosiana, Milano

P.Mazzoldi, M.Nigro, C.Voci: **“Elementi di Fisica meccanica”**,2001, EdiSES s.r.l.,Napoli

Fishbane, Gasiorowicz, Thornton: **“Physics, for scientists and Engineers”**, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, Fisica per scienze ed ingegneria **ed ingegneria**”, volume primo, 1995, EdiSES s.r.l., Napoli

C.Santi: **“Spettroscopia UV-Vis”**. Appunti di metodi fisici in chimica Organica

D.Federica: **“Trasmissione del calore per irraggiamento”**

*P. Atkins-L. Jones*: “**Chemistry : Molecules, Matter, and Change**”, third Edizione, 1997, TR.IT.M.Guardo, Chimica generale, 1998 Zanichelli Editore.,

SITI INTERNET CONSULTATI:

<http://erg.ca.astro.it>

<http://www.coelum.com>

<http://www.brere.mi.astro.it>

<http://scuola.ES.Astro.it>

<http://pcfarina.eng.unipr.it>

<http://ticlab.uni.pv.it>