

Le onde elettromagnetiche (Parte II) Vivendo tra le onde: panoramica sulle onde, elettromagnetiche, acustiche, luminose, fotoni

Stefania de Matteo

Complementary Medicine Association UK www.the-cma.org.uk
Visiting Professor Saint George School www.saintgeorge.it
President HEALTHQE Consortium www.healthqe.cloud

Riassunto. Non si può comprendere il bioelettromagnetismo se prima non si acquisiscono le basi fisiche sulle onde, di qualunque natura: elettromagnetiche, luminose, acustiche. In questo numero vedremo le caratteristiche di un'onda elettromagnetica (frequenza, periodo, ampiezza, velocità, lunghezza), le specificità di suono e luce. Introdurremo inoltre lo spettro elettromagnetico, la spettroscopia, e i principali fenomeni fisici associati alle onde elettromagnetiche: interferenza, riflessione, rifrazione, diffrazione, polarizzazione. Concluderemo introducendo i fotoni, quanti di luce, fondamentali per parlare di biofotoni.

Parole chiave: onde elettromagnetiche, onde sonore, onde luminose, frequenza, periodo, ampiezza, velocità, lunghezza, spettro elettromagnetico, spettroscopia, interferenza, riflessione, rifrazione, diffrazione, polarizzazione, fotoni, quanti di luce, biofotoni.

LIVING BETWEEN WAVES: OVERVIEW ON THE WAVES, ELECTROMAGNETIC, ACOUSTIC, LUMINOUS, PHOTONS

Abstract. We can not understand bioelectromagnetism if we do not acquire the physical bases of any kind of waves: electromagnetic, luminous, acoustic. In this issue we will see the characteristics of an electromagnetic wave (frequency, period, amplitude, speed, length), the specifics of sound and light. We will also introduce electromagnetic spectrum, spectroscopy, and the main physical phenomena associated with electromagnetic waves: interference, reflection, refraction, diffraction, polarization. We will conclude by introducing photons, light quanta, as are essentials for talking of biophotons.

Key words: electromagnetic waves, sound waves, light waves, frequency, period, amplitude, speed, length, electromagnetic spectrum, spectroscopy, interference, reflection, refraction, diffraction, polarization, photons, light quanta, biophotons

VIVIR ENTRE ONDAS: PANORAMA SOBRE LAS ONDAS, ELECTROMAGNÉTICO, ACÚSTICO, BRILLANTE, FOTONES

Resumen. No podemos entender el bioelectromagnetismo si no adquirimos bases físicas en ningún tipo de ondas electromagnéticas, luminosas, acústicas. En este número veremos las características de una onda electromagnética (frecuencia, período, amplitud, velocidad, longitud), los detalles del sonido y la luz. También presentaremos el espectro electromagnético, la espectroscopia y los principales fenómenos físicos asociados con las ondas electromagnéticas: interferencia, reflexión, refracción, difracción, polarización. Concluiremos introduciendo fotones, quanta luz como es esencial para hablar de biofotones.

Palabras clave: ondas electromagnéticas, ondas de sonido, ondas de luz, frecuencia, período, amplitud, velocidad, longitud, espectro electromagnético, espectroscopia, interferencia, reflexión, refracción, difracción, polarización, fotones, cuánta luz, biofotones

Introduzione

Cosa è un'onda? Quanti tipi di onde ci sono?

In questo numero tratteremo più in dettaglio le onde elettromagnetiche, acustiche, luminose, per concludere con i fotoni.

Un punto materiale può spostarsi leggermente dalla propria posizione di equilibrio rimanendo, complessivamente, fermo, ma oscillando periodicamente attorno a quella posizione. Questo moto, detto moto armonico, può propagarsi nello spazio e nel tempo: il fenomeno di propagazione di un'oscillazione, in fisica, va sotto il nome di onda.

Un'onda quindi è la propagazione di una oscillazione, una vibrazione che si sposta. L'onda non ha una traiettoria, la hanno i punti messi in moto da essa; similmente, l'onda non "occupa" una posizione in un dato istante, sono le particelle che mette in moto ad occuparla: un'onda, di qualsiasi tipo, non trasporta materia, e non causa uno spostamento netto di materia, ma solo sue vibrazioni. Eppure, possiamo accorgerci della presenza o dell'assenza di un'onda, e possiamo tracciarne la propagazione all'interno di un mezzo: un'onda, pur non spostando materia, è capace di spostare energia, responsabile dell'oscillazione delle singole particelle. Più precisamente, un'onda trasmette energia, senza spostare materia.

La propagazione delle onde può avvenire attraverso un mezzo: in questo caso, parliamo di onde meccaniche, poichè sono le caratteristiche di rigidità ed elasticità del mezzo a dettare la modalità di questa diffusione di energia. Ma esistono altri tipi di onde che possono viaggiare anche senza un mezzo di diffusione. Questo fenomeno è caratteristico delle onde elettromagnetiche, come la luce, capaci di propagarsi nel vuoto interstellare. La teoria della relatività generale di Einstein prevede la presenza di onde gravitazionali, generate dalla massa dei corpi, anch'esse in grado di viaggiare in assenza di materia.

Per studiare il fenomeno di propagazione di un'onda, dobbiamo innanzitutto ricordare che cosa significhi che un corpo si muova di moto armonico: un punto materiale si muove di moto armonico quando oscilla regolarmente con una certa frequenza f attorno ad una posizione di equilibrio. La forza responsabile di un tale spostamento è descritta dalla Legge di Hooke, e un

punto animato da tale forza è il modello dell'oscillatore armonico. La frequenza f rappresenta il numero di oscillazioni complete che il punto effettua attorno alla sua posizione di equilibrio in un'unità di tempo; il tempo impiegato dal punto materiale a compiere un'oscillazione completa si chiama periodo, T . L'oscillatore armonico compie una "oscillazione completa" quando ritorna in una posizione da cui è già passato con la medesima velocità. La massima distanza che l'oscillatore armonico può raggiungere dalla posizione di equilibrio si dice ampiezza del moto, solitamente indicata dalla lettera A .

Ma questo è soltanto un punto animato da moto armonico. Supponiamo ora di avere un po' di punti materiali, e pensiamo che il moto armonico di uno di questi punti influenzi quelli attorno a lui, trasmettendosi e diffondendosi, con le medesime caratteristiche (stessa frequenza, stessa ampiezza, stessa energia), a tutti gli altri: supponiamo quindi che sia presente un'onda.

Una corda viene fatta vibrare e una membrana viene deformata: queste deformazioni si propagano. Un'onda può propagarsi lungo un mezzo lineare (come una corda), su una superficie (come le increspature sulla superficie dell'acqua) o in tutto lo spazio (come il suono).

Un'onda si propaga in una determinata direzione più o meno velocemente: ogni onda è quindi caratterizzata, oltre che dalle grandezze del moto armonico

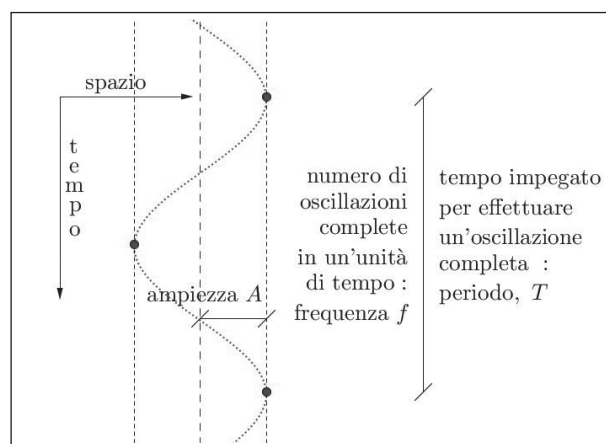


Figura 1. Per la loro stessa definizione, frequenza e periodo sono l'una il reciproco dell'altra: $T=1/f$ e $f=1/T$. L'ampiezza del moto armonico, la massa del punto da esso animato e la frequenza delle oscillazioni sono sufficienti a determinare l'energia meccanica che caratterizza il sistema: essendo la forza elastica una forza conservativa, tale quantità viene conservata da ogni oscillatore armonico, in base al principio di conservazione dell'energia.

che trasmette (come frequenza o ampiezza), da una velocità di propagazione, che indicheremo con la lettera v . I fenomeni ondulatori più comuni si propagano con una velocità v costante: ad esempio, la radiazione elettromagnetica si propaga nel vuoto in ogni direzione con velocità $c=3\cdot 10^8$ m/sc= $3\cdot 10^8$ m/s costante.

Se immaginiamo l'onda come la trasmissione di un'oscillazione, potremmo definire la velocità di propagazione come *la distanza alla quale le oscillazioni si sono propagate, trasmesse dall'onda, nell'unità di tempo* (il secondo, nel sistema internazionale). Vi è un'ultima grandezza tipica dei fenomeni ondulatori.

Supponiamo di essere in presenza di un'onda, caratterizzata da una frequenza f , propagantesi in una certa direzione con una velocità v : consideriamo allora due punti materiali animati dalla propagazione dell'onda, che vengano ad occupare una medesima posizione rispetto alla propria posizione di equilibrio, e che posseggano la medesima velocità: la minima distanza tra due di questi punti si dice lunghezza d'onda, e si indica con la lettera greca "lambda", λ . Se consideriamo il punto che sta sulla "cresta" di un'onda, cioè il punto che ha raggiunto la massima ampiezza A ammessa dalla propria oscillazione, la lunghezza d'onda è la minima distanza tra due di questi punti. Nell'illustrazione seguente è evidenziata la lunghezza d'onda:

In definitiva, le **grandezze caratteristiche di un'onda** sono:

- Le grandezze caratteristiche del fenomeno oscillatorio: **frequenza f , periodo T e ampiezza A**
- La **velocità di propagazione v e la lunghezza d'onda λ**

Un esempio di onda è l'onda meccanica prodotta dall'oscillazione di una corda tesa, oppure appunto la radiazione elettromagnetica

Il suono, onde sonore

Per la fisica, il **suono** è un'oscillazione (un movimento nello spazio) compiuta dalle particelle (atomi e

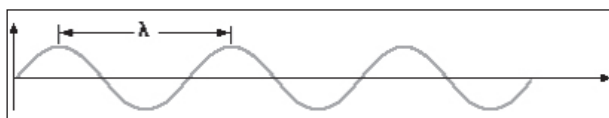


Figura 2. Frequenza f di oscillazione, velocità di propagazione v e lunghezza d'onda λ sono strettamente legate tra loro.

molecole) in un mezzo. Nel caso del suono che si propaga in un mezzo fluido (tipicamente in aria) le oscillazioni sono spostamenti delle particelle, intorno alla posizione di riposo e lungo la direzione di propagazione dell'onda, provocati da movimenti vibratori, provenienti da un determinato oggetto, chiamato sorgente del suono, il quale trasmette il proprio movimento alle particelle adiacenti, grazie alle proprietà meccaniche del mezzo; le particelle a loro volta, iniziando ad oscillare, trasmettono il movimento alle altre particelle vicine e queste a loro volta ad altre ancora, provocando una variazione locale della pressione; in questo modo, un semplice movimento vibratorio si propaga meccanicamente originando un'onda sonora (od **onda acustica**).

Il numero di periodi compiuti in un secondo esprime la frequenza in hertz (Hz). Dall'ampiezza dell'onda, invece, si calcola la pressione sonora, definita come la variazione di pressione rispetto alla condizione di quiete, e la potenza e l'intensità acustica, definita come il rapporto tra la potenza dell'onda e la superficie da essa attraversata; l'intensità delle onde sonore viene comunemente misurata in **decibel**.

La luce, onda luminosa

Il termine **luce** (dal latino *lux*) si riferisce alla porzione dello spettro elettromagnetico visibile dall'occhio

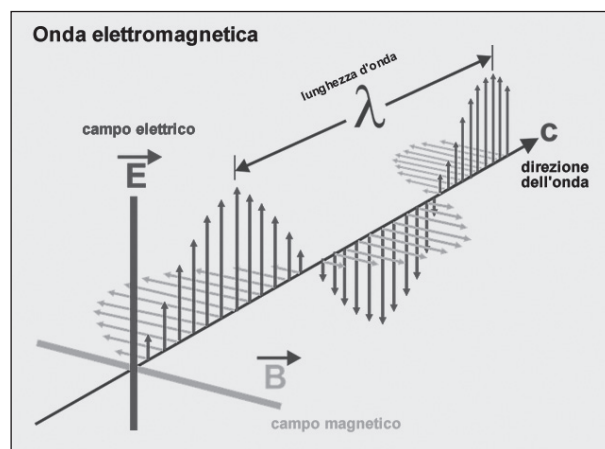


Figura 3. Il campo elettrico è ortogonale alla direzione di propagazione, mentre il campo magnetico è ortogonale sia al campo elettrico che alla direzione di propagazione. Dalle equazioni di Maxwell si evince dunque che in un'onda elettromagnetica i campi sono ortogonali fra loro e ortogonali alla direzione di propagazione, che le loro ampiezze sono proporzionali, e che la costante di tale proporzionalità è la velocità di propagazione, che dipende dalle caratteristiche del mezzo in cui si propaga.

umano, approssimativamente compresa tra 400 e 700 nanometri di lunghezza d'onda, ovvero tra 790 e 435 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. I limiti dello spettro visibile all'occhio umano non sono uguali per tutte le persone, ma variano soggettivamente e possono raggiungere i 720 nanometri, avvicinandosi agli **infrarossi**, e i 380 nanometri avvicinandosi agli **ultravioletti**. La presenza contemporanea di tutte le lunghezze d'onda visibili, in quantità proporzionali a quelle della luce solare, forma la **luce bianca**.

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 definizione della natura della luce ha sempre rappresentato un problema fondamentale per la fisica.

Il matematico e fisico britannico **Isaac Newton** propose agli inizi del 700 un modello corpuscolare, cioè considerò la luce come composta da fasci di particelle o, in generale, di corpuscoli di varia specie, prodotti da tutti i corpi luminosi. L'astronomo, matematico e fisico olandese **Christiaan Huygens**, invece, attribuì alla luce una natura ondulatoria, spiegandone il meccanismo

di propagazione secondo le leggi del moto ondulatorio.

Approfondendo la teoria ondulatoria della luce, nel 1870 il fisico scozzese **James Clerk Maxwell** giunse a sostenere che la luce è un'onda di natura elettromagnetica in quanto:

- viaggia con la stessa velocità delle onde elettromagnetiche, uguale nel vuoto a $3 \cdot 10^8$ m/s; la velocità della luce fu misurata per la prima volta in un esperimento di laboratorio dal fisico francese **Armand-Hippolyte-Louis Fizeau**, sebbene altre osservazioni astronomiche avessero già permesso di determinarne il valore con una buona approssimazione; tale valore è oggi conosciuto con estrema precisione e corrisponde appunto alla velocità di propagazione nel vuoto di un'onda elettromagnetica (uguale per tutte le frequenze) e pari a 299.792.458 m/s. La velocità di un'onda non nel vuoto ma nella materia dipende invece dall'elasticità e dalla densità del mezzo.
- è, come le onde elettromagnetiche, un'onda trasversale e non longitudinale come invece riteneva Huygens. Le onde si dicono trasversali o longitudinali a seconda che la direzione di oscillazione sia parallela o perpendicolare rispetto alla direzione di propagazione. Un'onda longitudinale risulta infatti da successive compressioni (stati di densità e pressione massimi) e rarefazioni (stati di densità e pressione minimi) del mezzo; le onde sonore ne sono un esempio tipico. In un'onda trasversale invece direzione di oscillazione e direzione di propagazione sono perpendicolari tra loro. Di tipo trasversale sono tutte le onde elettromagnetiche, come la luce, i raggi X, o le onde radio.

Una radiazione elettromagnetica è, dal punto di vista dell'elettromagnetismo classico, 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. L'immagine in **figura 3** mostra una schematizzazione di un'onda elettromagnetica; essa si propaga in direzione ortogonale al campo elettrico e magnetico.

Spettro elettromagnetico

L'insieme delle radiazioni elettromagnetiche costituisce lo spettro elettromagnetico.

Le radiazioni essendo onde sono caratterizzate da una lunghezza d'onda e da una frequenza e poi-

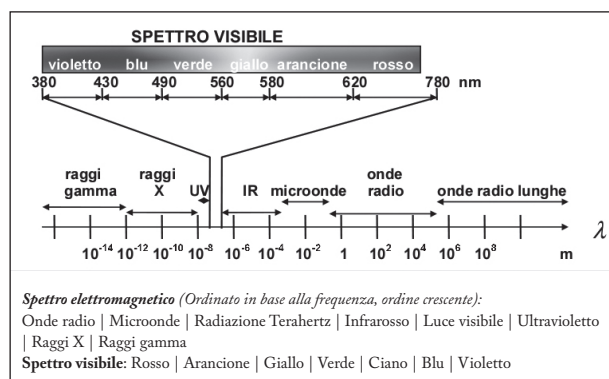


Figura 4. Lo spettro elettromagnetico

ché queste due sono inversamente proporzionali, tanto minore sarà la lunghezza d'onda, tanto maggiore sarà la frequenza e quindi l'energia. Con la vista riusciamo a percepire lunghezze d'onda comprese tra i 400 e i 700 nanometri (nm) a cui diamo il nome di luce visibile. Lunghezze d'onda minori corrispondono ai raggi ultravioletti, ai raggi X ed ai raggi gamma che hanno tutti quindi frequenza superiore alla luce visibile e perciò maggiore energia. Le radiazioni infrarosse, le onde radio e le microonde hanno invece lunghezze d'onda maggiori della luce e trasportano energia inferiore.

Spettroscopia

La misura e lo studio dello spettro elettromagnetico è chiamato spettroscopia.

Oggi il termine spettro è riferito a un flusso o un'intensità di radiazione elettromagnetica o particelle (atomi, molecole o altro) in funzione della loro energia, lunghezza d'onda, frequenza o massa.

È noto che la luce emessa da una sorgente si propaga nello spazio in ogni direzione.

Se essa incontra un corpo "opaco" (in cui le radiazioni non possono propagarsi), si genera un cono d'ombra.

Se la superficie è levigata, i raggi possono subire una riflessione, se non è levigata possono subire una diffusione.

Se invece penetrano in un corpo trasparente ma vengono deviati, allora si ha il fenomeno della rifrazione, che provoca la scomposizione della luce policromatica in radiazioni di diverso colore (lunghezza d'onda) che possono essere raccolte su uno schermo dando origine allo spettro.

L'esperimento di scindere la luce nei suoi colori componenti fu effettuato da **Newton** nel 1666, ponendo le basi dell'**elettroscopia**.

La spettroscopia prevede 3 tipi di spettri:

- **Ad emissione continua:** studiando la radiazione ottenuta scaldando un corpo nero si otterrà uno spettro continuo che contiene tutte le onde elettromagnetiche esistenti, poiché in esso non vi sono interruzioni tra una radiazione e l'altra.
- **Ad emissione a righe o bande:** si ottiene usando come sorgente un gas rarefatto (a bassa densità e pressione) ed elevata temperatura. Lo spettro che ne deriva non è continuo ma a righe o bande (caratteri-

stiche di specie poliatomiche). Gas con diversa composizione danno diversi insiemi di righe caratteristiche, per questo motivo esso è utile per identificare la composizione chimica di un gas.

- **Ad assorbimento:** quando la luce emessa da una sorgente passa per un gas a bassa pressione. Anch'esso consente di identificare la natura chimica di una sostanza allo stato gassoso.

Lo spettroscopio è lo strumento usato in chimica per l'osservazione e l'analisi della radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente, generalmente un elemento o una sostanza. Può essere a prisma, se utilizza un prisma ottico, o a reticolo, se viene usato un reticolo di diffrazione.

Fenomeni fisici associati alle onde elettromagnetiche

Presentando tutte le caratteristiche del moto ondulatorio un'onda elettromagnetica, e quindi la luce, può subire fenomeni di interferenza, rifrazione, riflessione, polarizzazione e diffrazione:

- **interferenza:** quando due onde si incontrano in un punto, l'ampiezza delle vibrazioni in quel punto è la somma algebrica dell'ampiezza delle due onde; questo effetto è conseguenza del principio di sovrapposizione, per cui due onde che si propagano nello stesso mezzo producono effetti dati dalla somma dei singoli effetti. Dunque, se l'oscillazione avviene nello stesso senso per entrambe le onde, si ottiene un rafforzamento; se gli spostamenti sono in direzioni opposte, si ha un indebolimento. Nel primo caso si parla di interferenza costruttiva, nel secondo di interferenza distruttiva.
- **rifrazione:** in generale, quando un'onda attraversa la superficie di separazione fra due mezzi, la direzione di propagazione subisce una variazione: questo fenomeno si definisce rifrazione, ed è dovuto al fatto che la velocità di propagazione dipende dal mezzo in cui essa ha luogo. Ad esempio, passando dall'aria al vetro, un raggio di luce diminuisce la propria velocità di propagazione di due terzi e di conseguenza l'angolo che questo forma con la retta perpendicolare alla superficie di separazione dei due mezzi diminuisce. Solo se il raggio incide perpendicolarmente alla superficie di separazione non subisce alcuna deviazione.
- **riflessione:** ogni volta che un'onda incide sulla superficie di separazione tra due mezzi, si separa in due

componenti: una prosegue nel secondo mezzo, subendo rifrazione, l'altra viene riflessa all'interno del primo mezzo. Nel caso della luce che colpisce il vetro di una finestra, la luce riflessa è debole rispetto a quella rifratta. Se invece la luce colpisce un materiale opaco, la componente di luce riflessa è più intensa di quella che riesce a penetrare nel mezzo: questa viaggerà per una breve distanza, prima di essere completamente assorbita.

- **polarizzazione:** la polarizzazione della luce è un fenomeno ottico che riguarda la direzione di vibrazione del vettore campo elettrico di un'onda luminosa rispetto alla direzione di propagazione, e che consiste nella predominanza di una particolare direzione di vibrazione tra tutte quelle possibili. Normalmente, la luce ordinaria risulta non polarizzata; può risultare, invece, parzialmente o totalmente polarizzata se il mezzo che essa attraversa è caratterizzato da proprietà ottiche opportune.

Tale fenomeno fu scoperto nel XVII secolo da **Christiaan Huygens** e trova applicazione, ad esempio, in fotografia, per la realizzazione di filtri e lenti antiriflesso, o in astronomia: l'analisi dello stato di polarizzazione della luce proveniente da astri lontani, infatti, fornisce informazioni sul mezzo interstellare attraversato e sulla sorgente da cui la luce proviene.

Lo studio della polarizzazione della luce è di competenza di quella branca dell'ottica che prende il nome di ottica fisica, e che, a differenza dell'ottica geometrica, tiene conto della natura ondulatoria della luce.

Ogni raggio luminoso, quindi, deve essere pensato come un treno di onde trasversali, le cui grandezze vibranti sono il campo elettrico e il campo magnetico.

Gli atomi di una sorgente di luce ordinaria emettono luce sotto forma di brevi impulsi. Ciascun impulso è costituito da un treno di onde elettromagnetiche pressoché monocromatiche (tutte della stessa lunghezza d'onda).

Il vettore campo elettrico associato a ognuna di queste onde forma con la retta di propagazione un certo angolo, detto **azimuth**, che normalmente può assumere qualsiasi valore.

All'interno di un treno di onde di luce naturale, gli azimuth sono distribuiti casualmente tra gli infiniti valori possibili: si parla quindi di luce ordinaria o non polarizzata.

La luce risulta polarizzata, invece, se i vettori associati a ciascuna onda elementare hanno tutti lo stesso azimuth – se vibrano tutti nel medesimo piano. Più precisamente, un treno di onde siffatto si dice **linearmente polarizzato**.

Esistono altri tipi di polarizzazione: si parla di **polarizzazione circolare** se il vettore campo elettrico non vibra costantemente su un piano, ma ruota intorno alla direzione di propagazione mantenendo sempre la stessa ampiezza.

Si parla invece di **polarizzazione ellittica** se il vettore campo elettrico compie un'analoga rotazione intorno alla direzione di propagazione, ma variando l'ampiezza nel corso della rotazione in modo da descrivere con la 'punta' una traiettoria ellissoidale.

La polarizzazione di un fascio di luce può essere completa o parziale: nel primo caso, tutte le onde che lo costituiscono sono caratterizzate dalla stessa direzione di polarizzazione; nel secondo, la polarizzazione riguarda soltanto una frazione delle onde che compongono il fascio.

Esistono diversi meccanismi che fanno di un fascio di luce ordinaria un fascio di luce polarizzata: i più noti sono la polarizzazione per riflessione, per rifrazione attraverso lamine sovrapposte, per dicroismo e per doppia rifrazione.

Diffrazione: la diffrazione fisica è un fenomeno tipicamente ondulatorio per il quale un'onda che attraversa una piccolissima fenditura o che supera lo spigolo vivo di un corpo, anziché procedere nella direzione iniziale, si sparpaglia seguendo percorsi diversi. Perché la diffrazione sia evidente è necessario che le dimensioni della fenditura siano paragonabili a quelle della lunghezza d'onda della radiazione incidente.

Il fenomeno interessa qualunque tipo di onda, come il suono, le onde sismiche, la luce o qualunque altro tipo di radiazione elettromagnetica.

Se si indirizza un fascio di luce contro un pannello su cui sia praticata una fenditura di dimensioni apprezzabili, uno schermo posto al di là del pannello raccoglie un'immagine relativamente nitida della fenditura, circondata da una zona d'ombra. Riducendo via via l'ampiezza della fenditura, l'immagine che si raccoglie sullo schermo non si restringe in modo proporzionale, ma si allarga e si offusca a causa del fenomeno della diffrazione.

Le onde luminose che incidono ai bordi della fenditura, infatti, non proseguono in direzione rettilinea, ma invadono la zona d'ombra, deviando di un angolo che dipende dalla lunghezza d'onda e dalle dimensioni dell'ostacolo.

Detta D l'ampiezza della fenditura, L la distanza fenditura-schermo, λ la lunghezza d'onda della luce e D' l'ampiezza dell'immagine raccolta sullo schermo, si può assumere con buona approssimazione che: $D' \sim D + L(\lambda/D)$.

È evidente che, se l'ampiezza D della fenditura è molto grande rispetto alla lunghezza d'onda, il rapporto λ/D è molto piccolo e l'ampiezza dell'immagine della fenditura rimane pressoché uguale a quella reale. Poiché la lunghezza d'onda della luce è dell'ordine dei 10^{-7} m, la diffrazione si può apprezzare soltanto su scala microscopica.

Il fenomeno si può spiegare alla luce del **principio di Huygens-Fresnel dell'interferenza**. Secondo tale principio, ogni punto di un fronte d'onda è sorgente di un'onda secondaria che si propaga in tutte le direzioni. Così, nel caso della fenditura, ogni punto del fronte luminoso che si affaccia su di essa genera un'onda secondaria che si propaga in fase con la prima, andando a colpire lo schermo in punti normalmente in ombra.

Come per l'interferenza, la sovrapposizione delle onde secondarie così generate produce una figura di diffrazione costituita da una successione di massimi e minimi più o meno intensi.

Il fenomeno della diffrazione può essere sfruttato per determinare la lunghezza d'onda di un fascio di luce monocromatica (costituita da un'unica componente): a questo scopo, si utilizza un dispositivo ottico chiamato **reticolo di diffrazione**: facendo incidere il fascio sul reticolo e sfruttando la relazione che fornisce

la deviazione subita dalla radiazione in funzione della lunghezza d'onda, si misura la prima per determinare la seconda.

Emissione della luce

Resta infine da chiarire il processo di emissione della luce visibile:

Nella meccanica quantistica si definisce eccitazione la transizione di un sistema ad uno stato quantico di maggiore energia (stato eccitato). Durante l'eccitazione il sistema cattura una quantità discreta di energia dall'ambiente. Gli stati eccitati hanno generalmente vita limitata: prima o poi, cioè, il sistema decade in uno stato energetico inferiore, spontaneamente o per l'influenza di fattori esterni (emissione stimolata, laser, ecc.) e durante questo processo viene rilasciata la stessa quantità di energia accumulata durante l'eccitazione. L'energia liberata può essere restituita all'ambiente in vari modi, per esempio sotto forma di radiazione elettromagnetica (e quindi anche di luce visibile), calore, vibrazione, moto e così via.

Fotoni

Sebbene nell'elettromagnetismo classico la luce sia descritta come un'onda, l'avvento della meccanica quantistica agli inizi del XX secolo ha permesso di capire che questa possiede anche proprietà tipiche delle particelle e di spiegare fenomeni come l'effetto fotoelettrico.

Nella fisica moderna la luce (e tutta la radiazione elettromagnetica) viene composta da unità fondamentali, o quanti, di campo elettromagnetico chiamati **fotoni**.

Verso la fine del diciannovesimo secolo, man mano che si acquisivano informazioni sulla radiazione elettromagnetica che non trovavano spiegazioni nell'ambito della meccanica classica, le perplessità degli scienziati andavano progressivamente aumentando; in tal modo, le righe dello spettro dell'idrogeno rimanevano un grande puzzle irrisolto.

Radiazione, quanti e fotoni

L'idea che avrebbe risolto il problema fu concepita nel 1900 dal fisico tedesco **Max Planck**, il quale propose che lo scambio di energia tra la materia e la radiazione avvenisse per **quanti**, o pacchetti discreti di energia.

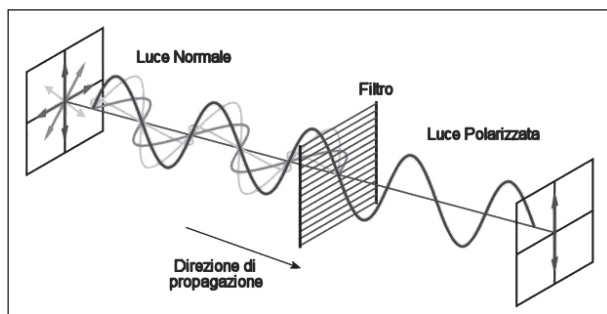


Figura 5. Polarizzazione della luce

Il concetto fondamentale della sua teoria era che una particella carica oscillante alla frequenza ν potesse scambiare energia con l'ambiente solo in forma di pacchetti di grandezza

$$E = h\nu$$

La costante h , detta oggi **costante di Planck**, vale $6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Se l'atomo in oscillazione cede all'ambiente una quantità di energia E , si rivelerà una radiazione di frequenza $\nu = E/h$.

Per giungere a questa teoria Planck fu costretto a confutare la fisica classica, che non pone limiti alla quantità di energia (anche molto piccola) trasferibile da un corpo a un altro. Le prove che l'energia si trasferisce in pacchetti discreti vennero **dall'effetto fotoelettrico**, cioè dall'emissione di elettroni da parte di un metallo la cui superficie sia esposta alla radiazione ultravioletta. Le osservazioni sperimentali che portarono alla scoperta dell'effetto fotoelettrico furono le seguenti:

1. non vengono emessi elettroni a meno che la radiazione non raggiunga una frequenza superiore a un certo valore di soglia caratteristico del metallo
2. gli elettroni vengono emessi immediatamente, qualunque sia l'intensità della radiazione
3. l'energia cinetica degli elettroni emessi aumenta linearmente all'aumentare della frequenza della radiazione incidente.

Albert Einstein trovò la spiegazione di tali osservazioni: egli propose che la radiazione elettromagnetica fosse costituita da **particelle**, che più tardi furono chiamate **fotoni**. Ciascun fotone si può considerare come un **pacchetto di energia**: quest'ultima dipende dalla frequenza della radiazione e corrisponde a $E = h\nu$. Per esempio, i fotoni ultravioletti sono più energetici di quelli della luce visibile, che corrispondono a frequenze più basse. È importante notare che l'intensità della radiazione indica il numero di fotoni presenti, e che l'espressione $E = h\nu$ misura l'energia di ciascun singolo fotone.

Le caratteristiche dell'effetto fotoelettrico si spiegano facilmente pensando alla **radiazione elettromagnetica** come a un **insieme di fotoni**. Se l'energia del fotone non raggiunge quella necessaria ad allontanare un elettrone dal metallo, l'elettrone non sarà espulso, quale che sia l'intensità della radiazione. Se, invece, **l'energia del fotone, $h\nu$** , è maggiore, allora sarà espulso un elettrone, indipendentemente dall'intensità della radiazione.

L'esistenza dei fotoni e la relazione che lega l'energia e la frequenza di un fotone aiutano a rispondere a una delle domande poste dallo **spettro dell'atomo di idrogeno**, introducendo l'idea che le righe spettrali scaturiscono da una transizione tra due livelli energetici. Ora possiamo vedere che se quella differenza di energia viene allontanata sotto forma di fotone, allora la frequenza di una singola riga è correlata alla differenza di energia tra i due livelli coinvolti nella transizione (figura 6):

$$h\nu = E_{\text{sup}} - E_{\text{inf}}$$

Questa relazione è nota come **condizione della frequenza di Bohr**.

La condizione della frequenza di Bohr (o **secondo postulato di Bohr**) è un postulato del modello atomico di Bohr, proposto da **Niels Bohr** nel 1913 che afferma che l'atomo irraggia energia solamente quando, per un qualche motivo, un elettrone effettua una transizione da uno stato stazionario ad un altro. La frequenza della radiazione è legata all'energia del livello di partenza e di quello di arrivo dalla relazione:

$$\nu = \frac{|E_f - E_i|}{h}$$

ν = frequenza della radiazione
 h = costante di Planck
 E_f = stato energetico dell'orbita finale
 E_i = stato energetico dell'orbita iniziale

dove **h** è la **costante di Planck**, mentre **E_i** ed **E_f** sono le energie dell'orbita iniziale e finale (secondo la teoria classica, invece, la frequenza della radiazione emessa avrebbe dovuto essere uguale a quella del moto periodico della particella carica).

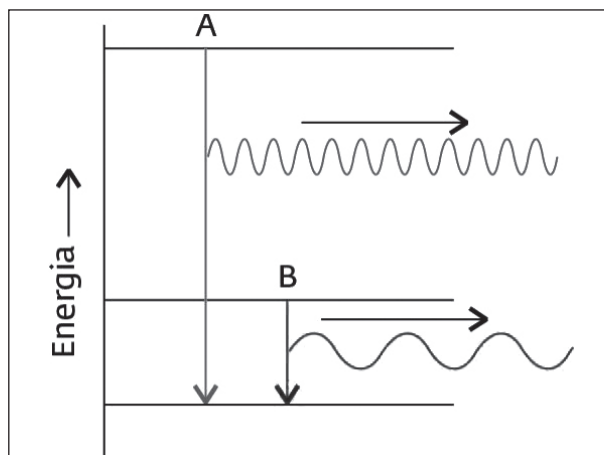


Figura 6. Quando subisce una transizione da uno stato di energia superiore a uno di energia più bassa, l'atomo perde energia, che si allontana sotto forma di un fotone. Quanto maggiore è la perdita di energia (A confrontato con B), tanto più elevata è la frequenza (e minore la lunghezza d'onda) della radiazione emessa.

L'energia che l'atomo scambia con il campo elettromagnetico soddisfa dunque sia il **principio della conservazione dell'energia**, sia la **relazione tra l'energia e la frequenza** introdotta da **Planck**. Notiamo, però, che nel suo lavoro Bohr non chiama in causa i **quanti di luce di Einstein**, dei quali sarà un deciso oppositore fino al 1924.

Bibliografia

1. Giovanni Barazzetta: <http://www.oilproject.org/lezione/onde-elettromagnetiche-meccaniche-onda-longitudinale-trasversale-lunghezza-d-onda-14943.html>
2. Zanichelli, la teoria quantistica: <http://ebook.scuola.zanichelli.it/atkinschimica/unita-uno/gli-atomi-il-mondo-quantico/la-teoria-quantistica#70>
3. Gobbi: la natura elettromagnetica della luce: <http://digilander.libero.it/fisicamoderna5b/Relazioni/Gobbi%20-%20La%20natura%20elettromagnetica%20della%20luce.pdf>
4. Andrea Minini: <http://www.andreaminini.org/fisica/elettromagnetismo/onde-elettromagnetiche>
5. Massimiliano Meneghetti: <http://www.massimilianomeneghetti.com/index.php/un-po-di-storia/83-lo-spettro-elettromagnetico>