

O4 - LO SPETTRO OTTICO

Non parliamo di fantasmi, lenzuoli e catene. In fisica, uno **spettro** è una successione di radiazioni, della stessa natura, di lunghezza d'onda compresa fra un minimo ed un massimo.

Ci limitiamo per ora a richiamare quanto già accennato all'inizio del primo articolo della serie (O1) e ad illustrare alcune esperienze; un approfondimento teorico si trova più avanti, alla pag. 32 e nella bibliografia citata all'inizio (vedi anche il manuale "Problemi tecnici della microscopia...", Cap. 1.1).

Sappiamo già che, per i suoni, una differenza di frequenza (o di lunghezza d'onda), procura al nostro orecchio sensazioni di diversa "altezza": si parla di suoni "gravi" ed "acuti". Il nostro orecchio ("medio", cioè per una persona giovane e sana senza difetti particolari) è sensibile a suoni con frequenza compresa fra circa 20 Hz e 15'000 Hz. Questo intervallo di frequenze rappresenta lo "spettro acustico", cioè l'intera gamma dei suoni udibili. Le vibrazioni di frequenza inferiore a 20 Hz si chiamano "infrasuoni"; quelle di frequenza superiore a 15'000 o 20'000 Hz sono dette "ultrasuoni". Sembra che taluni animali di gran mole siano sensibili agli infrasuoni, mentre quelli piccoli possono percepire ultrasuoni ad elevata frequenza.

Un suono, o per meglio dire un rumore, che contiene tutte le frequenze dello spettro acustico, si chiama "rumore bianco", per analogia con ciò che si fa per lo spettro ottico.

Per le radiazioni elettromagnetiche, abbiamo già chiarito che l'occhio "medio" percepisce onde di lunghezza d'onda λ^{21} compresa fra circa 0,4 μ e 0,75 μ ; questo è lo "spettro ottico" e quelle sono le "radiazioni ottiche". Ricordiamo che 1 μ = 0,001 mm.

Ebbene, una sorgente che emettesse tutte le lunghezze d'onda comprese nello spettro ottico ci darebbe la sensazione di "**bianco**": il nostro occhio non sarebbe in grado di distinguere tutte le lunghezze d'onda presenti e ci fornirebbe una sensazione globale.

Ma, se noi offriamo all'occhio una radiazione "monocromatica", formata da onde della stessa lunghezza, che sensazione ci dà il nostro occhio? Dalla tavola a pag. 36, fig. 63, e dalla striscia colorata a destra di essa, risulta che, partendo dall'alto ($\lambda = 0,4 \mu$), e supponendo di variare la λ fino a 0,75 μ , il nostro occhio ci fa percepire dei colori molto vivi, che corrispondono a quelli dell'iride (= arcobaleno). Sono questi i "colori puri" o "colori spettrali". Ma i colori dei corpi che vediamo ogni giorno sono "misti", cioè creati da un miscuglio assai vario di differenti lunghezze d'onda o di intere porzioni ("bande") dello spettro ottico.

In maggioranza, le sorgenti abituali (sole, cielo, lampadine ad incandescenza ed "alogene" fiamme, ecc.) sono "bianche", ma non ideali, nel senso che non emettono con la stessa intensità per tutto lo spettro. Se prevale la regione a forte lunghezza d'onda (giallo-rosso), il bianco avrà una "dominante" giallognola, come il sole al tramonto o una lampadina ad incandescenza; se prevale la regione a minor lunghezza d'onda (blu-viola), il bianco avrà una dominante azzurrognola, come il cielo sereno, e così via.

Per descrivere la composizione della radiazione emessa da una qualunque sorgente non basta quindi scrivere di quali lunghezze d'onda essa è composta, ma occorre dire anche per ogni valore di λ quale è l'intensità della sorgente; ciò si rappresenta bene con una "**curva di emissione spettrale**", cioè un diagramma cartesiano in cui si mette in ascissa il valore di λ (all'interno dello spettro ottico o di regioni simili) ed in ordinata il valore di intensità. Si veda la fig. 64 o 68, più avanti.

Volendo descrivere una certa sorgente, magari seguita da qualche filtro selettivo, sarebbe dunque utile ricavarne la curva di emissione; ciò richiede però uno strumento speciale (spettrometro). Noi dobbiamo limitarci ad una valutazione qualitativa; ecco come.

Nelle figure degli articoli precedenti, per es. la 15, 17, 19, 21 ... e soprattutto nella 37, in O2, si sarà notata la riproduzione in bianco e nero, proprio per escludere temporaneamente il problema dei colori. Ora dobbiamo occuparcene.

Consideriamo per es. la fig. 37 in O2, e riprendiamo un'altra foto dello stesso dispositivo, ma a colori (fig. 56); il fascio emergente dalla faccia 1 del prisma P (fascio R - FD), che già in bianco e nero appariva leggermente allargato a ventaglio, appare ora suddiviso in fasci minori, di

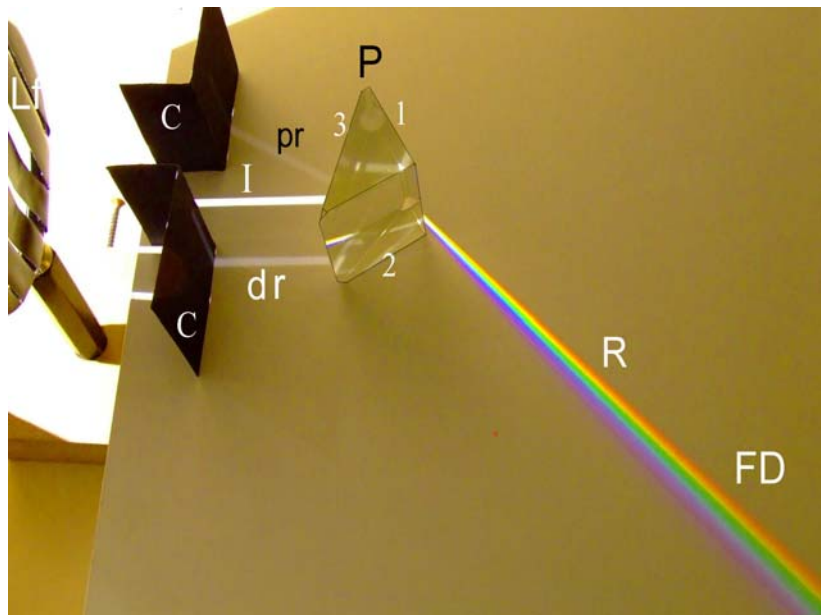
²¹ Per la regione ottica e per quelle contigue, in luogo della frequenza, che raggiunge valori elevatissimi, si indica di solito la lunghezza d'onda indicata, come si è già detto, colla lettera greca lambda (λ).

diverso colore.

Fig. 56

Un prisma retto, utilizzato per deviare un fascio parallelo (I diventa R). Poiché l'angolo di deviazione dipende anche dalla lunghezza d'onda e quindi dal colore, ecco che la luce bianca del fascio I viene "dispersa" e nel fascio risultante (FD) si vedono i colori dell'iride, dal viola (il più deviato) al rosso (il meno deviato). Ecco uno "spettro".

Questa disposizione è già stata utilizzata varie volte, per es. nella figura 19 (in O2): la lente a fessure (Lf, a sinistra) produce cinque fasci paralleli; di questi, due da una parte e due dall'altra vengono intercettati da due squadrette di cartoncino nero (C); il fascio centrale rimanente (I) incide sulla faccia ipotenusata del prisma P ed emerge da una faccia cateto (1); il fascio **dr** proviene da due riflessioni interne; quello **pr** da una prima riflessione esterna sulla faccia 3.

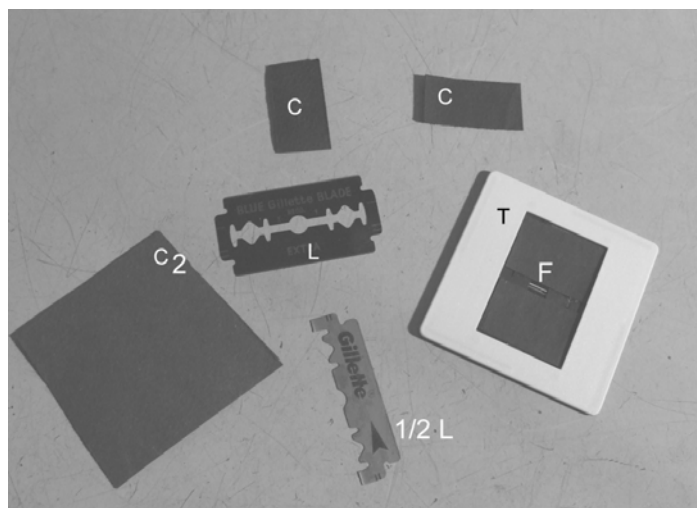


Non avevamo detto, all'inizio dell'articolo O2, che la deviazione di un fascio di luce nella rifrazione dipende, fra l'altro, dalla lunghezza d'onda (λ) della radiazione utilizzata? Il fatto è che, variando la lunghezza d'onda λ , varia anche l'indice di rifrazione n e quindi anche la deviazione del fascio rifratto²². Se sul prisma incidesse radiazione "monocromatica" ("di un solo colore", in greco; per noi "di una sola lunghezza d'onda), avremmo un solo fascio rifratto. Ma la luce bianca, abbiamo detto, è composta da tutte le lunghezze d'onda comprese fra due estremi, cioè da tutto lo spettro ottico. Ne consegue che nel fascio disperso FD avremo tanti fasci diversamente deviati quante sono le lunghezze d'onda comprese nel fascio incidente. Qualcosa di simile avviene durante la formazione dell'arcobaleno ed i colori di quest'ultimo sono ancora quelli della fig. 58 B, più sotto, semplicemente meno saturi a causa della diffusione, ecc.

Per meglio separare i vari colori all'interno dello spettro prodotto dal prisma, occorrerebbe uno strumento apposito, lo spettroscopio. Un tale strumento però, oltre al prisma, richiede un sistema ottico complesso ed una montatura meccanica non realizzabili con mezzi casalinghi. Consigliamo perciò di perfezionare il dispositivo di fig. 56 sfruttando un proiettore da diapositive.

Fig. 57

Il "telaietto a fessura" (T), da porre nel proiettore da diapositive, in luogo della diapositiva normale, con la fessura verticale. Mettere a fuoco l'obiettivo del proiettore per avere un'immagine nitida della fessura. Dopo aver completato il dispositivo della figura seguente, si potrà migliorare la saturazione dei colori ritoccando la messa a fuoco.



Occorre prima costruire un telaietto speciale: ci si procuri un normale telaietto da diapositive in plastica, "senza vetri"; lo si separi nelle due metà; all'interno di una di esse, invece della pellicola, si incollino due pezzetti di cartoncino nero (C) di dimensioni tali da occupare l'intera finestra del telaietto, salvo una fessura, parallela al lato corto della finestra, al centro della

²² È questa la "dispersione dell'indice".

finestra stessa, larga 3 - 4 mm. Si prenda ora una normale lametta da barba (L in figura) e la si spezzi in due per il lungo ($1/2 L$). S'incollino le due metà della lametta, con la parte affilata verso il centro, sui due cartoncini già incollati, in modo da restringere la fenditura dei cartoncini a circa 1 mm (F)²³. Si curi il parallelismo dei due bordi. La ragione di sostituire i bordi del cartoncino col filo di una lametta sta nella necessità di avere bordi netti, senza le sfilacciate delle fibre del cartone. Si richiudano infine le due metà del telaietto. Con altri due pezzetti di cartoncino, è bene accorciare la fessura fino a 4-6 mm di lunghezza.

Si ponga ora il "telaietto a fessura" nel proiettore, con la fessura verticale; si accenda e si focalizzi l'immagine della fessura (If) su uno schermo bianco, come in fig. 58 A.

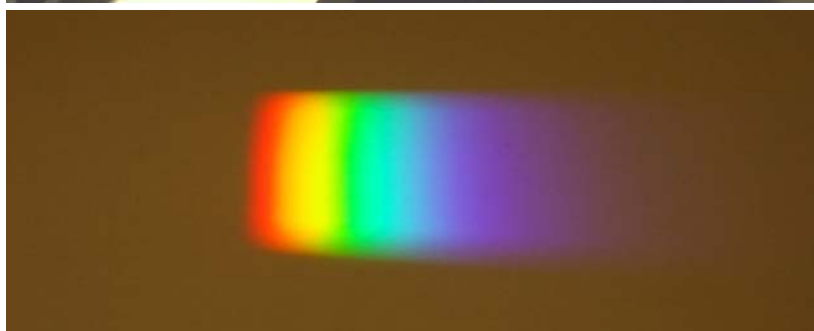
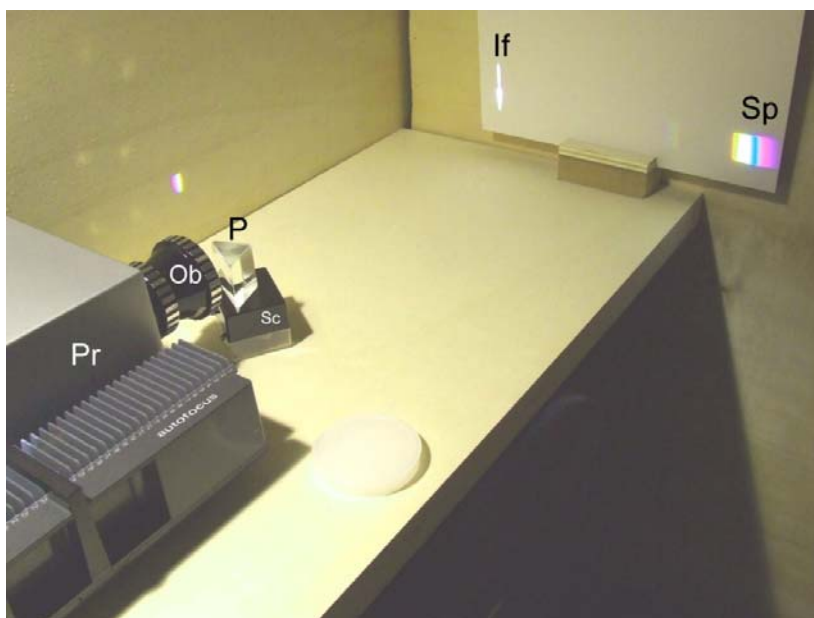
Fig. 58 A e B

Il proiettore Pr proietta su uno schermo un'immagine del telaietto a fessura (If). Una parte del fascio emergente dall'obiettivo (Ob) viene però intercettata dal prisma P, portato alla giusta altezza poggiandolo su uno scatolino (Sc). Sullo schermo si formerà quindi un'immagine "dispersa" della fessura (Sp), sotto forma di piccolo spettro.

Sotto, si vede un'immagine più dettagliata dello spettro. I colori non hanno né la fedeltà né la brillantezza dei colori reali: nessun sistema fotografico può riprodurre fedelmente ciò che l'occhio vede e, per giunta, l'illuminazione artificiale dell'ambiente ha creato un fondo giallastro. La realizzazione pratica di questo semplice dispositivo fornirà immagini assai più gradevoli di quanto la foto possa fare.

Si osservi che i colori associati a minore lunghezza d'onda (blu e viola) sono più deviati degli altri poiché ad essi corrisponde un maggior indice di rifrazione.

Interponendo lungo il fascio un filtro colorato, si potrà valutare qualitativamente l'effetto del filtro in base alla diminuita luminosità di una regione o l'altra dello spettro. In mancanza di uno spettrometro ...



Con qualche ritocco, sarà possibile proiettare un'immagine come quella di fig. 58 B, ma più brillante: una serie di infinite immagini della fessura, corrispondenti a tutti i valori di lunghezza d'onda presenti nella luce bianca della lampadina del proiettore. Poiché l'immagine della fenditura non è infinitamente sottile, come già s'intuisce dall'immagine If di fig. 58 A, le immagini corrispondenti ai vari colori si sovrappongono in parte ed i colori non saranno così puri come dovrebbero. Ridurre la larghezza della fenditura nel telaietto renderebbe più definiti i colori, ma la brillantezza dell'immagine diminuirebbe. Si cerchi il miglior compromesso.

Pensiamo ora ad eseguire l'operazione inversa: rimescolare tutti i colori dello spettro per riottenere la luce bianca di partenza.

Un primo sistema consiste nell'uso di specchietti (fig. 59): si ritagliano col "diamante" (o "rotellina") tagliavetro, reperibile in ferramenta, da 5 a 10 quadratini di circa 2×2 cm, partendo da uno specchietto da toilette. Si incollino con silicone o plastilina i 5 - 10 specchietti su una base in cartone o compensato, in modo da tenerli verticali, affiancati come in fig. 59. Conviene mettere la serie degli specchietti almeno a mezzo metro dal proiettore, in modo che il fascio disperso (FD in fig. 56) abbia una larghezza di qualche centimetro. Se si dispone, ad es., di sette

²³ Occorrerà accorciare le due mezze lamette per farle entrare nel telaietto: dovrebbe andar bene un pezzo lungo circa 24 mm, ottenuto spezzando la mezza lametta con un paio di pinze.

specchietti²⁴, si divide per sette la larghezza dello spettro e quella dovrà essere la larghezza utile di ogni singolo specchio. Per facilitare il lavoro, abbiamo supposto di disporre di specchietti di circa 2×2 cm; per evitare che gli specchietti perdano qualche porzione dello spettro, basta disporre gli specchietti in maniera embricata, come si vede dal dettaglio a destra della fig. 59 e lasciare scoperta quella porzione dello specchietto che corrisponde alla larghezza dello spettro divisa per sette.

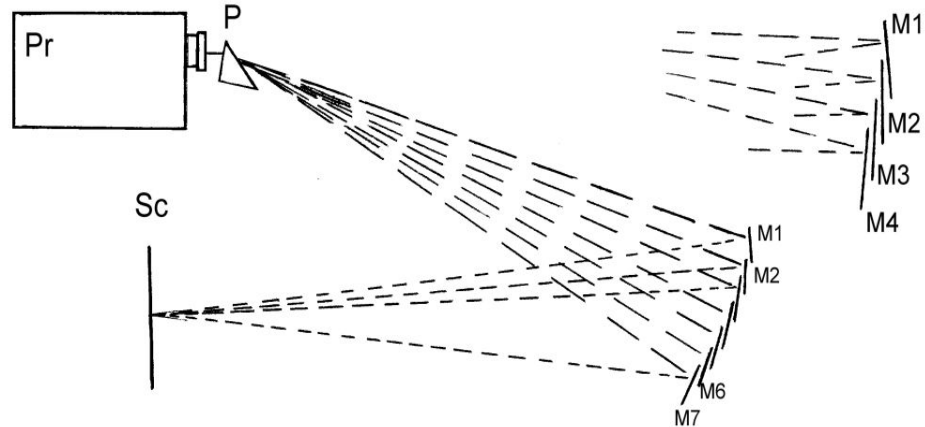
Fatto questo, si orientino gli specchietti (il silicone impiega alcune ore ad indurire; la plastilina non ha limiti) in modo che i sette fasci riflessi convergano verso un unico punto, e lì si metterà un pezzo di cartone bianco verticale (Sc in figura).

Fig. 59

Dispositivo per la ricomposizione della luce bianca partendo da un fascio disperso prodotto dal prisma P. Schema visto dall'alto.

Anche in questo caso, sarà bene ritoccare la messa a fuoco del proiettore per ottimizzare la saturazione dei colori.

Tutto il dispositivo andrà poggiato su una tavoletta di legno; un blocchetto, di legno o di polistirolo espanso, permetterà di portare alla giusta altezza gli specchietti.



Inutile dire che sullo schermo Sc non si vedrà una macchia puntiforme ma rettangolare, piuttosto grande; infatti, i sette specchietti intercettano sette porzioni rettangolari del fascio disperso prodotto dal prisma, e tali fasci rimangono dispersi dopo la riflessione (gli specchietti sono piani); e non importa che i sette fasci vengano poi riflessi fino a sovrapporsi in Sc.

L'operazione di allineare i sette specchietti è naturalmente delicatissima, poiché i sette fasci riflessi debbono terminare nello stesso punto dello schermo Sc, sia in direzione verticale che orizzontale.

In luogo dei sette specchietti piani, si può far convergere il fascio disperso prodotto dal prisma usando un unico specchio concavo posto in luogo degli specchietti. Si cerchi in una profumeria uno specchio da toilette "da ingrandire" (i commessi lo chiamano "a lente", dimostrando di non saper distinguere fra lente e specchio). Tali specchi si usano per radersi la barba o per il trucco, e forniscono un'immagine (virtuale) leggermente ingrandita. Provando e riprovando, si dovrebbe trovare una posizione ed un orientamento dello specchio concavo in grado di dare buoni risultati. Per evitare però di dover mettere lo specchio troppo lontano dal prisma, occorre uno specchietto molto ricurvo, che avrà in genere un diametro minore e forse insufficiente. Se questo non è reperibile, conviene ricorrere ad uno specchietto concavo del tipo che si usava una volta nei microscopi privi d'illuminatore incorporato.

Un altro modo di ricomporre la luce bianca partendo da un fascio disperso è quello di usare una lente convergente. Va bene una lente d'ingrandimento del tipo già usato (vedi l'articolo O3, fig. 41, 50, 51). La spiegazione e lo schema di principio del dispositivo sono illustrati più sotto (pag. 39, fig. 67). Vediamo concretamente come si può fare.

Si torni alla disposizione di fig. 58 A; lungo il percorso del fascio disperso, fra il prisma P e lo schermo, si interponga una lente d'ingrandimento di qualche centimetro di diametro. Le distanze prisma-lente e lente-schermo andranno trovate per tentativi, poiché dipendono dalla focale della lente. Anche la focalizzazione del proiettore andrà ritoccata.

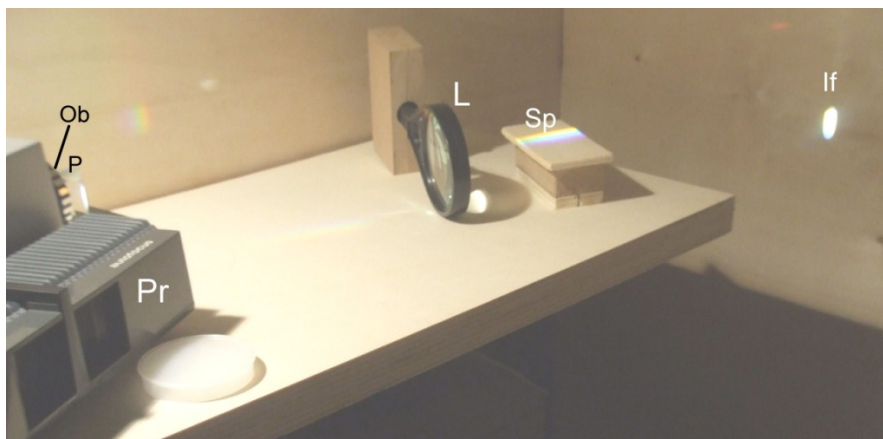
La lente dovrà trovarsi col centro alla stessa altezza dell'asse dell'obbiettivo del proiettore; per far ciò potrebbe bastare il blocchetto di legno che si è già usato in altri dispositivi per sostenerla col manico verticale. Così è stato fatto nella disposizione di fig. 60.

²⁴ Si è scelto il numero sette poiché, fin dai tempi di I. Newton, che per primo eseguì la scomposizione della luce bianca a mezzo di un prisma, si sono considerati sette i colori dello spettro: rosso, arancio, giallo, verde, azzurro, indaco, violetto. In realtà i colori spettrali sono infiniti, poiché, fra i due estremi dello spettro ottico, infiniti sono i valori possibili di lunghezza d'onda. Che poi il nostro occhio riesca a distinguerli tutti, è un altro paio di maniche ...

Fig. 60

La lente d'ingrandimento L intercetta il fascio prodotto dal proiettore Pr e disperso dal prisma P ; poiché tale fascio è divergente, la lente lo fa convergere in una figura ristretta (If) sullo schermo posto a distanza adeguata.

Un cartoncino orizzontale (Sp), leggermente inclinato, mostra come il fascio, appena emerso dalla lente, sia già più ristretto ma non completamente ricomposto: in esso i colori si distinguono ancora.

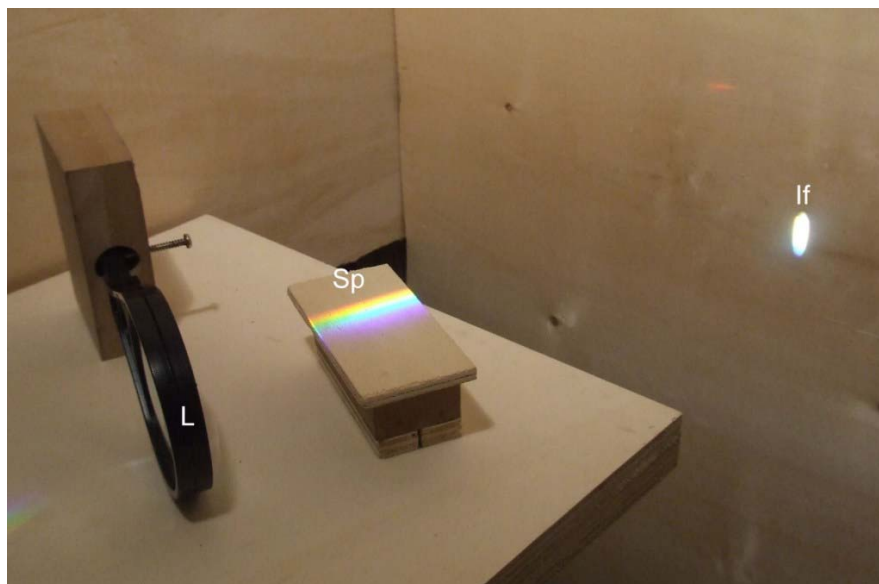


La macchia If che compare sullo schermo dovrebbe essere bianca, ma non perfettamente; infatti, la “sorgente” del sistema è la fessura ricavata nel telaietto a fessura e, fra essa e lo schermo, si trova l’obbiettivo del proiettore (Ob) e soprattutto la lente L che non è “corretta” e pertanto è affetta da numerose aberrazioni (vedi O5). Per migliorare le cose, si orienta la lente L , sempre rimanendo verticale il suo piano, ruotandola attorno ad un asse verticale e spostandola orizzontalmente in modo che il fascio attraversi una regione più o meno periferica di essa. Nella fig. 61 si osserva qualche dettaglio in più.

Fig. 61

Stesso dispositivo della figura precedente. Per reggere la lente L nella giusta posizione e consentire i suoi spostamenti come descritti nel testo, si è usato lo stesso blocchetto di legno che si vede nella fig. 50 (in O3). Nel blocchetto si è praticato un foro dello stesso diametro del manico della lente; la vite, visibile a destra del blocchetto, serve a fissare tale manico.

A parte le inevitabili imperfezioni, la macchia If , almeno al centro, dovrebbe essere quasi bianca. Ecco “la ricomposizione della luce bianca”.



LUCE BIANCA

SCOMPOSIZIONE e RICOMPOSIZIONE dello SPETTRO OTTICO

La “luce”²⁵ è una radiazione elettro-magnetica, vale a dire una forma d’energia che si irradia nello spazio propagandosi (in un mezzo omogeneo) in linea retta; le linee di propagazione si chiamano **raggi**. In particolare, si tratta di una variazione periodica di due campi (uno elettrico ed uno magnetico) collegati fra loro.

Non deve stupire questa natura complessa della luce; infatti, qualunque sia la sorgente che si considera (lampade, fiamme, corpi celesti, ecc.), la luce è sempre emessa dagli elettroni contenuti negli atomi. Un elettrone può essere disturbato dal suo stato normale, di riposo, quando viene “eccitato”, cioè quando assorbe una quantità opportuna di energia. Poco importa se quest’energia proviene da reazioni chimiche (“chemioluminescenza”, come quella delle lucciole ed altri animali e piante luminosi), o dal calore (fiamme, corpi incandescenti, corpi celesti) o da altre radiazioni (fluorescenza, vedi l’articolo O 10). Sta di fatto che, in tempi brevissimi, l’elettrone ritorna al suo stato di riposo e riemette l’energia che aveva assorbito. La quantità d’energia emessa dipende dallo stato d’eccitazione che l’elettrone aveva raggiunto e dallo stato di riposo a cui l’elettrone ritorna. Per ogni dato tipo di atomi, cioè per ogni “elemento” chimico, vi sono numerosi di questi “salti energetici” possibili dell’elettrone e ad ogni salto corrisponde una diversa radiazione che trasporta una diversa quantità di energia.

Ora, si pensi che ogni elettrone ruotante attorno ad un nucleo atomico non è altro che una carica elettrica che si sposta nello spazio secondo un’orbita periodica, percorsa all’infinito, sempre uguale a sé stessa. La fisica insegna che una carica crea attorno a sé un **campo** elettrico, cioè una porzione di spazio in cui essa può esercitare su altre cariche una forza di attrazione o repulsione. Poiché la carica dell’elettrone si può spostare nello spazio (avvicinandosi od allontanandosi al nucleo dell’atomo, semplificando molto), essa può cedere od acquistare energia; quando la cede, lo fa sotto forma di onda. Si ha così un campo **elettrico** oscillante.

Allo stesso modo si produce un campo **magnetico** oscillante: un elettrone rappresenta una carica in movimento e cioè una elementare corrente elettrica. Ebbene, qualunque corrente elettrica produce un campo magnetico; basta pensare alle elettrocalamite dei campanelli e dei motori elettrici.

Così l’elettrone produce simultaneamente un campo elettrico ed uno magnetico; poiché l’elettrone si comporta anche come un’onda, così pure i campi da esso prodotti oscillano; e poiché la causa è unica, i due campi oscillano in perfetto sincronismo.

Per ogni grandezza oscillante, come i nostri campi elettrico e magnetico, si può dire che qualcosa, per es. l’intensità dei campi, varia continuamente di valore, da un minimo ad un massimo e viceversa, con andamento periodico. In altre parole, ad intervalli di tempo regolari, il campo riassume (periodicamente) lo stesso valore, che sia il massimo, il minimo, o qualunque altro valore intermedio. Si chiama **periodo** (T) questo intervallo costante di tempo dopo il quale il campo oscillante riassume lo stesso valore²⁶. E si chiama **frequenza** il numero di volte, ogni secondo, in cui il campo ritorna allo stesso valore, cioè il numero di “periodi” contenuti in un secondo. L’unità di misura della frequenza è l’**Hertz**²⁷, simboleggiato con **Hz**. Un Hertz (1 Hz) è la frequenza di un’oscillazione che ripete una volta ogni secondo il ciclo completo delle sue variazioni.

Ma quest’oscillazione del campo si propaga nello spazio e quindi, se supponiamo di metterci in un dato punto dello spazio, vedremo l’oscillazione che passa: il campo in quel punto varierà periodicamente nel tempo.

Possiamo visualizzare questo fenomeno osservando uno specchio d’acqua tranquilla e creandovi un “disturbo”, alterandone lo stato di riposo. Basta gettarvi un oggetto qualunque: una certa massa d’acqua è bruscamente spostata, potremmo dire “eccitata”, e, nel tornare allo stato di

²⁵ Meglio dire “radiazione ottica” per indicare che si tratta di un agente fisico; il termine “luce” si riferisce ad una sensazione, ad una rappresentazione psichica (vedi il manuale “Problemi tecnici della microscopia...”, Cap. 1.1).

²⁶ variando nello stesso senso e dopo aver traversato l’intero ciclo periodico di variazione

²⁷ tratto dal nome di Heinrich Rudolf HERTZ (1857 - 1894), fisico tedesco, scopritore delle onde elettromagnetiche (1887).

riposo, restituisce l'energia assorbita producendo un'onda²⁸. Se vicino al punto di caduta, vale a dire alla sorgente delle onde, si trova un qualunque oggetto galleggiante, si osserva che quest'oggetto oscilla, sale e scende periodicamente; si osserva anche che l'onda, l'oscillazione della superficie del liquido, si propaga dalla sorgente in tutte le direzioni colla stessa velocità: le "onde" sono, infatti, circolari. Se ora fissiamo l'attenzione sul corpo galleggiante, vedremo l'onda che passa e si propaga, ma il corpo oscilla rimanendo fermo nella stessa posizione media: ciò che si propaga è l'oscillazione, non l'acqua.

•• Se guardiamo la fig. 62, vediamo un piano P che può rappresentare la superficie dell'acqua; il piano V è il piano in cui si verificano le oscillazioni della superficie dell'acqua; D è la direzione di propagazione dell'onda; E è lo spostamento della superficie, rispetto alla posizione di riposo, in un dato istante; E₀ è il valor massimo dello spostamento, detto **ampiezza** dell'onda. Il piano V della figura può rappresentare un diagramma cartesiano; se l'asse D (ascisse) rappresenta il tempo che passa, allora la curva rappresenta il movimento della superficie in un dato punto dello spazio; se D invece rappresenta lo spazio, cioè le distanze crescenti dalla sorgente, la curva rappresenta, in un dato istante, la posizione della superficie dell'acqua lungo una direzione di propagazione. ••

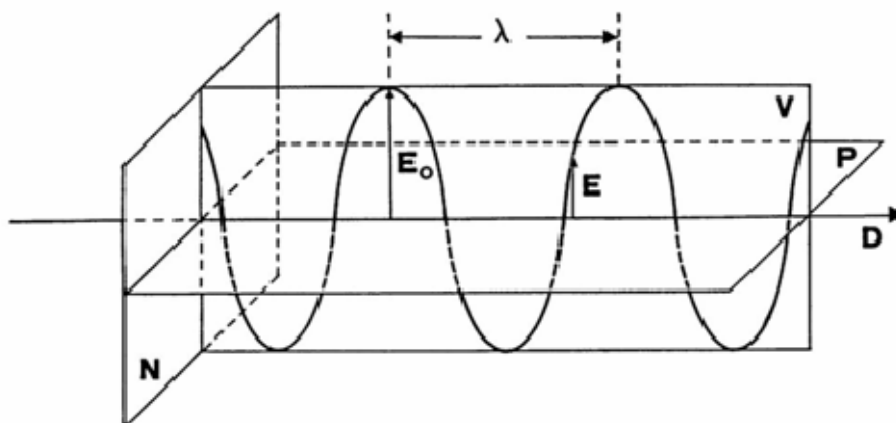


Fig. 62 - Schema di un'oscillazione non smorzata con andamento "sinusoidale". Spiegazione nel testo.

Dalla fig. 62, supponendo che l'onda si propaghi nella direzione D, è chiaro che due "creste" dell'onda, due punti equivalenti (in questo caso, di massimo spostamento verso l'alto) sono distanti della lunghezza λ , in cui il simbolo λ ²⁹ indica la **lunghezza d'onda**. Il tempo impiegato dall'onda a percorrere la lunghezza λ è il "periodo" sopra definito.

Indicando con T il periodo (un tempo), con ν la frequenza³⁰ (il numero di periodi che stanno in un secondo), con λ la lunghezza d'onda (una lunghezza), con V la velocità di propagazione dell'onda, cioè lo spazio percorso nell'unità di tempo, si può intuire che:

$$\nu = 1/T = V/\lambda \quad (1) \quad \lambda = V/\nu = V \cdot T \quad (2) \quad V = \lambda \cdot \nu \quad (3)$$

Dalla (2) e dalla (3) si vede che frequenza (ν) e lunghezza d'onda (λ) sono inversamente proporzionali: al crescere dell'una decresce l'altra. Si suppone che, per un dato tipo di onda ed un dato materiale³¹, la velocità V sia costante: $V = \text{cost}$.

Esaminiamo ora un altro tipo di onde, quelle acustiche, i "suoni". Si tratta ancora di onde che consistono nello spostamento di materia (i suoni si propagano nei gas, nei liquidi o nei solidi, ma non nel vuoto) ma, invece dell'altezza della superficie dell'acqua, ciò che varia, che oscilla, è la pressione del mezzo. Per rendersene conto, basta collegare un altoparlante ad un generatore di segnali acustici, tramite un amplificatore³²: sfiorando colle dita la membrana dell'altoparlante, si sentirà una rapida successione di urti; se il volume è sufficiente, si potrà far vibrare un foglio di carta posto in prossimità dell'altoparlante. Perciò l'aria circostante viene compressa e decompressa periodicamente. Ciò che si propaga intorno non è una corrente d'aria, ma una successione d'onde di pressione.

Così la fig. 62 può rappresentare la variazione della pressione nel tempo, in un dato punto dello spazio, oppure la distribuzione della pressione nello spazio (lungo la direzione di

²⁸ In verità, quest'onda consiste in uno spostamento di materia (acqua), non nella variazione di un campo elettromagnetico come nel caso delle onde elettromagnetiche, ma il paragone calza ugualmente.

²⁹ λ è la lettera ℓ minuscola dell'alfabeto greco o "lambda".

³⁰ ν è la lettera n minuscola dell'alfabeto greco o "nu".

³¹ Il materiale in cui si propaga un'onda è detto "mezzo".

³² La frequenza sia fra 10 e 200 Hz, l'ampiezza sufficiente a far vibrare di qualche decimo di mm il cono dell'altoparlante.

propagazione) in un dato istante.

Ma c'è una differenza: le onde sulla superficie dell'acqua sono **trasversali**, cioè la superficie dell'acqua si sposta su e giù mentre l'onda si propaga orizzontalmente; invece, nel caso delle onde sonore, l'aria (o comunque il "mezzo") oscilla avanti e indietro, cioè lungo la stessa direzione di propagazione. Si dice che le onde sonore sono **longitudinali**. Per il resto, si applicano ai suoni gli stessi concetti di periodo, frequenza, lunghezza d'onda e velocità di propagazione. La frequenza ν dei suoni "udibili" (che un orecchio sano mediamente percepisce) va da 20 a 15'000 Hz circa; la velocità di propagazione (V) nell'aria in condizioni normali di temperatura e pressione è di circa 340 m al secondo; la lunghezza d'onda va da 17 m (20 Hz) a 2,3 cm (a 15'000 Hz).

Ma ora dobbiamo porci un problema: variando la frequenza di un suono, cosa succede? Ovviamente varia la λ (formula (2)), ma ciò ci fa percepire il suono più "acuto", più "alto" (maggiore frequenza) oppure più "grave", più "basso" (minore frequenza); dunque la frequenza determina l'**altezza** dei suoni; un parametro fisico (ν) influisce su una percezione (altezza dei suoni).

E torniamo alle onde elettromagnetiche, quelle in cui oscillano insieme un campo elettrico ed uno magnetico. Si tratta di onde trasversali, come dimostrano certe osservazioni³³, di lunghezza d'onda e di frequenza assai variabili. Poiché frequenza e lunghezza d'onda variano entro limiti assai ampi (in teoria, da 0 all'infinito), occorre dividere le onde elettromagnetiche in tante "gamme" o "bande"³⁴ con proprietà ed interesse pratico assai diversi. La tavola alla pagina seguente illustra l'intero **spettro** delle radiazioni elettro-magnetiche. Per spettro s'intende una successione di onde dello stesso tipo, con frequenza variabile da un minimo ad un massimo.

• Si noti che, nella tavola, le colonne che indicano la frequenza, la lunghezza d'onda, ecc. sono disegnate in scala logaritmica, e cioè ognuna delle caselle di altezza costante non corrisponde ad intervalli unitari (1, 2, 3, 4, ecc.) ma a potenze di 10 (es. $10^1 = 10$; $10^2 = 100$; $10^3 = 1'000$; $10^4 = 10'000$; $10^5 = 100'000$; $10^6 = 1'000'000$, ecc.). In altre parole, una data casella indica valori di frequenza o lunghezza d'onda pari a quelli delle caselle contigue moltiplicati o divisi per 10.

• Per le frequenze, come si fa per altre grandezze, si usano i multipli:

Kilo (K) pari a 1'000 (10^3); per es. 1 KHz = 1'000 Hz.

Mega (M) pari a un milione (10^6). 1 Mz = 1'000'000 Hz.

Giga (G) pari ad un miliardo (10^9).

Tera (T) pari a 1'000 miliardi (10^{12}).

• Per le lunghezze si sono usati i sottomultipli:

milli (m) pari ad un millesimo = $0,001 = 1 / 10^3 = 10^{-3}$; es.: 1 mm = 0,001 m.

micro (μ) pari ad un milionesimo = $1 / 10^6 = 10^{-6}$

nano (n) pari ad un miliardesimo = 10^{-9}

pico (p) pari al millesimo di miliardesimo = 10^{-12} .

• Applicati al metro (m), questi sottomultipli portano a:

millimetro = mm (millesimo di m = $0'001 \text{ m} = 10^{-3} \text{ m}$)

micrometro o micron = μm o μ (millesimo di mm = milionesimo di metro = 10^{-6} m)

nanometro = nm = milionesimo di mm (= miliardesimo di m = 10^{-9} m)

picometro = pm = miliardesimo di mm = 10^{-12} m

Per frequenze molto basse, al di sotto di 10 KHz, non si parla normalmente di onde, poiché la loro trasmissione è molto debole; si tratta di campi elettromagnetici generati da correnti alternate a frequenza "acustica", come le correnti usate negli impianti acustici, nelle reti di distribuzione dell'energia elettrica, in molte macchine elettriche, ecc.

Per frequenze maggiori (10 o più KHz, fino a 100'000 MHz) si può parlare di **radio-onde** nel senso che tali onde sono utilizzabili per trasmissioni di qualche genere. La loro lunghezza d'onda è relativamente grande, sempre superiore ad 1 mm. Nelle bande "radio", le onde a lunghezza d'onda minore (micro-onde) hanno applicazioni anche in medicina, nella tecnologia radar, ecc.; esse sono facilmente concentrabili in fasci stretti, e ciò permette la

³³ i fenomeni di polarizzazione, la diffusione della luce nei gas, ecc.

³⁴ Per "banda" s'intende una porzione più o meno larga dello spettro, in cui l'intensità della radiazione può variare in funzione della lunghezza d'onda.

direttività dei sistemi di rilevamento radar o il riscaldamento localizzato di organi nella Marconi-terapia. In cucina, i forni “a micro-onde” sfruttano analoghe radiazioni per riscaldare e per cuocere cibi e bevande.

Al di sotto di 1 mm^{35} si parla di **infrarosso** (IR). Queste onde possono ancora essere usate come mezzi di trasmissione (sistemi antifurto, telecomandi, ecc.), ma il loro effetto è essenzialmente termico, nel senso che provocano il riscaldamento del corpo su cui cadono³⁶. Non hanno apprezzabili effetti chimici. Possono attraversare alcuni corpi opachi alla luce, come del resto fanno anche le radio-onde³⁷.

A questo punto, le lunghezze d'onda divengono assai piccole: la banda IR si prolunga al di sotto del millesimo di mm e precisamente fino a circa $0,0008\text{ mm} = 0,8\text{ }\mu\text{m} = 800\text{ nm}$.

Al di sotto di $0,8$ o $0,75\text{ }\mu$ e fino a $0,4\text{ }\mu$, le radiazioni elettro-magnetiche producono un effetto percepibile da parte dell'occhio umano sano; si parla di radiazioni “**ottiche**” (il termine “visibili” è improprio poiché una radiazione o uno spettro non sono di per sé “visibili” o “luminosi”: essi producono solo un effetto ottico, cioè una reazione fisiologica nell'occhio umano).

Quindi lo spettro ottico, la banda di radiazioni elettro-magnetiche capaci di darci la sensazione di “luce”, comprende onde elettromagnetiche con lunghezza d'onda compresa fra circa $0,4$ e $0,75\text{ }\mu$. All'interno di questo particolare spettro, molto ristretto in confronto all'intero spettro elettromagnetico, il nostro occhio ci mostra le differenze di lunghezza d'onda come differenze di colore; ricordiamo che, nello spettro delle onde elastiche, il nostro orecchio ci fa percepire le differenze di lunghezza d'onda come differenze di “altezza” dei suoni.

Con le lunghezze d'onda maggiori, il nostro occhio ci dà la sensazione di rosso; da $0,65$ a $0,6\text{ }\mu$ circa si passa all'arancio ed al giallo; fra $0,6$ e $0,5\text{ }\mu$ si passa dal verde al blu; fino al limite inferiore di circa $0,4\text{ }\mu$ si passa al viola sempre più scuro. Di sotto a $0,4\text{ }\mu$ il nostro occhio mediamente non viene più stimolato.

Le onde di lunghezza d'onda ancora minore (dette **ultraviolette** o UV, poiché si trovano al di là del viola nello spettro generale), hanno essenzialmente effetti chimici e biologici, possono suscitare una fluorescenza visibile (articolo O 10) ed impressionano le emulsioni fotografiche. Sono prodotte da lampade speciali (in misura minima dalle normali lampade ad incandescenza), dal sole e da altri corpi celesti, ecc.

Per lunghezze d'onda inferiori a circa 10 nm si parla di “raggi X” (o Röntgen, dal nome dello scopritore), ben noti per le loro applicazioni nella diagnosi medica, con forti effetti chimici e biologici.

Vi sono anche radiazioni più “corte”, come i raggi γ (“gamma”, lettera g minuscola dell'alfabeto greco), che vengono prodotti da salti energetici del nucleo atomico. Queste radiazioni sono molto penetranti; per esse, come per i raggi X, i tessuti molli degli organismi sono trasparenti. Si formano nel decadimento dei nuclei radioattivi, in certi corpi celesti, ecc. ••

³⁵ I limiti fra una banda e l'altra non sono universalmente condivisi; riferendosi alle sorgenti disponibili, alle tecniche di manipolazione e di rivelazione, molti autori indicano limiti diversi.

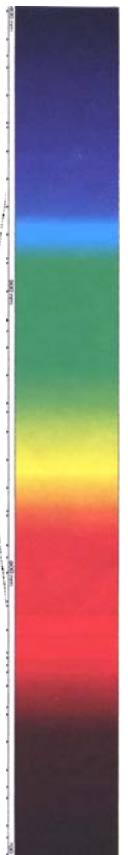
³⁶ In realtà, qualunque radiazione elettro-magnetica, quando è assorbita da un corpo, viene più o meno trasformata in calore.

³⁷ L'infrarosso è emesso da tutti i corpi “caldi” (con temperatura superiore allo zero assoluto). Un animale omeotermo ($35 - 40^\circ\text{ C}$) emette su una lunghezza d'onda intorno a $10\text{ }\mu\text{m}$.

Fig. 63

LE RADIAZIONI ELETTROMAGNETICHE

NOME	LUNGHEZZA D'ONDA (λ)	FREQUENZA (ν)	ENERGIA	SORGENTI ed APPLICAZIONI
RAGGI COSMICI o MILLIKAN	10^{-14} m = 10^{-2} pm		10^8 eV	Corpi celesti fuori dal sistema solare
RAGGI GAMMA (γ)	10^{-13} m	10^{22} Hz = 10^{10} THz		Transizioni nucleari in corpi celesti, atomi radioattivi e radioisotopi.
	10^{-12} m			(Medicina nucleare) ("Bomba" al Cobalto)
	10^{-11} m = 10^{-2} nm		10^5 eV	
RAGGI X o RÖNTGEN	10^{-10} m	10^{19} Hz = 10^7 THz		Corpi celesti; tubi speciali "a raggi X"
	10^{-9} m			(Diagnostica a raggi X, Dermoterapia a raggi X)
	10^{-8} m = 10 nm		10^2 eV	
ULTRA-VIOLETTA (UV)	10^{-7} m = 100 nm	10^{16} Hz = 10^4 THz	10 eV	UV Estremo (10-200 nm) (Lampade speciali)
SPETTRO OTTICO (VIS)	10^{-6} m = 1 μ		1 eV	UV Lontano (200-300 nm) UV Vicino (300-400 nm) "OTTICO" (400-750 nm)
INFRAROSSO (IR)	10^{-5} m = 10 μ	10^{14} Hz = 100 THz		NIR = Near InfraRed (0,8 - 3 μ) (Corpi caldi)
	10^{-4} m = 100 μ	da 0,3 a 10 THz = "Terahertz radiation" Da 30 μ ad 1 mm		MIR = Mid InfraRed (3 - 30 μ) (Corpi caldi)
	10^{-3} m = 1 mm		10^{-3} eV	FIR = Far InfraRed (30 μ - 1 mm) (Corpi caldi)
MICRO-ONDE	10^{-2} m = 1 cm	10^{11} Hz = 10^5 MHz	10^{-4} eV	(Radar)
	10^{-1} m = 10 cm	10^{10} Hz = 10^4 MHz	10^{-5} eV	(Marconi terapia)
	10^0 m = 1 m	10^9 Hz = 10^3 MHz	10^{-6} eV	Trasmittenti TV
ONDE ULTRA-CORTE	10^1 m = 10 m	10^8 Hz = 100 MHz	10^{-7} eV	Trasmittenti Radio FM
ONDE CORTE	10^2 m = 100 m	10^7 Hz = 10 MHz	10^{-8} eV	Trasmittenti Radio commerciali e militari in AM (10 - 200 m)
ONDE MEDIE	10^3 m - 1 Km	10^6 Hz = 1 MHz	10^{-9} eV	Onde Medie commerciali fra 200 e 600 m in AM (1'500 - 500 KHz)
ONDE LUNGHE	10^4 m = 10 Km	10^5 Hz = 100 KHz		Onde Lunghe commerciali fra 600 e 3'000 m in AM (500 - 100 KHz)
		10^4 Hz = 10 KHz		



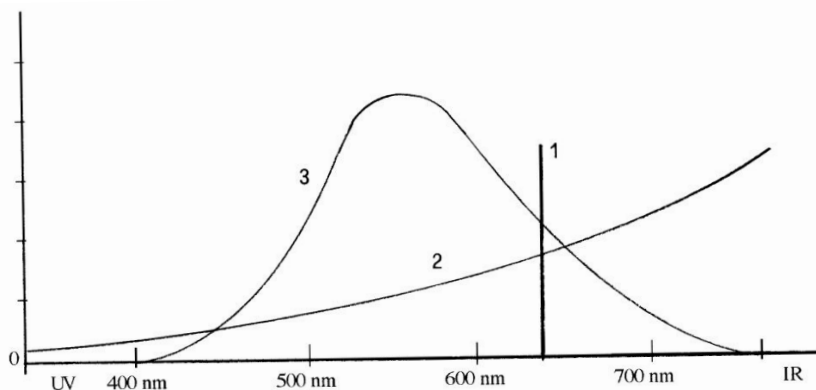
A questo punto, è chiara la posizione e l'estensione dello spettro ottico nel generale spettro delle onde elettromagnetiche: una frazione molto piccola. All'interno dello spettro ottico supponiamo ora di isolare un fascio di radiazione dotata di una lunghezza d'onda unica, vale a dire "monocromatica" (dal greco: "Di un solo colore"); in realtà, qualunque sorgente reale produce radiazioni comprese in uno spettro, per quanto ristretto; ma con opportuni accorgimenti si ottiene una radiazione che si può considerare monocromatica sotto molti aspetti.

Ebbene, variando la lunghezza d'onda entro i limiti dello spettro ottico, il nostro occhio ci dà una sensazione di vario colore, secondo l'ordine sopra riassunto, e tali colori si possono chiamare **puri**. Ma il nostro occhio, nonostante le sue elevate prestazioni, è un cattivo giudice della **composizione spettrale** di una radiazione ottica. Chiariamoci: in un diagramma cartesiano come quello di fig. 64, si possono indicare in ascissa le lunghezze d'onda ed in ordinata le intensità di un fascio ottico per ogni valore di λ . In tale diagramma, una radiazione monocromatica sarebbe indicata da un segmento verticale (curva 1 in fig. 64), di altezza proporzionale all'intensità. La curva 2 rappresenta l'emissione di una lampadina ad incandescenza, che ha un massimo di emissione nell'infrarosso. Si vede bene che tale sorgente emette con tutti i colori dello spettro ottico, in misura maggiore o minore; eppure essa ci appare "**bianca**", o almeno giallognola. Ciò avviene con altre sorgenti artificiali, con le fiamme, il sole ed in genere le stelle, ecc. Dunque la sensazione di bianco è falsa, poiché ci nasconde i singoli colori puri, come sopra definiti. Ma c'è di più: vi sono coppie di colori più o meno "puri" che, mescolati assieme, producono la sensazione di bianco: per es. rosso e verde-azzurro, oppure viola e giallo: sono i cosiddetti **colori complementari**. Ancora una volta, l'occhio non c'indica la composizione spettrale di una radiazione composta e le nostre sensazioni sono ingannevoli.

Del resto, molti sistemi di riproduzione dei colori (stampa tipografica in tricromia, fotografia a colori, televisione a colori) ottengono la riproduzione di quasi tutti i colori, compreso il bianco, con fedeltà accettabile, utilizzando tre colori **fondamentali** e mescolandoli in rapporto opportuno. Le deficienze di questi sistemi, e le differenze fra l'uno e l'altro, stanno soprattutto nella difficoltà di definire e riprodurre i colori "fondamentali" secondo una curva spettrale standardizzata. La riproduzione di tutti i colori e del bianco mediante la somma ponderata di tre colori fondamentali si chiama **sintesi additiva**.

Fig. 64

Distribuzione spettrale di una lampada ad incandescenza (2) e di un laser ad He Ne (1). La curva (3) dà la "sensibilità spettrale" dell'occhio medio in visione diurna (fotopica); con scarsa illuminazione, la risposta dell'occhio è spostata verso le minori lunghezze d'onda, e si chiama "scotopica".



Se dunque noi disponiamo della radiazione di una sorgente "bianca" (sole, fiamme, lampade ad incandescenza, ecc.), noi possiamo decomporla nei suoi colori puri con un opportuno strumento: lo spettroscopio. Più semplicemente, si può fare ciò, con qualche limitazione, usando un fascio ristretto proveniente da una sorgente lontana (per es. un fascio di sole attraverso una fessura nelle imposte) e scomponendolo con un prisma in vetro. Ne abbiamo parlato sopra, e qui entriamo in qualche dettaglio.

Si veda la fig. 65: il raggio incidente (I) attraversa una prima volta la faccia di sinistra del prisma, da aria a vetro, poi emerge dalla faccia destra, da vetro ad aria. Tutte le volte che un fascio di radiazione attraversa la superficie di separazione fra due materiali ("mezzi") diversi e trasparenti, avviene la "rifrazione" ed il fascio³⁸ viene deviato. Questa deviazione avviene secondo leggi note e dipende da una proprietà dei mezzi trasparenti, detta **indice di rifrazione (n)**; questo **n** è pari a poco più di 1,00 per l'aria ed i gas leggeri, è 1,5 / 1,6 per i normali vetri, è 1,33 per l'acqua, ecc. Tutte cose che abbiamo già detto nei precedenti articoli.

³⁸ Tranne il caso che il fascio incida perpendicolarmente sulla superficie.

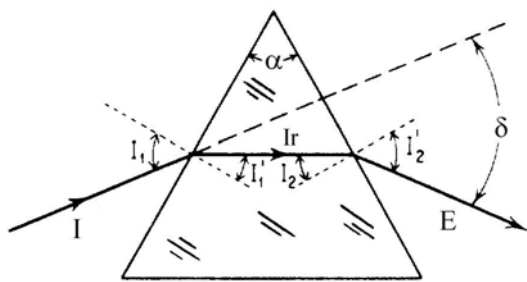


Fig. 65 - Deviazione operata da un prisma

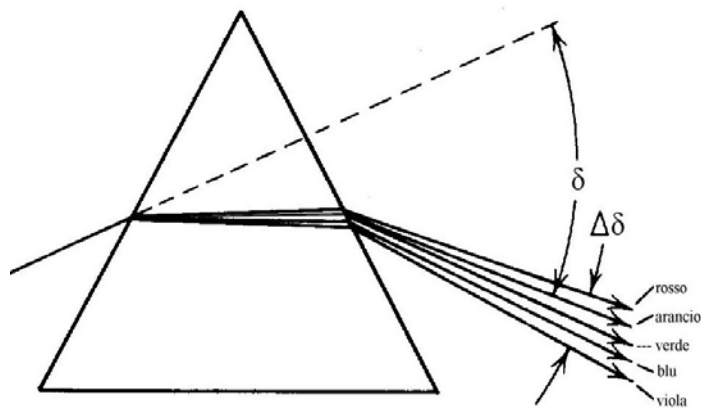


Fig. 66 - Dispersione di un fascio di luce bianca

Si può dimostrare che, emergendo dal prisma di fig. 65, il raggio incidente è stato deviato due volte dalla stessa parte e la **deviazione** totale è indicata con δ ³⁹. Questo schema è però rigoroso solo se il fascio incidente è formato da onde della stessa lunghezza d'onda (monocromatico). Con una radiazione mista, in particolare bianca, vale a dire che si estende per tutto lo spettro ottico, l'angolo δ non è unico, ma dipende dalla lunghezza d'onda: fra valore massimo e minimo di δ vi è un angolo di **dispersione** ($\Delta\delta$ in fig. 66); in alte parole, il fascio emergente è **disperso**, cioè allargato a ventaglio e, proiettandolo su uno schermo, si osserva la normale serie dei colori dell'arcobaleno: rosso (il meno deviato), arancio, giallo, verde, blu, viola. Prima del rosso, vi sarà normalmente una regione non visibile occupata dalla radiazione infrarossa, rivelabile con opportuna fotocellula⁴⁰. Oltre il viola vi sarà un fascio ultravioletto, anch'esso non visibile ma rivelabile con una lastra fotografica, con un corpo fluorescente⁴¹, ecc. Indicazioni pratiche su come osservare lo "spettro" ottico sono già state date.

Per rivelare le componenti UV ed IR di solito presenti in una sorgente bianca si può anche utilizzare il fascio diretto di una lampada interponendo un opportuno filtro, trasparente solo per la banda desiderata. Per l'ultravioletto "prossimo" si può usare il vetro all'ossido di cobalto (per es. il vetro Schott UG 1); per l'infrarosso va bene il filtro in gelatina Kodak Wratten n° 97. Nel fascio che ha traversato tali filtri, l'occhio non percepisce più la radiazione della sorgente bianca, poiché lo spettro ottico è stato assorbito dal filtro. Solo con i sensori citati sopra si può dimostrare la presenza di radiazione non ottica, UV od IR (a volte chiamata impropriamente "luce nera")⁴².

Una volta ottenuta la decomposizione della radiazione bianca nei suoi colori elementari (colori spettrali puri), si può anche eseguire il passaggio inverso, ricomponendo la luce bianca per sovrapposizione di tutti i colori puri dello spettro.

Il metodo più classico è quello del "disco di Newton": un disco diviso in settori circolari, di solito sette, colorati secondo le varie parti dello spettro della luce bianca. Ruotando il disco con sufficiente velocità, la **persistenza** delle immagini retiniche fa sì che l'impressione data da uno dei settori permanga per un tempo sufficiente (mediamente 1 / 30 di secondo) perché si sommino le impressioni date dai settori di tutti gli altri colori. Il "mescolamento" dei colori puri avviene dunque nella retina e l'occhio ha l'impressione che il disco rotante sia bianco. In pratica, poiché i colori a stampa non possono avere la purezza dei colori dello spettro, il bianco così ottenuto sarà piuttosto "sporco".

Più fedele è il bianco ottenuto concentrando l'intero spettro (ottenuto per dispersione da un prisma) per mezzo di una lente convergente, come nella fig. 67: da sinistra proviene un fascio collimato di luce bianca (I); il prisma P lo disperde e forma uno spettro nel piano di L; qui si

³⁹ La lettera δ (delta minuscola) è la "d" dell'alfabeto greco.

⁴⁰ Meglio usare una fotocellula al silicio collegata ad un microamperometro, ma va bene anche una fotoresistenza (LDR) collegata ad un ohmmetro. Con queste fotocellule è in genere possibile rivelare anche la componente UV dello spettro, benché la loro sensibilità sia massima nell'IR.

⁴¹ Può bastare un cartoncino grigio, non sbiancato, colorato con un pennarello "evidenziatore" giallo o verde. Vedi l'articolo O10.

⁴² È bene eseguire questa prova con una lampada a fascio concentrato, un "faretto", una lampada da microscopia, ecc.

trova una lente convergente di sufficiente potenza che fa convergere in F i singoli fasci corrispondenti agli infiniti colori puri dello spettro⁴³. In questo caso, sono le stesse radiazioni costituenti lo spettro a sovrapporsi in F ; se il bianco ricomposto in F non è identico a quello del fascio incidente I , ciò può dipendere da un'imperfetta trasparenza dei vetri, dalle aberrazioni cromatiche della lente L ⁴⁴ e simili.

Come realizzare questo dispositivo con mezzi semplici è già stato detto (fig. 60 e 61).

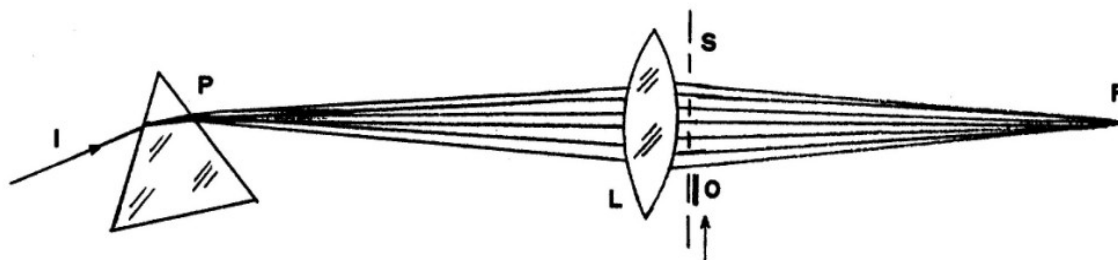


Fig. 67 - Ricomposizione della luce bianca da un fascio disperso

A questo punto, con una disposizione come quella di fig. 67, è possibile creare i **colori di sottrazione**: si intende con ciò il colore misto che si ottiene sottraendo dalla luce bianca una qualche regione dello spettro ottico. Nel piano S , a ridosso della lente L , si trova l'intero spettro, cioè il fascio bianco I disperso dal prisma P ; se interponiamo in S un qualunque corpo opaco O (largo circa $1/5$ o $1/10$ dell'intero spettro), il fascio bianco di sintesi proiettato in F sarà privato della banda spettrale obliterata da O , quindi non sarà più bianco ma colorato; il suo colore per altro non potrà mai essere un colore spettrale puro, bensì un colore misto, pari ad un bianco privato di qualche sua porzione. Sono interessanti a questo proposito i **colori di sottrazione** usati in alcuni sistemi di riproduzione delle immagini a colori: si possono ottenere (quasi) tutti i colori mescolando opportunamente tre colori di sottrazione fondamentali: il **Cyan**, il **Magenta**, il **Giallo di sottrazione**. Ognuno di questi è derivato da un fascio bianco, privato di uno dei tre colori fondamentali per la sintesi additiva sopra citati: il Cyan deriva da un bianco privato della banda "rossa" ("bianco meno rosso", quindi una somma di giallo-verde-blu-viola); il Magenta è un bianco privato della regione "verde" ("bianco meno verde", quindi una somma di rosso-arancio-blu-viola) ed il Giallo di sottrazione è un bianco privato del blu-viola ("meno viola", quindi una somma di rosso-giallo-verde).

Si noti che è facile definire un colore puro come porzione dello spettro di larghezza infinitesimale; basta indicare la lunghezza d'onda λ . Più difficile è definire un colore fondamentale, di addizione o di sottrazione, poiché si tratta di bande al cui interno va definita una curva come quella di fig. 64, che indica l'energia contenuta in un fascio per ogni valore di lunghezza d'onda. Per es., dire che il Cyan è un colore misto ottenuto da un "bianco meno rosso" è del tutto generico: bisogna indicare la larghezza di questa banda del rosso e, all'interno di questa, come varia l'intensità in funzione di λ . In fig. 68 sono indicate tre curve che possono tutte corrispondere al Cyan, ma con diversa tonalità e diversa saturazione.

⁴³ Si noti che F non è il fuoco della lente; è solo l'immagine coniugata della sorgente virtuale da cui provengono i fasci dispersi, e che si trova molto vicino al prisma.

⁴⁴ a causa delle quali i fasci monocromatici dello spettro non vengono fatti convergere esattamente nello stesso punto.

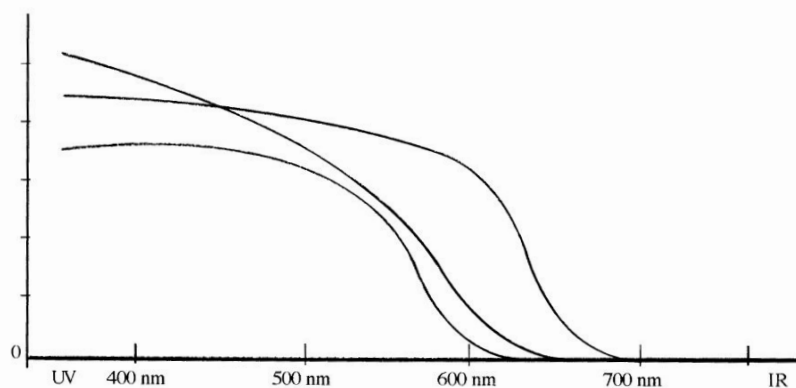


Fig. 68 - Curve spettrali tutte corrispondenti al colore di sottrazione "Cyan"

Molti dei concetti sopra esposti (cfr. anche la fig. 67) possono essere illustrati disponendo di un proiettore da diapositive e di pochi componenti ottici disposti secondo lo schema di quella figura e delle figure 60 e 61.

Nel proiettore Pr si inserisce una diapositiva contenente una fenditura di circa 1×7 mm; davanti all'obiettivo (a 2 o 3 cm) si pone un prisma retto o equilatero (vedi O2). Alla distanza di almeno 50 cm si avrà su uno schermo bianco il dispiegarsi dello spettro ottico. Si dovrà focheggiare l'obiettivo del proiettore fino ad ottenere la maggior saturazione dei colori. È bene oscurare l'ambiente. Spostando il prisma lateralmente rispetto al proiettore, si può far sì che una parte del fascio passi di lato al prisma e formi sullo schermo anche un'immagine bianca, non dispersa, della fenditura (tornare alla fig.58 A, If).

Come si è detto sopra, una fotocellula collegata ad un tester, posta oltre la regione rossa dello spettro, rivelerà l'IR; una cellula foto-voltaica al Selenio non si presta bene, poiché ha il massimo di sensibilità nel giallo; più adatta è una cellula fotovoltaica al Silicio o una foto-resistenza (LDR)⁴⁵, che hanno il massimo di sensibilità nell'arancio-rosso, ma rivelano la presenza di radiazione anche oltre il rosso estremo. Con gli stessi sensori si può rivelare l'IR prodotto da un faretto IR o da una lampada ad incandescenza seguita da un filtro IR (per es. il Kodak 97).

Se si cerca di rivelare la porzione di spettro UV oltre il limite (violetto) dello spettro ottico si dovrà fare i conti con la scarsa emissione UV delle lampade ad incandescenza, ma si può avere una risposta con un buon tester riparando la cellula dalla luce diffusa

Per avere la ricomposizione della luce bianca (fig. 67), ad una trentina di cm dal prisma va disposta la lente d'ingrandimento L leggermente disassata ed inclinata⁴⁶, in modo che l'immagine che si forma in F sia il più possibile bianca.

A questo punto, subito dopo la lente si disponga un cartoncino largo pochi mm (O in fig. 67), e spostandolo per tutta la lunghezza dello spettro si ha in F un fascio concentrato dotato di un colore di sottrazione, che varia al variare della posizione del cartoncino (è facile ottenere la serie Cyan - Magenta - Giallo di sottrazione).

Se in O si pone un cartoncino con due fessure, si avrà in F la sovrapposizione di due bande spettrali e, spostando opportunamente le fessure, le bande possono corrispondere a coppie di colori complementari (verde/blu e rosso; viola e giallo/arancio, per es.) e l'immagine in F sarà ancora bianca. Con un cartoncino a tre fessure si possono isolare tre fasci: rosso - verde - e blu/viola (colori fondamentali, di addizione); il fascio concentrato in F sarà di nuovo bianco (o quasi). La larghezza e la distanza delle tre strisce di cartoncino diventeranno sempre più critiche ed il colore risultante in F sarà difficilmente un bianco puro. Ottenere i colori di sottrazione con una sola strisciolina di cartone è facile; ottenere i colori complementari con due o tre diverse fenditure diventa assai più delicato.

⁴⁵ Le cellule foto-voltaiche vanno collegate al tester disposto per la misura di tensioni (fondo scala 1 V cc o anche meno); per le foto-resistenze (LDR = Light Dependent Resistor), il tester deve essere disposto per la misura di resistenze elevate.

⁴⁶ Intendiamo che, rispetto alla linea di congiunzione prisma-spettro, la lente dovrà essere leggermente decentrata ed inclinata.