

Le onde meccaniche e le onde elettromagnetiche

Che cos'è un'onda?

Il vento che passa sopra un campo di frumento (come nelle prime inquadrature del film "Il Gladiatore") produce un'onda che si propaga attraverso l'intero campo. Le piante restano al proprio posto, oscillando attorno alla base del gambo, ma l'onda *viaggia*.

Tutt*, spero, avrete visto le **onde circolari** che si propagano attorno al punto in cui avete lanciato un sasso nell'acqua *ferma*. Il moto dell'onda è del tutto diverso dal moto dei singoli volumetti d'acqua i quali si muovono su e giù (o meglio ruotano attorno ad un centro posto sotto il pelo dell'acqua): il moto dell'onda, che vediamo propagarsi, è quello di uno stato della materia e non di materia stessa.

Per comprendere meglio cosa sia un'onda facciamo un *esperimento ideale* supponendo che nel centro di una stanza *sferica*, piena di una sostanza colorata (scegli tu il colore) un po' più densa dell'aria, ma con densità costante in tutta la stanza, vi sia una piccola sfera.

Ad un tratto la sfera comincia a *pulsare ritmicamente*, dilatandosi e contraendosi alternatamente. Come un piccolo cuore sferico. Che cosa accadrà nel mezzo circostante?

Quando **la sfera si dilata**, le particelle del mezzo nelle immediate vicinanze della sfera vengono compresse in gusci sferici la cui densità è superiore a quella degli strati circostanti.

Quando **la sfera si contrae**, particelle del mezzo nelle immediate vicinanze della sfera si dilatano in gusci sferici la cui densità è inferiore a quella degli strati circostanti.

Queste variazioni di densità si propagano attraverso l'intero mezzo: si trasmettono da un guscio sferico al guscio successivo.

Vengono così ad alternarsi strati più densi e strati meno densi alternati e successivi. In una sorta di *grande fisarmonica sferica!*

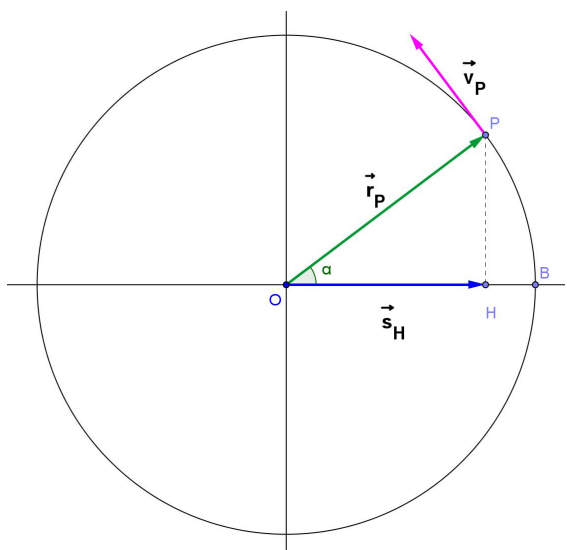
Il moto delle particelle costituenti il mezzo consiste soltanto di piccole vibrazioni, mentre **il moto generale è quello di un'onda sferica che si propaga.**

La novità essenziale è il **moto** di qualcosa che non è materia, bensì **energia**. Energia, che si muove propagandosi attraverso la materia.

DEF Un'onda è una **pulsazione** che si propaga trasportando **energia** ma non materia.

DEF Quando la pulsazione di cui sopra è un **moto armonico**, parliamo di **onda monocromatica** (il significato di questo aggettivo lo comprenderai più avanti).

Il moto armonico



Il moto armonico è molto importante in fisica perché è alla base della modellizzazione di un grande ventaglio di fenomeni. Descriverlo non è semplicissimo: occorre partire da un moto più semplice, il moto **circolare uniforme**; come mostrato in questo filmato:

http://www.youtube.com/watch?v=si1i4_UcgLU

Dato un punto materiale **P** che si muove di **moto circolare uniforme** ($\omega_P = a/t = \text{cost}$), ciascuna delle sue proiezioni sugli assi cartesiani (in figura la proiezione **H** sull'adx), si muove di **moto armonico**.
Guarda il filmato al minuto 2' 12".

Il vettore s_H è il vettore *posizione* del punto materiale **H**; r_P è il vettore *posizione* del punto materiale **P**; $|r_P| = A$.

Osservando il triangolo rettangolo **PHO**, si ricava: $s_H = A \cdot \cos \alpha$, dove $\omega = a/t \rightarrow a = \omega \cdot t$.

$s = A \cdot \cos(\omega \cdot t)$ è l'**equazione oraria** del moto del punto materiale **H** (perciò di un moto armonico), qualora all'istante $t=0$ **H** si trovi nella posizione del punto **B**(A;0), che corrisponde a $s_0=A$. Infatti, sostituendo il valore 0 al posto di t si ha:

$$s_0 = A \cdot \cos(\omega \cdot 0) = A \cdot \cos 0 = A \cdot 1 = A.$$

Se il moto del punto **H** cominciasse dalla posizione **O**(0;0), che corrisponde a $s_0=0$, l'equazione oraria dovrebbe essere $s=A \cdot \cos(\omega \cdot t + \pi/2)$. Infatti: $s_0 = A \cdot \cos(0 + \pi/2) = 0$.

Se il moto cominciasse nella posizione indicata in figura con **B₀**(b;0), l'equazione dovrebbe essere: $s=A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$.

Infatti, per $t=0$: $s_0 = A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) = A \cdot \cos(\varphi) = b$.

DEF L'angolo φ si chiama **angolo di fase**.

DEF L'**equazione oraria generica** di un moto armonico è pertanto: $s=A \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$.

Torniamo alle **onde**. Abbiamo detto che un'onda data dalla propagazione di un moto armonico si chiama **onda monocromatica**.

Come si *rappresenta graficamente* un'onda monocromatica? Attenzione: abbiamo due fenomeni fisici di cui tener conto: un'**oscillazione** e una **propagazione**. I due fenomeni si rappresentano su due grafici separati:

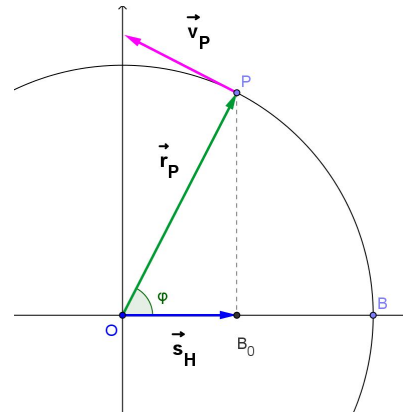


Grafico di un'oscillazione armonica ($x=x^*$, fissato: oscillazione in un punto).

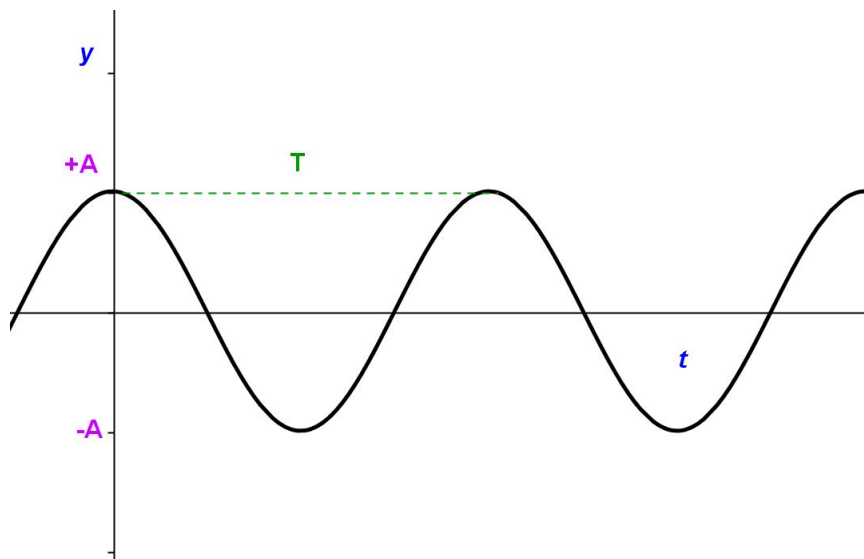
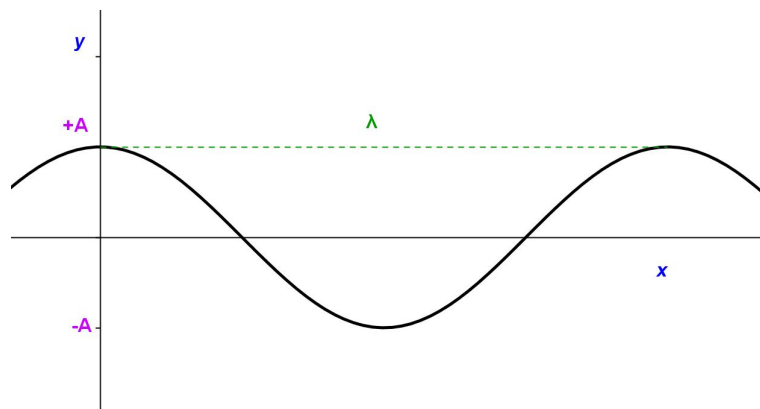


Grafico della propagazione di un'onda monocromatica trasversale ($t=t^*$, fissato: fotografia dell'onda in un istante)



I due grafici presentano delle **analogie** e delle **differenze**. Inoltre su di essi sono segnati dei simboli (**T** nel primo e **lambda** nel secondo) che rimandano a *grandezze fisiche* da definire.

Analogie: hanno la stessa ordinata massima: **A** (l'ampiezza dell'oscillazione – corrispondeva alla misura del raggio nella definizione di moto armonico – il punto massimo di distanza dal *punto di equilibrio* attorno al quale avviene l'oscillazione) e hanno la stessa forma: la propagazione di un'oscillazione armonica, infatti, se l'oscillazione è ortogonale alla direzione di propagazione, produce, istante per istante, un tipo di *configurazione sinusoidale*.

Grandezze caratteristiche di un'onda monocromatica

DEF La **lunghezza d'onda λ** , è la distanza che separa una **cresta** (punto di altezza massima¹) dall'altra nelle onde del mare (o su una corda) e un *punto di massima densità* dall'altro nell'esempio della sfera pulsante. Qualunque coppia di punti *in fase* sono distanti una lunghezza d'onda.

DEF La **frequenza f** è il numero di oscillazioni che avviene in un secondo (o il numero di *creste* che tagliano un certo traguardo in un secondo).

DEF Inverso della frequenza è il **periodo T** : il tempo impiegato a ciascuna oscillazione per completarsi (da A a -A e ritorno, per esempio)².

DEF La **velocità di propagazione** dell'onda: è il rapporto fra la lunghezza d'onda e il periodo o il prodotto fra lunghezza d'onda e frequenza. Dipende dal mezzo di propagazione.

Il concetto di onda si è mostrato assai fecondo in fisica, dicevamo. Per esempio la spiegazione dei **fenomeni acustici** è basata essenzialmente su tale concetto: un corpo vibrante, come una corda di violino, o la corda vocale di un interlocutore propaga nell'aria le sue vibrazioni che poi giungono al nostro orecchio e fanno vibrare il timpano e l'organo dell'udito decodifica tali vibrazioni in pacchetti d'informazione che vanno al nostro cervello (viaggiando come impulsi elettrici) e ci fanno percepire suoni, rumori, voci, ecc.

Modalità differenti per classificare le onde

Cosa distingue l'**onda** che si propaga su una **corda** (di violino, per esempio) dall'**onda** della **sfera pulsante**? Nel primo caso **direzione di propagazione** e **direzione di oscillazione** sono ortogonali. Nel secondo caso sono parallele.

DEF Le onde per le quali **direzione di oscillazione** del mezzo e **direzione di propagazione** dell'onda siano **parallele** si dicono **onde longitudinali**.

DEF Le onde per le quali **direzione di oscillazione** del mezzo e **direzione di propagazione** dell'onda siano **ortogonali** si dicono **onde trasversali**.

Le onde si possono propagare in un mezzo *unidimensionale*, come la corda del violino, in un mezzo *bidimensionale*, come una lastra metallica di spessore trascurabile, oppure nello spazio *tridimensionale*, come il suono nell'aria.

DEF Fra le onde che chiameremo per brevità *tridimensionali*, le superfici caratterizzate da una stessa *fase* dell'onda si chiamano **fronti d'onda**. Interessanti in particolare le onde con fronti d'onda *sferici* o *piani*; dette rispettivamente: **onde piane** e onde **sferiche**.

DEF Le rette perpendicolari ai fronti d'onda si chiamano **raggi**

A seconda del **tipo di perturbazione**, della **sorgente** che la produce, e delle caratteristiche della **propagazione**, si possono distinguere, poi, tipi particolari di onda. In particolare:

DEF Se un'onda nasce dall'oscillazione di un mezzo (solido o fluido) e necessita di un **mezzo** per propagarsi, si chiama **onda meccanica**.

DEF Se un'onda nasce da **cariche accelerate** e si può propagare anche nel **vuoto**, si chiama **onda elettromagnetica**.

¹ **DEF** Per il nostro discorso devi sapere anche che i punti di altezza minima si chiamano **ventri**.

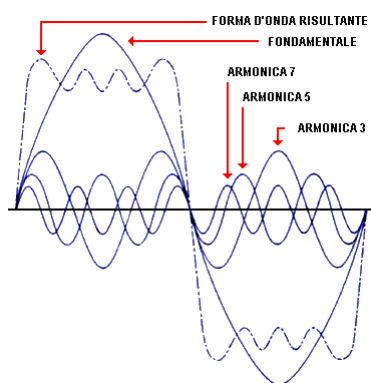
²Per capire questo concetto pensate ad un caso più concreto: il rapporto fra la **frequenza** con cui passa un **autobus** e l'intervallo di tempo fra il passaggio di un autobus e il successivo: il **periodo**.

Ci soffermeremo un poco, per quanto riguarda le *onde meccaniche*, a parlare delle **onde sonore** (tralasciando le **onde stazionarie**, che pure sono molto importanti) e, per quanto riguarda le *onde elettromagnetiche*, a occuparci della **luce**.

DEF Un'onda **meccanica monocromatica**, corrisponde a un **suono puro** (ES il suono di un diapason: <http://www.youtube.com/watch?v=YRv4POv5jh4>)

L' **ampiezza** dell'onda **A** determina il **volume** del suono,

La **frequenza** è legata all'**altezza** del suono (la **nota**).



Si dimostra che l'oscillazione corrispondente a ogni suono (o anche ruomore), può ottenersi come somma finita di onde monocromatiche (suoni puri o armoniche): **Teorema di Fourier**.

Un suono non puro avrà il grafico dell'oscillazione con una forma non sinusoidale (guarda il grafico dell'onda risultante nella figura a sinistra). A parità di frequenza, la **forma del grafico dell'oscillazione** corrisponde al **colore** del suono: al suo **timbro** (pensa a una stessa nota emessa da strumenti musicali differenti!).

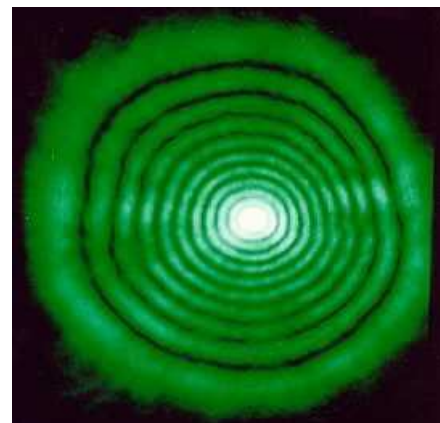
La luce è un'onda

Vorrei riprendere il discorso lasciato in sospeso riguardo l'**elettromagnetismo** e il *declino del programma meccanicista*. Perciò vi chiedo un piccolo atto di fiducia e v'invito a credere che, se invece di considerare che la luce si propaghi per raggi – come nella **teoria meccanicistica** – supponiamo si propaghi per **onde**, i fenomeni di cui abbiamo già parlato: *riflessione, rifrazione e dispersione* si spiegano ugualmente bene. Basta sostituire al *raggio luminoso* la **direzioe di propagazione** dell'onda. Sta di fatto che ai tempi di Newton e per oltre cento anni dopo di lui la maggior parte dei fisici preferì la teoria corpuscolare.

Andiamo all'esperimento *clou* che sovvertì questo stato di cose: prendiamo un raggio **laser** verde.

Pensiamo di farlo passare attraverso uno schermo in cui sia praticato un **forellino**. Cosa ti aspetti di vedere sulla parete dietro questo schermo? Se il forellino è "grande" vedrai, come ti aspetti, un puntino luminoso contornato da un'ombra piuttosto delineata (era questo un esperimento probante del fatto che la luce si propagasse per raggi).

Ma se riduci le dimensioni del forellino a, diciamo circa 10^{-6} m, ecco in figura quello che apparirà sul muro!



Questa figura testimonia che la luce **diffrange** e **interferisce**: due fenomeni peculiari delle onde e dei quali non abbiamo ancora parlato.

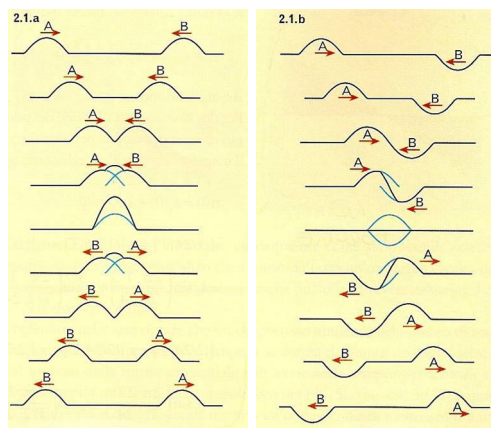
Troverai qui un'interessante e accurata presentazione del fenomeno, con esempi inerenti fenomeni naturali: <http://www.youtube.com/watch?v=-mNOW5OShMA&feature=related>

Il fenomeno in questione è inspiegabile servendosi della teoria corpuscolare della luce...

DEF Quando due (o più) onde di uguale frequenza si incontrano in una certa regione di spazio più in generale, in un mezzo, avviene il fenomeno dell'**interferenza**: le onde si **sommano** (*algebricamente*) punto per punto.

In particolare vi sono due tipi d'interferenza che ci interessano ai fini del nostro discorso: l'**interferenza costruttiva**, che si verifica quando le onde sono in fase (dando origine a un'onda che ha per ampiezza la somma delle ampiezze delle singole onde) e l'**interferenza distruttiva** che si verifica quando le onde sono in opposizione di fase (dando origine a un'onda di ampiezza nulla o, comunque, inferiore a quella delle onde che si incontrano).

Ecco rappresentate graficamente interferenza costruttiva e distruttiva.



DEF Quando un'onda incontra nel suo cammino un ostacolo o una fenditura di dimensioni confrontabili con la sua lunghezza d'onda, si verifica il fenomeno della **diffrazione**: il fronte d'onda cambia forma e così cambiano direzione le rette ad esso perpendicolari (raggi).

Questo fenomeno coinvolge, per esempio le **onde del mare** quando incontrano l'imboccatura di un porto piccolo, la **luce** che "gioca" con i capelli, un **suono** che giunge in classe, anche da posizioni improbabili, "arrocciandosi" attorno agli *stipiti delle porte*, ecc...

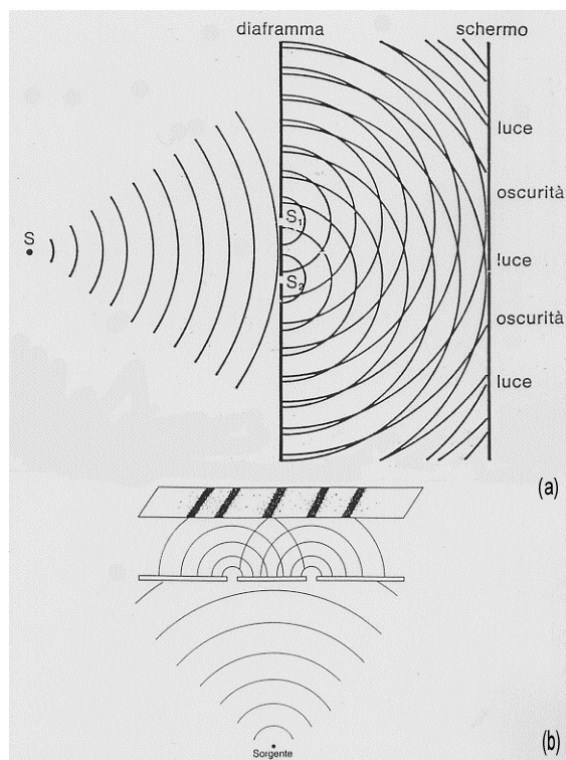
Ora finalmente possiamo spiegare il fenomeno della diffrazione e interferenza della luce e lasciarci alle spalle, così, un altro baluardo della teoria meccanicista.

Per spiegarlo, almeno a larghe linee, ci serviamo di un dispositivo che consente di evidenziare alcuni aspetti importanti: consideriamo un BANCO OTTICO con una **sorgente di luce collimata**³, una lastra con **due fessure ravvicinate** e uno schermo.

Sullo schermo otterremo una situazione del tipo descritto nel disegno a fianco: **bande scure** (oscurità) saranno alternate a **bande chiare** (luce).

Le *bande scure* corrisponderanno a zone d'**interferenza distruttiva**. Le bande chiare corrisponderanno a zone d'**interferenza costruttiva**.

La luce infatti, passando per le fessure, **diffrange**, andando a propagarsi in tutte le direzioni. In questo modo va a **interferire** e noi possiamo ammirarne il risultato, anche esteticamente gradevole, nelle fotografie e nei filmati che ritraggono questo fenomeno.



Diffrazione e interferenza sono fenomeni caratteristici unicamente delle onde: la **luce diffrange e interferisce** quindi: **la luce deve essere un'onda!**

La luce è un'onda trasversale

Abbiamo visto che il modello preferito dai meccanicisti per la luce si mostra incoerente con gli esperimenti. E' certo un fallimento del programma meccanicista, ma non drammatico: del resto *anche un'onda è un fenomeno di tipo meccanico*.

Stabilito che la luce si propaga come un'onda c'è però ancora qualche aspetto da chiarire:

³ **DEF** La **luce collimata** è definita come la luce i cui raggi sono paralleli e che ha un fronte d'onda piano. Così da rendere più evidente il fenomeno della diffrazione...

le onde luminose sono **longitudinali** o **trasversali**? In altre parole: la luce si propaga forse come il **suono** [onda longitudinale]? L'onda luminosa si **propaga** per oscillazione di cosa?

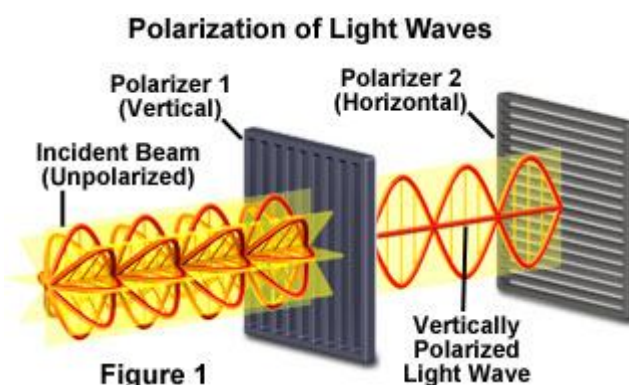
Per rispondere a queste domande dobbiamo discutere alcuni **nuovi esperimenti** (la fisica procede così!). Cominciamo dal primo. Per effettuarlo occorre un BANCO OTTICO con lampada ad arco e due filtri polaroid identici.

DEF Polarizzare la luce visibile significa *selezionare*, fra le oscillazioni delle onde che compongono un raggio luminoso, e che avvengono in tutte le direzioni, quelle che giacciono su di un piano prescelto, contenente la direzione di propagazione.

Tale selezione ha un senso se e solo se la luce è un'onda trasversale: se, infatti, fosse un'onda *longitudinale*, le direzioni di oscillazione sarebbero parallele alla direzione di propagazione e non ci sarebbe modo di *fermarne alcune e farne passare altre*, senza fermare l'onda stessa.

Se la luce è trasversale, la vibrazione elettrica avviene ad angolo retto con la direzione di propagazione; allora per polarizzarla occorre avere un *asse privilegiato* su di un piano perpendicolare alla direzione del raggio di luce (griglie grigie in figura), in modo che l'asse privilegiato selezioni quelle onde le cui vibrazioni elettriche sono parallele ad esso.

La figura seguente rappresenta efficacemente quanto stiamo trattando.



L'esperimento che verifica che la luce è un'onda trasversale necessita di un BANCO OTTICO con una sorgente di luce e due filtri polaroid congruenti, montati su supporti rotanti (fotografia in basso a destra). L'esperimento avviene in tre fasi:

- 1) I filtri polaroid vengono posizionati in modo da avere gli assi che selezionano la direzione di oscillazione paralleli. La luce passa attraverso entrambi i filtri.
- 2) Ruotiamo il secondo polaroid in modo che il suo asse sia posto a 90° rispetto a quello del primo: molta meno luce passa attraverso il secondo polaroid. Questo perché le vibrazioni allineate col primo asse raggiungono il secondo polaroid e qui trovano un asse perpendicolare ad esse e perciò non possono attraversarlo.
- 3) Se ruotiamo di altri 90° il secondo filtro, l'intensità della luce che vi passa attraverso sale di nuovo. Questo poiché le vibrazioni allineate col primo polaroid trovano un nuovo asse parallelo e perciò passano.

Abbiamo così dimostrato che la luce è un'onda per lo più trasversale. Non è possibile infatti che essa sia un'onda longitudinale (la cui vibrazione avviene lungo la direzione in cui si propaga) poiché, se così fosse, l'asse del polaroid sarebbe sempre perpendicolare alla vibrazione (anche quando lo ruotiamo) e nessun angolo sarebbe diverso dagli altri agli effetti dell'intensità della luce.



Si trovano in **youtube** filmati del PSSC molto interessanti. In relazione all'argomento che stiamo trattando una serie di esperimenti illustrati dal Prof. S. Wolga, del **MIT** (Massachusetts Institute of Technology).

Tutte le onde elettromagnetiche hanno in comune i seguenti aspetti caratteristici (caratteristici al punto che attribuiremmo lo *status* di onde elettromagnetiche a tutti i fenomeni che tali caratteristiche manifesteranno!):

- hanno origine da **cariche accelerate**
- sono **onde** (quindi come tutte le onde **diffrangono** e **interferiscono**) **trasversali** (cioè soggette a fenomeni di **polarizzazione**)
- si propagano, nel vuoto, alla stessa **velocità**: quella della **luce**

Gli esperimenti illustrati nel filmato mostrano come le onde radio, le microonde, l'infrarosso, la luce visibile, l'ultravioletto, i raggi X siano tutte onde elettromagnetiche.

Cosa le distingue le une dalle altre? Per quale motivo continuiamo a chiamarle con nomi differenti? Le grandezze caratteristiche delle onde sono: **lunghezza d'onda**, **frequenza** (o, specularmente, il periodo) e velocità. Ricordi? $v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$, quindi, fissata la velocità (in questo caso è la velocità della luce), lunghezza d'onda e periodo sono direttamente proporzionali e frequenza e lunghezza d'onda sono inversamente proporzionali.

La famiglia delle onde elettromagnetiche viene chiamato **spettro elettromagnetico**.

Lo schema qui a fianco mostra come ciascun *tipo* di onda, in base alla sua lunghezza d'onda, si collochi all'interno dello spettro. La parte relativa alla luce visibile è ingrandita per permetterti di conoscere la lunghezza d'onda corrispondente, almeno, ai colori "limite": il violetto e il rosso.

Un **nm** è un **nanometro** e corrisponde a 10^{-9} **metri** (cioè un milionesimo di **millimetro**)

A "sinistra" del violetto ci sono: l'ultravioletto, i raggi X e i raggi gamma, a "destra" del rosso ci sono: l'ultrarosso, le microonde e le onde radio.

DEF Un'onda elettromagnetica **monocromatica**, corrisponde a un **colore**, se ci troviamo nella banda della luce visibile. Ora, finalmente, potete capire il perché di quest'aggettivo!

Non abbiamo risposto alla seconda domanda: "l'onda luminosa si **propaga** per **oscillazione di cosa?**". Per rispondere a questa domanda abbiamo bisogno d'indagare un po' meglio la relazione fra elettricità e magnetismo. E per farlo ci serve il concetto di CAMPO...

