

Lezione n. 6: Le proprietà della luce

Fabrizio Scuri^{a)}, Alessandra Toncelli^{b)}

3/4/2019

a) Istituto Nazionale di Fisica Nucleare – Sezione di Pisa

b) Dipartimento di Fisica, Università di Pisa



aggiornamenti
laboratorio di didattica della scienza

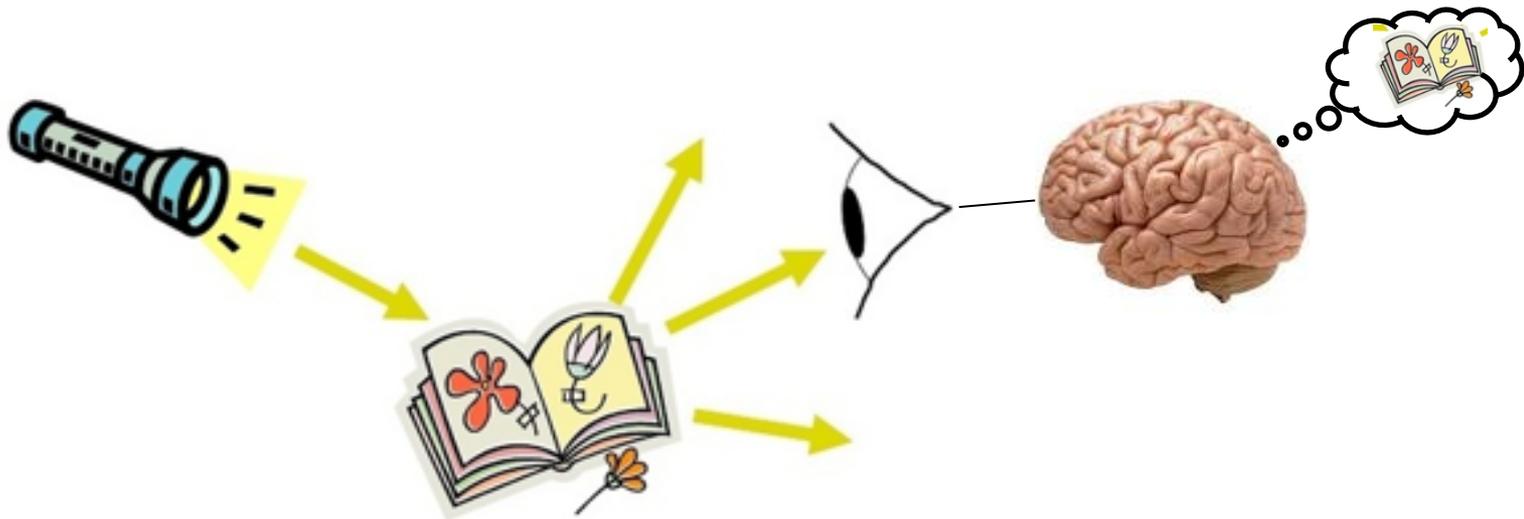
Faremo semplici esperienze con la luce ...

Per capire:

- **Come si propaga**: nel vuoto, riflettendosi su una superficie, attraversando mezzi diversi
- **Perché si comporta come “un’onda”**, come quelle del mare, capace di interferire, superare ostacoli
- La relazione tra i **colori** che vediamo e la **lunghezza d’onda** (distanza tra le creste)
- Che esiste luce che non vediamo direttamente, ma di cui sperimentiamo effetti ben evidenti !

La domanda iniziale: perché vediamo oggetti che non sono sorgenti di luce?

La risposta: raggi luminosi dalle sorgenti di luce o ambientali colpiscono ogni punto di un oggetto sulla loro traiettoria, sono riflessi e catturati dal nostro occhio che invia stimoli che il cervello usa per ricostruire un'immagine 3D



Per convincerci che la risposta è giusta occorre capire come si propaga la luce e quale siano le sue proprietà

La propagazione della luce



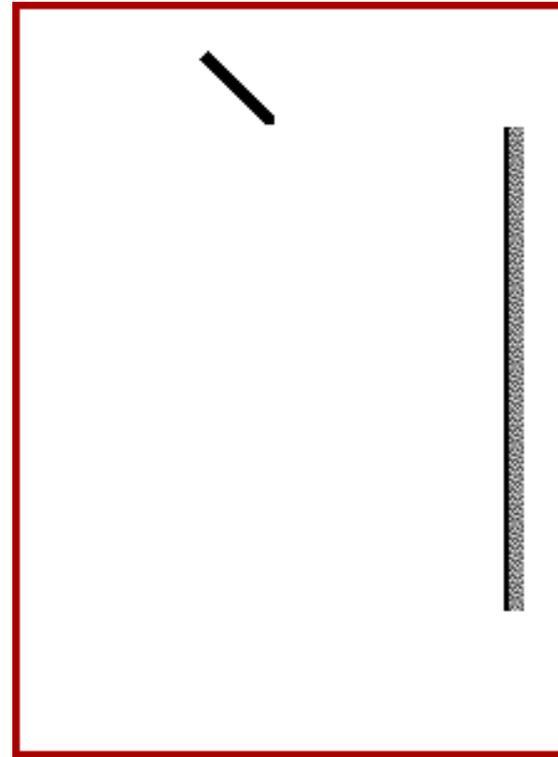
- Infila uno spillo o un chiodo sottile in un cartoncino spesso o in un foglio sottile di polistirolo
- Infila un secondo chiodo in modo da coprire il chiodo iniziale alla tua vista. Tu non devi spostarti! In questo modo copri la luce riflessa dal primo chiodo che arriva ai tuoi occhi
- Ripeti l'operazione con altri chiodi posizionando l'ultimo senza poter vedere quelli infilati precedentemente. L'ultimo chiodo posizionato copre la luce riflessa da tutti i precedenti
- Ora traccia con una matita sul piano la congiungente di tutti i chiodi. Cosa osservi ?

La luce si propaga in linea retta (cammino più breve) nel vuoto o in un mezzo uniforme (ovvero che ha ovunque le stesse proprietà)

La riflessione della luce

Se un raggio luminoso viene riflesso da una superficie piana, possiamo studiare le relazioni geometriche tra il raggio incidente e quello riflesso

Dobbiamo introdurre la definizione di **angolo di incidenza**, **angolo di riflessione** e **normale alla superficie riflettente**



La riflessione della luce

Infila uno spillo a lato della fila predisposta nell'esperienza precedente in modo che, guardando lo specchio, copra il primo riflesso della fila già esistente



La riflessione della luce

Infila uno spillo a lato della fila predisposta nell'esperienza precedente in modo che, guardando lo specchio, copra il primo riflesso della fila già esistente



Poi infila altri spilli sempre in modo da vedere solo il più vicino all'occhio guardando lo specchio



La riflessione della luce

Alza ora lo sguardo e osserva il percorso della luce incidente e quello della luce riflessa unendo con una linea la posizione degli spilli

Misura gli angoli delle linee rispetto alla normale alla superficie

Verifica che **angolo di incidenza** e **angolo di riflessione** sono **uguali**



La rifrazione della luce



Riempi una vaschetta d'acqua e inserisci una matita con un angolo non nullo rispetto alla verticale.

La matita appare "spezzata" in corrispondenza della superficie di separazione tra acqua ed aria.....

Se la matita invece è verticale, appare spezzata?

Cambia l'angolo di "frattura" a seconda dell'inclinazione della matita?

La rifrazione della luce

Una semplice spiegazione del fenomeno con una analogia



La rifrazione della luce

Bagnino

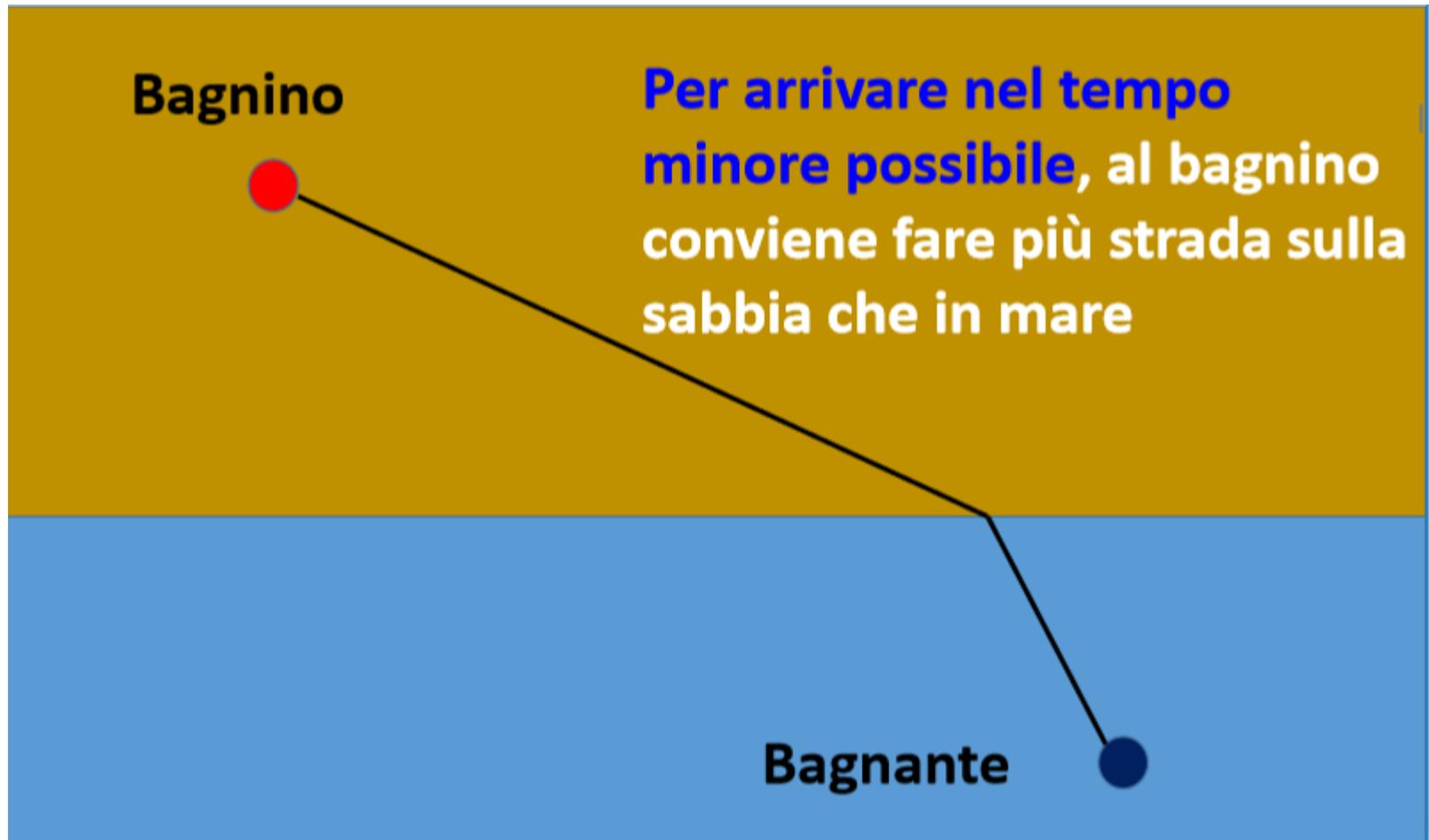


Sulla sabbia il bagnino va
più veloce che nell'acqua

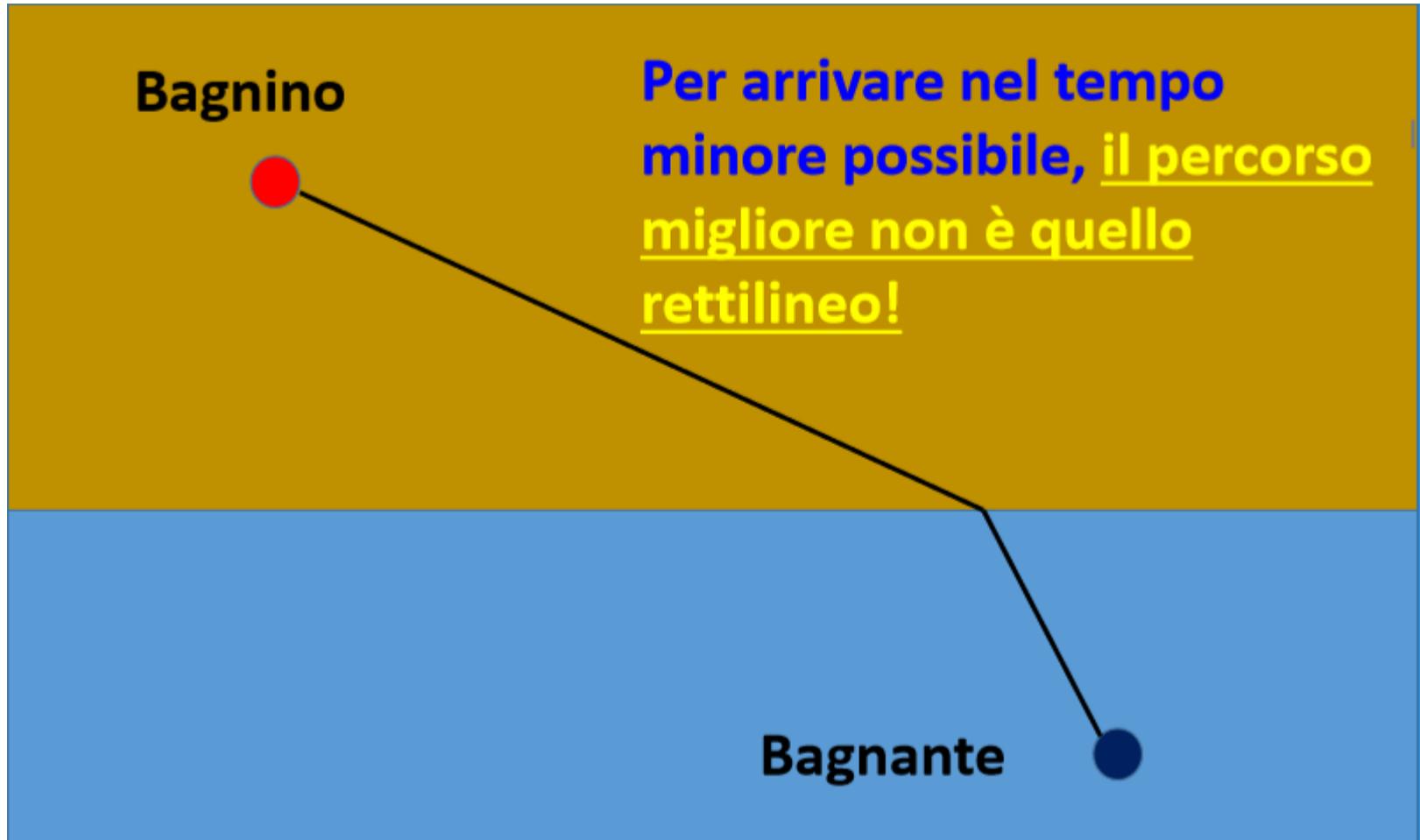
Bagnante



La rifrazione della luce



La rifrazione della luce



La legge della rifrazione

La luce si propaga con velocità diversa in mezzi diversi

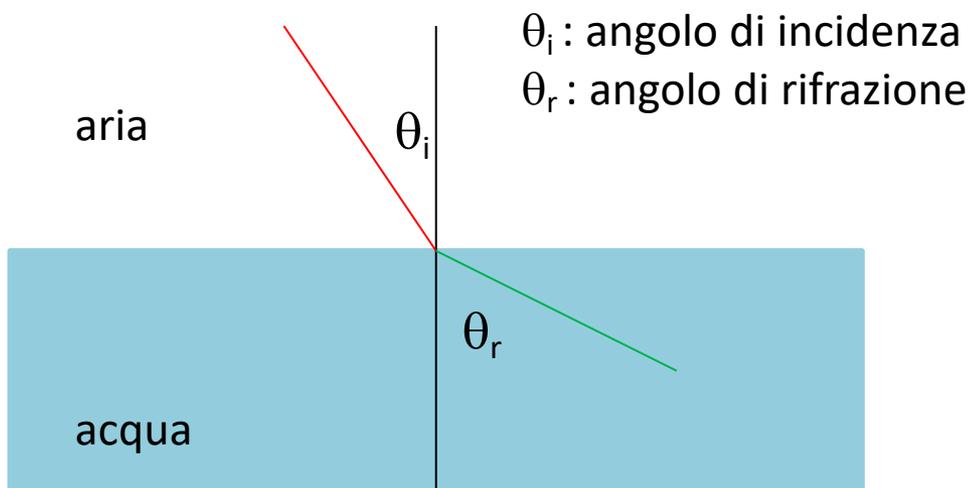
Ogni mezzo è caratterizzato da un indice di rifrazione n_{mezzo}

La velocità di propagazione della luce in un mezzo è $v_{\text{mezzo}} = c / n_{\text{mezzo}}$

Nel vuoto $n_{\text{vuoto}} = 1$ e $v_{\text{vuoto}} = c = 299\,792\,458$ m/s

Nell'acqua $n_{\text{acqua}} = 1,333$, nell'aria $n_{\text{aria}} = 1,0003$

La luce si comporta come il bagnino! Segue il percorso che rende minimo il tempo per propagarsi da un punto in un mezzo a un punto in altro mezzo



$$\frac{v_{\text{aria}}}{v_{\text{acqua}}} = \frac{n_{\text{acqua}}}{n_{\text{aria}}}$$

Legge di Snell

$$n_{\text{aria}} \sin \theta_r = n_{\text{acqua}} \sin \theta_i$$

La luce segue il percorso che rende minimo il tempo per propagarsi da un punto A a un punto B

La rifrazione della luce: monete che appaiono



Posiziona una moneta in fondo a un contenitore e poi abbassa lo sguardo fino a non vedere più la moneta

La rifrazione della luce: monete che appaiono



Posiziona una moneta in fondo a un contenitore e poi abbassa lo sguardo fino a non vedere più la moneta

Aggiungi acqua fino a quando la moneta non appare al tuo sguardo e segna il livello....

La rifrazione della luce: monete che appaiono

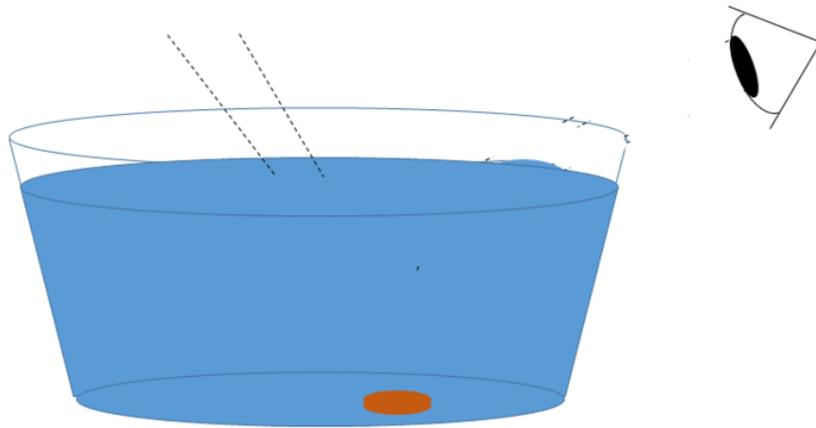


Posiziona una moneta in fondo a un contenitore e poi abbassa lo sguardo fino a non vedere più la moneta

Aggiungi acqua fino a quando la moneta non appare al tuo sguardo e segna il livello....

Ripeti l'operazione con olio di semi. A che livello la moneta torna visibile?
Si può capire quale liquido ha indice di rifrazione maggiore?

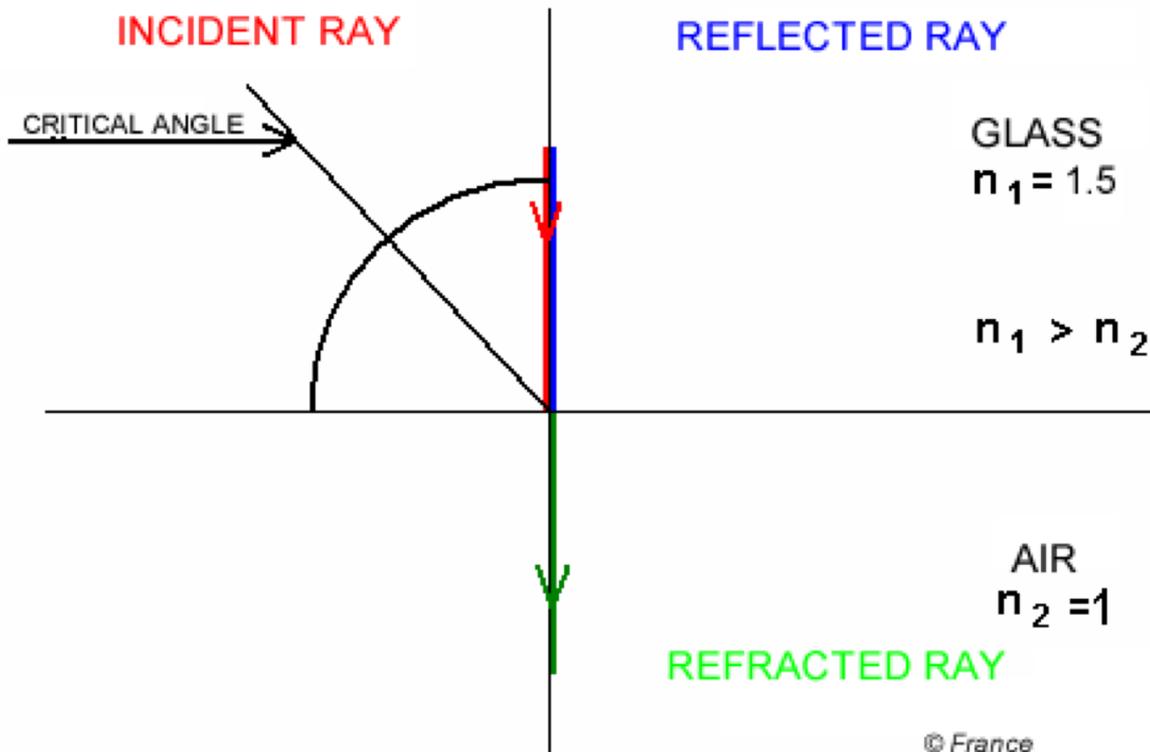
Spieghiamo il mistero della moneta che appare



La luce ambientale si riflette e viene diffusa dalla moneta

L'occhio ricostruisce l'immagine sulla base della direzione dei raggi diffusi e rifratti

Rifrazione e riflessione totale

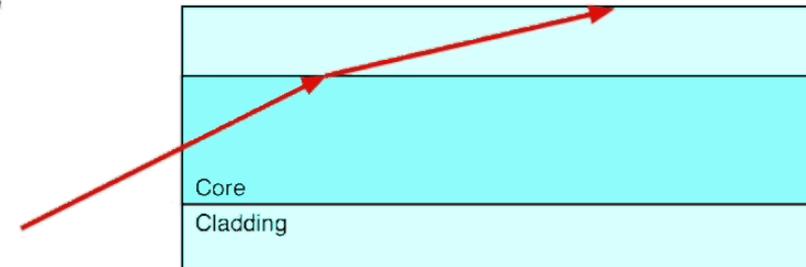


Le fibre ottiche: un'applicazione della riflessione totale della luce

Indici di rifrazione

Core: 1,48
Cladding: 1,46
Aria: 1,0003

} Grande differenza, quasi tutta la luce nel cladding va in riflessione totale



La riflessione totale della luce

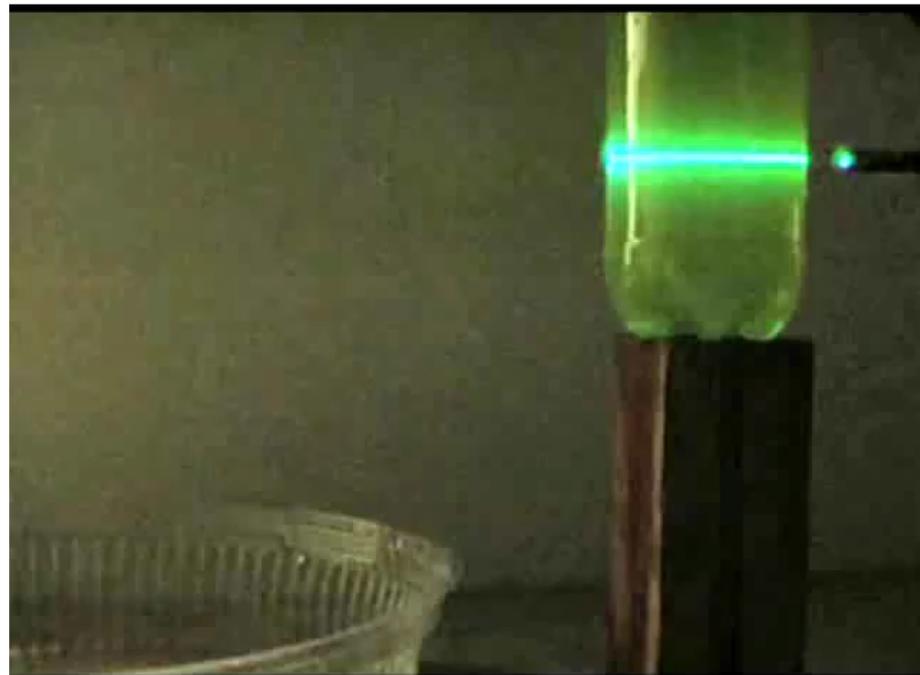
Cosa succede quando la luce, *passando da un mezzo più denso a un mezzo meno denso*, incide con un angolo molto grande sulla superficie di separazione? Proviamo a vederlo con un laser che incide sulla superficie acqua-aria (mescolate qualche goccia di latte per visualizzare meglio)...



La luce del laser, incidendo con un angolo maggiore di un *angolo critico*, viene **totalmente riflessa** e questo si ripete lungo tutto il percorso del fascio di luce. Questo fenomeno si chiama **riflessione totale** e viene sfruttato per "guidare" la luce *senza perdite* lungo il percorso che si desidera, ad esempio attraverso **fibre ottiche**.



Una fibra ottica fatta in casa



- Prendi una bottiglia d'acqua aperta e forala con uno spillo, in modo che esca un sottile getto d'acqua
- Illumina il foro con un puntatore laser: osserverai che il **fascio di luce segue il percorso del getto d'acqua**. Questo avviene poiché la luce che cerca di uscire "rimbalza" contro la superficie acqua-aria, venendo totalmente riflessa all'interno.

Rifrazione e lenti



- Riempi d'acqua un contenitore cilindrico
- Osserva cosa succede al foglio: la freccia appare ribaltata e ingrandita

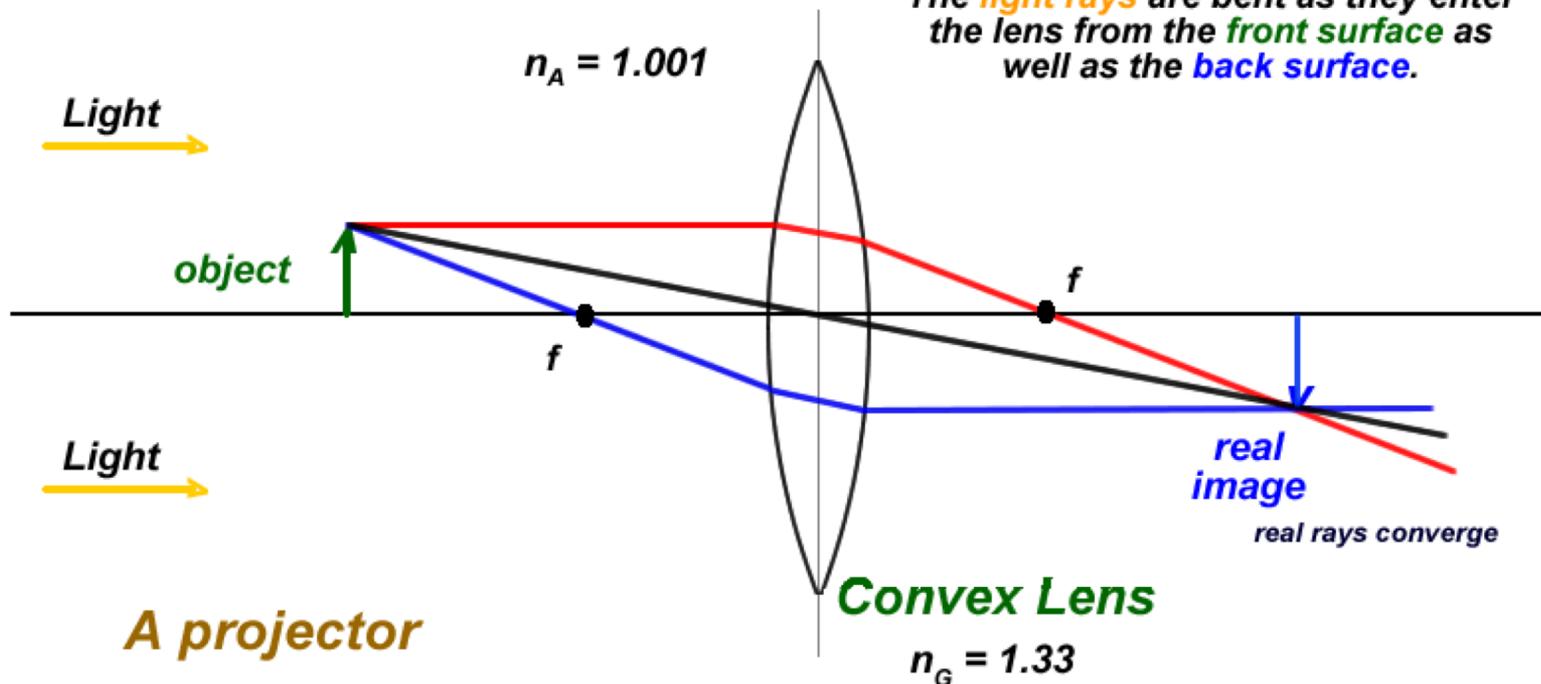
Rifrazione e lenti



- Riempi d'acqua un contenitore cilindrico
- Osserva cosa succede al foglio: la freccia appare ribaltata e ingrandita
- Avvicina lentamente la freccia fin a farla toccare il bicchiere: cosa succede? La freccia si gira dalla parte giusta

Rifrazione e lenti

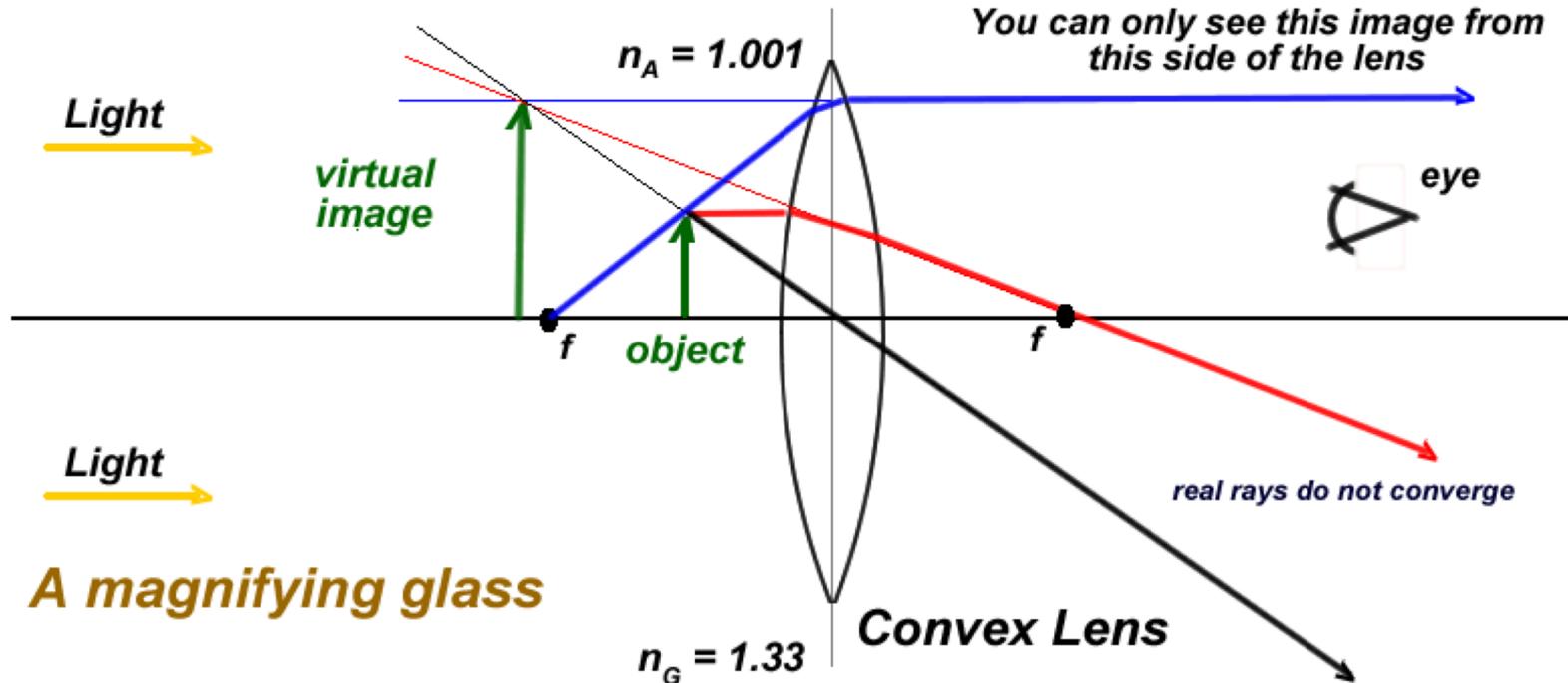
Refraction thru a Convex Lens



Hai costruito una lente che ribalta e dilata l'immagine fino a quando ...

Rifrazione e lenti

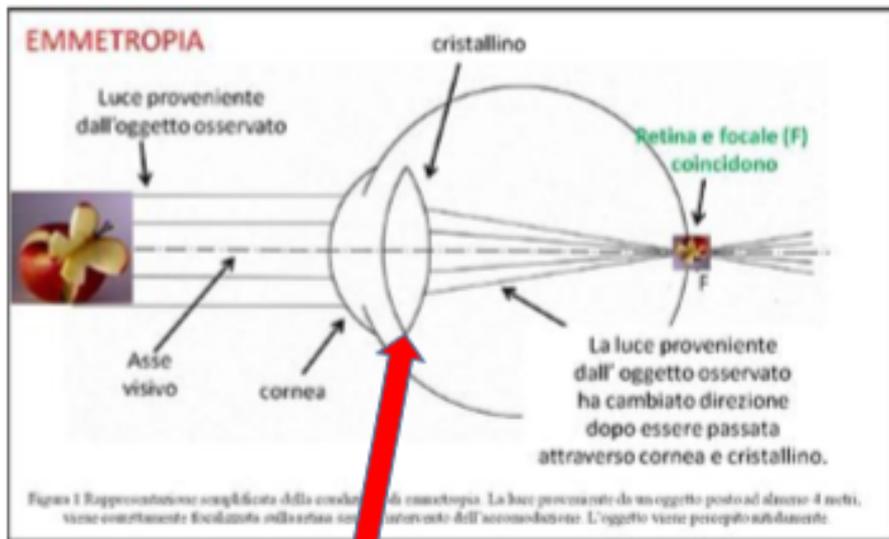
Refraction thru a Convex Lens II



A magnifying glass

.... l'oggetto viene a trovarsi tra il fuoco e la lente

L'occhio umano è un sistema ottico ...



Rifrazione: la luce passa dall'aria a un liquido, gli indici di rifrazione dei due mezzi sono diversi

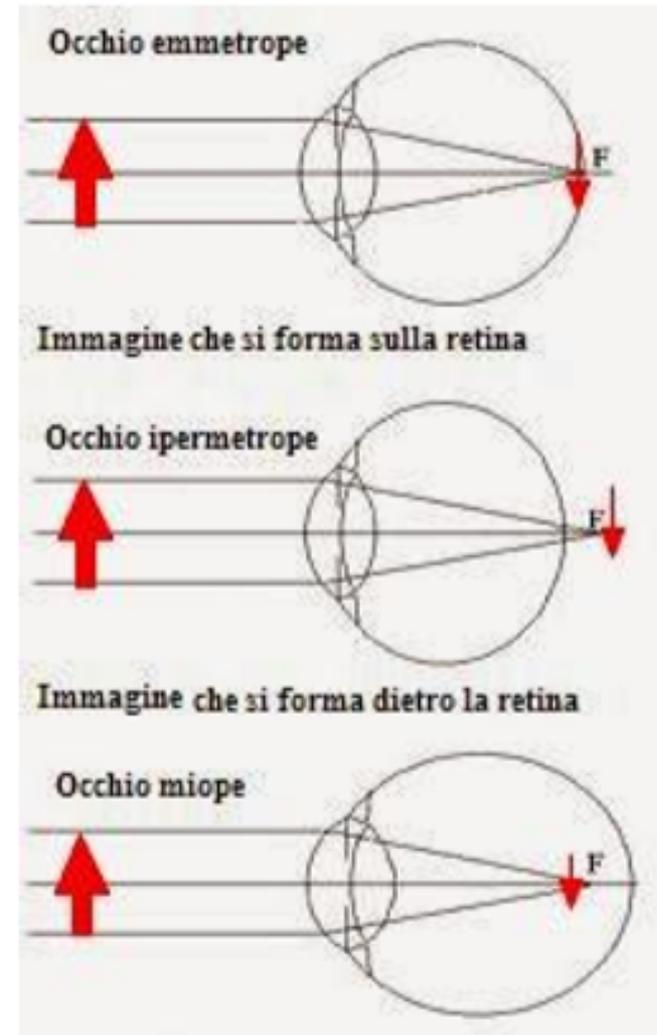


Immagine che si forma davanti alla retina

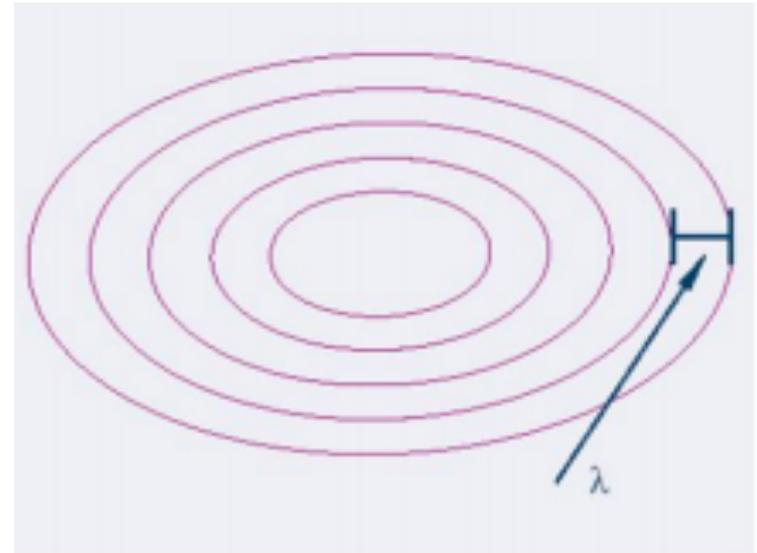
L'occhio umano è un sistema otticosviluppato per ricevere immagini dall'aria!

- Perché il nostro occhio focheggia correttamente le immagini se la luce proviene dall'aria. Il suo indice di rifrazione è stato tarato dall'evoluzione in questo modo.
- Se invece la luce proviene dall'acqua, la focheggiatura giusta non avviene.
- Mettendoci la maschera davanti, si ritorna nella situazione «corretta».



Natura ondulatoria della luce

Ci sono fenomeni che conducono a trattare la propagazione dell'energia trasportata dalla luce esattamente come osserviamo l'energia meccanica propagarsi con il moto ondoso nei liquidi

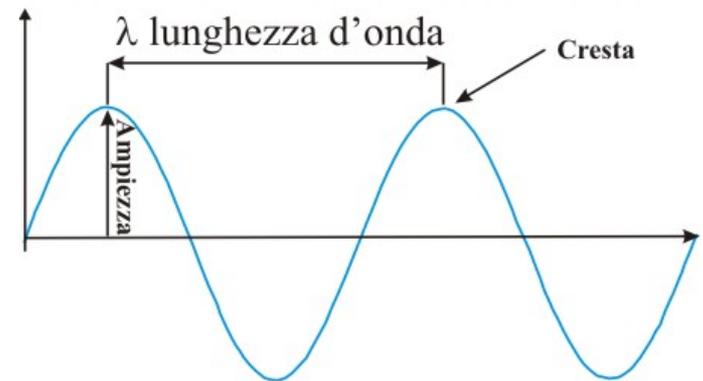


Un po' di nomenclatura:

La lunghezza d'onda λ è la distanza fra le creste
La frequenza f è legata alla velocità v con cui si muovono le creste nel mezzo:

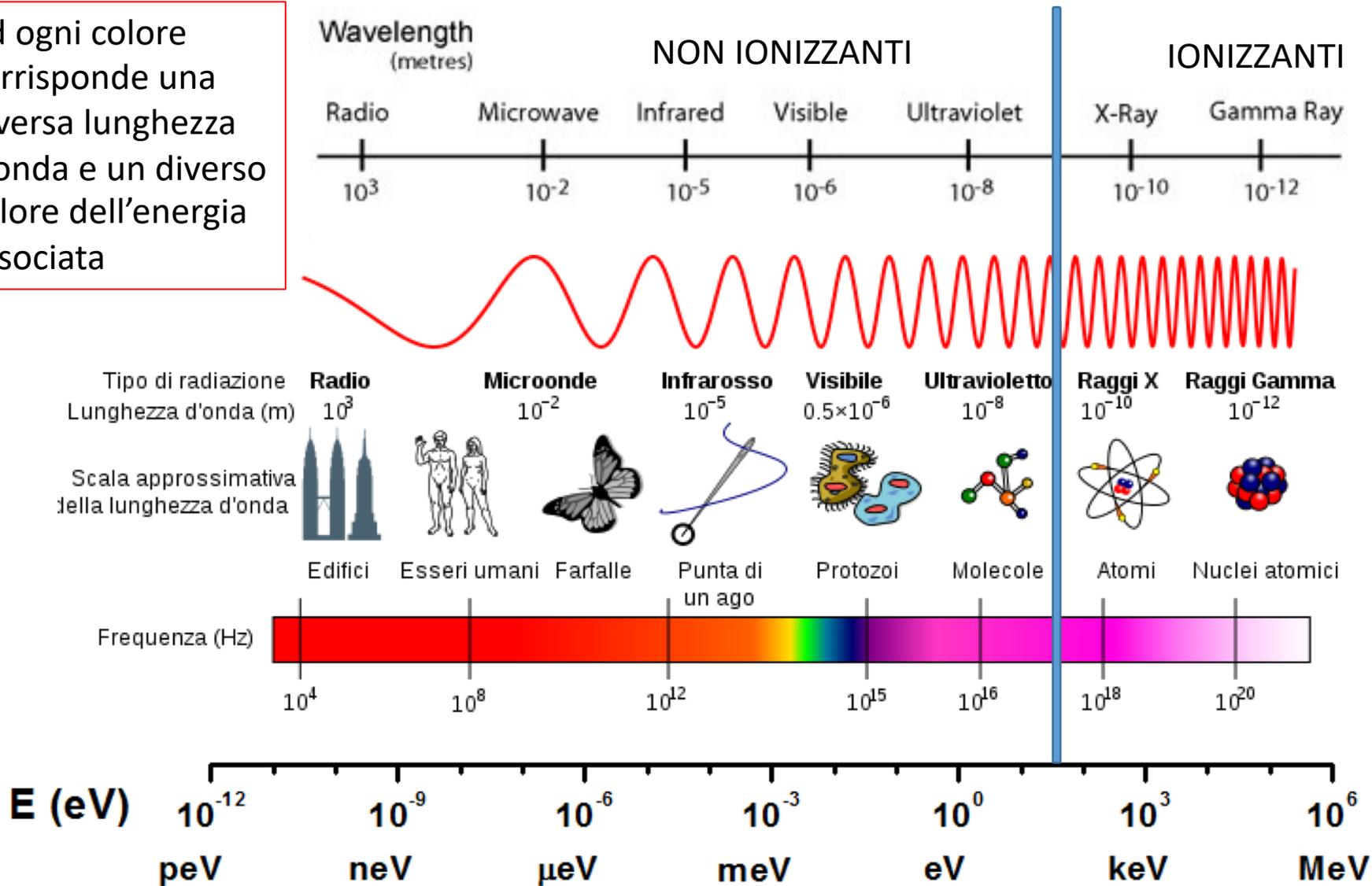
$$f = \frac{v}{\lambda}$$

(per la luce nel vuoto $v = c$)



Lunghezza d'onda e colori

Ad ogni colore corrisponde una diversa lunghezza d'onda e un diverso valore dell'energia associata

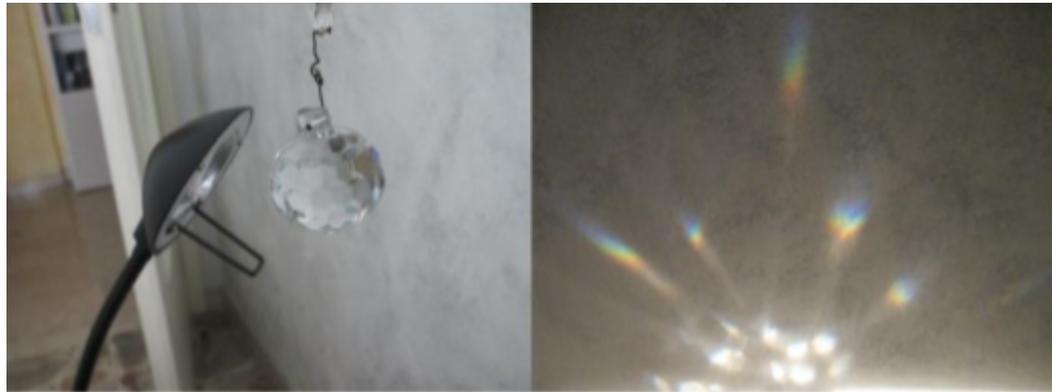


Luce bianca e colori

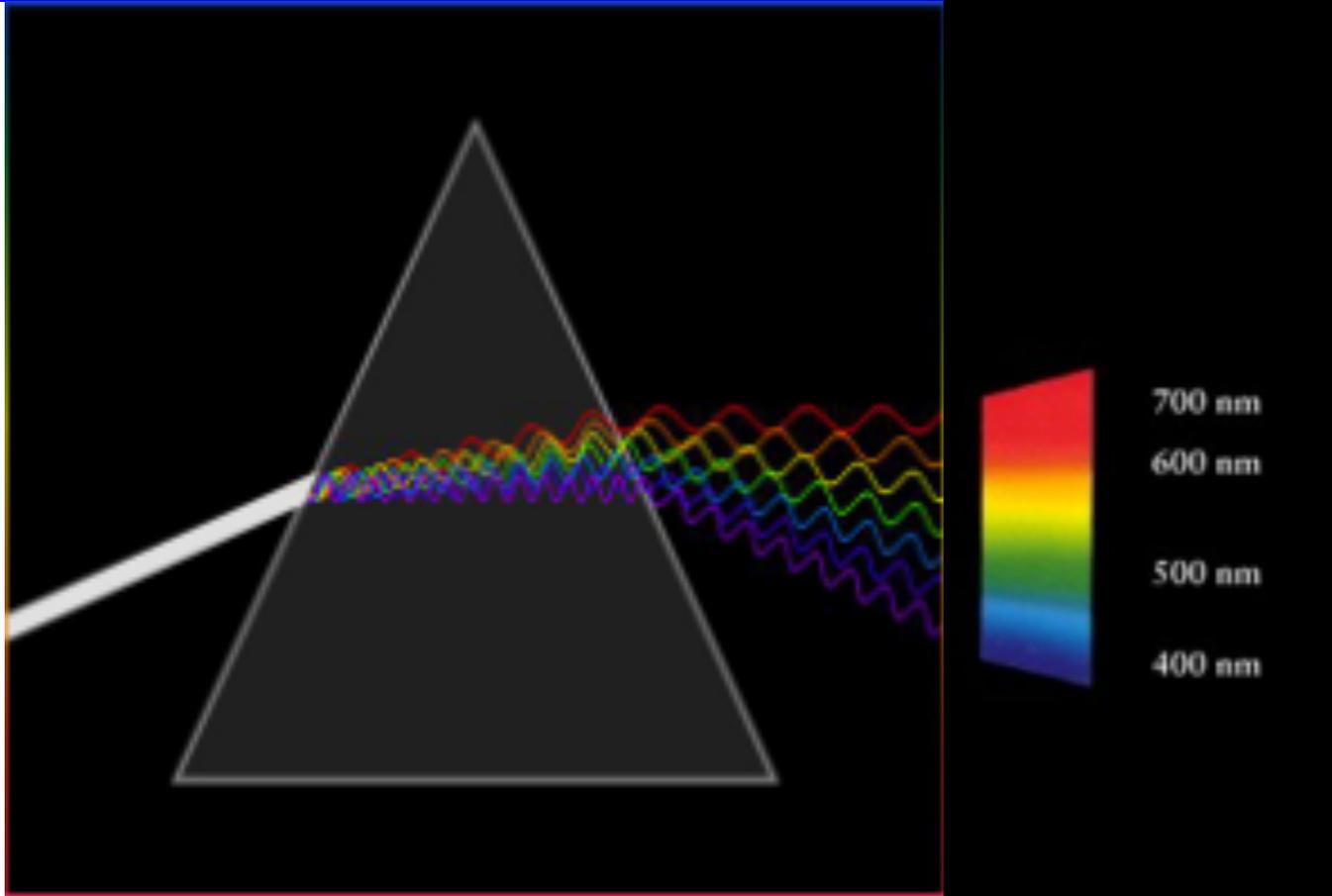


La luce bianca del sole viene “scomposta” nei vari colori dalle gocce di pioggia che la diffondono....

...come succede per la luce bianca di una lampada riflessa da cristalli sfaccettati



Colori e rifrazione.....



Facciamo l'esperimento della diffusione della luce bianca con un prisma di vetro e verificiamo che l'indice di rifrazione dipende dal colore, ovvero dalla lunghezza d'onda. Il **blu** (creste più vicine) viene deviato di più del **rosso** (creste più lontane).

La dispersione della luce



Aggiungi qualche goccia di latte in un bicchiere d'acqua, e illuminala con una torcia (luce bianca).

- La **luce diffusa** appare **azzurra**
- La luce che viene **direttamente dalla torcia** appare **giallo-rosa**
- Il latte contiene microscopici globuli di grasso che **diffondono** la luce con intensità proporzionale a $1/\lambda^4$
- **Luce rossa: 700 nm. Luce blu: 400 nm.** La luce blu è diffusa molto di più della luce rossa

La dispersione della luce



Il cielo è azzurro di giorno perché le componenti a più alta frequenza (minore lunghezza d'onda) della luce solare nello spettro visibile sono diffuse molto di più delle componenti a bassa frequenza

$$\lambda_{\text{blu}} < \lambda_{\text{rosso}} \quad 1/\lambda_{\text{blu}}^4 \gg 1/\lambda_{\text{rosso}}^4$$

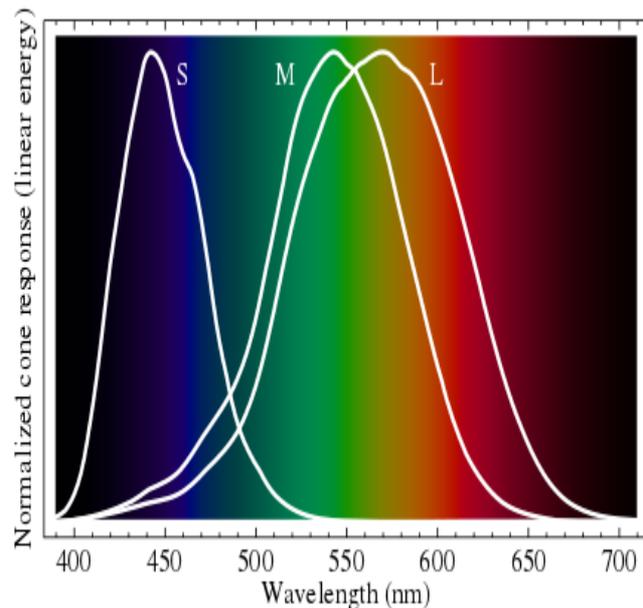
Alla sera, i raggi solari, inclinati rispetto alla perpendicolare alla superficie terrestre, attraversano uno strato maggiore di atmosfera, tutta la luce, salvo quella a più bassa frequenza (rosso), viene totalmente diffusa....

La dispersione della luce

Se la luce viene diffusa proporzionalmente a $1/\lambda^4$, perché vediamo il cielo azzurro e non viola?

L'occhio umano è più sensibile all'azzurro che al viola !

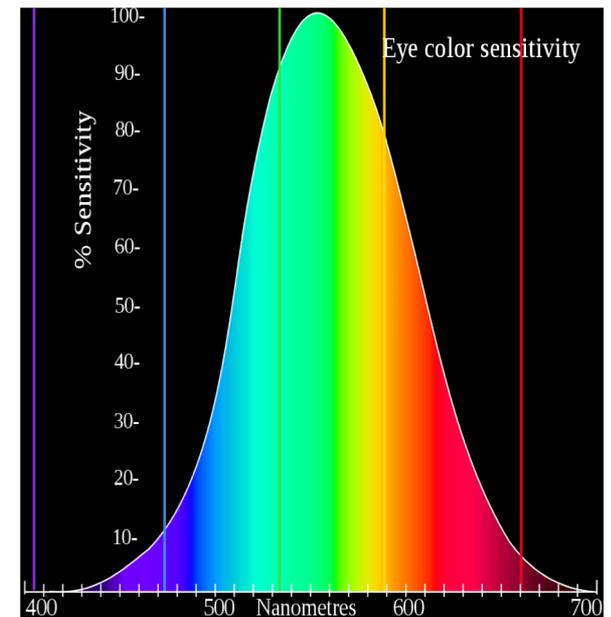
Spettro normalizzato della risposta delle tre cellule cono umane



Nella retina solo il 5% dei cono sono di tipo S ...

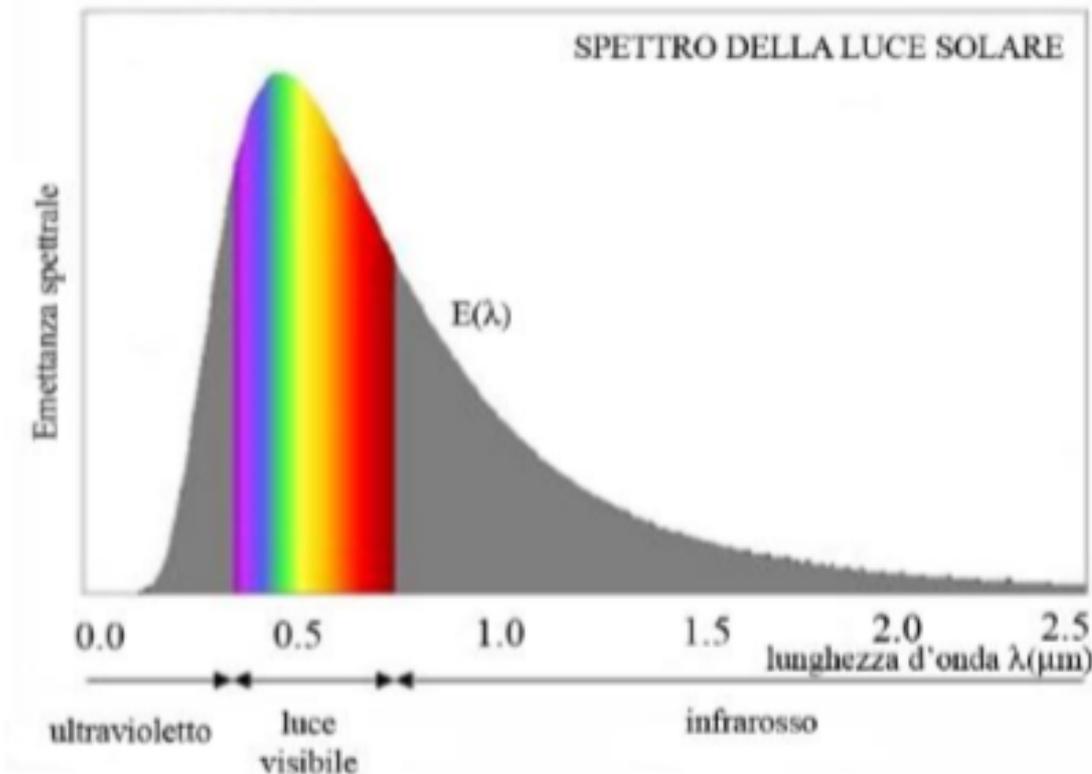


Sensibilità alla luminanza del sistema di visione umano



La dispersione della luce

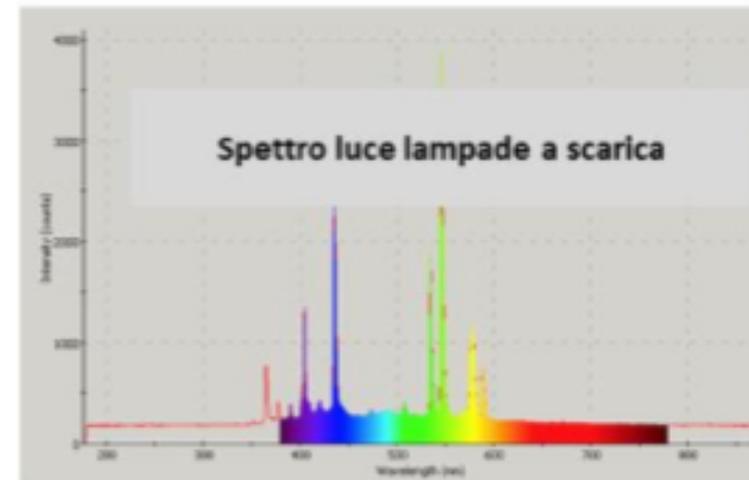
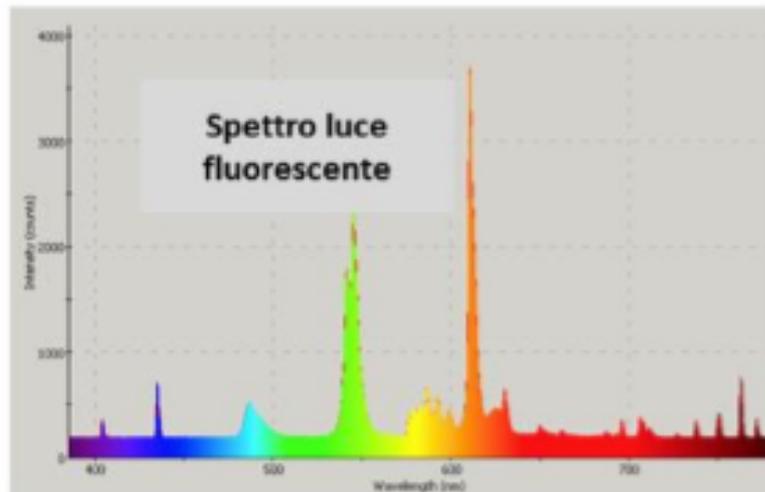
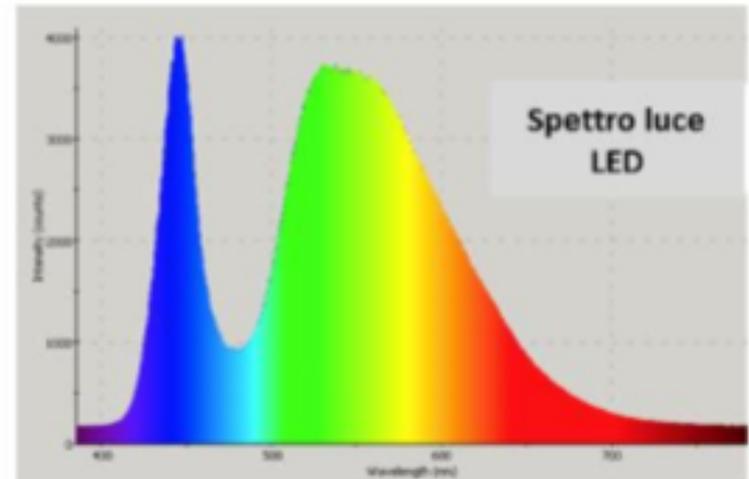
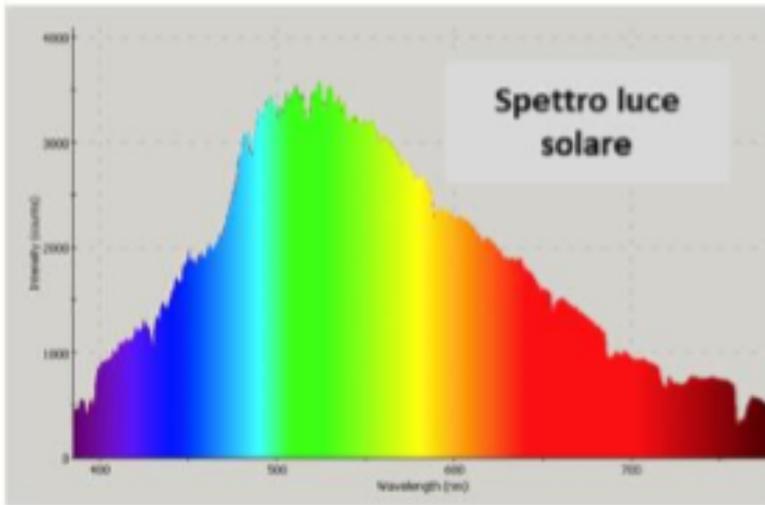
Se la luce viene diffusa proporzionalmente a $1/\lambda^4$, perché il cielo non è viola?



Inoltre il sole emette una maggiore intensità nel blu che nel violetto

Spettro sorgenti luminose

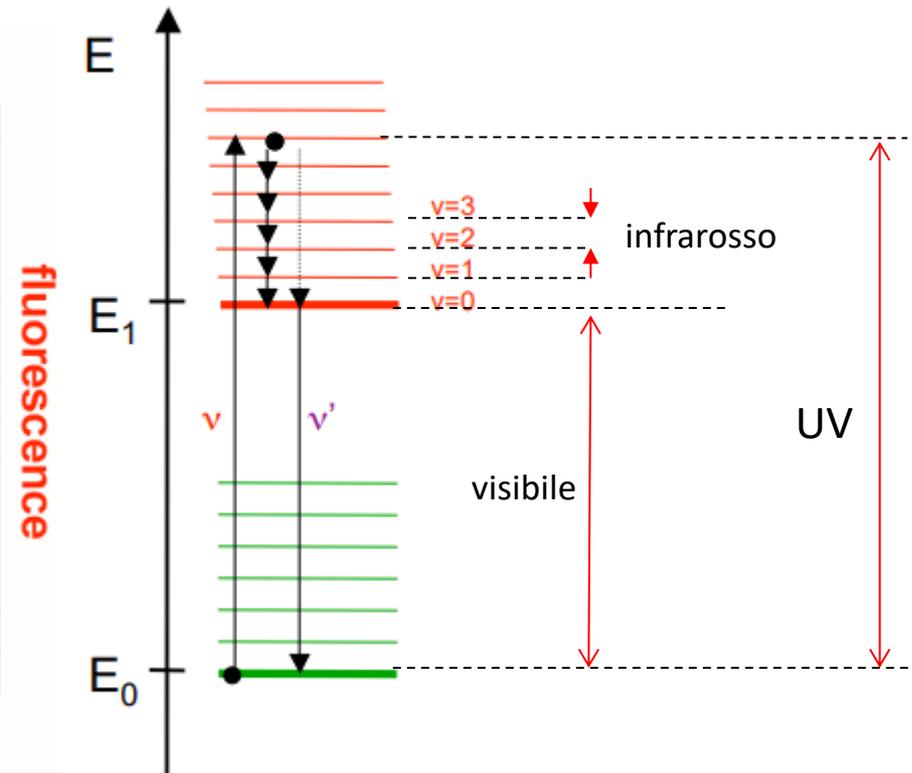
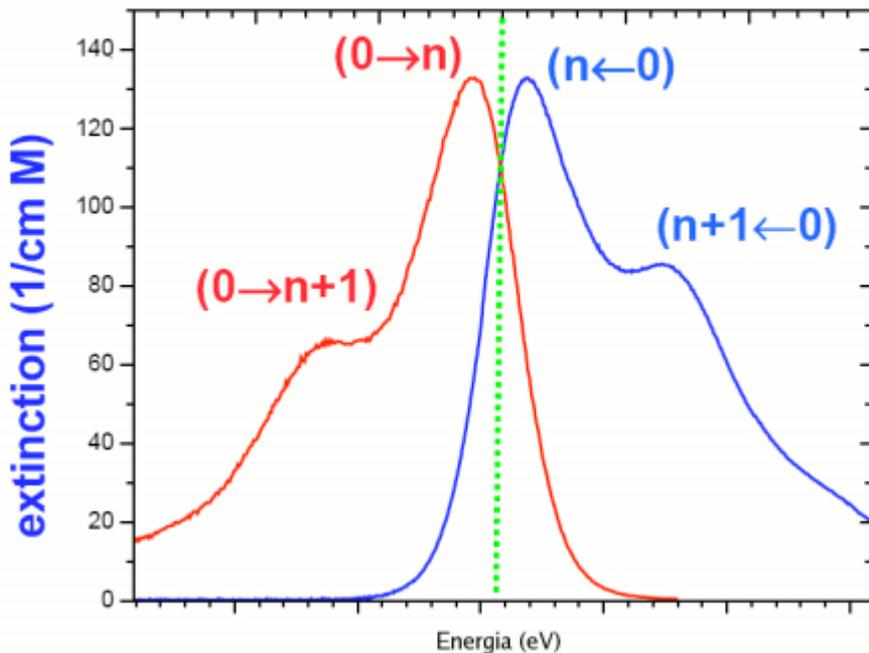
A seconda della sorgente luminosa utilizzata, gli oggetti possono apparire di colore diverso !



Raggi UV e fluorescenza

- La fluorescenza è un fenomeno associato alla capacità di alcune sostanze di assorbire luce ultravioletta e rimettere luce nello spettro visibile
- Ciascun livello energetico principale ha una sottostruttura fine legata alla vibrazione degli atomi che costituiscono la struttura del materiale
- All'eccitazione in una banda di livelli superiore allo stato fondamentale segue una de-eccitazione prima attraverso la struttura fine vibrazionale e poi con emissione di un fotone visibile

Un tipico spettro di fluorescenza e' fatto cosi':



Raggi UV e fluorescenza

**Gli evidenziatori funzionano in questo modo !
Contengono sostanze fluorescenti che assorbono le
Frequenze nell'ultravioletto e le riemettono nel visibile**

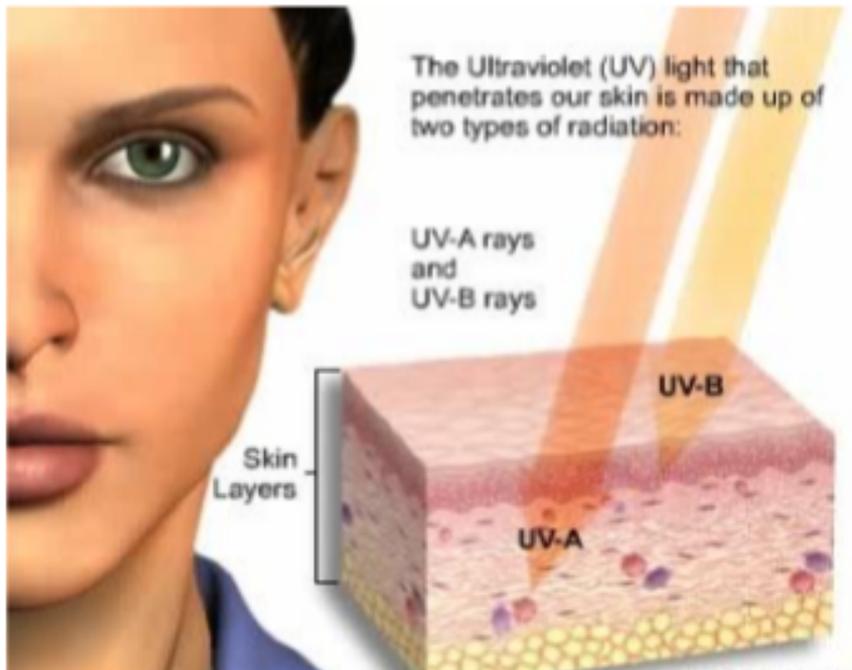
Prova ad evidenziare alcune parti di un testo.
Alla luce solare o di una lampada ad incandescenza,
il testo evidenziato appare brillante.

Prova ora a spegnere la luce ed illuminare le zone
evidenziate con luce laser monocromatica.
Riesci a vedere bene come prima la zona evidenziata?

anello Carattere o Controllo.
Modificare le opzioni dei formati sottolineati
arrato
io è particolarmente utile se volete c
na sottolineatura uniforme sotto caratte
dimensioni diverse o per creare effetti spe
l esempio evidenziare lo sfondo.
tal menu del pannello Carattere o Conti
seguite Opzioni sottolineato o Opzioni bai

Raggi UV - Tipologia

- Il sole emette tre tipologie di raggi UV: UVA, UVB, e UVC
- **UVA**: lunghezza d'onda maggiore (tra 320 e 400 nanometri , spettro tipico delle lampade UV), quindi al limite del visibile. Sono penetranti, ma sono i meno dannosi. Causano abbronzatura e rappresentano il 95% dei raggi UV che raggiungono la superficie terrestre. Passano attraverso le nuvole e gli occhiali da sole



- **UVB**: non penetrano in profondità nella pelle, hanno energia maggiore, e lunghezza d'onda minore. Sono le cause della scottature al sole. Sono causa di cancro alla pelle. Sono parzialmente schermati dall'atmosfera (Ozono)
- **UVC**: Hanno energie elevate, e lunghezza d'onda ancora minore. Sono completamente schermati dall'atmosfera (Ozono). Altrimenti sarebbero estremamente nocivi per la salute. Vengono usati per sterilizzare il materiale medico in laboratorio

L'interferenza della luce



Una caratteristica importante delle onde è quella di poter **interferire**, dando luogo a strutture con **massimi e minimi di intensità**

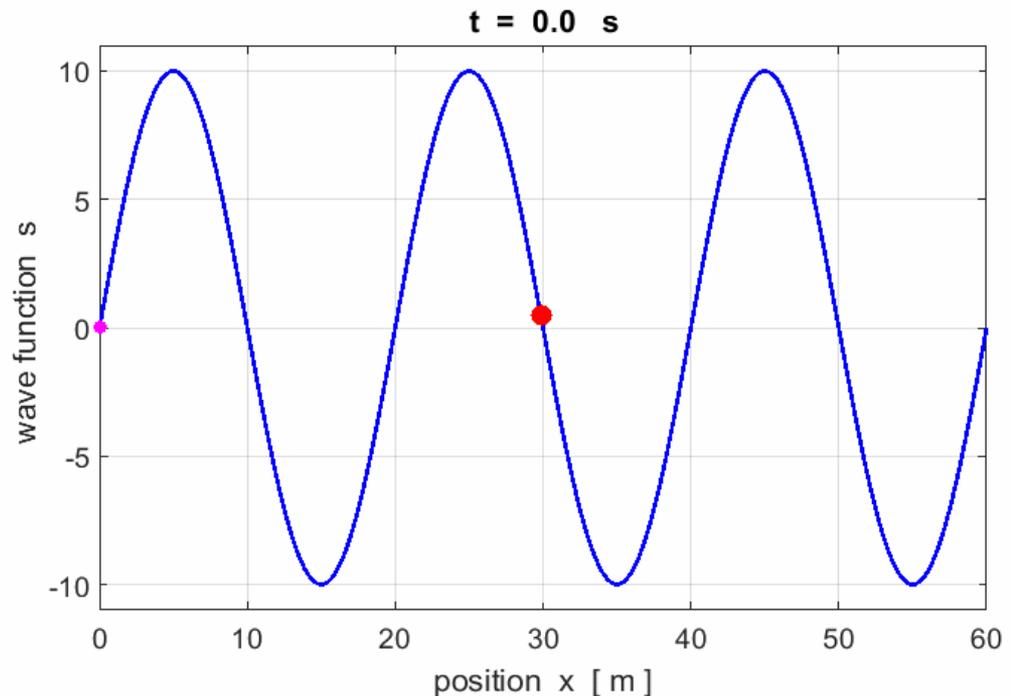
L'interferenza della luce

Rappresentazione di un'onda sinusoidale

Se x è la direzione di propagazione dell'onda, la funzione analitica che rappresenta l'ampiezza di oscillazione $A(x,t)$ in funzione dello spazio e del tempo è del tipo:

$$A(x,t) = A_{\max} \sin(kx - \omega t)$$

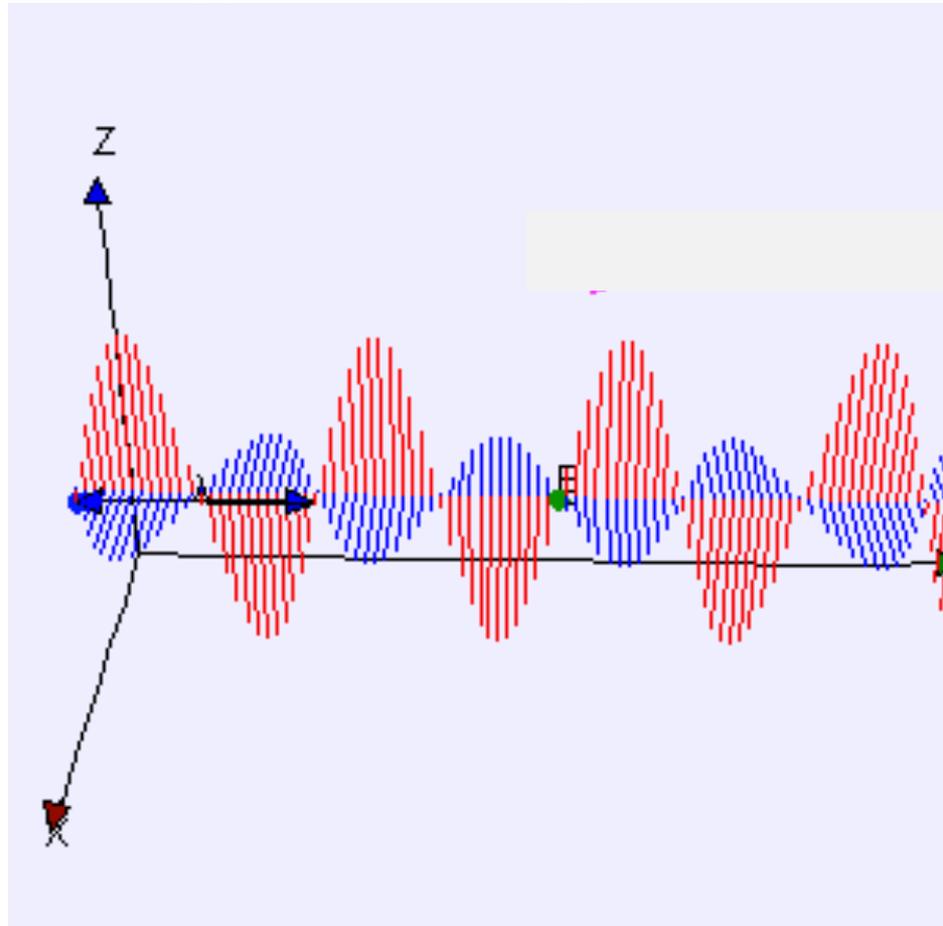
dove A_{\max} è l'ampiezza massima, $k = 2\pi / \lambda$ e $\omega = 2\pi f = 2\pi v / \lambda$, v = velocità di propagazione



Andamento dell'ampiezza in funzione del tempo a fissata posizione x

L'interferenza della luce

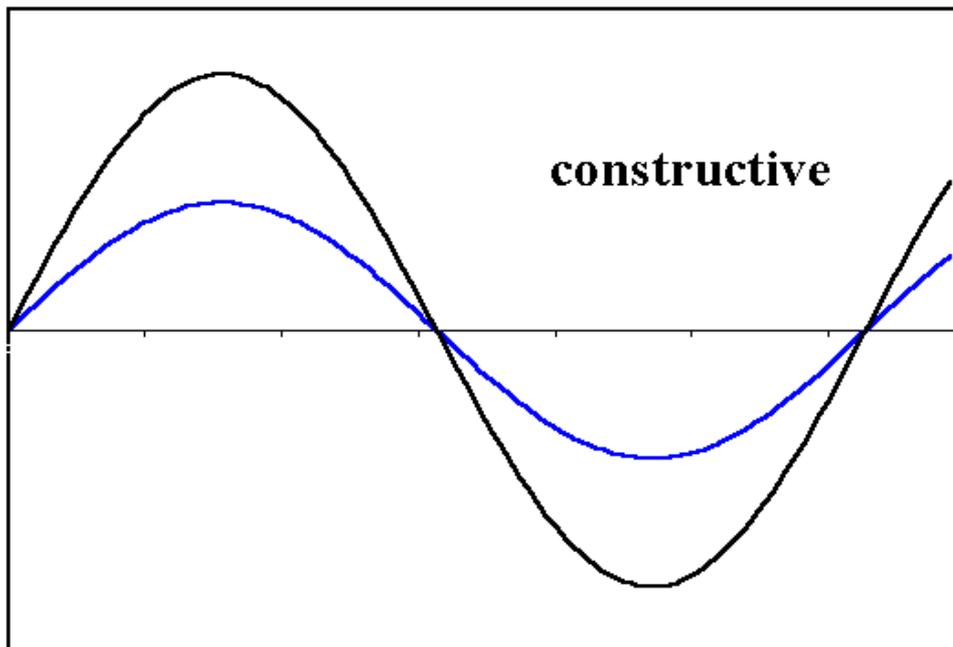
- La propagazione della luce è la propagazione di energia elettromagnetica nello spazio-tempo
- I campi elettrico e magnetico oscillano su piani ortogonali.
- La direzione di propagazione dell'onda è data dall'intersezione di tali piani
- L'interferenza è data dalla sovrapposizione dei campi associati a due differenti onde



L'interferenza della luce

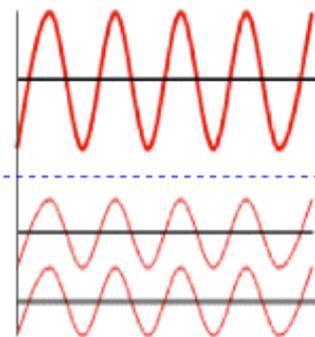
Per le onde vale il principio di sovrapposizione:

L'ampiezza dell'onda risultante dalla sovrapposizione di due onde nello stesso punto e nello stesso istante è data dalla somma delle ampiezze delle singole onde

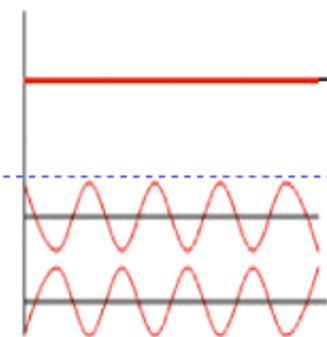


oscillazione massima

oscillazione zero



caso A: onde
in fase



caso B: onde in
opposizione di fase

effetto
combinato

→ tempo

La fase è determinata dall'ampiezza dell'onda all'istante $t=0$

L'interferenza della luce

Vediamo ora alcuni fenomeni che si possono osservare con un CD/DVD



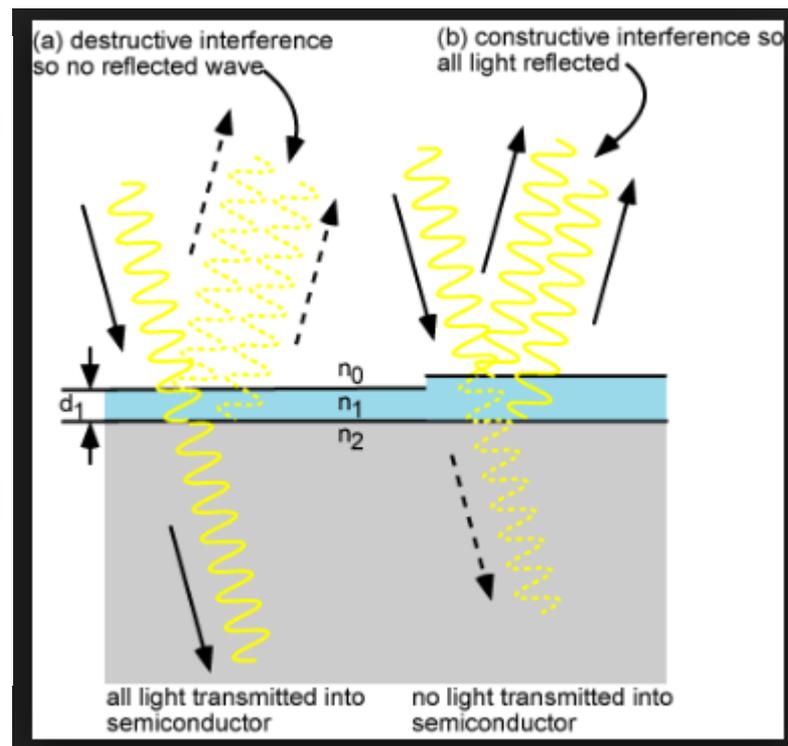
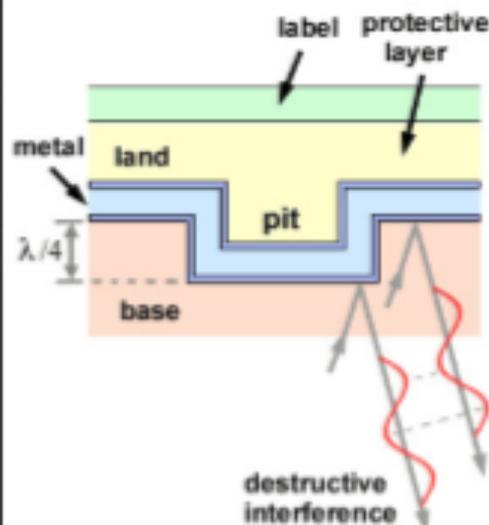
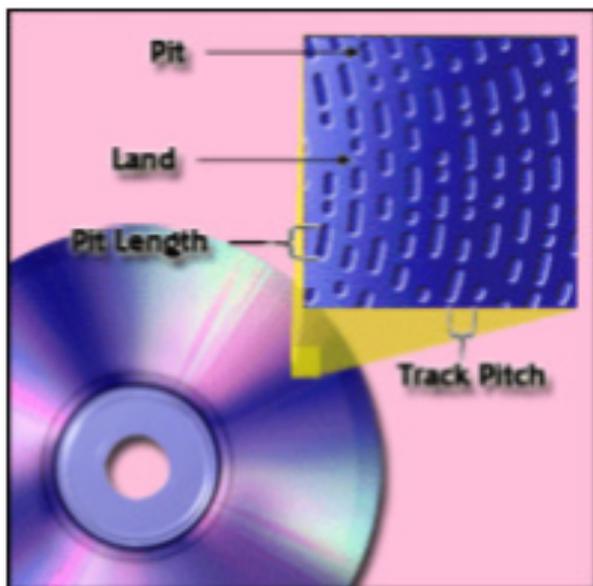
- Esponiamo un CD/DVD alla luce solare, variando l'angolo di inclinazione: a seconda dell'angolo appariranno delle linee luminose dei colori dell'arcobaleno, dal rosso al violetto
- Illuminiamo ora un CD/DVD con un raggio laser ed osserviamo la luce riflessa su una parete buia: apparirà una figura di interferenza caratterizzata da tanti massimi luminosi e minimi bui

Entrambi i fenomeni sono un effetto dell'**interferenza della luce** dovuta alla **struttura a solchi del CD**, che si comportano come **tante sorgenti coerenti** di luce, riflettendo i raggi luminosi con differenza di fase costante



L'interferenza della luce

- I CD hanno una superficie rugosa fatta di scanalature concentriche di profondità prossima alla lunghezza d'onda nel visibile. La luce riflessa dalla cresta interferisce con quella riflessa dal fondo della scanalatura dando luogo a massimi e minimi di intensità
- A seconda dell'angolo di incidenza, diversi colori (= lunghezze d'onda) producono un massimo di intensità di luce riflessa .
- Lo stesso avviene per spessori di materiali semi-riflettenti per la luce riflessa dalla prima superficie attraversata e la luce riflessa dalla seconda superficie

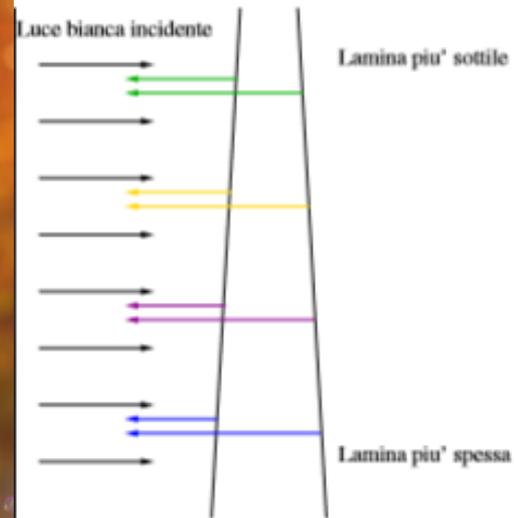


L'interferenza della luce



- Prendete dell'**acqua saponata** e un **cerchio di plastica** del diametro di una decina di centimetri o un cerchietto per fare le bolle di sapone
- Dopo aver immerso il cerchio sollevatelo, facendo in modo che si formi una **sottile pellicola d'acqua**
- Illuminate con una lampada la lamina d'acqua: **dopo qualche secondo** compariranno in alto delle **linee orizzontali colorate!**

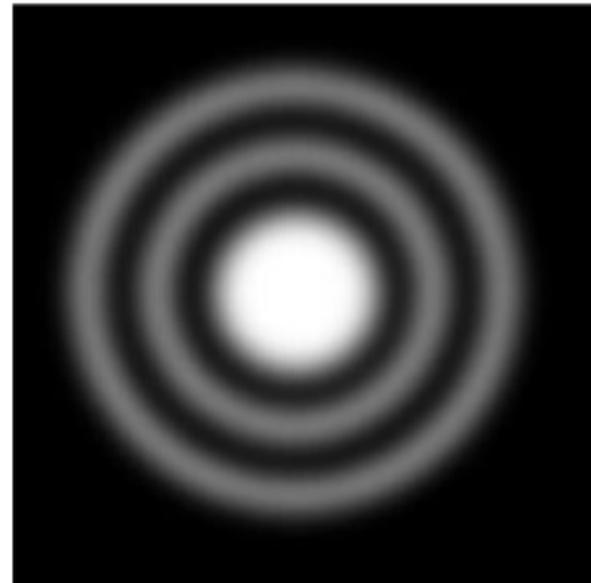
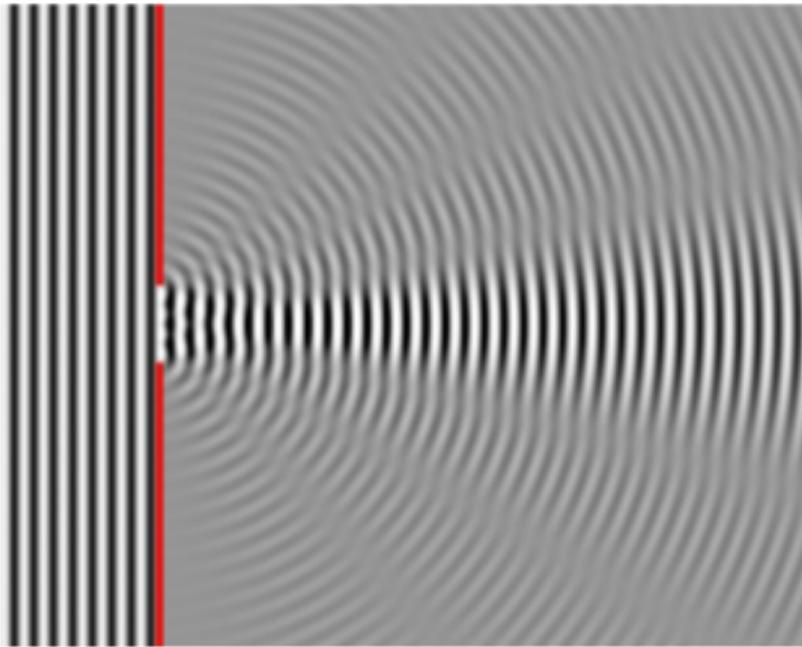
L'interferenza della luce



A causa della forza di gravità, dopo alcuni secondi, la **pellicola** d'acqua sarà **più spessa in basso e più sottile in alto**. La luce incidente contiene tutte le lunghezze d'onda (dal rosso al violetto). **Parte** di essa viene **riflessa dalla prima superficie** della pellicola, **parte dalla seconda**. Poiché il secondo raggio riflesso avrà percorso una distanza più lunga del primo **i due raggi torneranno indietro sfasati**. Ad una data altezza dal fondo della lamina tale sfasamento causerà interferenza costruttiva per alcune lunghezze d'onda e distruttiva per altre lunghezze d'onda, determinando il colore della linea orizzontale che vediamo

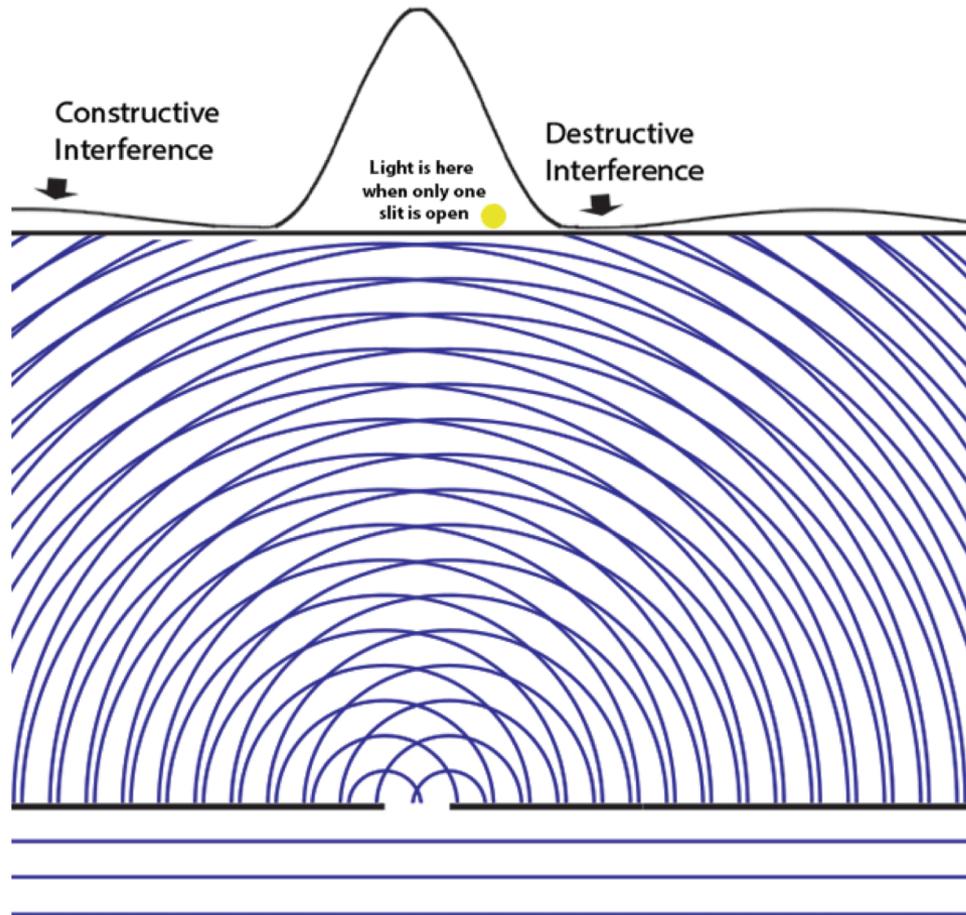
Diffrazione

La **diffrazione** è un fenomeno associato alla deviazione della traiettoria di propagazione delle onde, quando queste incontrano un **ostacolo** sul loro cammino di dimensioni dell'ordine della lunghezza d'onda. A quel punto i contorni dell'ostacolo diventano indefiniti. È tipica di ogni genere di onda (suono, le onde sulla superficie dell'acqua, onde radio etc.)

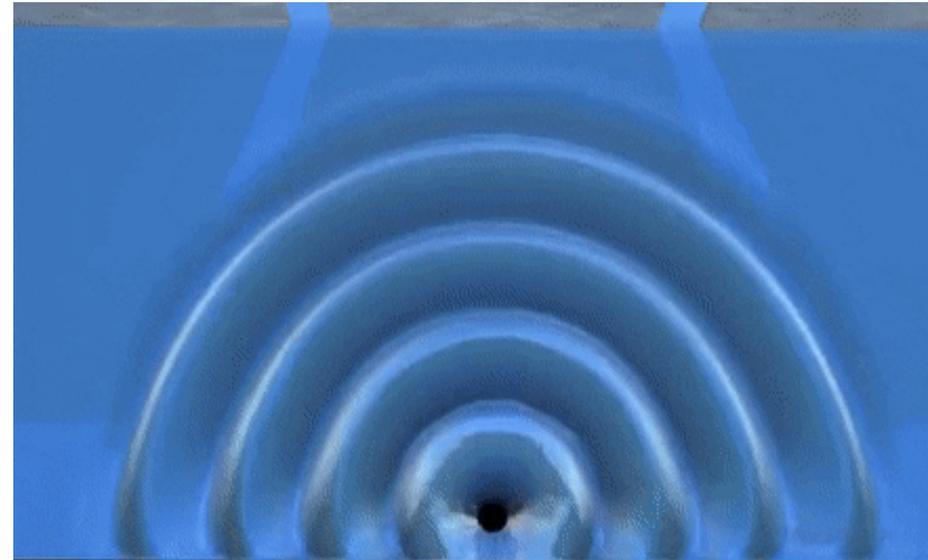


Diffrazione

Diffrazione con singola fenditura



Diffrazione da doppia fenditura



Diffrazione



- Prendiamo un capello e un puntatore laser
- Spegnendo la luce e ponendo il capello davanti al raggio laser, osserviamo sulla parete un sistema di frange chiare e scure. **In particolare nel mezzo (dove c'è il capello) c'è il massimo di intensità, invece che il buio.**
- Questo fenomeno avviene quando la luce incontra ostacoli o attraversa fenditure di dimensioni confrontabili con la sua lunghezza d'onda (tra 400 e 700 nm = $4-7 \times 10^{-4}$ mm)
- Dalla distanza fra i minimi e i massimi di intensità è possibile determinare le dimensioni del capello.

Diffrazione

Possiamo vedere un atomo con un microscopio ottico ?



Diffrazione

Possiamo vedere un atomo con un microscopio ottico ?



NO! Non importa quanto buone siano le lenti e quanto sia

l'ingrandimento.

Il motivo è che un atomo è circa mille volte più piccolo delle dimensioni della lunghezza d'onda della luce visibile.

Ci vorrebbe una «luce» con una lunghezza d'onda più piccola delle dimensioni dell'atomo

Elenco materiale per le esperienze

Descrizione	Quantità	Prezzo unitario stimato (Euro)
Specchio 30 cm x 30 cm	1	6,00
Foglio polistirolo 50 cm x 40 cm x 2 cm	1	3,00
Chiodi 2 mm x 25 mm	30	3,00
Matita nera	1	0,50
Goniometro	1	1,00
Squadra millimetrata	1	2,00
Vaschetta plastica bordo alto 10 cm x 20 cm traspar.	1	2,00
Vaschetta plastica bordo alto 10 cm x 20 cm opaca	1	n.d., conf. gelato
Moneta	1	1,00
Puntatore laser	1	15,00
Bottiglia acqua minerale 1,5 lt	1	n.d.
Bocchetta di latte 50 ml	1	n.d.
Bicchieri di vetro trasparente	1	0,50
Prisma ottico di vetro o specchietto 10 cm x 5 cm	1	4,00
Evidenziatore giallo, rosso e verde	1+1+1	1,50
CD ROM usato	1	n.d.
Bocchetta detersivo piatti 50 ml	1	n.d.
Piastrina plastica 5 cm x 5cm opaca forata per fissaggio capello	1	n.d.
Anello di plastica (O-ring) di diametro 4-5 cm	1	0,50
Totale		41,00