

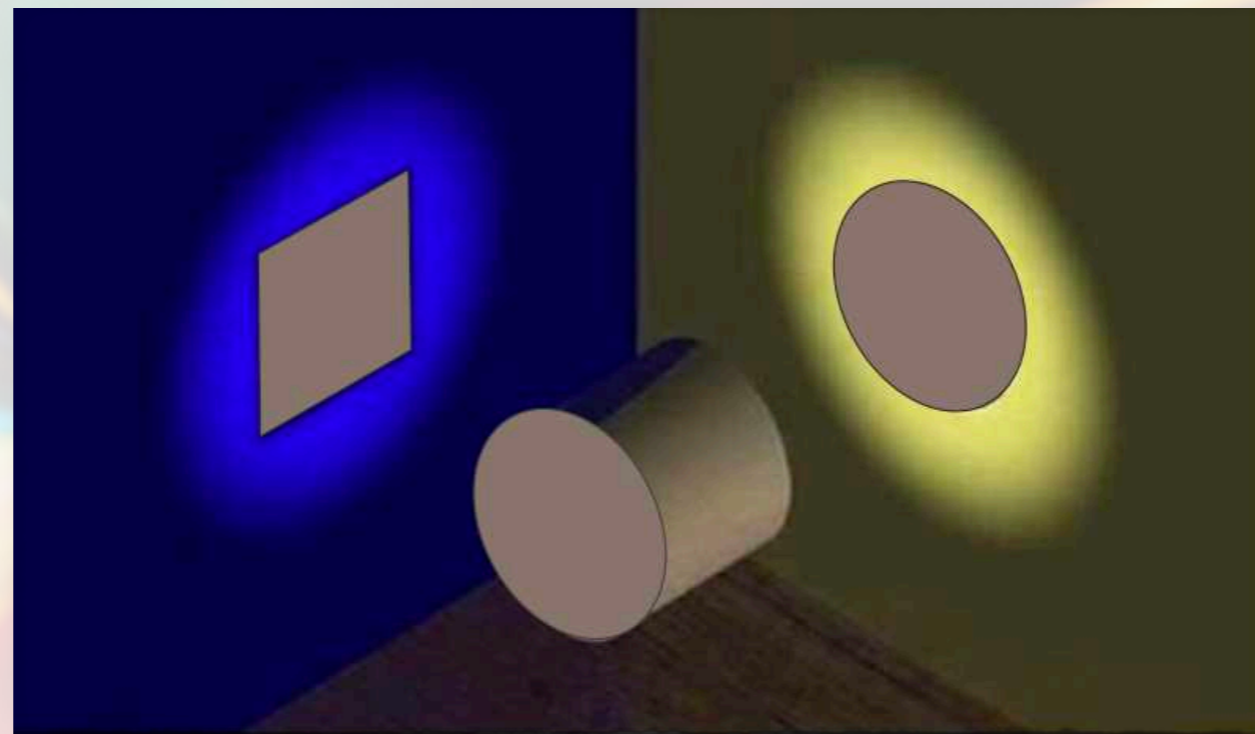
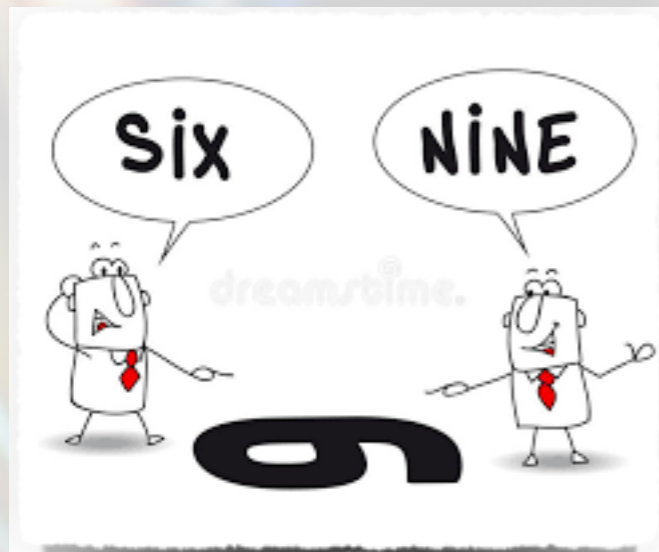
LUCE: ONDA O PARTICELLA?
ESPERIMENTI CHE "PROVANO" A RISPONDERE

LIVIA SOFFI
RICERCATRICE UNIVERSITA' LA SAPIENZA - ROMA



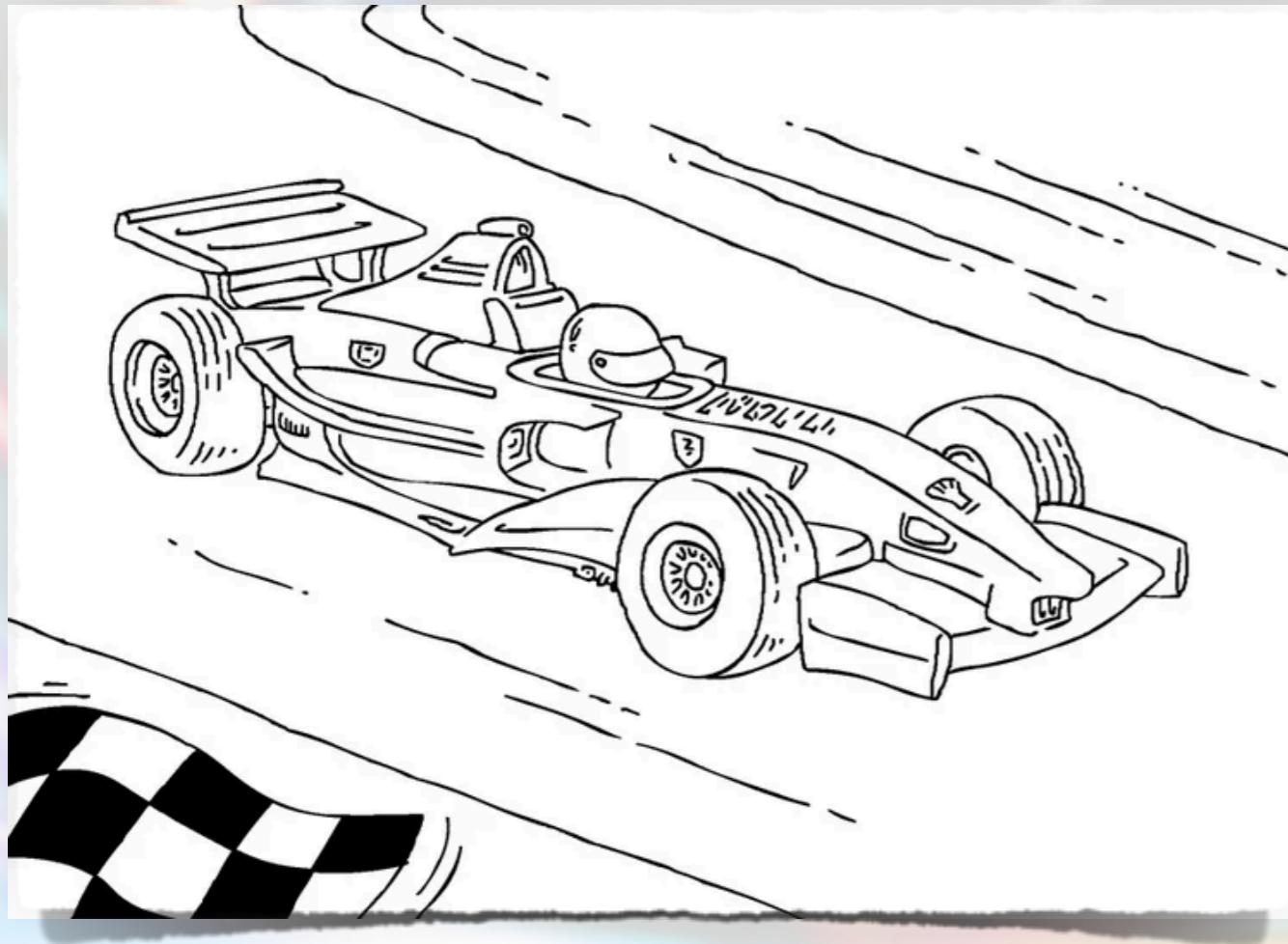
LA PROSPETTIVA DEL PUNTO DI VISTA

- Spesso in fisica (e non solo) la **descrizione di un fenomeno** puo' cambiare a seconda del punto di vista utilizzato per osservarlo



LA PROSPETTIVA DEL PUNTO DI VISTA

- Pensate al classico esempio di un **sistema in moto relativo** rispetto ad un sistema fisso...



A che velocità si muove
l'orologio al polso del pilota?

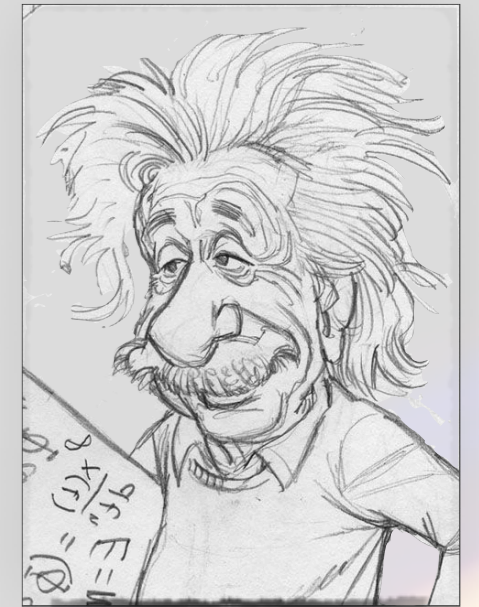
Rispetto a chi?

Promosso!

LA NATURA DELLA LUCE

- Oggi proveremo a rispondere alla domanda:

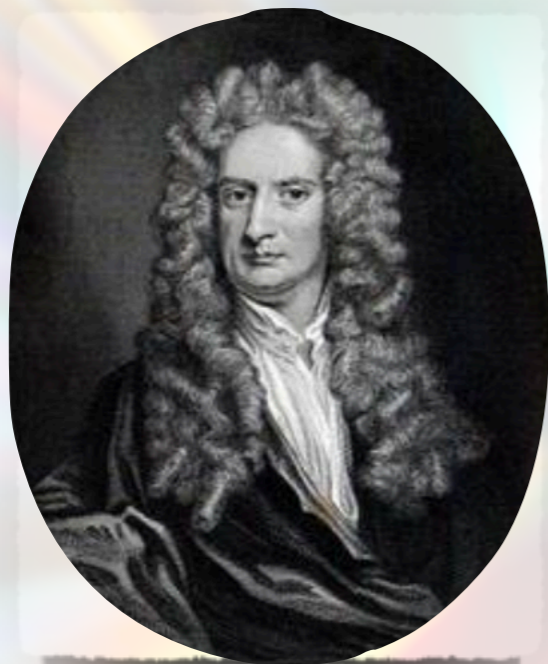
La luce e` un'onda o una particella?



- Vedremo prima le risposte che diedero

Newton (1704)

Modello corpuscolare



Huygens (1678)

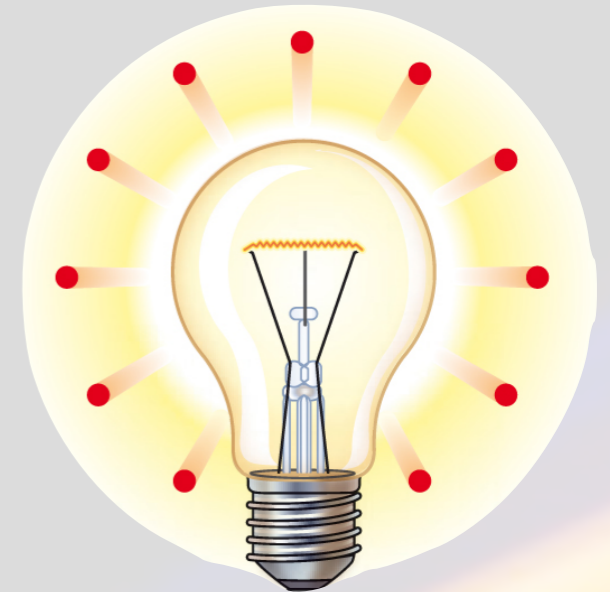
Modello ondulatorio



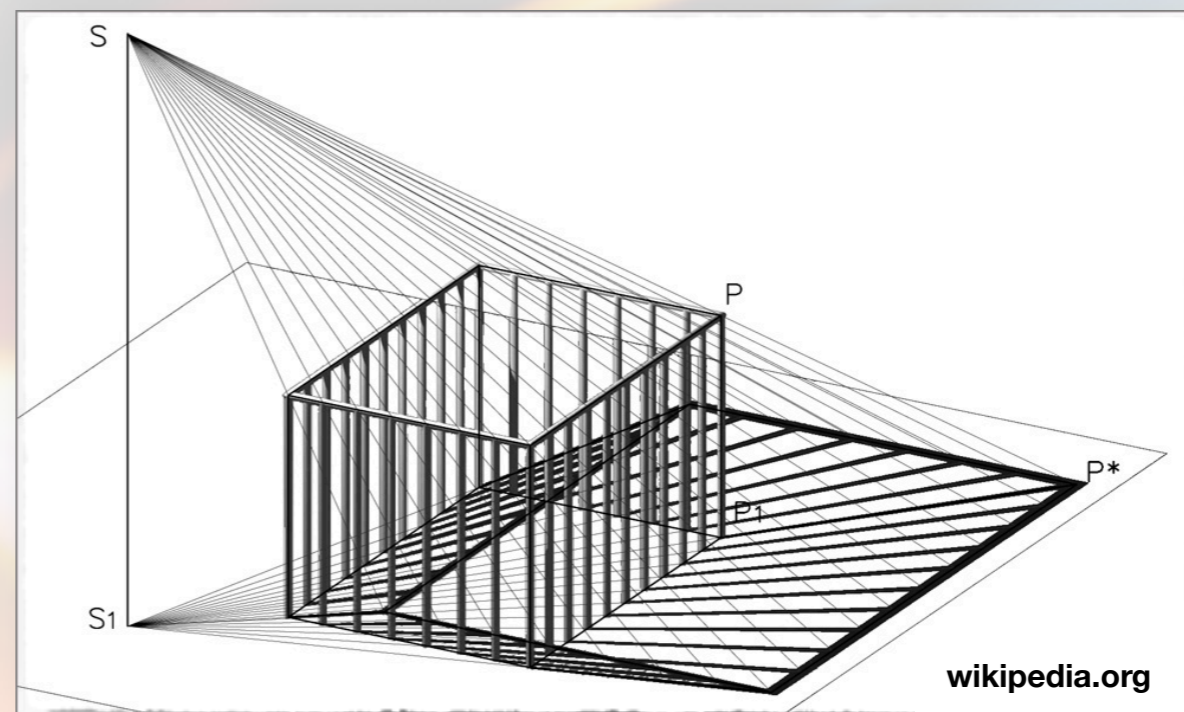
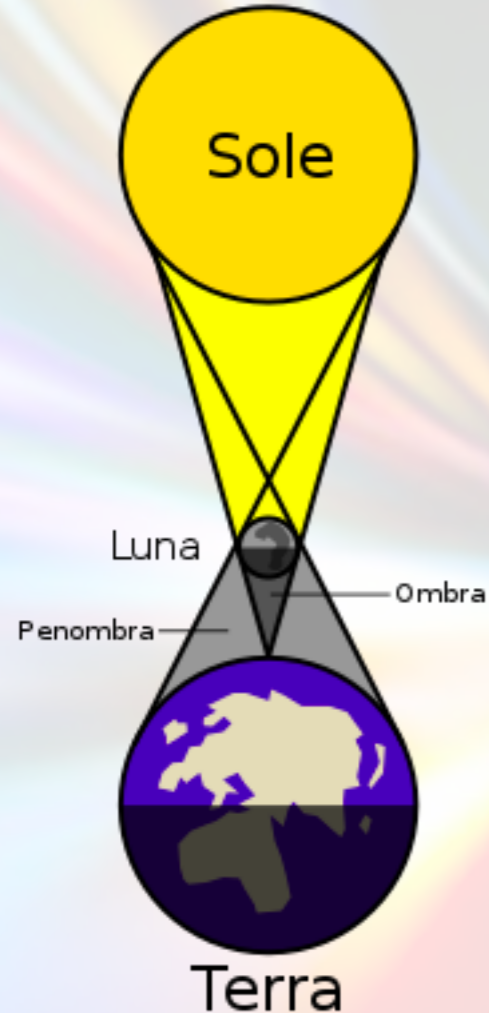
- Proveremo a rispondere noi con degli **esperimenti "dal vivo"**

IL MODELLO CORPUSCOLARE DI NEWTON

- La luce è composta da **piccolissime particelle di materia** emesse da sostanze luminose in tutte le direzioni
- Tali particelle vengono liberate dai corpi luminosi e si propagano in **linea retta**:



OMBRE E ECLISSI



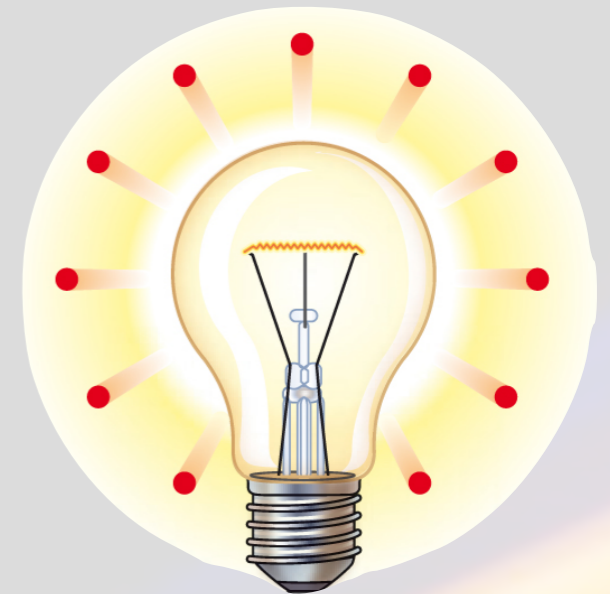
wikipedia.org

IL MODELLO CORPUSCOLARE DI NEWTON

- La luce è composta da **piccolissime particelle di materia** emesse da sostanze luminose in tutte le direzioni
- Tali particelle **rimbalzano** contro gli ostacoli con urti elastici ("**come palline**"):

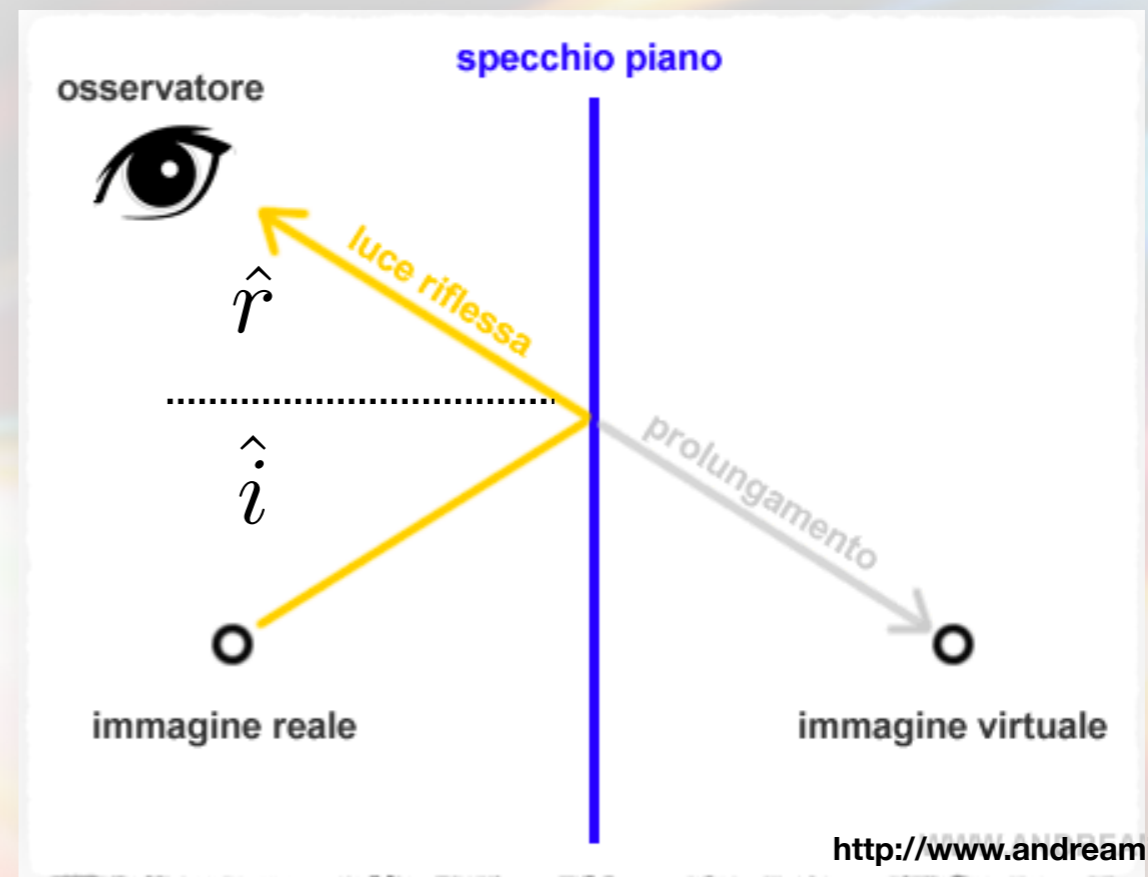


RIFLESSIONE



Dalla **conservazione della quantità di moto** in due dimensioni:

1. Il raggio incidente e quello riflesso giacciono su un **piano**
2. L'**angolo di riflessione** è **uguale** a quello di incidenza



IL MODELLO CORPUSCOLARE DI NEWTON

- La luce è composta da **piccolissime particelle di materia** emesse da sostanze luminose in tutte le direzioni
- Tali particelle **rimbalzano** contro gli ostacoli con urti elastici ("**come palline**"):



RIFLESSIONE



Amaldi, L'Amaldi 2.0 © Zanichelli editore 2010

Dalla **conservazione della quantità di moto** in due dimensioni:

1. Il raggio incidente e quello riflesso giacciono su un **piano**
2. L'**angolo di riflessione** è **uguale** a quello di incidenza



ESPERIMENTO CON PALLINE : LA RIFLESSIONE

IL MODELLO CORPUSCOLARE DI NEWTON

- La luce è composta da **piccolissime particelle di materia** emesse da sostanze luminose in tutte le direzioni
- A causa delle **diverse forme, masse e dimensioni** dei corpuscoli:



COLORI



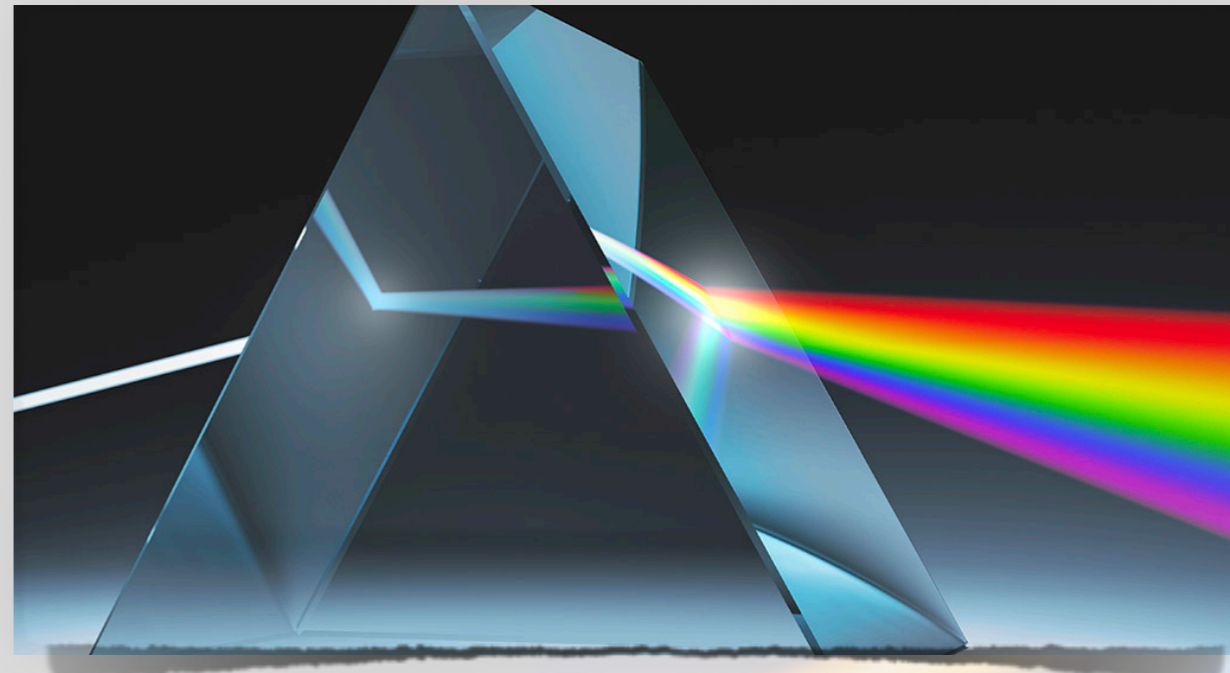
Amaldi, L'Amaldi 2.0 © Zanichelli editore 2010

- Rifrazione & dispersione
- Luci di **colori diversi vengono rifratte con angoli differenti.**
 - corpuscoli più grossi -> rosso
 - corpuscoli più piccoli -> violetto



MA COME SPIEGAVA NEWTON LA RIFRAZIONE DELLA LUCE?

- All'interno del mezzo i corpuscoli sentono una **forza diversa in base alla loro massa**



Tale forza ne **devia la direzione.**

Ma se c'è una forza c'è un' **accelerazione:**

La luce è più veloce nei corpi rispetto al vuoto.

Paradosso: sappiamo che non è così!



La pura natura corpuscolare non funziona!

LA VELOCITA' DELLA LUCE

Infatti noi sappiamo che la **velocita' della luce nel vuoto** e`:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$$

E` la massima possibile in natura ed e` **invariante in tutti i sistemi di riferimento**

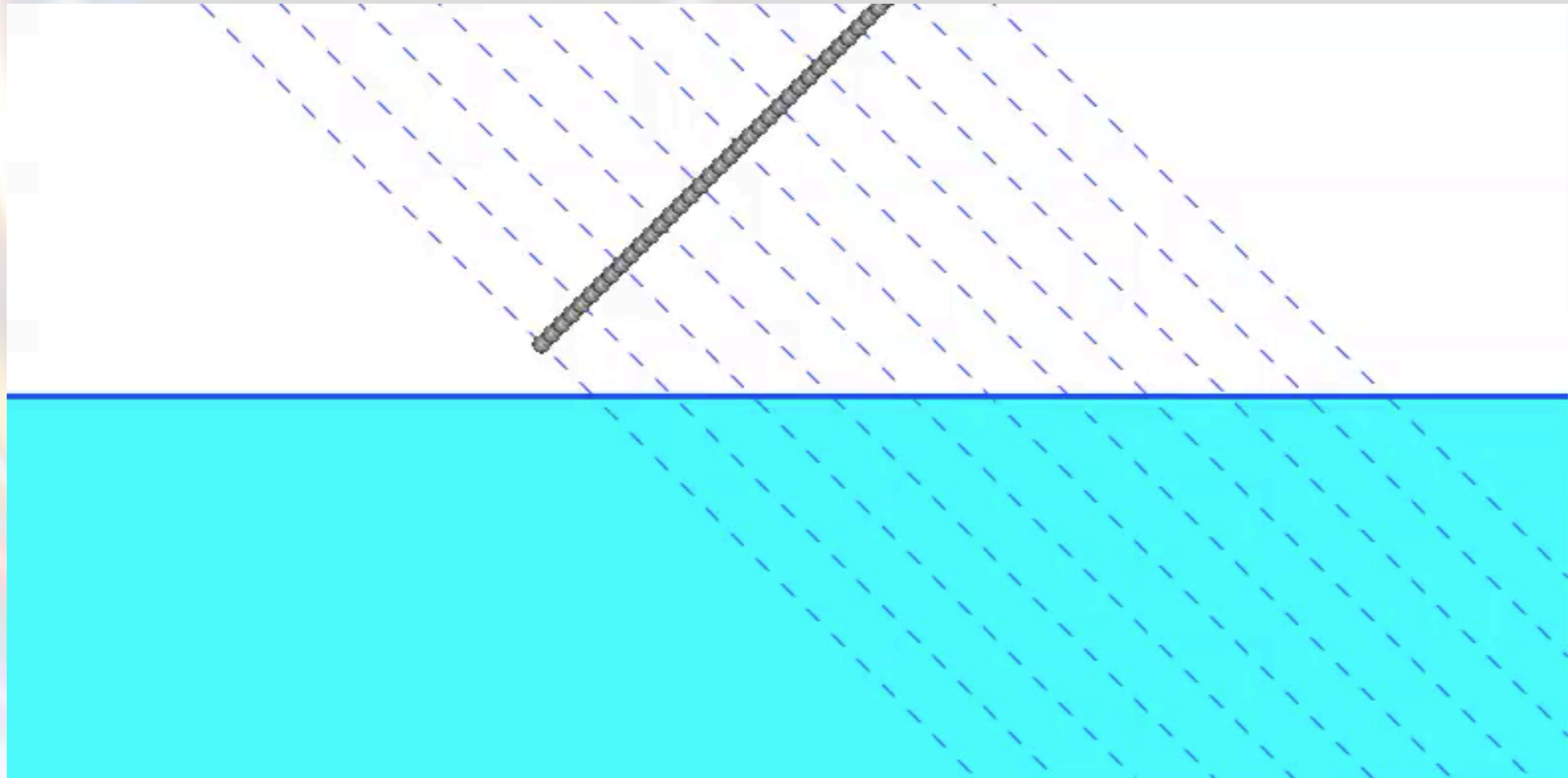
In un mezzo la velocita' della luce e` sempre minore di c e vale la relazione:

$$v = c/n$$

Con **n = Indice di rifrazione, sempre >1**

$$\text{ex. } n(\text{aria}) = 1.0003, n(\text{acqua}) = 1.33$$

ANIMAZIONE SULLA RIFRAZIONE

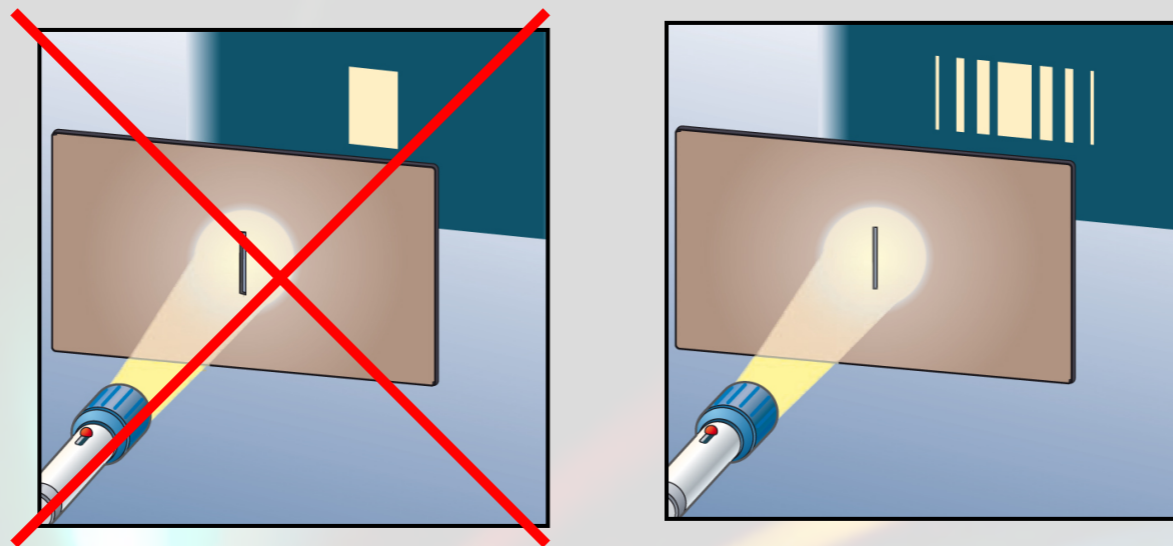


[Link](#)

LA DIFFRAZIONE

Si ha **diffrazione** quando la luce aggira gli ostacoli e invade una zona d'ombra.

Se un fascio di luce passa attraverso una **fenditura molto stretta**, sullo schermo compaiono delle **frange luminose alternate a zone scure**

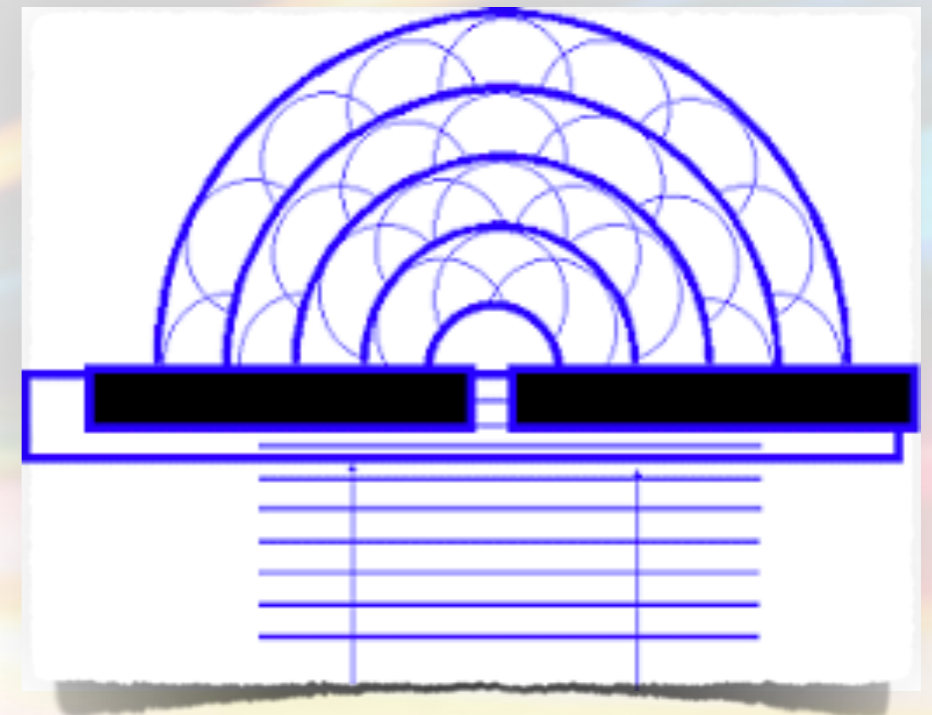


Il modello corpuscolare della luce non è in grado di spiegare il fenomeno della diffrazione.

**La pura natura
corpuscolare non funziona!**

IL MODELLO ONDULATORIO DI HUYGENS

- La luce è costituita da **un insieme di onde meccaniche** che si propagano in linea retta a velocità finita
- Ciascun punto del fronte d'onda è il centro di **onde particolari**
- **Il fronte d'onda** è determinato dalla tangente comune alle estremità di queste onde elementari
- **La velocità della luce è inferiore nei mezzi più densi**



Principio di Huygens (1678)

NEWTON VS HUYGENS

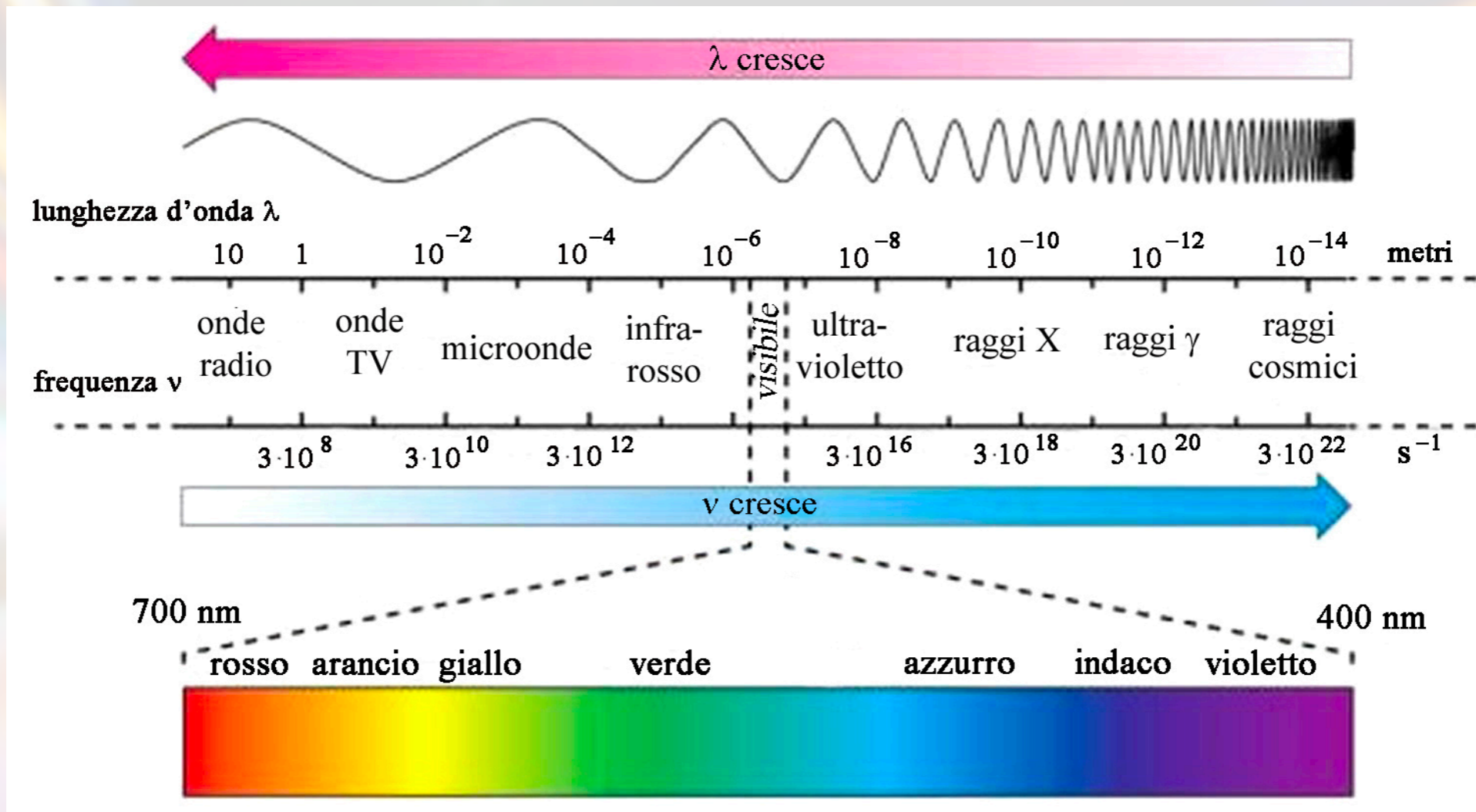
- Il principio di **Huygens** spiegava:
Riflessione, rifrazione e diffrazione della luce
- Tuttavia fu principalmente **la teoria corpuscolare di Newton** a ispirare gli studiosi del 18° secolo.
- Bisognerà però aspettare Il **19° secolo e Thomas Young** per rimettere in discussione la teoria di Newton.

EULERO E L'ORIGINE DEI COLORI

- Un' eccezione fu rappresentata da **Eulero** che assunse la **teoria ondulatoria** e per primo spiegò il fenomeno della diffrazione:

ad ogni colore è associata una determinata lunghezza d'onda.

- Noi oggi sappiamo che:

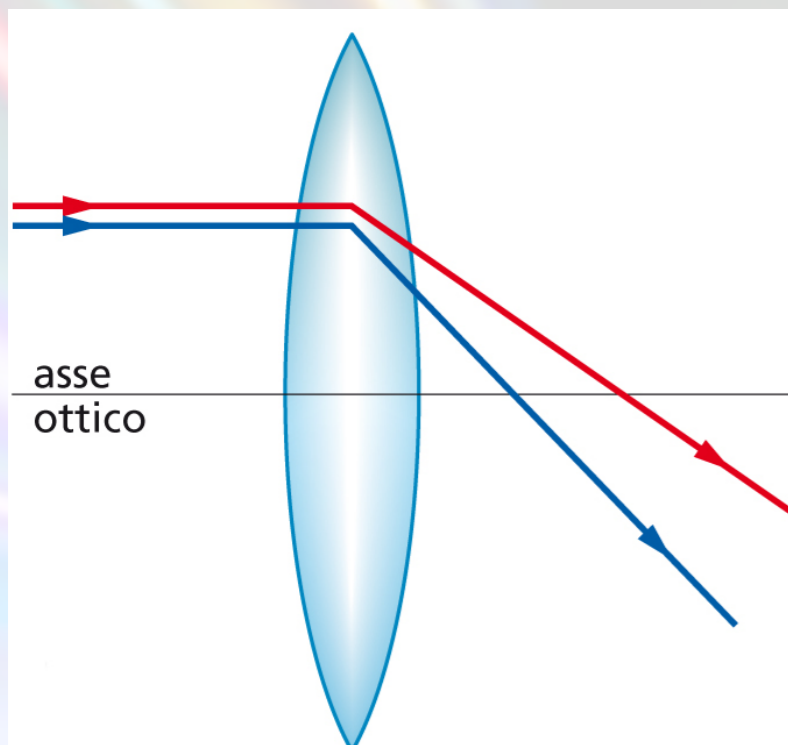


EULERO E L'ORIGINE DEI COLORI

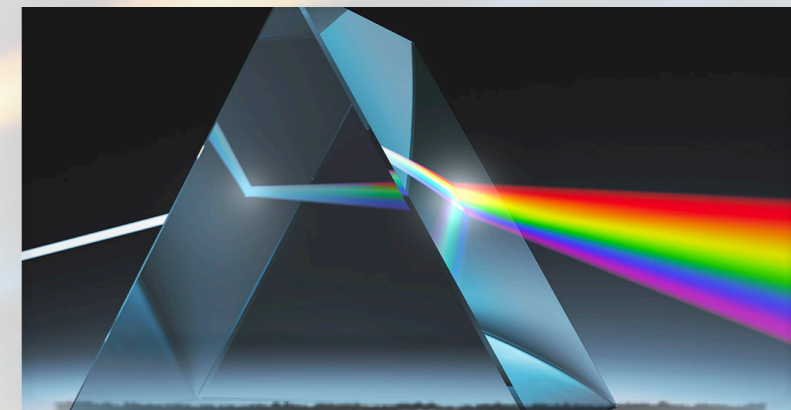
- Un' eccezione fu rappresentata da **Eulero** che assunse la **teoria ondulatoria** e per primo spiegò il fenomeno della diffrazione:

ad ogni colore è associata una determinata lunghezza d'onda.

- Noi oggi sappiamo che:



Colore	Indice di rifrazione
Violetto	1,522
Blu	1,516
Giallo	1,510
Rosso	1,507



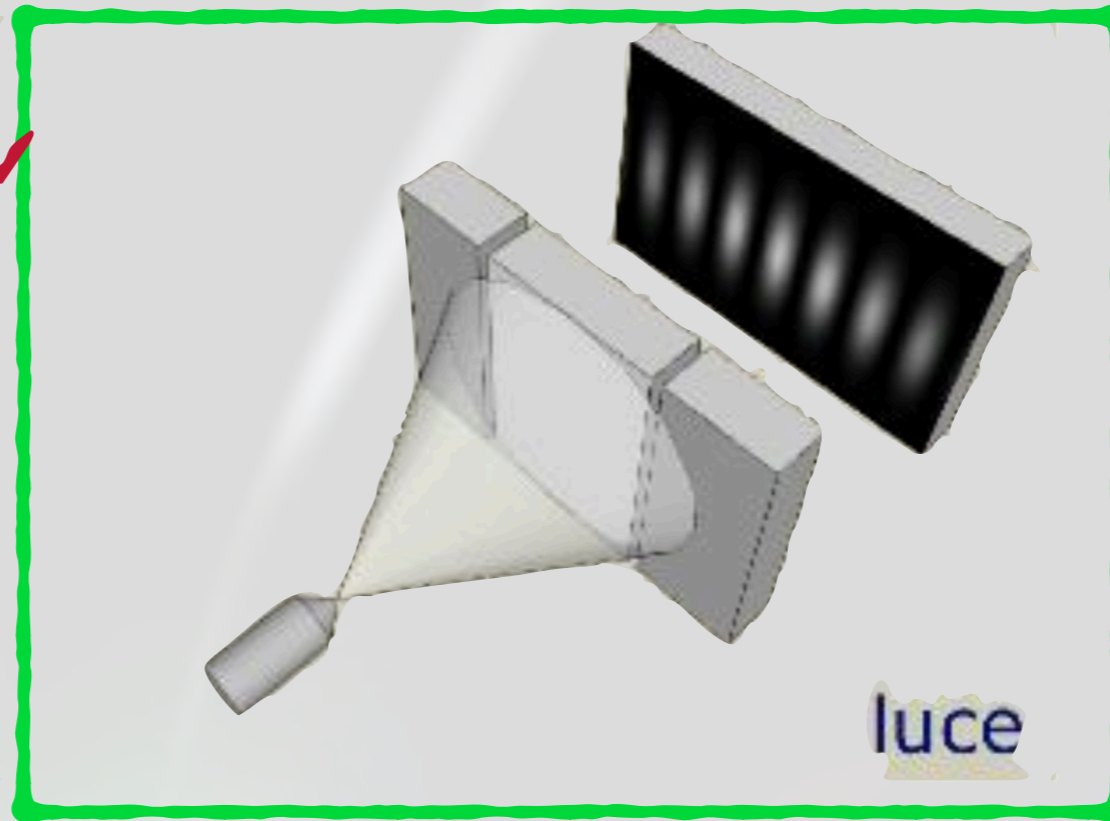
- L'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda: **colori diversi vengono rifratti ad angoli diversi**

The background features a central point from which numerous bright, multi-colored light streaks radiate outwards. The colors include yellow, orange, red, pink, purple, blue, and green, creating a starburst or lens flare effect. The streaks are slightly blurred and overlap, giving a sense of depth and movement.

ESPERIMENTO CON LASER: DIFFRAZIONE E INTERFERENZA

L'INTERFERENZA: ESPERIMENTO DI YOUNG (1801)

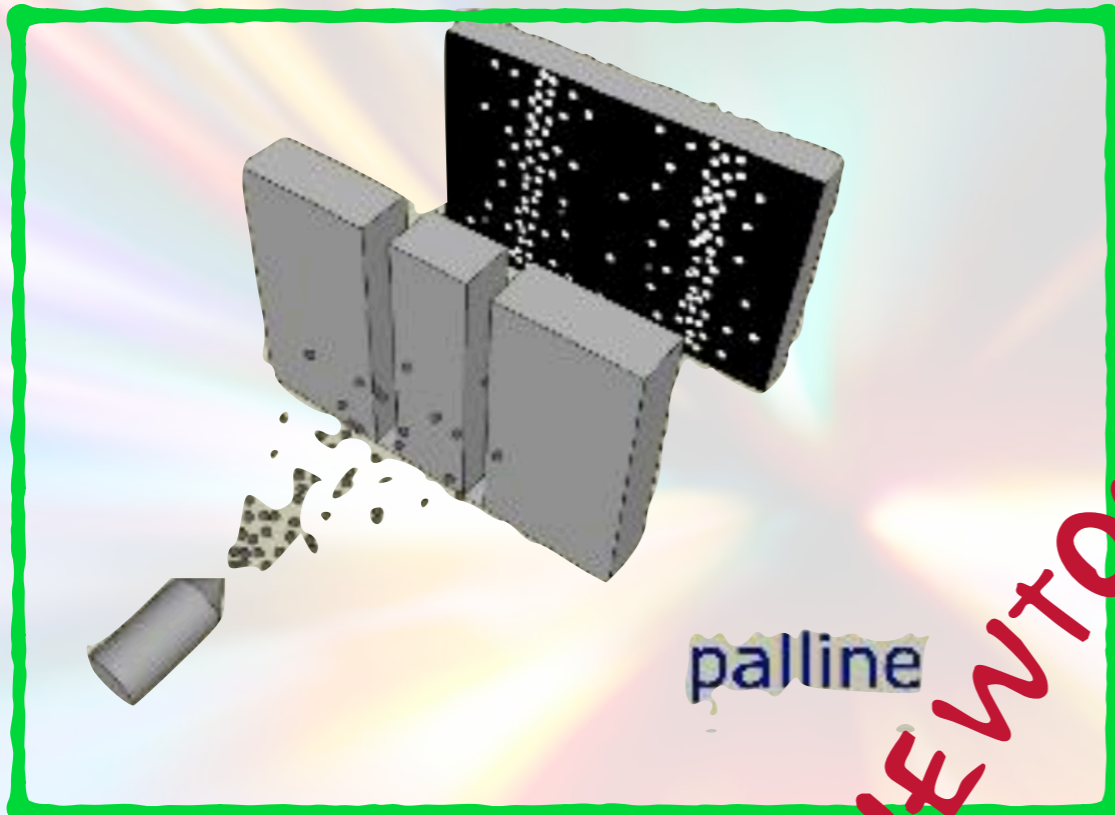
OSSERVAZIONE



Paradosso: sappiamo che non e' così!



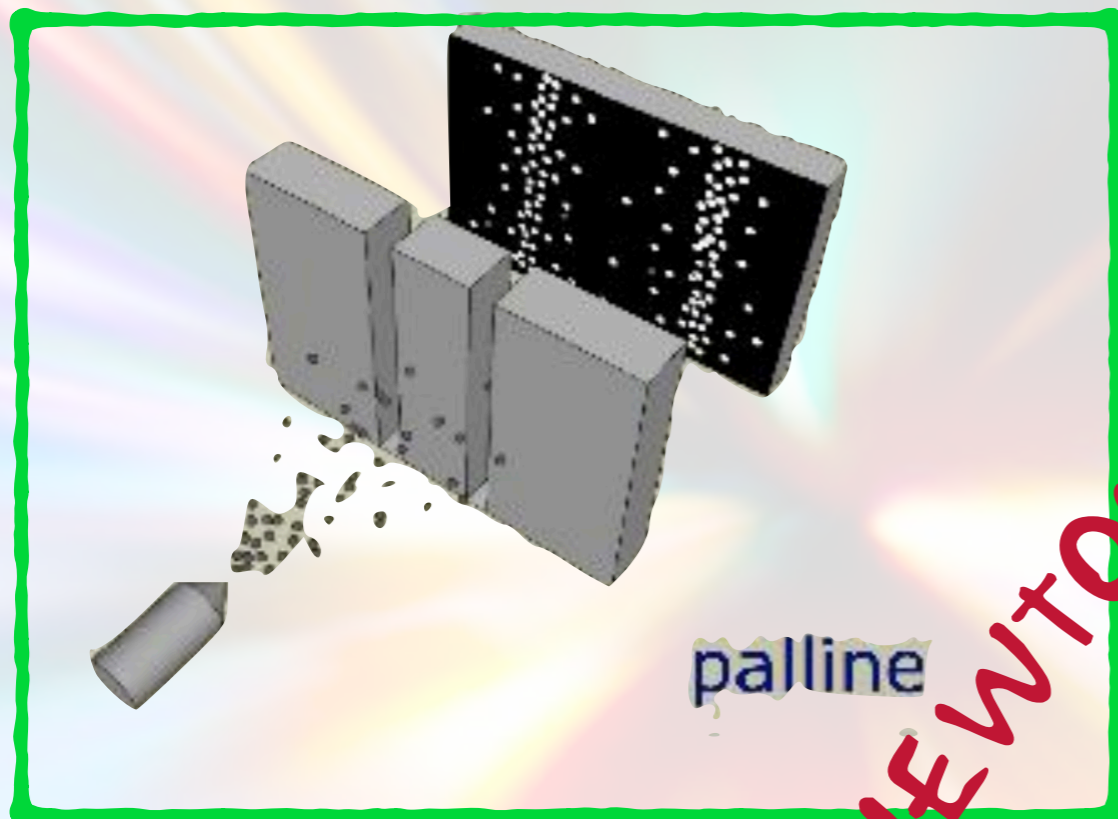
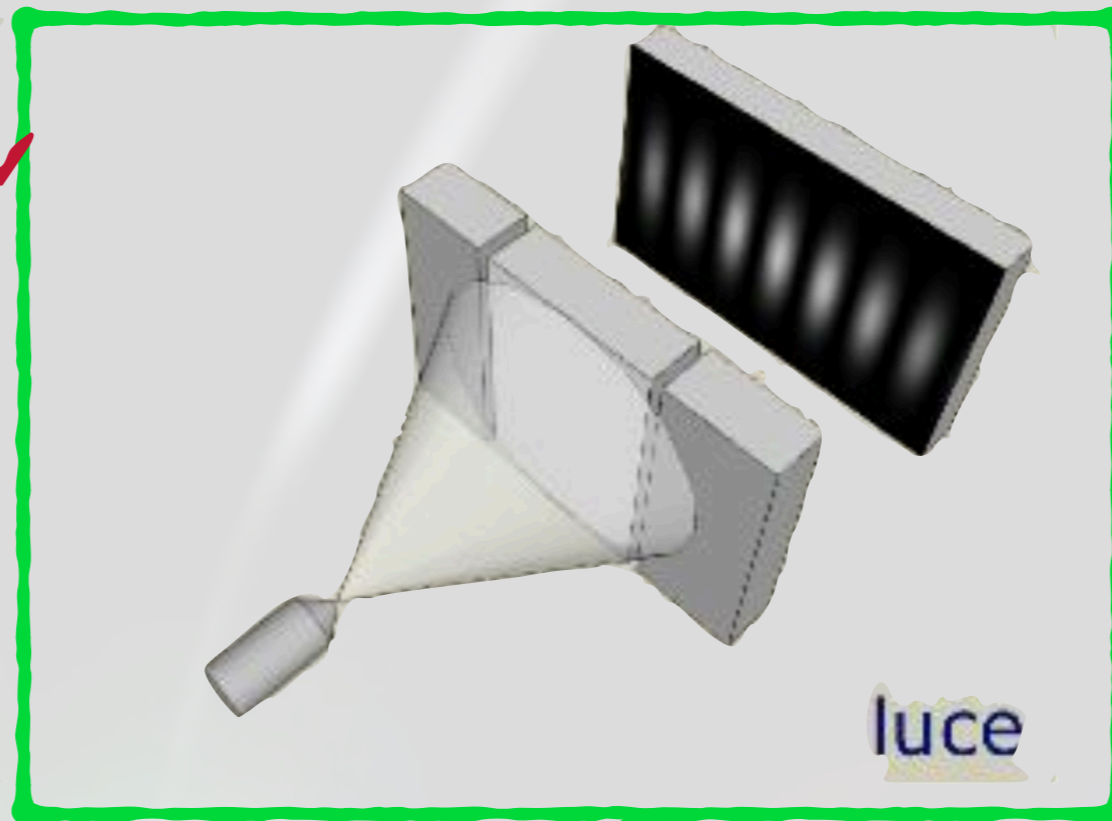
La pura natura corpuscolare non funziona!



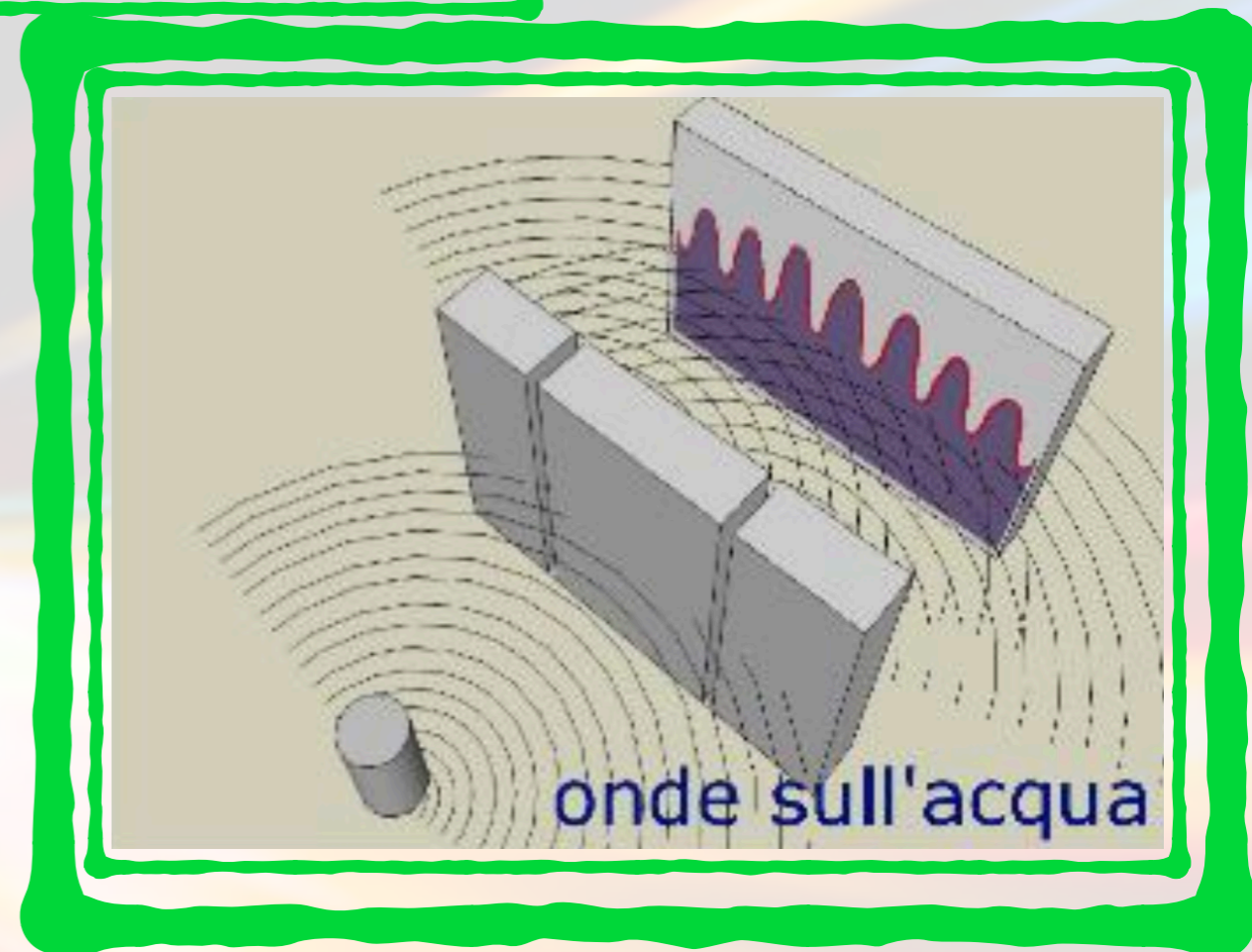
NEWTON

SOLUZIONE ALL' INTERFERENZA

OSSERVAZIONE

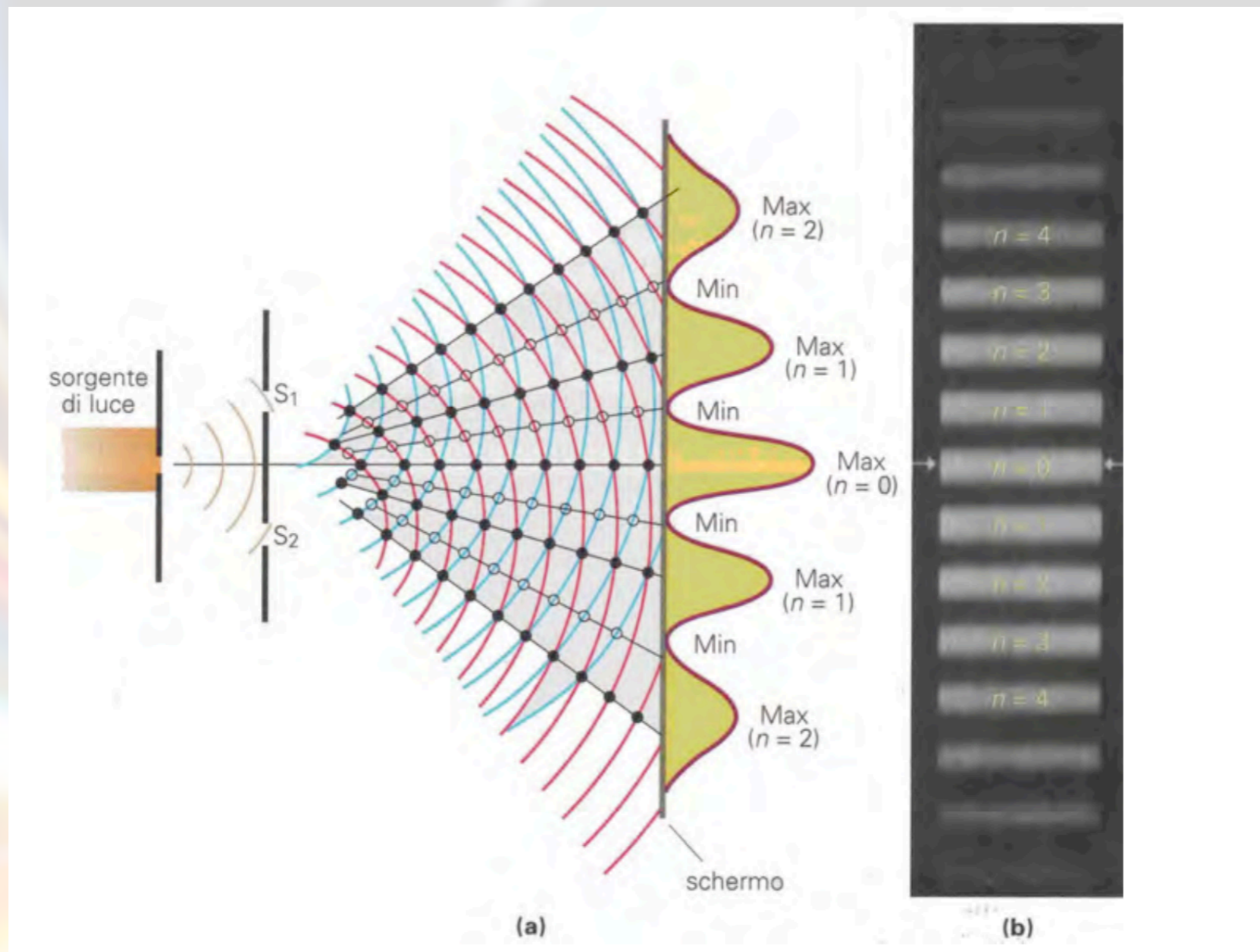


NEWTON



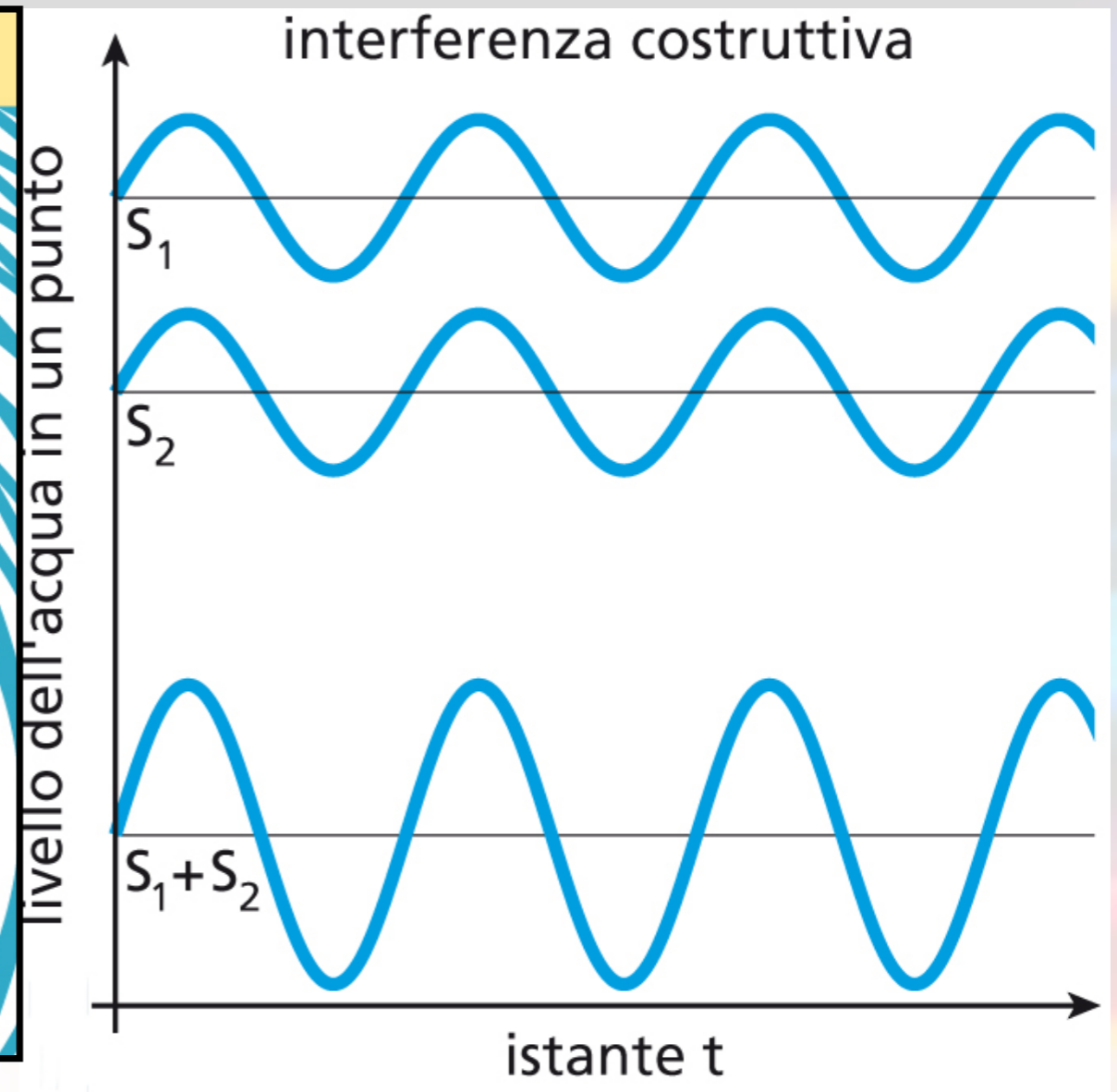
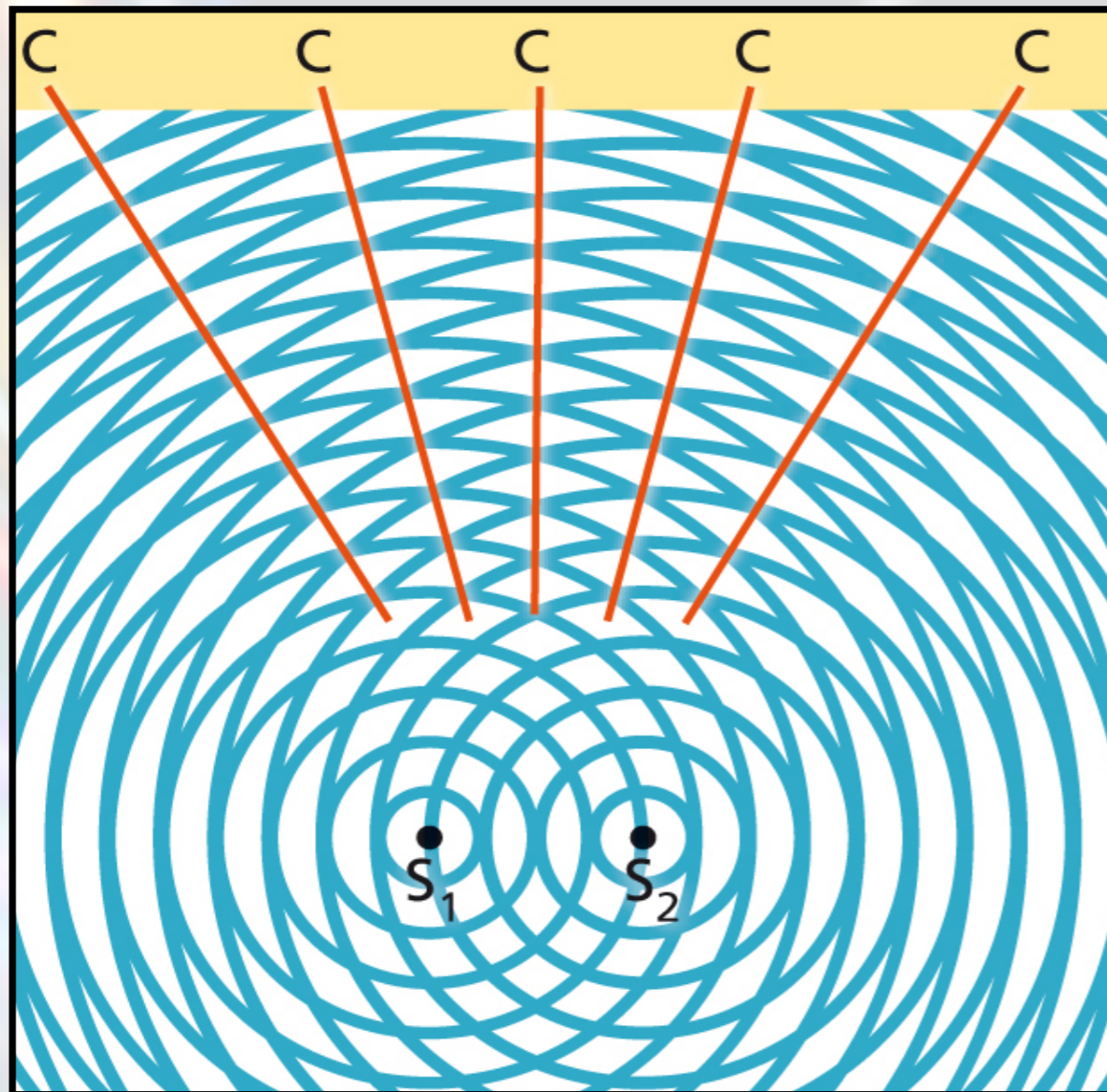
PERCHE' SI OSSERVA L'INTERFERENZA

- Si ha **interferenza** quando due onde si propagano nello stesso mezzo: in alcuni punti gli effetti **si rinforzano (interferenza costruttiva)**, in altri **si annullano (interferenza distruttiva)**.



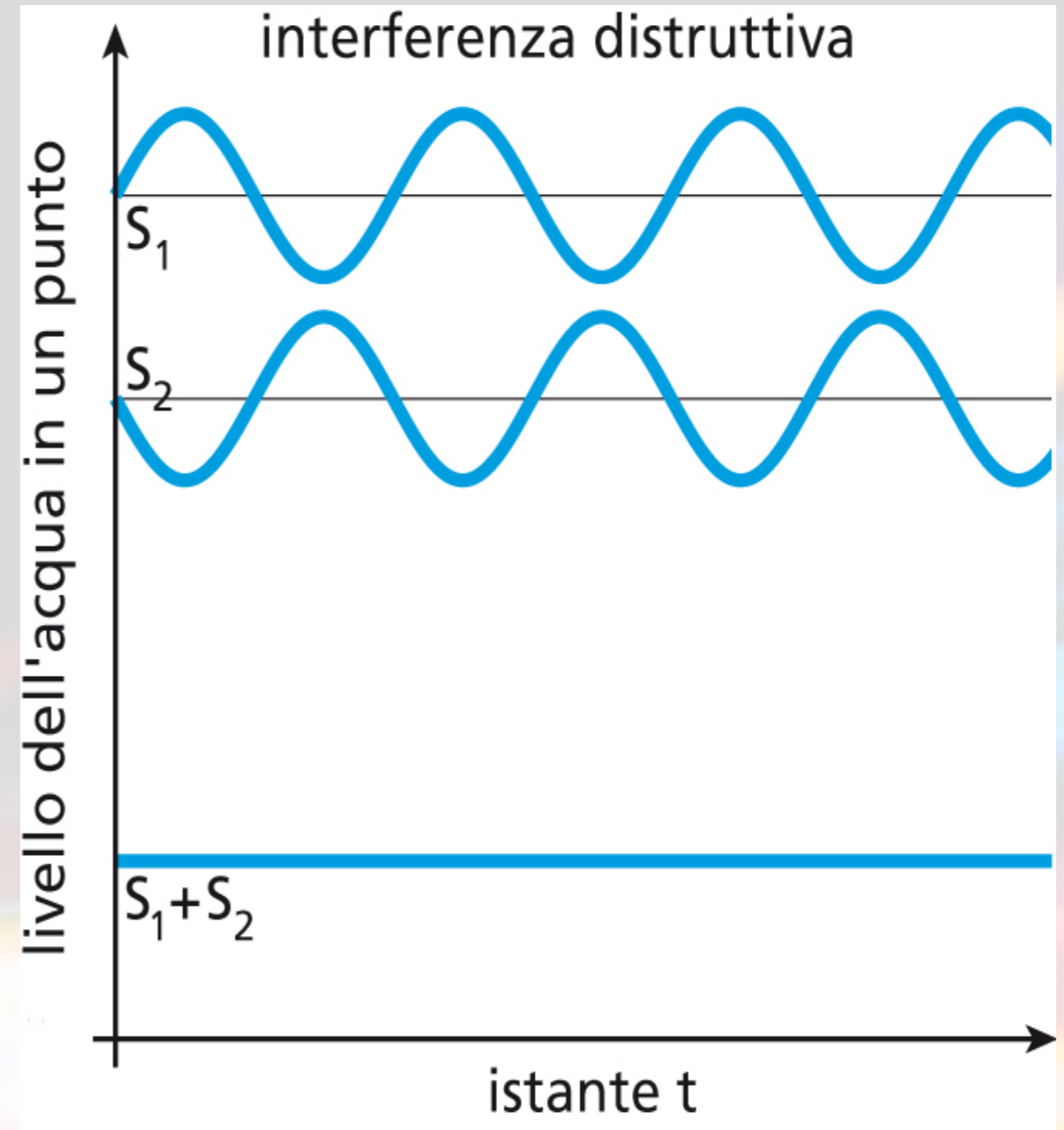
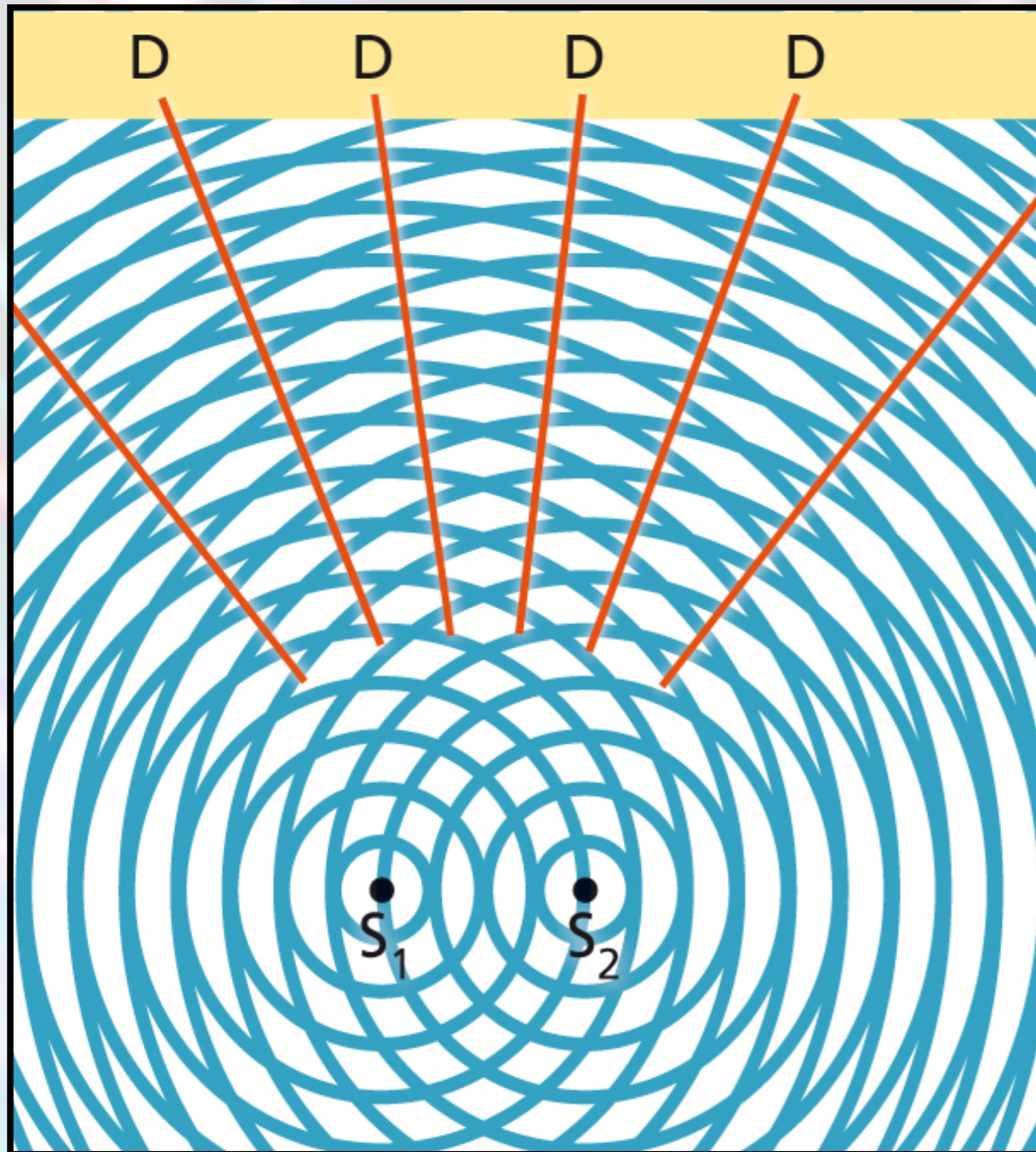
INTERFERENZA COSTRUTTIVA

L'interferenza costruttiva si ha quando le due onde oscillano **in fase** (giungono insieme al valore massimo e a quello minimo).



INTERFERENZA DISTRUTTIVA

L'interferenza distruttiva si ha quando le onde oscillano in **opposizione di fase** (una raggiunge il massimo quando l'altra è al minimo).



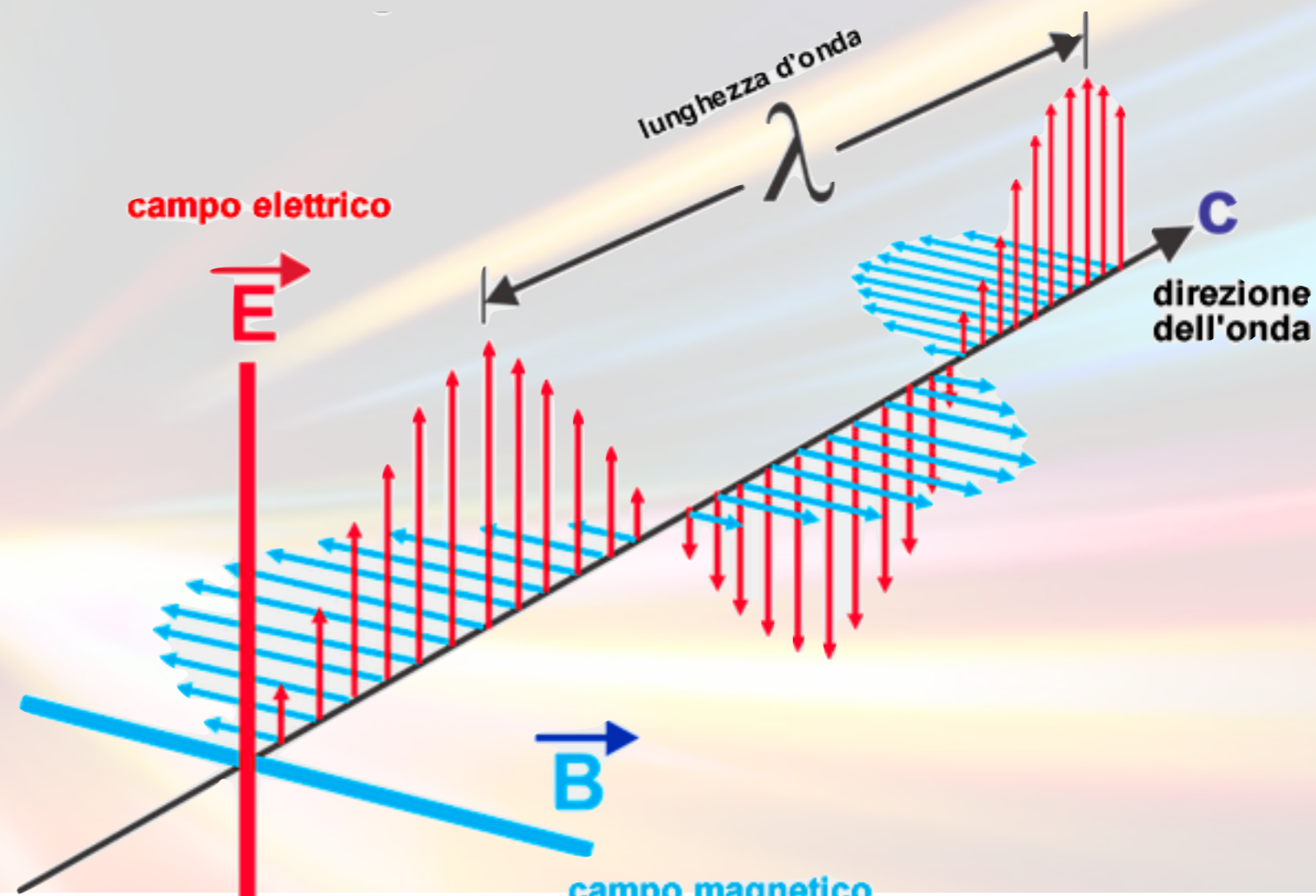
IL FORMALISMO DI MAXWELL

- Le **equazioni di Maxwell** prevedono l'esistenza di **onde elettromagnetiche**, ossia di **oscillazioni** del campo elettromagnetico in direzioni perpendicolari.
- La **velocità** alla quale l'onda si muove attraverso lo spazio è definita dalla relazione:

$$c = \lambda \nu$$

- L'energia per unità di volume posseduta da un'onda è proporzionale a A^2

Flusso continuo di energia



RICAPITOLANDO..

Modello

Spiega

Non Spiega

- **Corpuscolare di Newton**



- Propagazione linea retta luce
- Esistenza colori
- Riflessione
- Rifrazione

- Diffrazione
- Interferenza

- **Ondulatorio di Huygens, Young**



- Formalismo di Maxwell

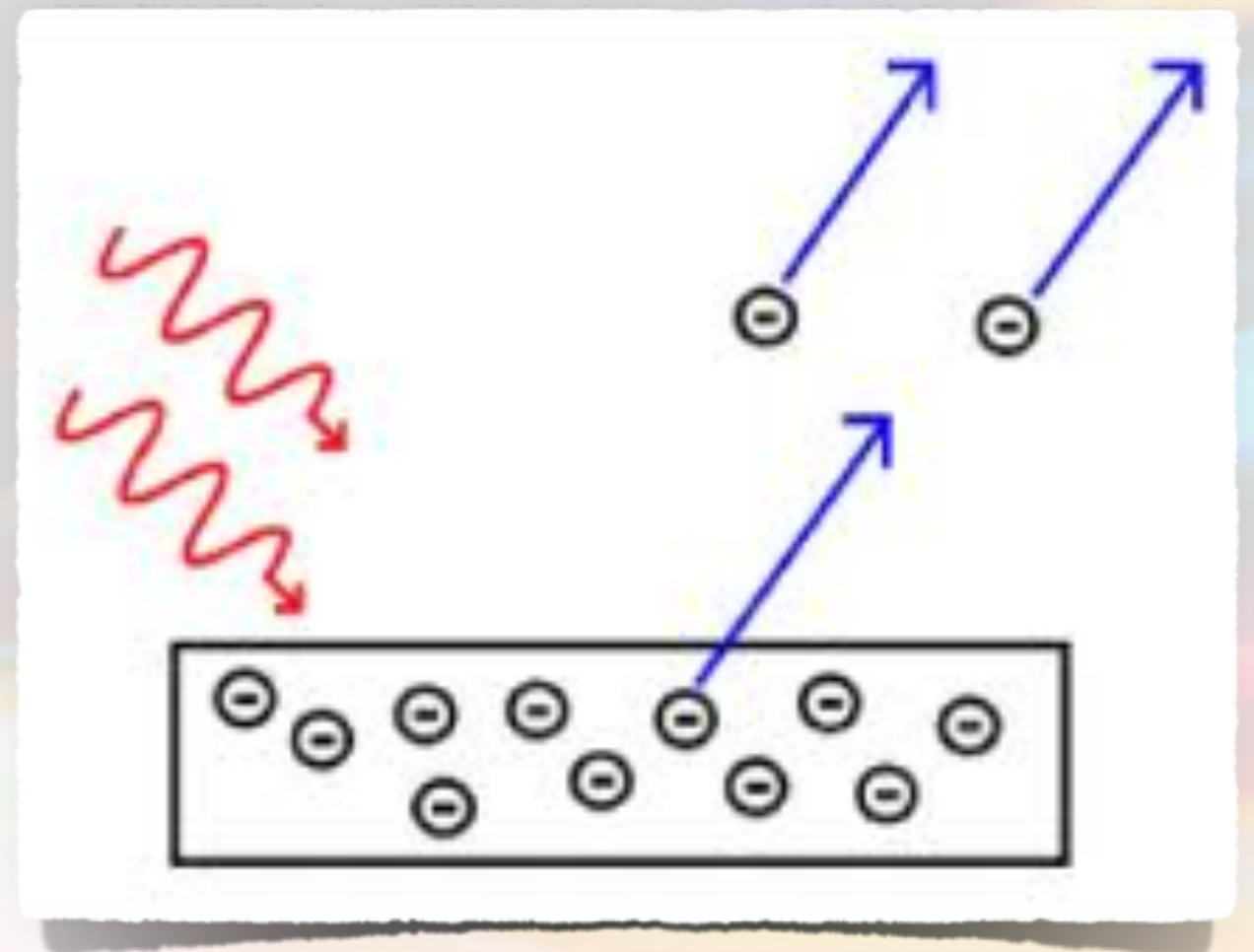
- Newton +
- Diffrazione
- Interferenza

TEORIA DEFINITIVA?

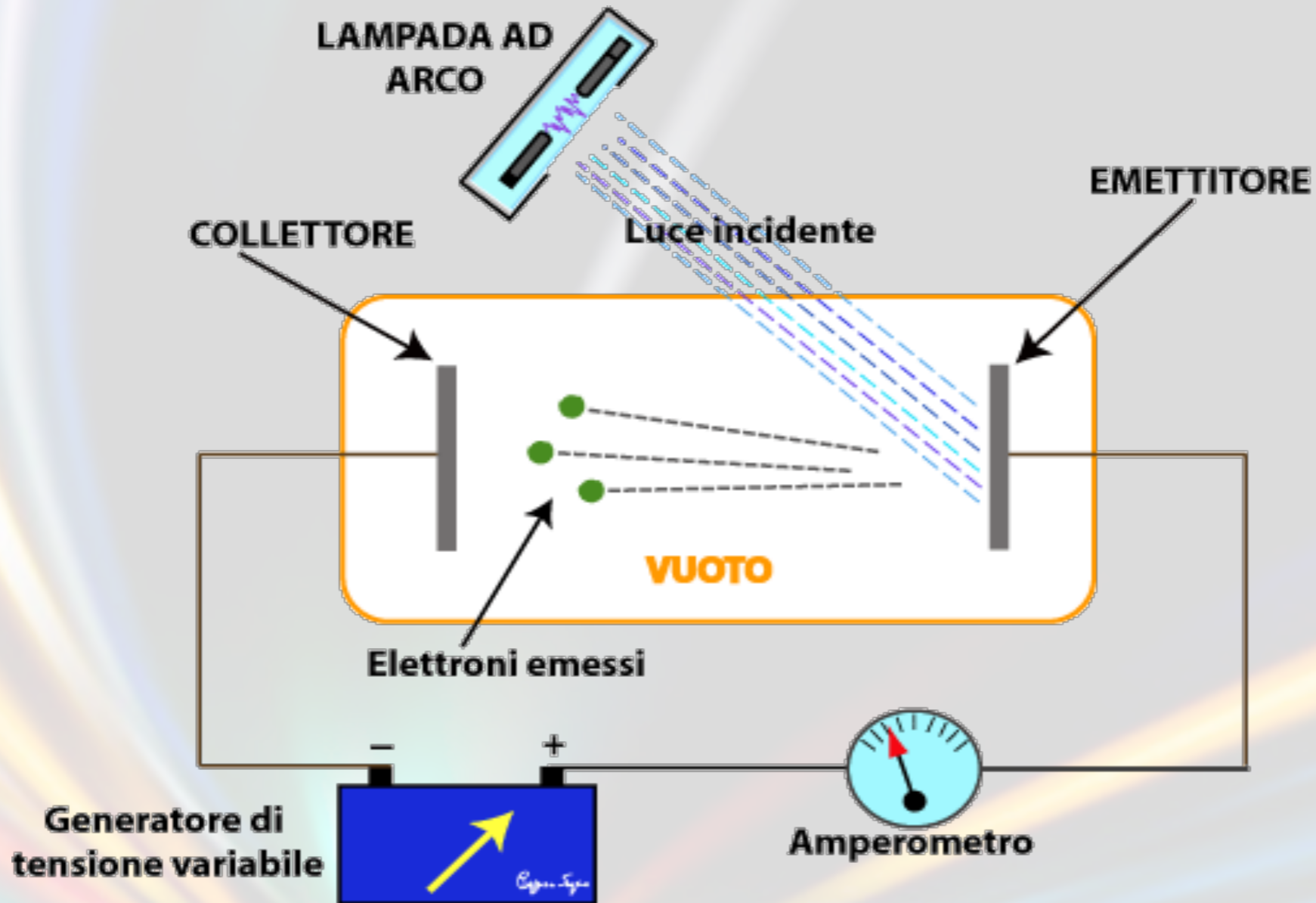
ONDE O PARTICELLE?

La natura della luce tornò di nuovo alla ribalta quando **Einstein**, nel **1905**, pubblicò un importante lavoro in cui mostrava che bisognava utilizzare un modello corpuscolare, e non ondulatorio, per spiegare l'**effetto fotoelettrico**.

L'effetto fotoelettrico consiste nell'**estrazione di elettroni da un metallo ad opera di un fascio di luce** incidente avente una particolare lunghezza d'onda.



L'EFFETTO FOTOELETTRICO I



1. Se l'intensità della luce incidente cresce, il numero di elettroni cresce ma l'energia cinetica non cambia.
2. Se la frequenza della luce incidente viene ridotta sotto un certo valore non vengono emessi elettroni a prescindere dall'intensità della luce.

ESPERIENZA EFFETTO FOTOELETTRICO

L'EFFETTO FOTOELETTRICO II

Tutto ciò non è consistente con la visione classica secondo cui le onde elettromagnetiche sono una distribuzione continua di campi E e B .



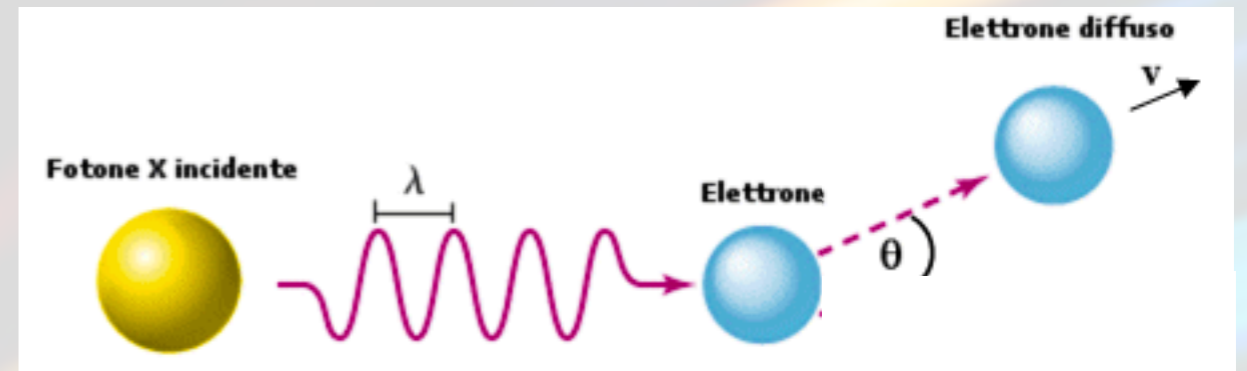
La teoria ondulatoria non funziona!

L'EFFETTO FOTOELETTRICO: SOLUZIONE DI EINSTEIN

Einstein propone l'idea secondo cui **l'energia in un fascio di luce** non è distribuita in modo continuo ma consiste in un insieme di pacchetti discreti di energia (fotoni) di:

$$E = h\nu$$

Ogni elettrone emesso è il risultato di **un singolo fotone che cede E all'elettrone**:



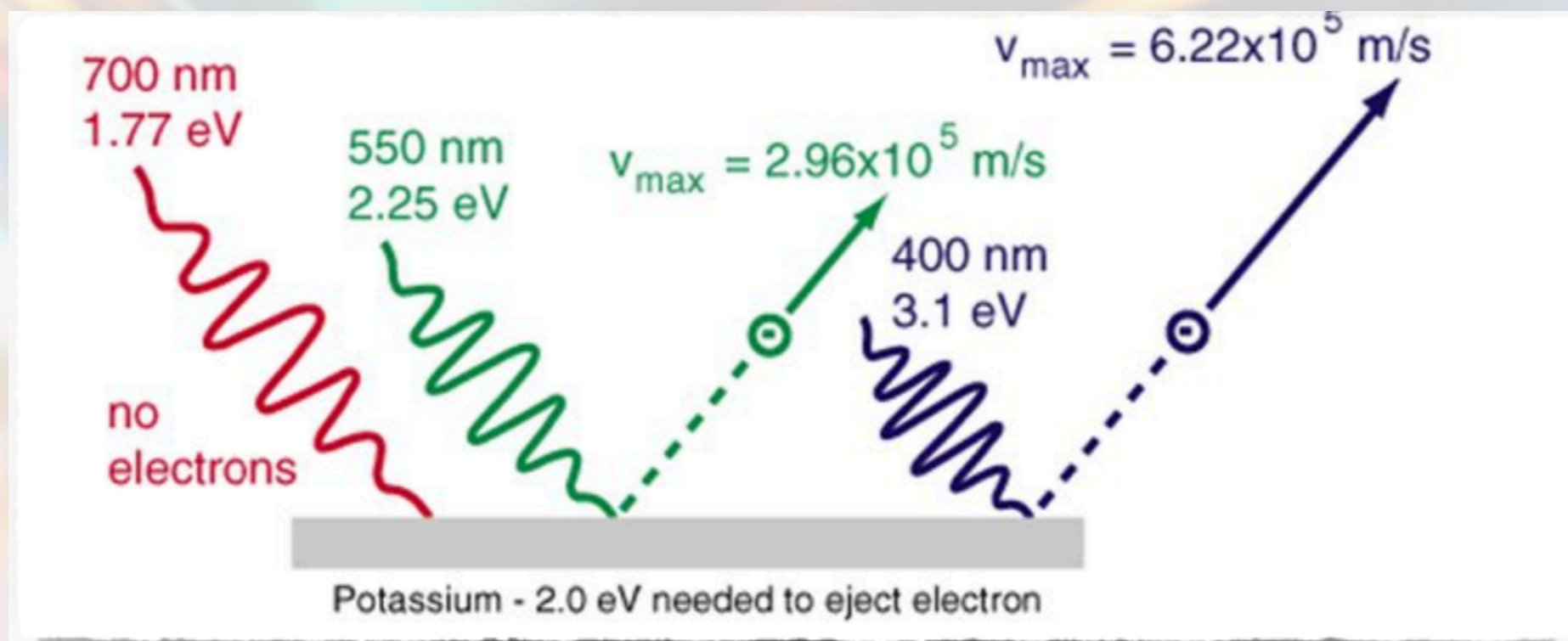
1. Con **più fotoni, più elettroni** sono emessi, ma visto che ogni fotone ha la stessa energia, **ogni elettrone emesso avrà la stessa energia e quindi K non cambia.**

L'EFFETTO FOTOELETTRICO: SOLUZIONE DI EINSTEIN

2. Per ogni metallo, c'è una **energia minima** definita per rimuovere un elettrone

Quando i **fotoni**, urtano la superficie del metallo, una parte della loro E serve a **vincere il potenziale attrattivo** che tiene legato l'elettrone all'atomo; la rimanente si trasforma in **energia cinetica dell'elettrone** espulso:

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - W$$



ONDA **E** PARTICELLA

L'effetto fotoelettrico non si spiega con la pura natura **ondulatoria** della luce



La natura **corpuscolare** e **ondulatoria** della luce **coesistono** e a ciascuna è assegnato il proprio ambito di validità



In certe situazioni si comporta come **un'onda**, in altre come una **pioggia di corpuscoli** chiamati fotoni



BONUS TRACKS

ANCHE GLI ELETTRONI SI COMPORTANO SIA COME ONDE CHE COME PARTICELLE

- Nel **1924 De Broglie**, colpito dalla scoperta che la luce mostrava sia proprietà ondulatorie che corpuscolari, avanzò l'**ipotesi che anche la materia ordinaria potesse avere una doppia natura**

Fotoni

$$\lambda = c/\nu$$

Elettroni

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

- Se gli elettroni hanno anche un **comportamento ondulatorio** e quindi godono delle **proprietà delle onde** (es. **interferenza e diffrazione**)

ESPERIENZA TUBO CATODICO

COME SI USA LA LUCE IN FISICA DELLE PARTICELLE

- Una **particella carica** che si muove in un mezzo con una velocità V maggiore della luce nel mezzo **emette fotoni**



- I fotoni si muovono nel mezzo con $v = c/n$

COME SI USA LA LUCE IN FISICA DELLE PARTICELLE

- Si puo' misurare l'angolo caratteristico a cui vengono emessi i fotoni:



- Posso mettere un rivelatore di fotoni nella direzione attesa e se misuro della luce significa che e' passata la particella

- Considerando particelle con V molto vicina a c si osserva:

$$\cos \alpha = \frac{c}{nV}$$

nell'atmosfera	$n \sim 1.00029$	$\theta \sim 1.3^\circ$
In acqua di mare	$n \sim 1.335$	$\theta \sim 42^\circ$

ESPERIMENTO T2K IN GIAPPONE

