

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

DAVIDE PAGANO

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA

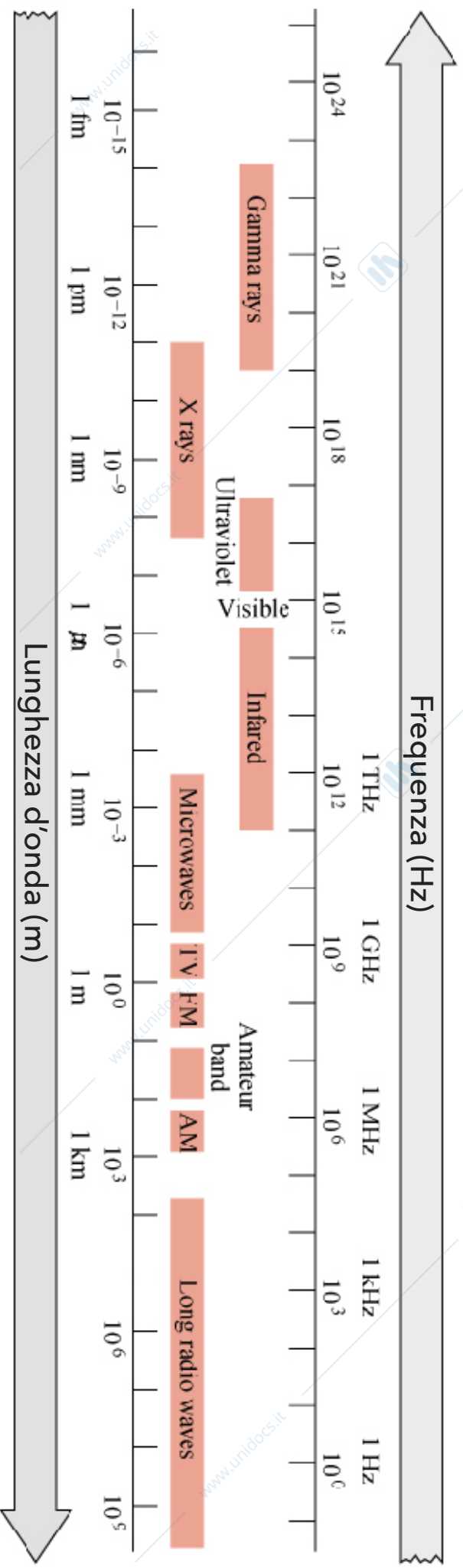
FISICA SPERIMENTALE (OTTICA ONDE)

A.A. 2017/2018

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

INTRODUZIONE

- ▶ Con spettro elettromagnetico si indica l'insieme di tutte le possibili frequenze (o lunghezze d'onda) delle onde elettromagnetiche
- ▶ Sebbene sia uno spettro continuo è possibile suddividerlo (in maniera puramente convenzionale) in intervalli (bande di frequenza)



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

INTRODUZIONE

- ▶ Non ci sono limiti ben definiti per definire le varia bande, alcuni per esempio sono fissati per legge
- ▶ Tutte le onde dello spettro elettromagnetico hanno la medesima natura e sono descritte dal medesimo formalismo matematico
- ▶ Anche se hanno proprietà molto diverse si distinguono solamente per la diversa frequenza (e lunghezza d'onda) e per il diverso meccanismo per produrle e rivelarle
- ▶ L'occhio (così come l'orecchio per le onde sonore) è sensibile soltanto ad un piccolo intervallo di frequenze (e lunghezze d'onda)

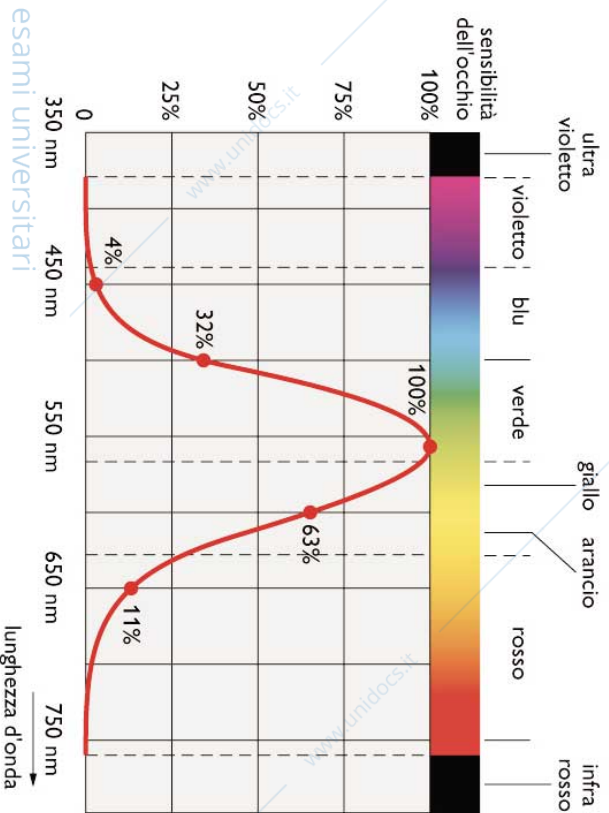
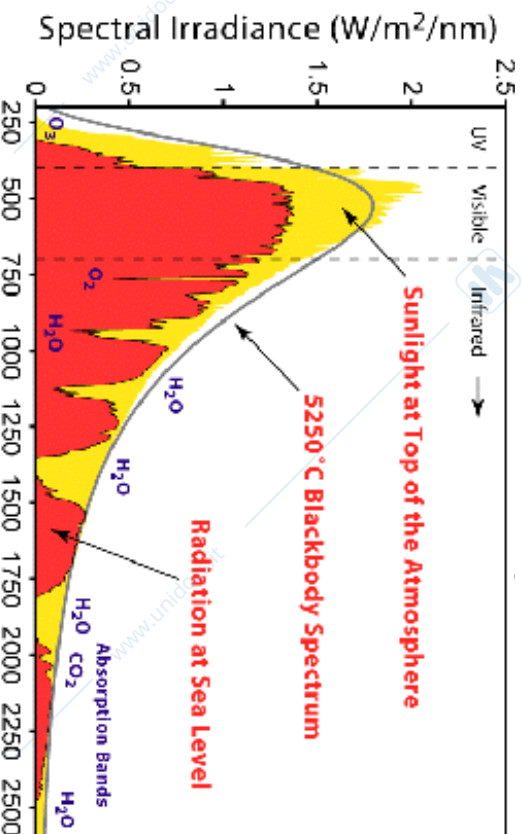
LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

BANDA VISIBILE

- ▶ L'occhio umano è sensibile all'intervallo tra 400 nm e 700 nm (intervallo del visibile)...come mai?

700	620	580	530	470	420 nm
Rosso	Arancione	Giallo	Verde	Blu	Viola
4.3	4.8	5.2	5.7	6.4	7.1×10^{14} Hz
1.4	1.6	1.7	1.9	2.1	2.4×10^4 cm ⁻¹

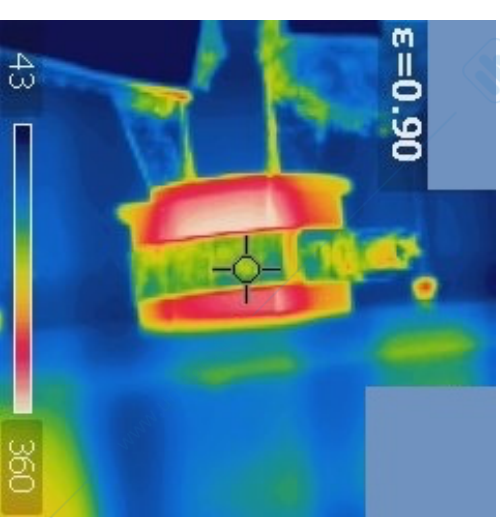
- ▶ La luce viene emessa quando gli elettroni esterni (di valenza) degli atomi cambiano di stato di moto (transizioni ottiche)



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

BANDA INFRAROSSO (IR)

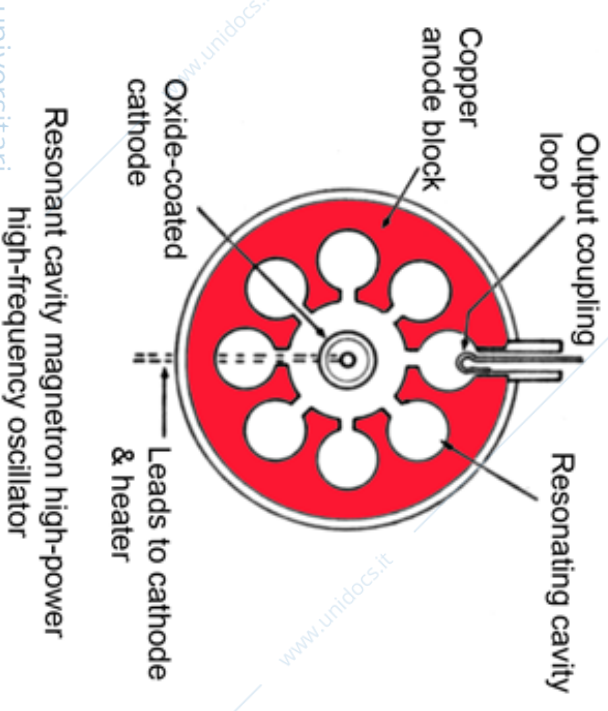
- ▶ È la banda formata da onde di lunghezza d'onda tra $0,7 \mu\text{m}$ e 1mm
- ▶ È anche chiamata radiazione termica perché associata al trasferimento di calore per irraggiamento
- ▶ Normalmente emessa quando atomi e molecole cambiano lo stato di moto rotazionale o vibrazionale



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

BANDA MICROONDE

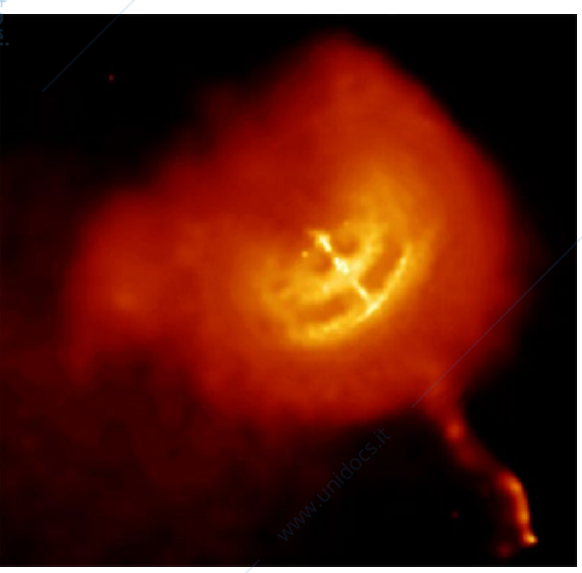
- ▶ È la banda formata da onde di lunghezza d'onda tra 1 mm e 1 m
- ▶ Di norma prodotte da oscillatori elettromagnetici in circuiti elettrici
- ▶ Le microonde hanno numerosissime applicazioni:
 - ▶ telefoni cellulari, radar, armi...



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

BANDA ONDE RADIO

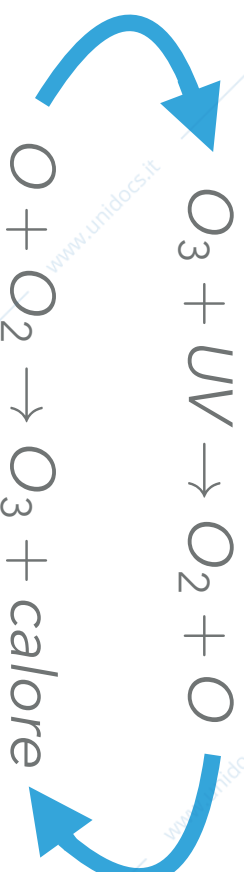
- ▶ È la banda formata da onde di lunghezza d'onda maggiore di 1 m
- ▶ Sono prodotte da elettroni che oscillano in circuiti elettrici e trasmesse mediante antenne
- ▶ È grazie alla onde radio che abbiamo **tutte** le telecomunicazioni
- ▶ Esistono anche sorgenti extraterrestri di onde radio
- ▶ Nel 1967 scoprirono un segnale di origine extraterrestre con periodo molto regolare: una pulsar



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

BANDA ULTRAVIOLETTA (UV)

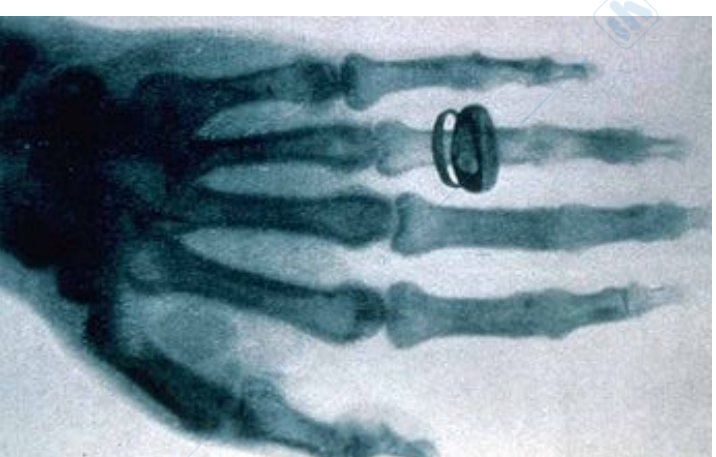
- ▶ È la banda formata da onde di lunghezza d'onda minore di quelle nel visibile con valori compresi tra di 1 nm e 400 nm
- ▶ Tipicamente prodotta nelle transizioni atomiche degli elettroni
- ▶ Il Sole è una sorgente estremamente potente di radiazione UV
- ▶ Fortunatamente la nostra atmosfera è in grado di assorbire la gran parte della radiazione UV che investe la Terra



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

BANDA RAGGI X

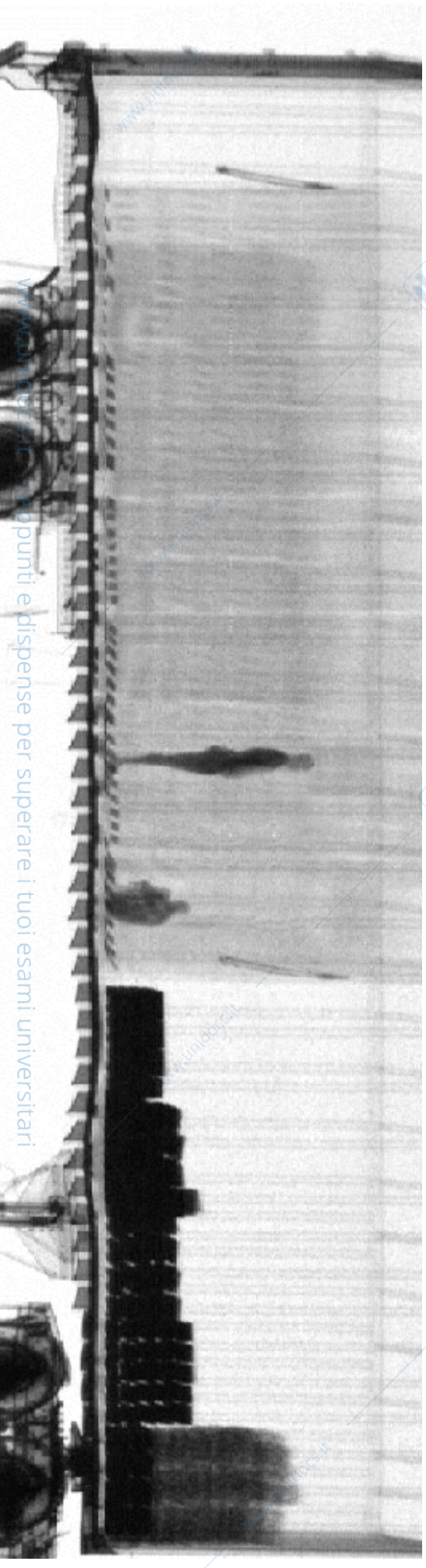
- ▶ È formata da onde di lunghezza d'onda tra 0,01 nm e 10 nm
- ▶ Tipicamente prodotta nelle transizioni atomiche degli elettroni più interni o dal **frenamento** di elettroni di alta energia
- ▶ Sono molto penetranti e attraversano i tessuti molli del corpo, sebbene vengano fermati dalle ossa o altre sostanze solide
- ▶ Essendo la lunghezza d'onda paragonabile alle distanze interatomiche vengono utilizzati (tramite diffrazione) per l'analisi dei materiali



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

BANDA RAGGI GAMMA

- ▶ È formata da onde di lunghezza d'onda inferiore a 10 pm
- ▶ Tipicamente prodotta nelle transizioni dei nuclei atomici o per decadimento o interazione di certe particelle
- ▶ È la radiazione più penetrante (con effetti biologici molto distruttivi) e per questo ha numerose applicazioni sia mediche che civili



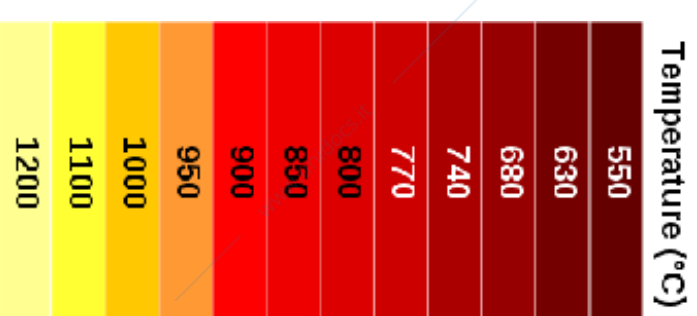
LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

INCANDESCENZA E LUMINESCENZA

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

INCANDESCENZA

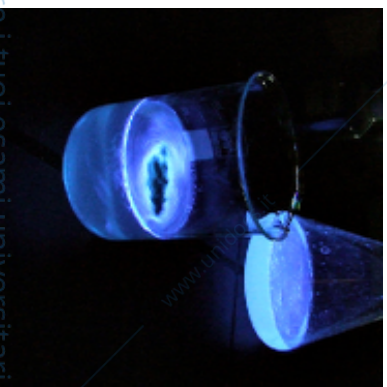
- ▶ Tutti i corpi a T (K) > 0 emettono radiazione elettromagnetica, detta radiazione termica
- ▶ La frequenza della radiazione emessa cresce con la temperatura e può essere nello spettro del visibile (lampadine, Sole, etc...)
- ▶ Corpi la cui radiazione termica è nella regione del visibile sono detti incandescenti ($T > 550$ °C)
- ▶ L'intensità della radiazione emessa cresce come T^4



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

LUMINESCENZA

- ▶ Anche alcuni oggetti freddi possono emettere luce ed il fenomeno è noto come luminescenza
- ▶ Gli esempi più comuni sono la fluorescenza e la fosforescenza, basate sull'assorbimento e successiva emissione (a frequenze più basse) di radiazioni elettromagnetiche
- ▶ Esistono molte altre forme di luminescenza: bioluminescenza, chemiluminescenza, radioluminescenza, etc...



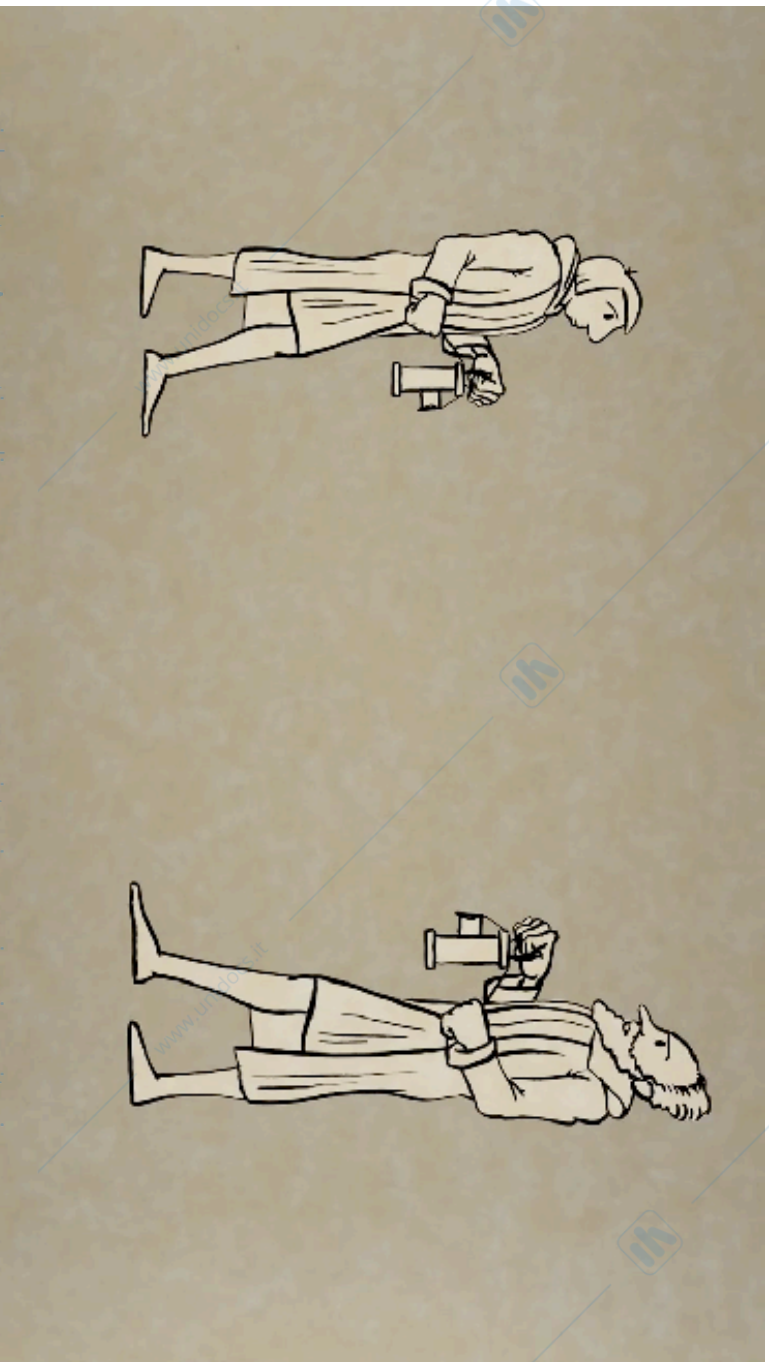
LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

MISURA DELLA VELOCITÀ DELLA LUCE

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

LA VELOCITÀ DELLA LUCE

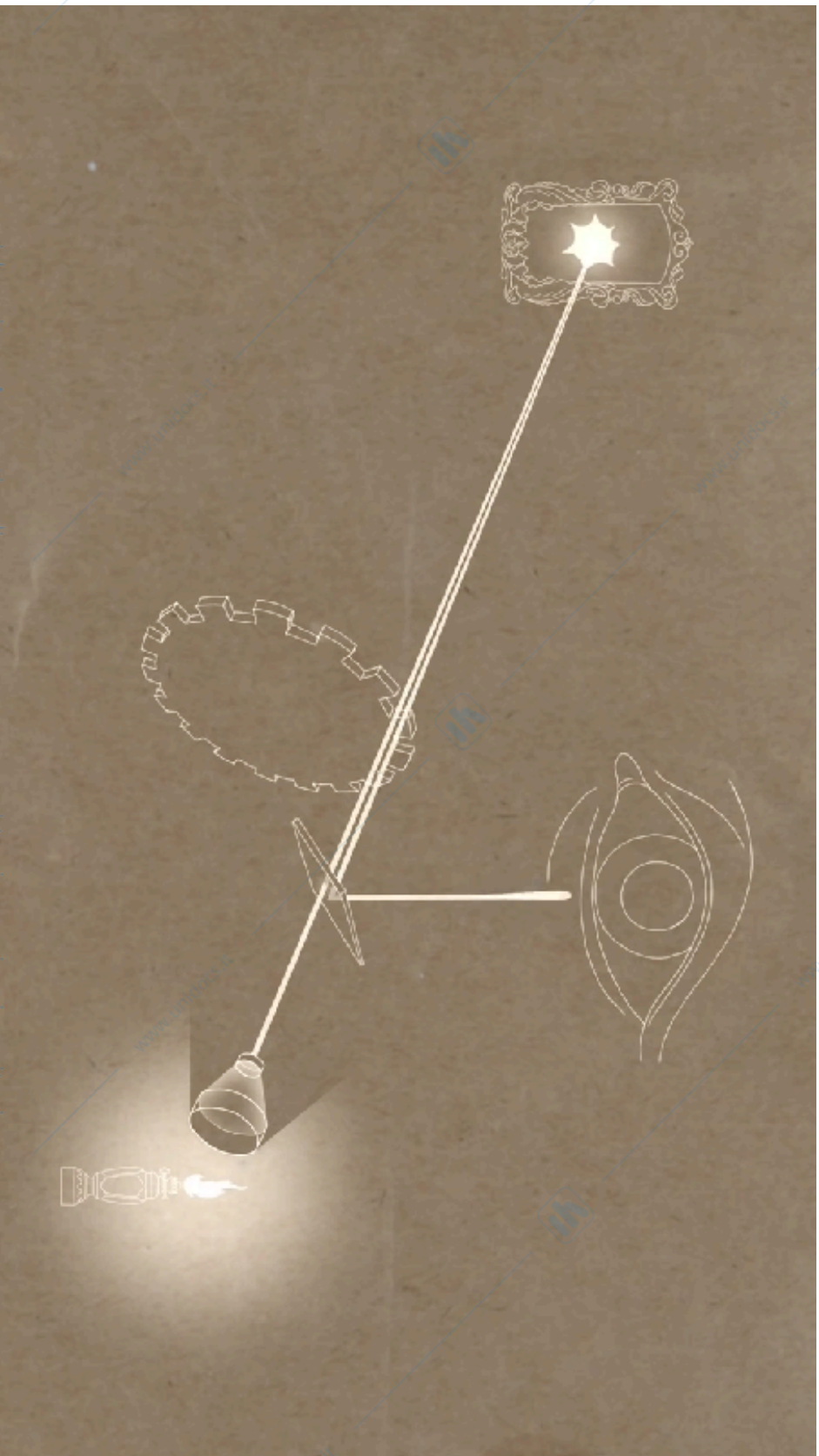
- ▶ Fino al XVII secolo si pensava che la luce si propagasse istantaneamente (velocità infinita)
- ▶ Il primo tentativo di una misura sperimentale è dovuto a Galileo



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

LA VELOCITÀ DELLA LUCE

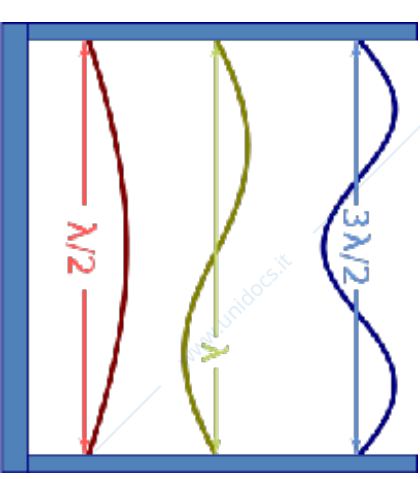
- ▶ La prima misura diretta della velocità è dovuta a Fizeau nel 1849 (precisione di qualche percento!)



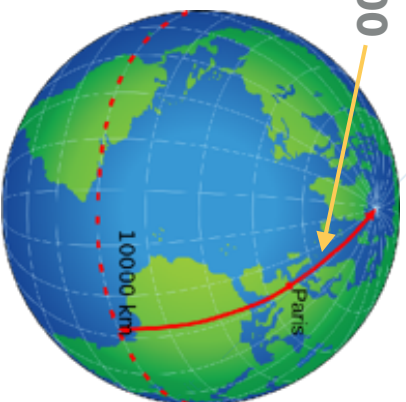
LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

LA VELOCITÀ DELLA LUCE

- ▶ Un metodo molto più efficace consiste nel misurare indipendentemente λ e ν di un'onda EM nel vuoto, usando per esempio una cavità risonante



- ▶ Dal 21 ottobre 1983 si considera il valore di c come **esatto** (pari a 299 792 458 m/s) e a partire da esso si definisce il metro nel SI



1/110 000 000



spazio percorso dalla luce
nel vuoto in 1/299 792 458 s

1791 - 1799

1799 - 1983

1983 - oggi

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

LA VELOCITÀ DELLA LUCE

- ▶ Quando ci riferiamo alla “velocità della luce” generalmente intendiamo la velocità della luce nel vuoto

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

- ▶ In presenza di un mezzo, in analogia con quanto si fa per le equazioni per il campo elettrico e magnetico, dobbiamo utilizzare $\epsilon_0 \epsilon_r$ e $\mu_0 \mu_r$ al posto di ϵ_0 e μ_0

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

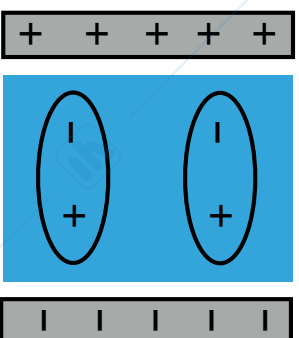
- ▶ Tipicamente i mezzi che trasmettono la luce non sono ferromagnetici e $\mu_r \approx 1$

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

LA VELOCITÀ DELLA LUCE

- ▶ La "costante" dielettrica è costante solo in condizioni statiche
- ▶ Per misurare la costante dielettrica di un materiale, si può usarlo come dielettrico di un condensatore

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{A}{d}$$



$$C = \epsilon_r C_0$$

- ▶ Alla frequenza delle onde luminose i dipoli non riescono ad orientarsi alla stessa frequenza e pertanto ϵ_r varia

- ▶ La relazione $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$ dipende quindi dalla frequenza della luce

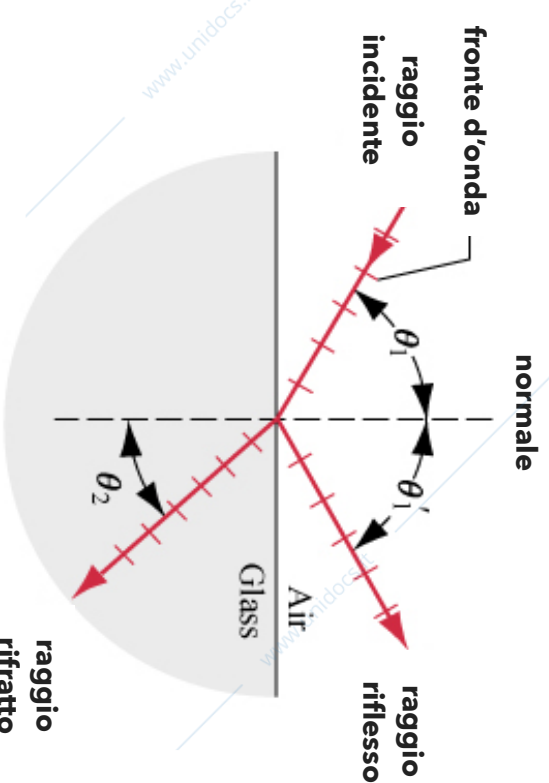
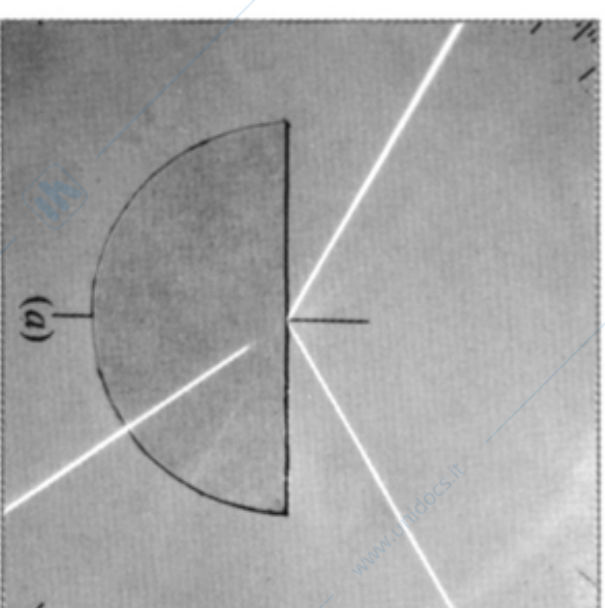
LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DELLA LUCE

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DELLA LUCE

- ▶ Quando un raggio di luce passa da un mezzo ad un altro abbiamo in generale due fenomeni: riflessione e rifrazione
- ▶ Consideriamo un raggio che incide sulla superficie di separazione tra due mezzi
- ▶ Nel punto di incidenza tracciamo la normale alla superficie
- ▶ Il piano formato dal raggio incidente e la normale è detto piano di incidenza



RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DELLA LUCE

- ▶ **Dall'esperienza** si ricavano le seguenti relazioni per riflessione e rifrazione

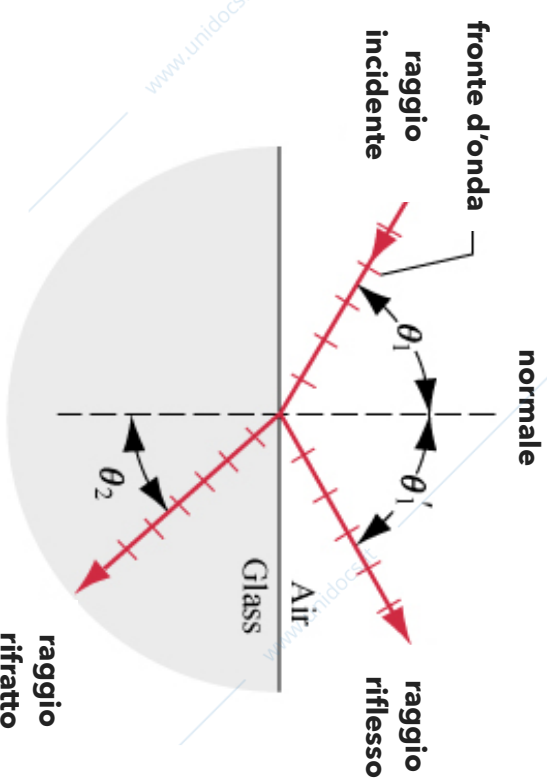
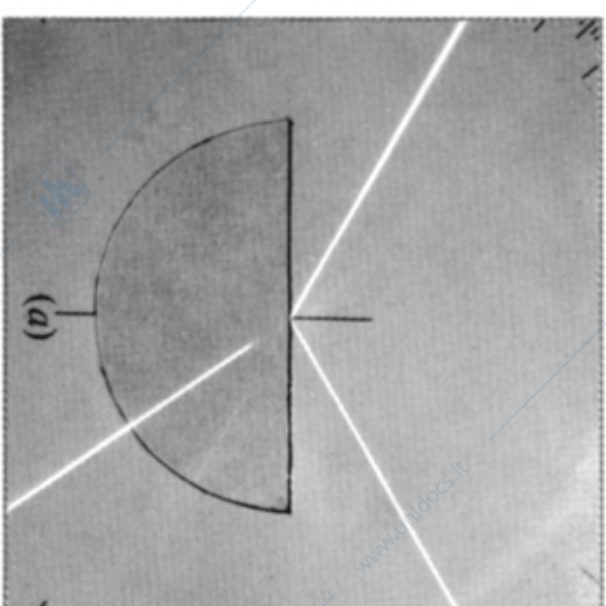
- ▶ Legge della riflessione: il raggio riflesso giace nel piano di incidenza e

$$\theta'_1 = \theta_1$$

- ▶ Legge della rifrazione o Legge di Snell: il raggio rifratto giace nel piano di incidenza e

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

indici di rifrazione



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

RIFLESSIONE E RIFRAZIONE DELLA LUCE

▶ L'indice di rifrazione di un mezzo è definito come $n = \frac{c}{v}$

▶ La rifrazione avviene perché la velocità della luce cambia da un mezzo ad un altro

▶ Le leggi della riflessione e rifrazione valgono per **tutte** le onde EM

▶ Basti pensare alla riflessione delle onde radio da parte della ionosfera

▶ Infatti le equazioni di Maxwell permettono di ricavare le leggi della riflessione e della rifrazione

mezzo	$n = c / v$
aria	1,000292
acetone	1,359
acqua	1,334
alcol etilico	1,365
perspex	1,493
quarzo	1,458
vetro crown	1,517
vetro flint	1,732
vetro pesantissimo	1,890
diamante	2,419

IL MODELLO DI HUYGENS

- ▶ Nel 1678 il fisico olandese **Christian Huygens** sviluppo una semplice teoria della luce
- ▶ È una teoria **ondulatoria** della luce ma non ne specifica la natura, né la lunghezza d'onda o la velocità

- ▶ Principio di Huygens:

Tutti i punti di un fronte d'onda possono essere considerati come sorgenti puntiformi di onde sferiche secondarie. Dopo un tempo t la nuova posizione del fronte d'onda sarà la superficie di inviluppo di queste onde secondarie.

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

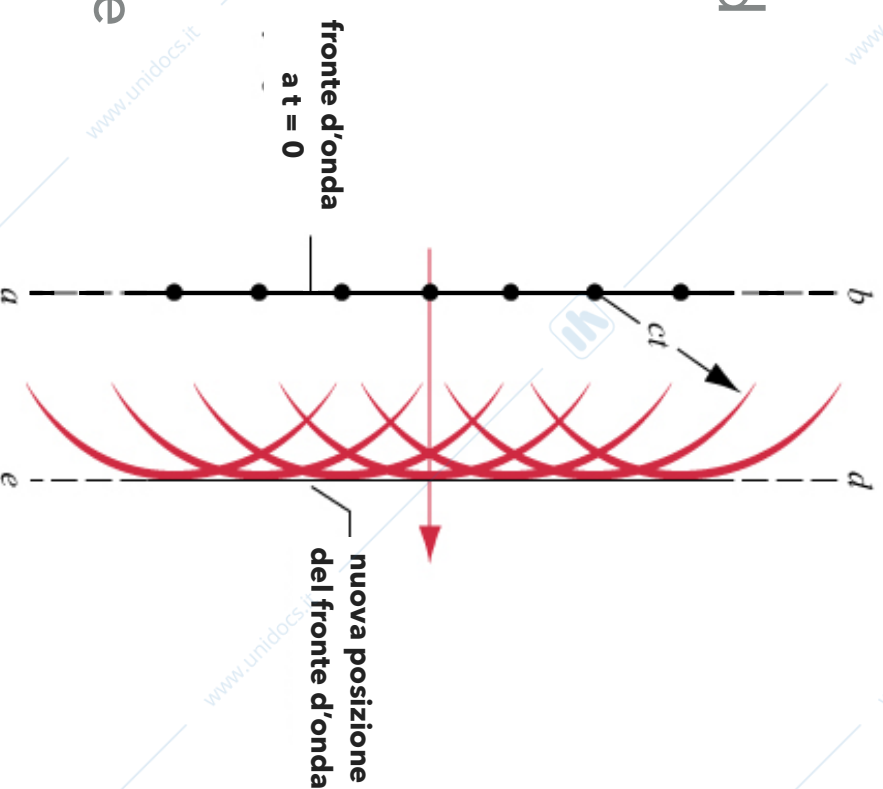
IL MODELLO DI HUYGENS

- ▶ Consideriamo l'esempio in figura: dato un fronte d'onda \overline{ab} a $t = 0$ come lo troviamo dopo un tempo t ?

- ▶ Considerando diversi punti del **piano** ed applicando il principio di Huygens

- ▶ Dopo un tempo t il raggio delle onde sferiche costruite è ct

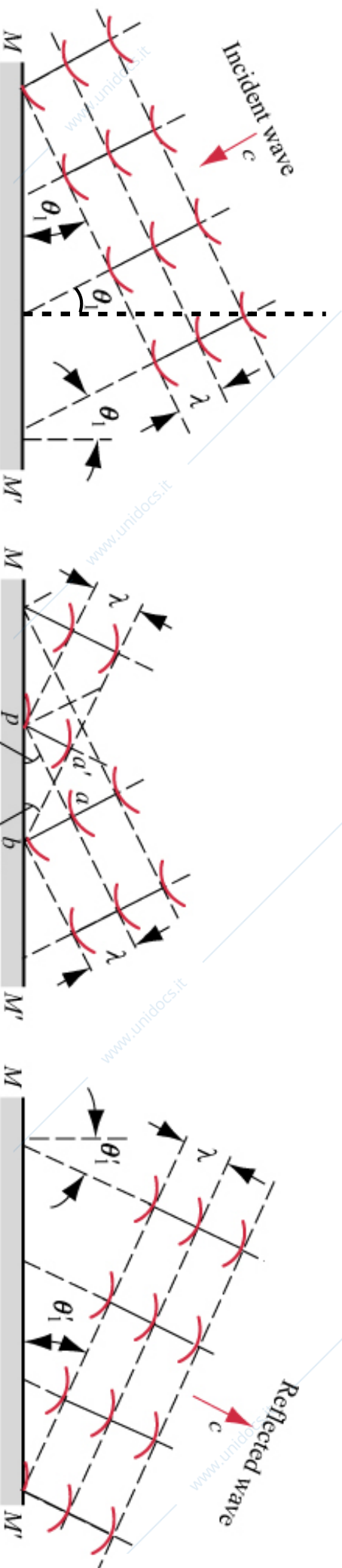
- ▶ Il piano tangente a queste sfere è rappresentato dal profilo \overline{de} in figura che è parallelo a \overline{ab} e distante ct da esso



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

IL MODELLO DI HUYGENS

- ▶ Se ogni punto di un fronte d'onda è sorgente sferica di onde secondarie allora perché l'onda non si propaga anche all'indietro?
- ▶ Si evita questo problema assumendo che l'intensità delle onde sferiche secondarie non sia uniforme in tutte le direzioni ma vari da un massimo in avanti ad un minimo (zero) all'indietro
- ▶ Col principio di Huygens si può spiegare la legge della riflessione



LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

IL PRINCIPIO DI FERMAT

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

IL PRINCIPIO DI FERMAT

- ▶ Nel 1650 il matematico francese Pierre Fermat ha scoperto il principio seguente che porta il suo nome

- ▶ Principio di Fermat:

Un raggio luminoso, propagandosi da un punto fisso ad un altro, segue un percorso tale che il tempo impiegato a percorrerlo, confrontato con quello dei percorsi vicini, è un minimo, un massimo o stazionario

- ▶ È possibile ricavare facilmente la legge della riflessione a partire dal principio di Fermat

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

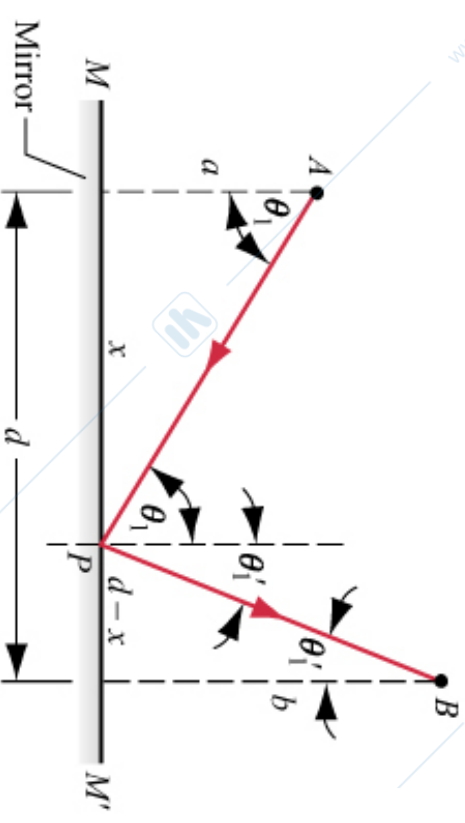
IL PRINCIPIO DI FERMAT: DERIVAZIONE LEGGE RIFLESSIONE

- Con riferimento alla figura indichiamo con L il percorso compiuto dal raggio luminoso per andare da un punto A a un punto B

$$L = \overline{AP} + \overline{PB} = \sqrt{x^2 + a^2} + \sqrt{(d-x)^2 + b^2}$$

$$t = \frac{L}{c} = \frac{1}{c} \left(\sqrt{x^2 + a^2} + \sqrt{(d-x)^2 + b^2} \right)$$

- Per il principio di Fermat $\frac{dt}{dx} = 0$



$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{2} \frac{2x}{\sqrt{x^2 + a^2}} + \frac{1}{2} \frac{2(d-x)(-1)}{\sqrt{(d-x)^2 + b^2}} \right) = 0$$

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

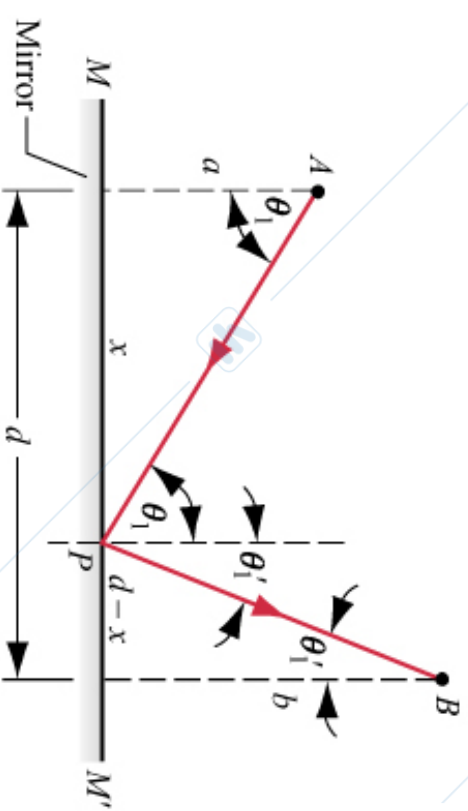
IL PRINCIPIO DI FERMAT: DERIVAZIONE LEGGE RIFLESSIONE

$$\frac{dt}{dx} = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{2} \frac{2x}{\sqrt{x^2 + a^2}} + \frac{1}{2} \frac{2(d-x)(-1)}{\sqrt{(d-x)^2 + b^2}} \right) = 0$$

$$\frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} = \frac{d-x}{\sqrt{(d-x)^2 + b^2}}$$

$$\sin(\theta_1) = \sin(\theta'_1)$$

$$\theta_1 = \theta'_1$$



- ▶ Analogamente possiamo derivare la legge della rifrazione

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

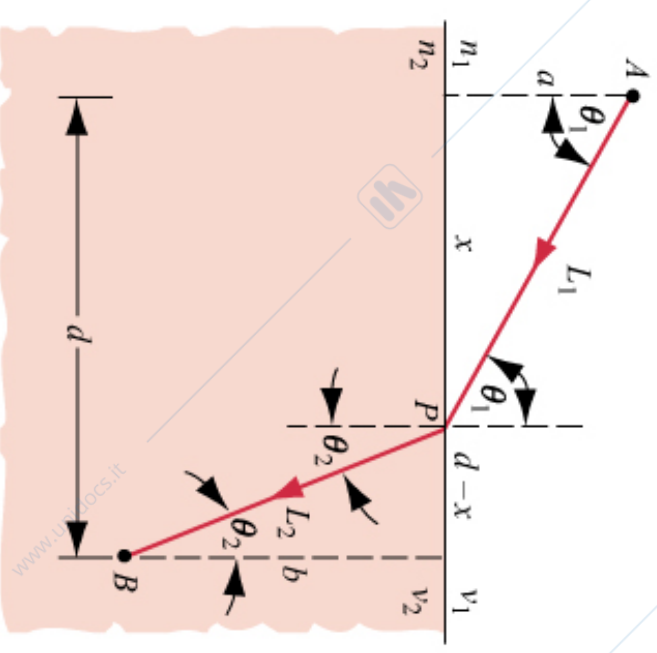
IL PRINCIPIO DI FERMAT: DERIVAZIONE LEGGE RIFRAZIONE

- Con riferimento alla figura indichiamo con L il percorso compiuto dal raggio luminoso per andare da un punto A a un punto B

$$L = \overline{AP} + \overline{PB} = \sqrt{x^2 + a^2} + \sqrt{(d-x)^2 + b^2}$$

$$t = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2} = \frac{n_1 L_1}{c} + \frac{n_2 L_2}{c}$$

$$\frac{dt}{dx} = 0 \longrightarrow n_1 \frac{dL_1}{dx} + n_2 \frac{dL_2}{dx} = 0$$



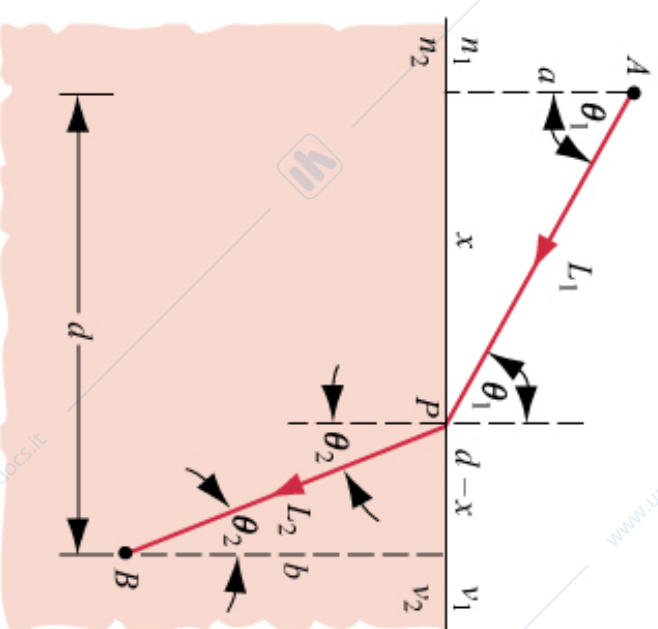
LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

IL PRINCIPIO DI FERMAT: DERIVAZIONE LEGGE RIFRAZIONE

$$\blacktriangleright n_1 \left(\frac{1}{2} \frac{2x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \right) + n_2 \left(\frac{1}{2} \frac{2(d-x)(-1)}{\sqrt{(d-x)^2 + b^2}} \right) = 0$$

$$\longrightarrow n_1 \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} = n_2 \frac{d-x}{\sqrt{(d-x)^2 + b^2}}$$

$$\longrightarrow n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$



- ▶ Mentre per il caso della riflessione abbiamo utilizzato il cammino geometrico per il caso della rifrazione abbiamo considerato il cammino ottico $n_1 L_1 + n_2 L_2$

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

RIFLESSIONE TOTALE

- ▶ Dalla figura si nota che al crescere dell'angolo di incidenza di raggiunge il caso in cui il raggio rifratto è parallelo alla superficie

- ▶ Questo angolo di incidenza θ_c è detto angolo limite

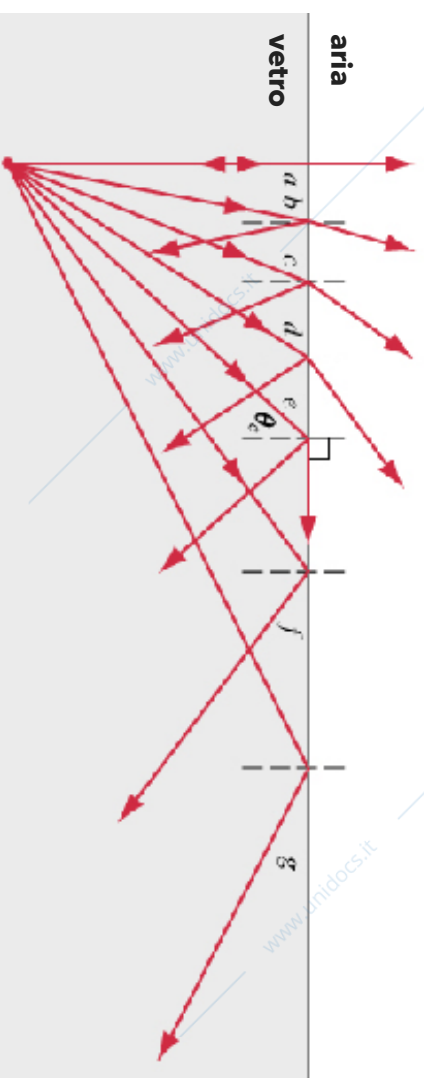
$$\blacktriangleright n_1 \sin(\theta_c) = n_2 \sin(90^\circ) \longrightarrow \theta_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

- ▶ Deve necessariamente essere

$$n_1 > n_2$$

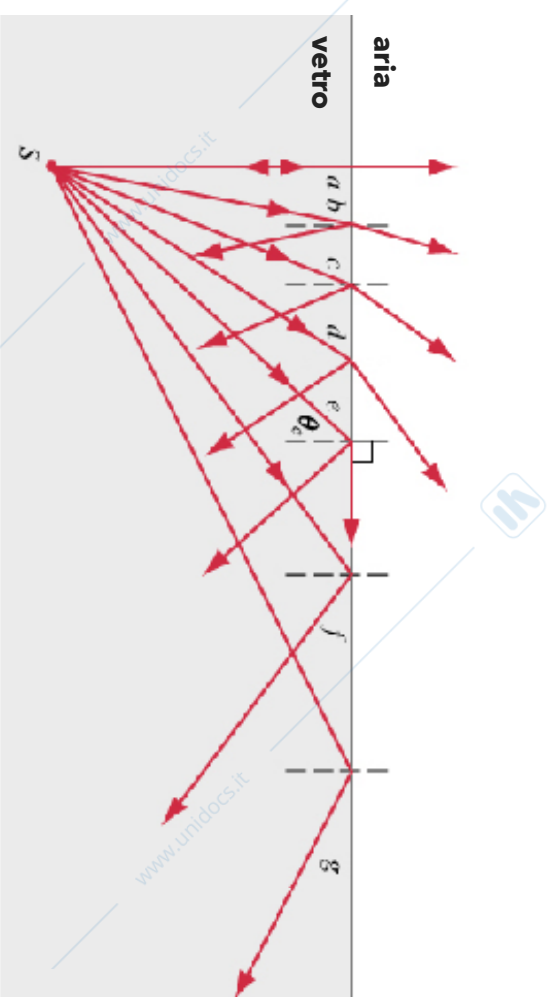
- ▶ Per il vetro rispetto all'aria

$$\theta_c = 41,8^\circ$$



RIFLESSIONE TOTALE

- ▶ Per angoli $\theta > \theta_c$ non esiste alcun raggio rifratto e ha luogo il fenomeno della riflessione totale

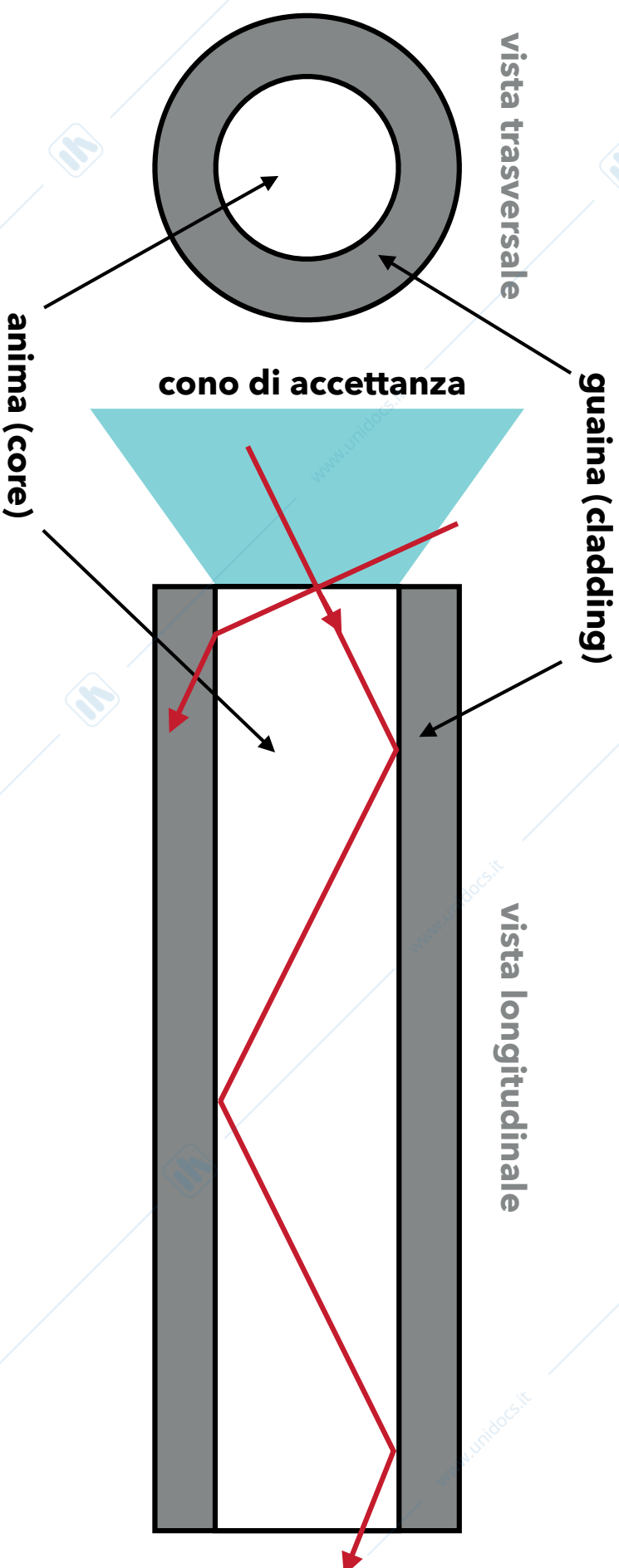


- ▶ È il fenomeno sfruttato dalle fibre ottiche per trasmettere un segnale





LE FIBRE OTTICHE



- ▶ Affinché si abbia riflessione totale $\theta > \theta_c$
- ▶ L'angolo critico determina un cono di accettazione

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

EFFETTO DOPPLER PER LA LUCE

EFFETTO DOPPLER PER LA LUCE

- ▶ Abbiamo già visto come la frequenza di un suono percepita da un osservatore dipenda dal suo moto relativo rispetto alla sorgente

Osservatore fisso e sorgente in allontanamento con velocità u

$$\nu = \nu_0 \frac{1}{1 + u/v}$$

Sorgente fissa e osservatore in allontanamento con velocità u

$$\nu = \nu_0 (1 - u/v)$$

- ▶ Fissato u i risultati che si ottengono sono diversi se è la sorgente o l'osservatore a muoversi
- ▶ Per la luce il discorso è diverso

LEZIONE 5: ONDE LUMINOSE

EFFETTO DOPPLER PER LA LUCE

- ▶ Nel caso della luce è impossibile identificare un mezzo rispetto al quale sorgente e osservatore si muovono
- ▶ *Sorgente che si avvicina all'osservatore o Osservatore che si avvicina alla sorgente* sono situazioni fisicamente identiche
- ▶ È possibile dimostrare che l'effetto Doppler per la luce (in accordo con la Relatività Speciale) è descritto dalla formula:

$$v = v_0 \frac{1 - u/c}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} = v_0 \frac{1 - \beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} = v_0 \frac{\sqrt{1 - \beta}}{\sqrt{1 + \beta}}$$

**sorgente e osservatore
in allontanamento con
velocità u**

- ▶ Se in avvicinamento è sufficiente sostituire $-u$ al posto di u

EFFETTO DOPPLER PER LA LUCE

$$v = v_0 \frac{\sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1+\beta}}$$

implica il cosiddetto fenomeno del redshift (o

blushift) della luce

$$\lambda v = c \quad \longrightarrow \quad \lambda = \lambda_0 \frac{\sqrt{1+\beta}}{\sqrt{1-\beta}}$$



Analogamente in caso di avvicinamento della sorgente e dell'osservatore si ha una diminuzione della lunghezza d'onda

$$\lambda = \lambda_0 \frac{\sqrt{1-\beta}}{\sqrt{1+\beta}}$$

