



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE

Lezione 3

Ottica geometrica

Corso di Fisica Medica - A.A. 2024 - 2025

Luca Brombal: lbrombal@units.it

Dipartimento di Scienze Mediche Chirurgiche e della Salute

04-09/12/2024

L'OTTICA

- L'ottica è la branca della fisica che descrive le proprietà della luce ed il suo comportamento nell'interazione con la materia
- Le leggi dell'ottica sono alla base di:
 1. Molti strumenti in uso in ambito medico (microscopio, fibre ottiche, ...)
 2. I meccanismi della visione e il funzionamento dell'occhio

L'OTTICA

Rispetto alla rivelazione della luce/visione, l'ottica coinvolge 4 elementi fondamentali

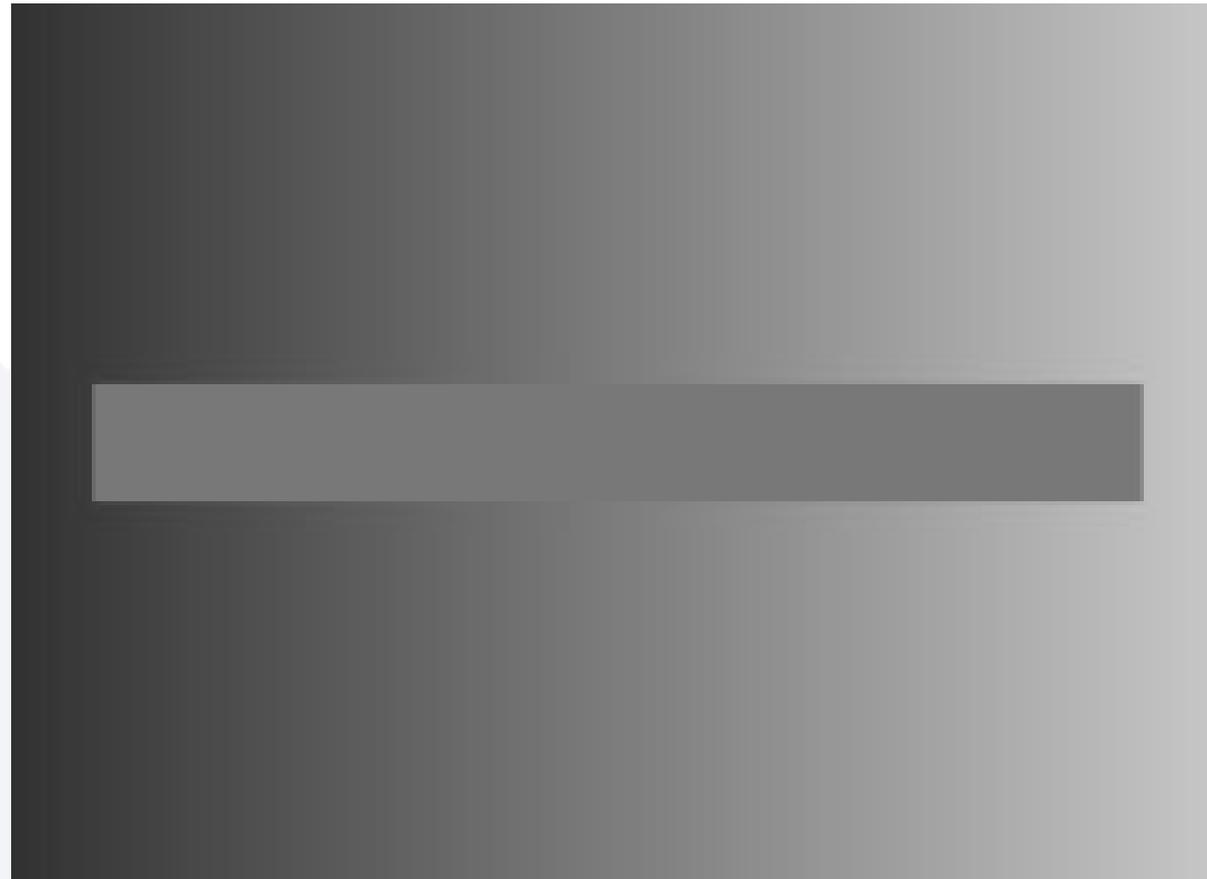
1. **La sorgente** di luce (alcuni oggetti emettono luce)
2. **L'oggetto** con cui la luce interagisce (in generale gli oggetti riflettono, rifrangono o diffondono la luce)
3. **Il rivelatore** della luce – l'occhio, che focalizza il segnale luminoso e lo converte in impulsi elettrici)
4. **L'elaboratore** del segnale – il cervello, che elabora i segnali e fornisce una loro interpretazione coerente.

La fisica si occupa di **1** e **2**

La biologia si occupa di **3** e **4**

La psicologia si occupa di **4**

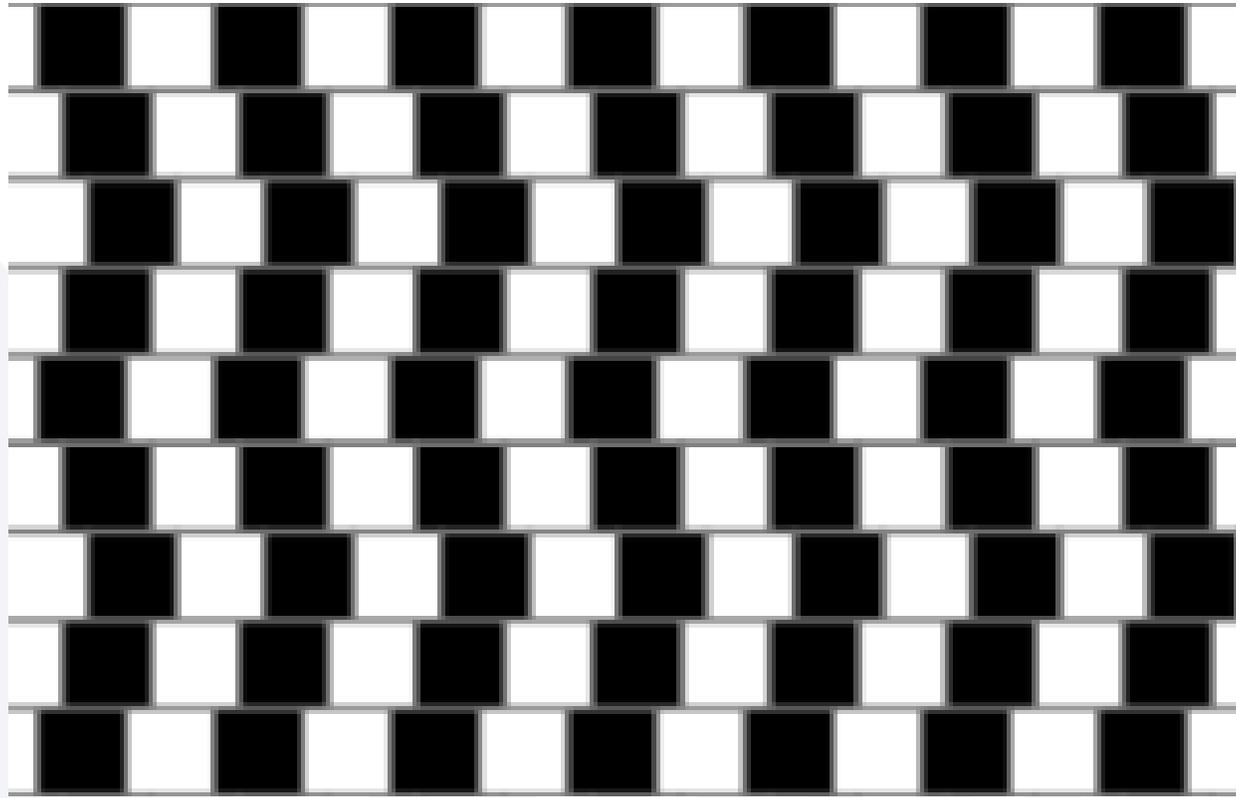
LE ILLUSIONI OTTICHE



La banda centrale ha sempre
la stessa intensità di grigio

https://it.wikipedia.org/wiki/Illusione_ottica

LE ILLUSIONI OTTICHE



Le line orizzontali sono parallele!

https://it.wikipedia.org/wiki/Illusione_ottica

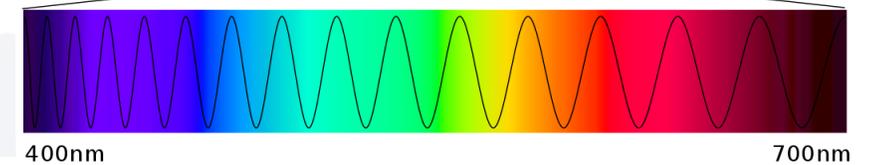
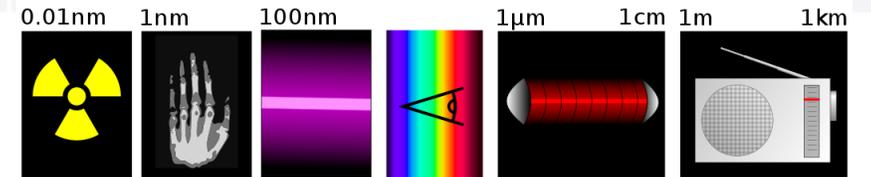
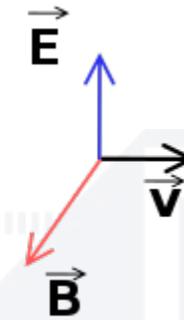
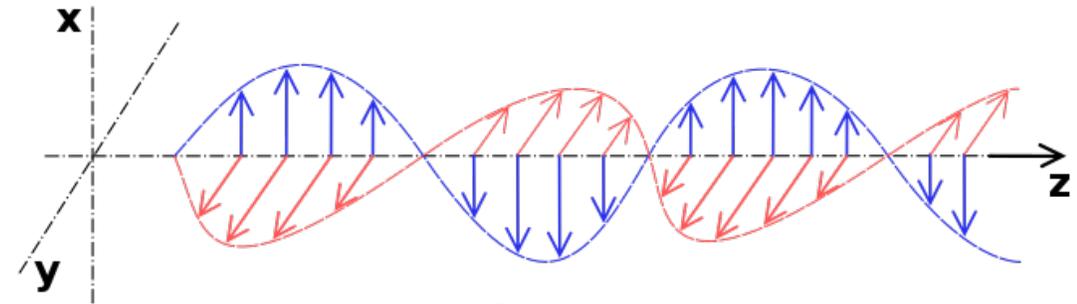
LA LUCE

- La luce è descrivibile come un'onda elettromagnetica
- Un'onda elettromagnetica consiste nella propagazione di un campo elettrico e magnetico oscillanti, sempre ortogonali tra loro
- L'onda elettromagnetica è caratterizzata da una lunghezza d'onda (ovvero la periodicità «spaziale») λ e una velocità di propagazione v che, nel vuoto, è pari alla velocità della luce $c = 3.0 \times 10^8 \frac{m}{s}$
- Data lunghezza d'onda e velocità, si definiscono anche frequenza ν e periodo (temporale) T

$$\nu = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda}; [\nu] = \text{secondi}^{-1} = \text{Hz}$$

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{\lambda}{v} = \frac{\lambda}{c}; [T] = \text{secondi}$$

Nel vuoto



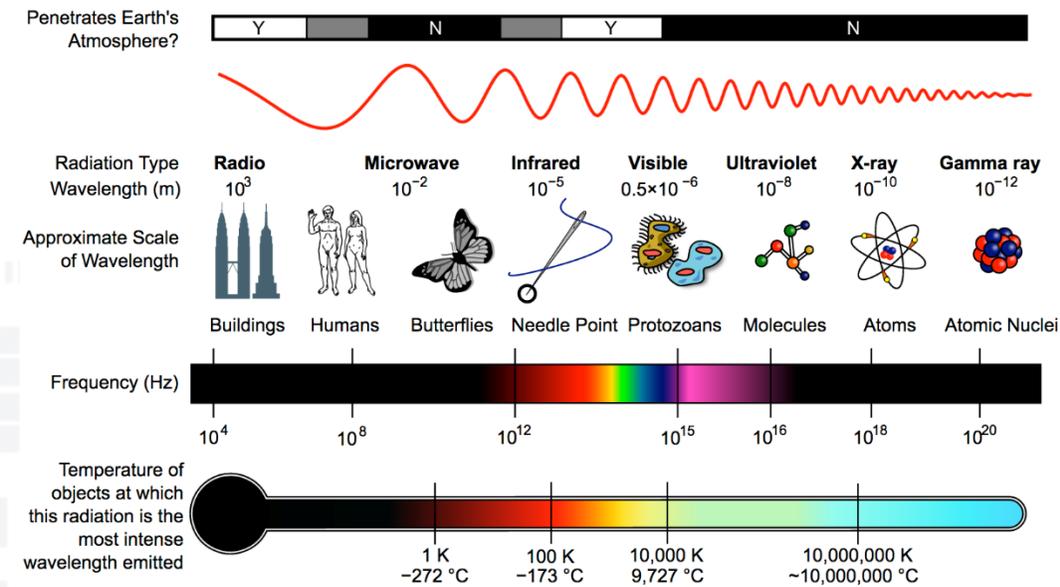
https://it.wikipedia.org/wiki/Spettro_visibile

LA LUCE VISIBILE

Tipicamente, in ambito medico/biologico con «luce» si intende la luce visibile

La luce visibile costituisce la piccola frazione dello spettro elettromagnetico:

- con lunghezze d'onda comprese tra i **400 nm** e i **700 nm**
- O, analogamente, con frequenze comprese nell'ordine dei **400 THz** e i **750 THz**



https://en.wikipedia.org/wiki/Electromagnetic_spectrum

L'ORIGINE DELLA LUCE (LA SORGENTE)

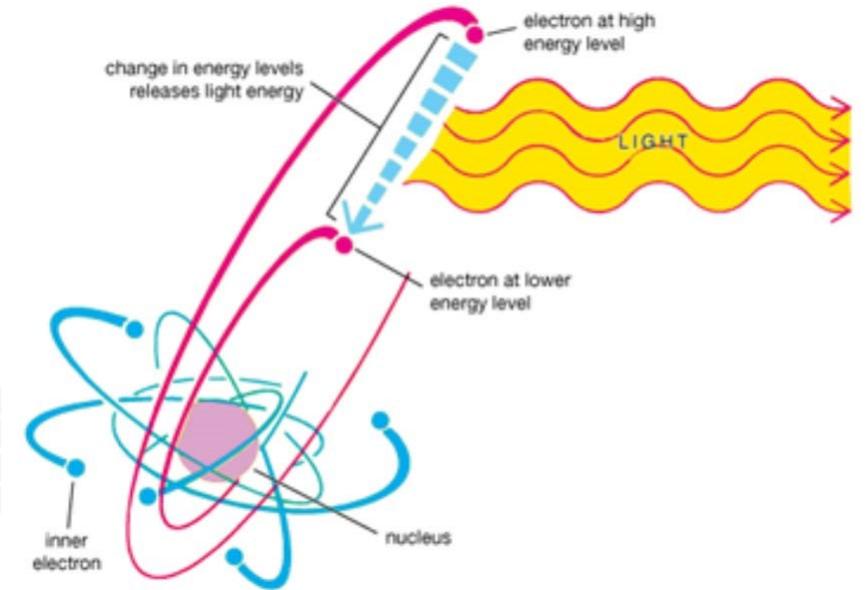
Classicamente le **onde elettromagnetiche** sono **generate da cariche in oscillazione**.
Tipicamente le cariche in oggetto sono gli **elettroni atomici**.

NOTA:

Alcuni fenomeni luminosi sono spiegabili assumendo una natura particellare della luce (luce = insieme di «proiettili» definiti fotoni).

A questo si riferisce il dualismo *onda-corpuscolo*.

Tale complementarità è ben descritta dalla meccanica quantistica (che noi non faremo 😊)



<https://www.fire2fusion.com/light-energy/definition-of-light-energy.html>

OTTICA FISICA E OTTICA GEOMETRICA

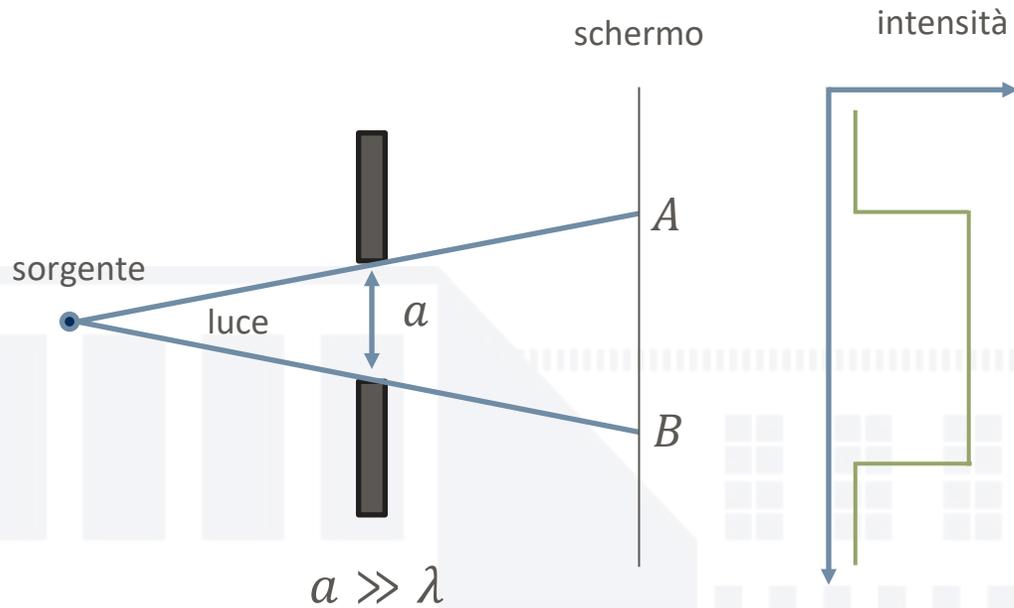
In generale l'ottica che considera la natura ondulatoria della luce è definita **ottica fisica**

Sotto certe condizioni è possibile compiere un'approssimazione, in cui la luce si propaga in linea retta e i fenomeni di interazione con la materia vengono descritti con la geometria Euclidea. Questa è l'**ottica geometrica**

I 2 fenomeni principali descritti attraverso l'ottica geometrica sono:

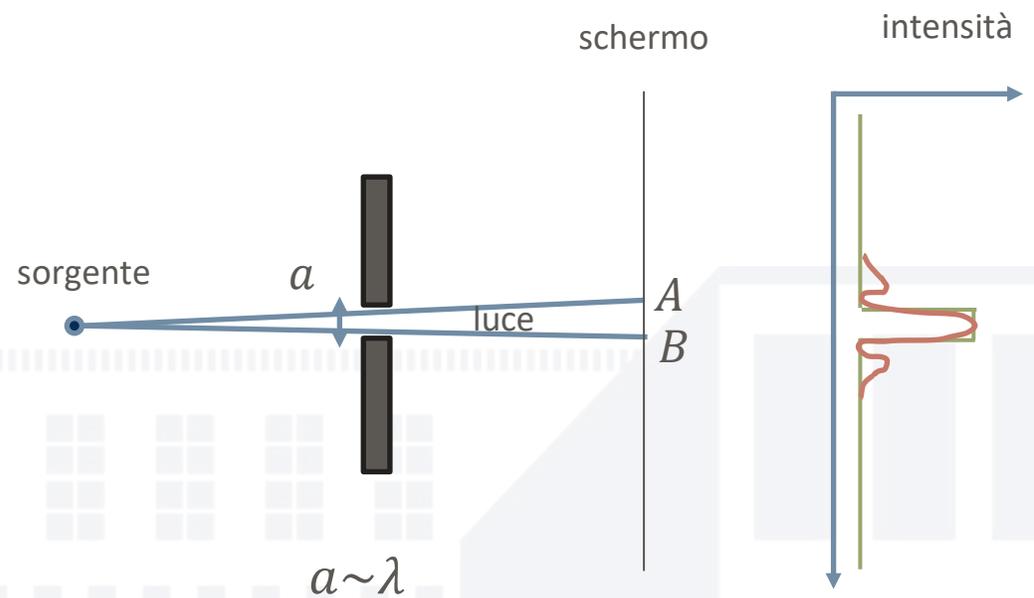
1. **Riflessione**
2. **Rifrazione**

OTTICA FISICA E OTTICA GEOMETRICA



Quando il “dettaglio” di interesse ha dimensioni maggiori della lunghezza d’onda

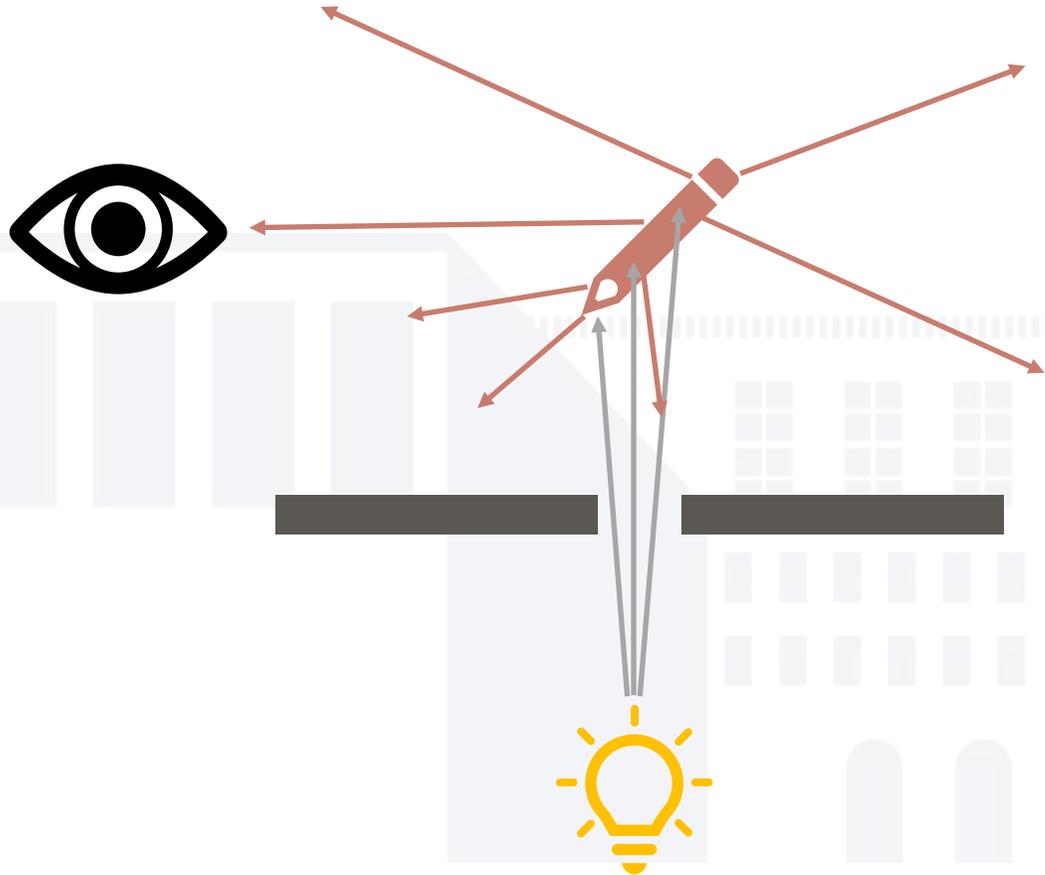
OTTICA **GEOMETRICA** = OTTICA **FISICA**



Quando il “dettaglio” di interesse ha dimensioni minori della lunghezza d’onda

OTTICA **GEOMETRICA** \neq OTTICA **FISICA**

OTTICA GEOMETRICA: SORGENTE, OGGETTO E OCCHIO

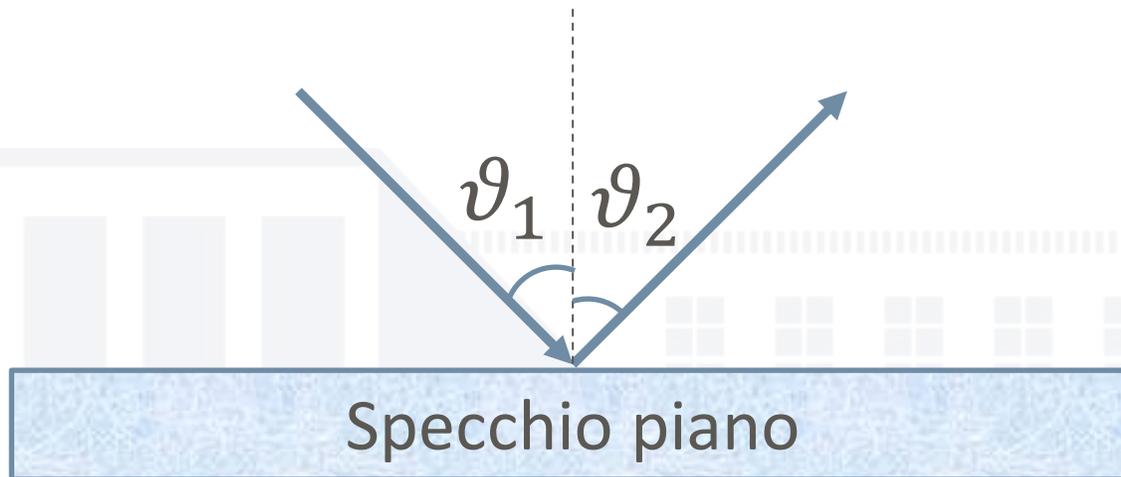


La sorgente (lampadina) emette luce di tutte le lunghezze d'onda (luce bianca)

L'oggetto (la matita) «riflette» solo una (banda di) lunghezza d'onda – rossa

Tra i raggi riflessi, quelli che raggiungono l'occhio sono quelli che consentono di «vedere» l'oggetto.

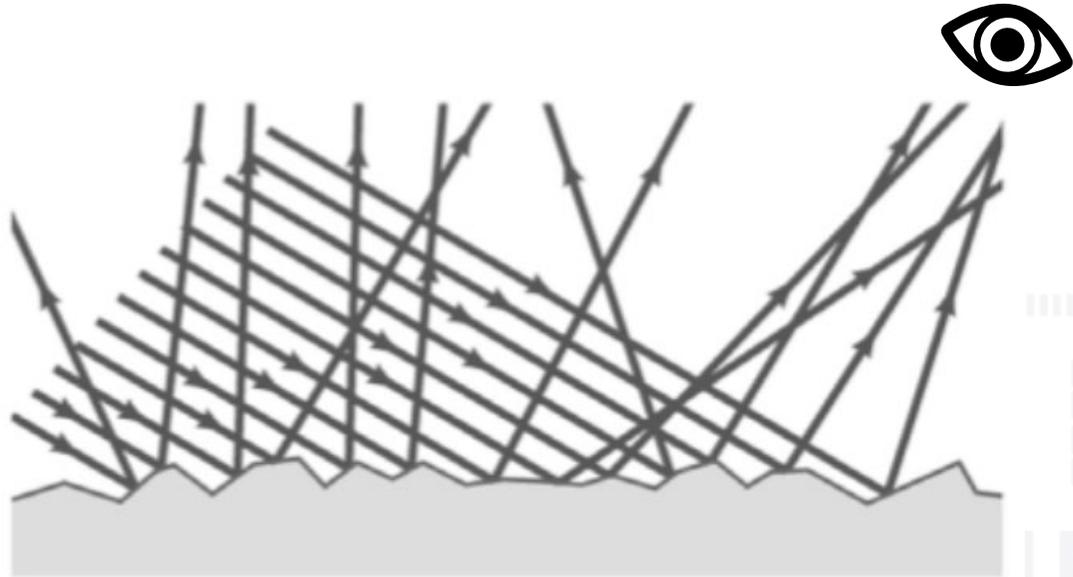
OTTICA GEOMETRICA: LA RIFLESSIONE



Un raggio di luce che incida su una superficie riflettente con un certo angolo ϑ_1 verrà riflesso ad un angolo

$$\vartheta_2 = \vartheta_1$$

LA RIFLESSIONE «SFACCETTATA»: DIFFUSIONE



Se la superficie riflettente è sfaccettata, ovvero con orientazioni locali della superficie che cambiano nello spazio, ogni raggio viene riflesso ad un angolo diverso.

Globalmente la luce incidente si dice essere **diffusa dalla superficie**

LA VELOCITA' DELLA LUCE NEL MEZZO

La **velocità** della luce in un mezzo (v) è minore della velocità della luce ($c = 3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$)

Il loro rapporto prende il nome di **indice di rifrazione**

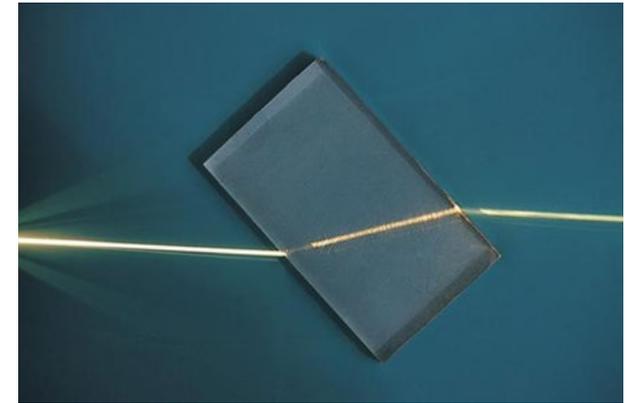
$$n = \frac{c}{v}$$
$$n \geq 1$$

Materiale	Indice di rifrazione (n)
Aria	1.000293
Acqua	1.333
Vetro (finestre)	1.52
Diamante	2.417

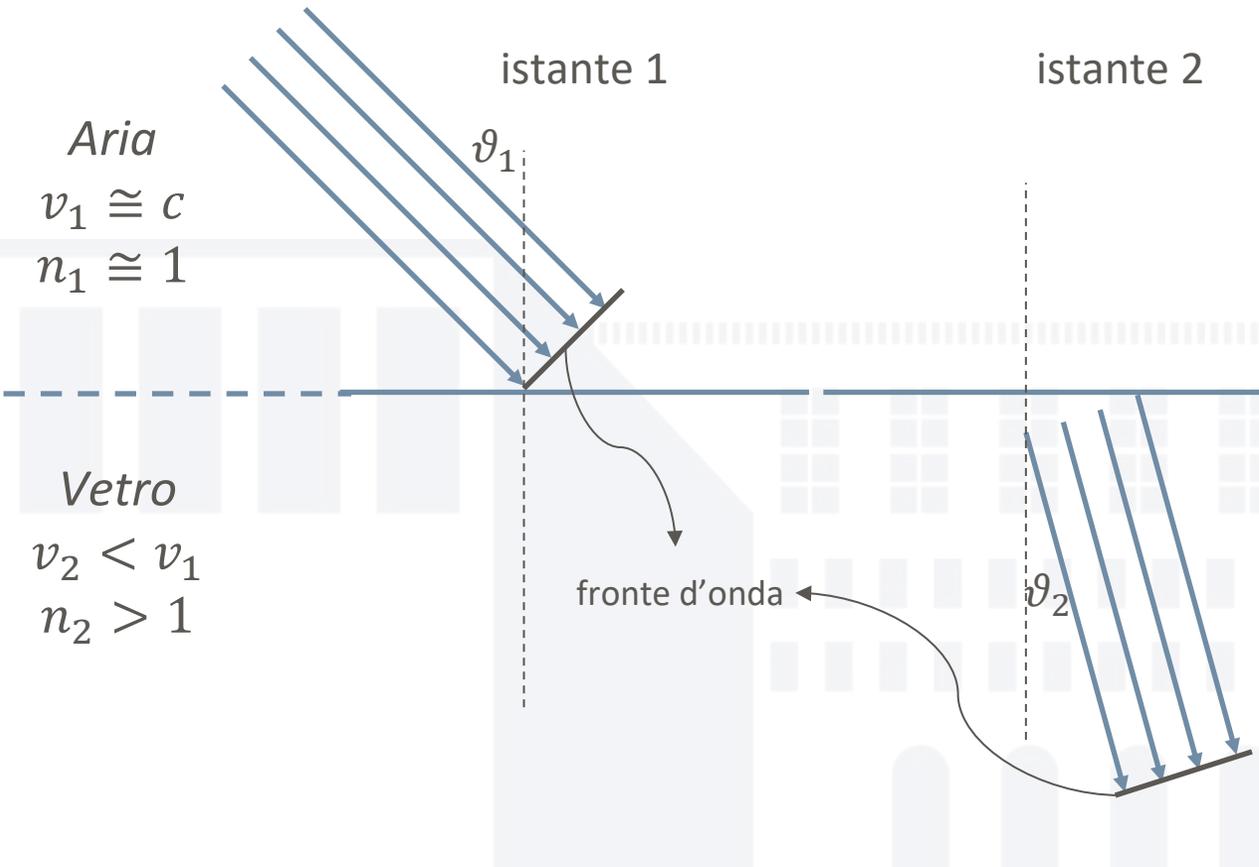
NOTA: l'indice di rifrazione dipende in generale dalla lunghezza d'onda, non è una costante

NOTA: i valori riportati in tabella si riferiscono alla lunghezza d'onda (visibile) $\lambda = 589 \text{ nm}$ (giallo)

LA RIFRAZIONE: CONCETTO INTUITIVO



https://en.wikipedia.org/wiki/Refractive_index

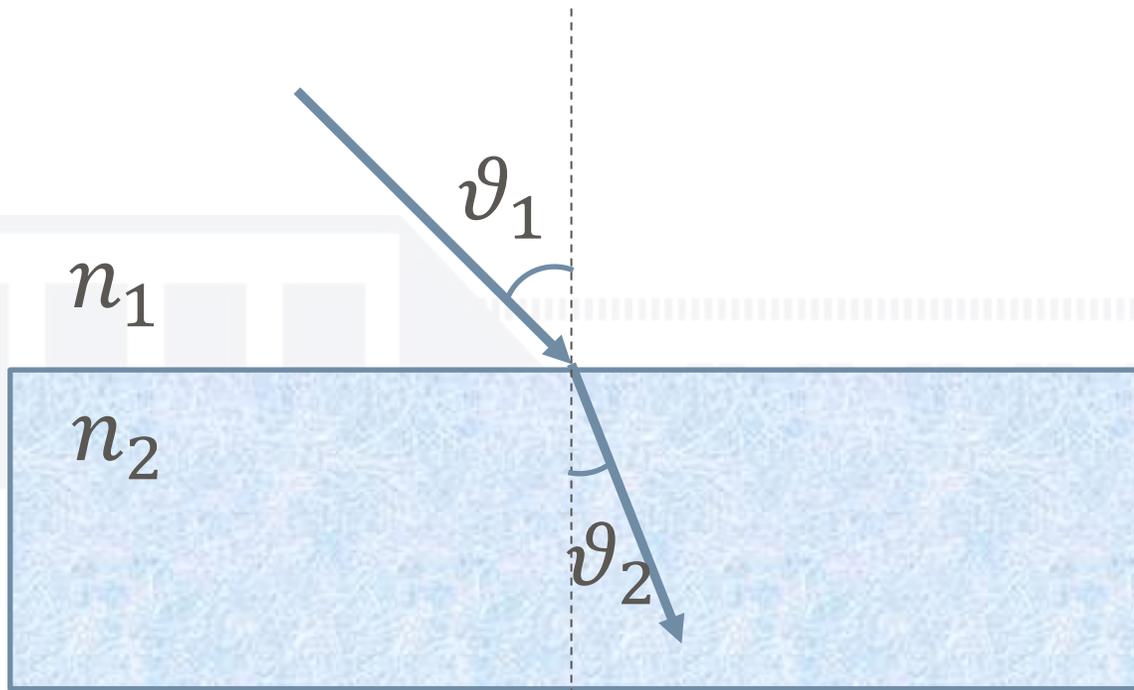


Aria
 $v_1 \cong c$
 $n_1 \cong 1$

Vetro
 $v_2 < v_1$
 $n_2 > 1$

- Sino all'istante 1 tutto il "fronte d'onda" si propaga con velocità v_1
- Tra l'istante 1 e l'istante 2 la porzione del fronte d'onda nel vetro viaggia a v_2 , cioè più lentamente di quella in aria
- Tale fenomeno fa sì che il fronte d'onda venga deflesso (= rifrazione)

LA RIFRAZIONE: LEGGE DI SNELL



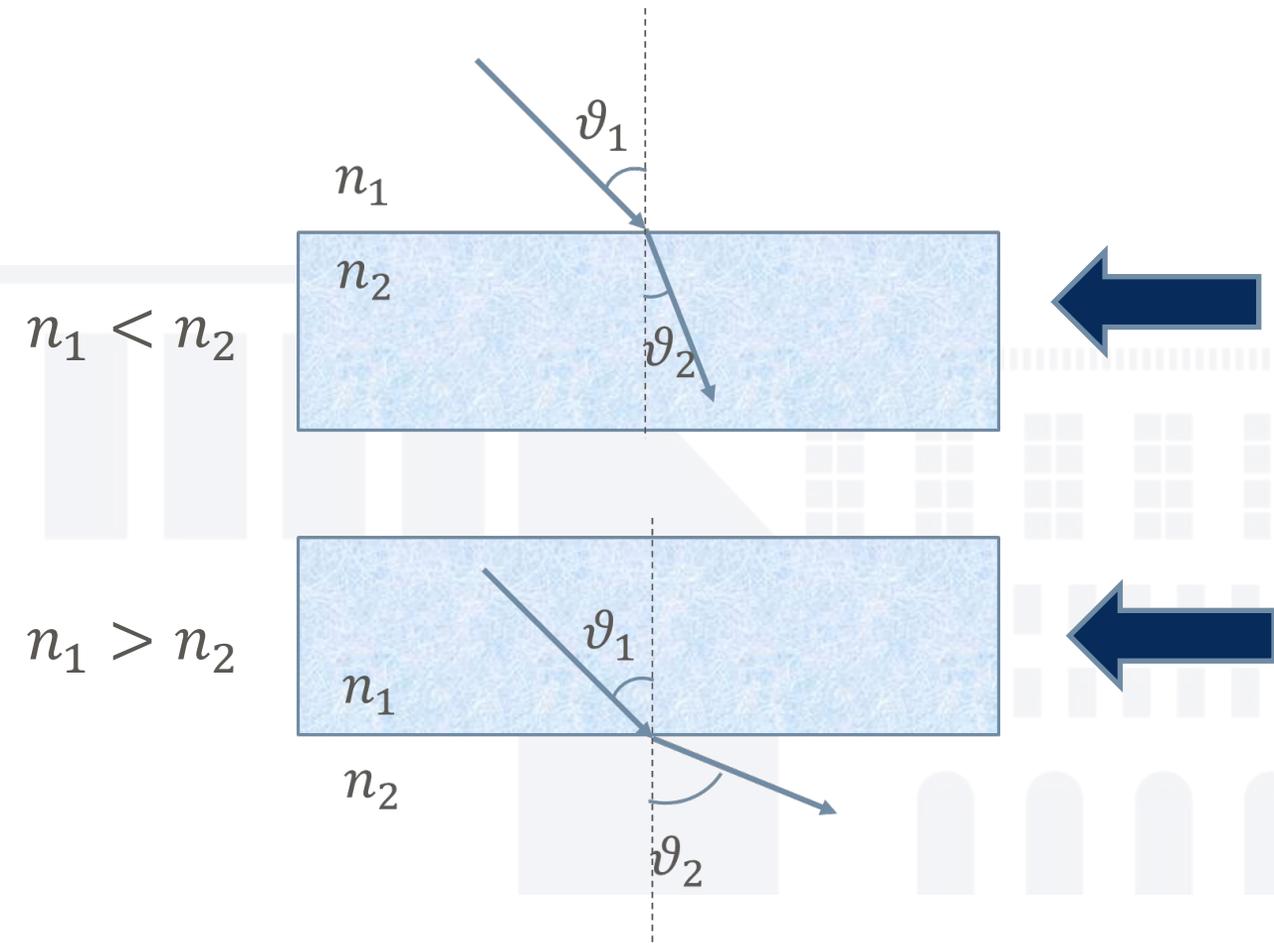
Un raggio di luce che attraversa un'interfaccia tra due materiali diversi subisce una deviazione angolare denominata rifrazione.

L'angolo di rifrazione, ϑ_2 dipende dall'angolo di incidenza ϑ_1 e dagli indici di rifrazione dei due materiali n_1 e n_2 .

Legge di Snell

$$n_1 \sin(\vartheta_1) = n_2 \sin(\vartheta_2)$$

LA RIFRAZIONE: LEGGE DI SNELL

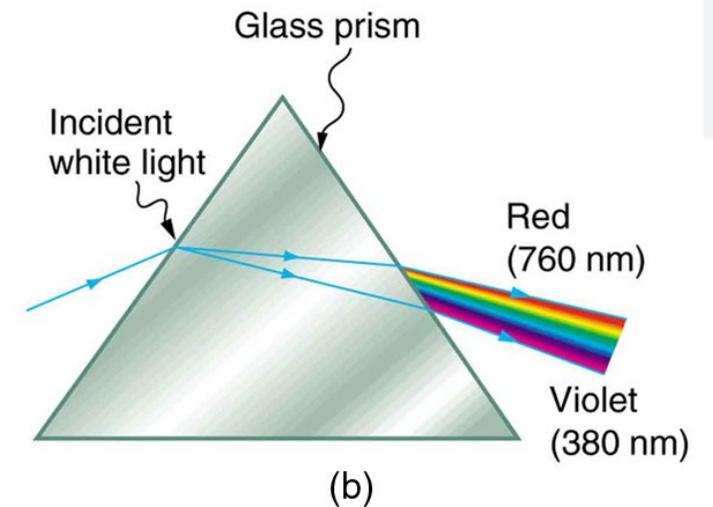
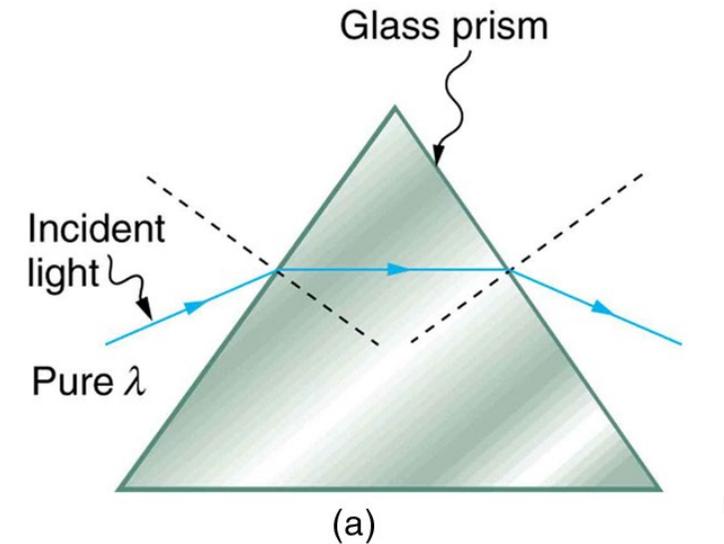


Nel caso in cui l'indice di rifrazione del mezzo iniziale è minore di quello finale il raggio rifratto **converge verso la normale** alla superficie di separazione

Nel caso in cui l'indice di rifrazione del mezzo iniziale è maggiore di quello finale il raggio rifratto **diverge dalla normale** alla superficie di separazione

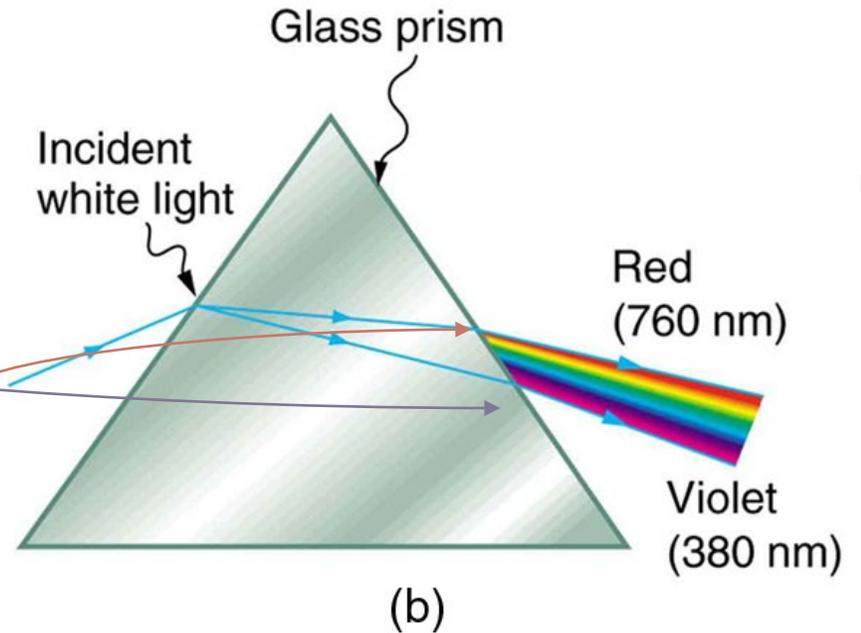
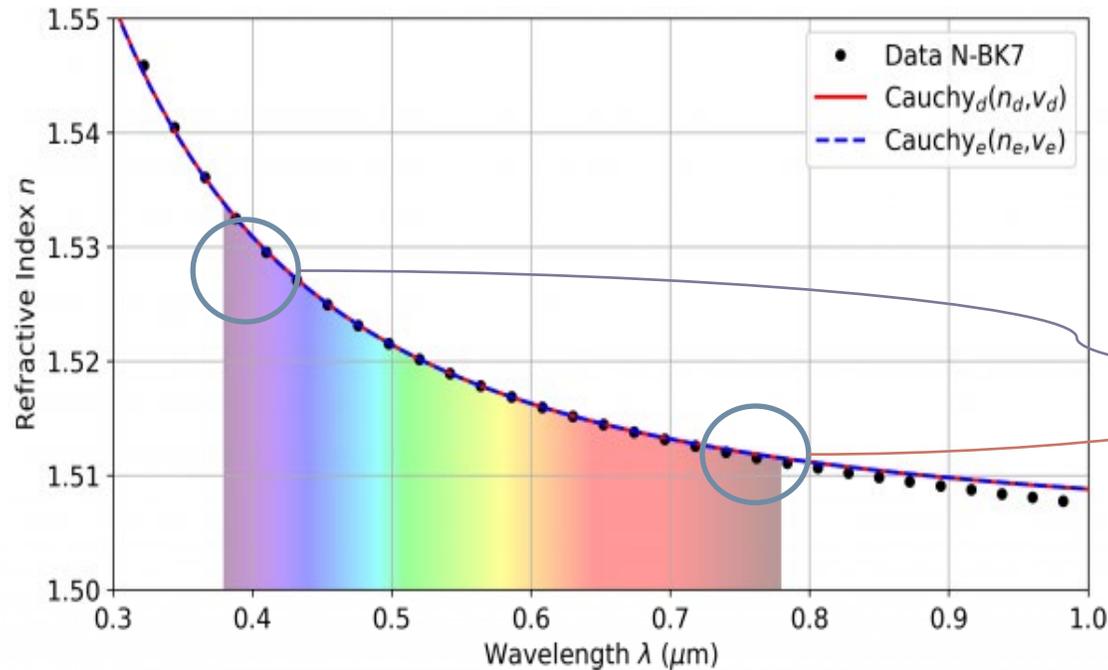
LA DISPERSIONE DELLA LUCE

- a) Un raggio di luce monocromatica (con una precisa lunghezza d'onda) viene rifratto due volte attraverso un prisma di vetro
- b) Un raggio di luce policromatica (luce bianca = con plurime lunghezze d'onda) viene disperso nello spazio attraverso un prisma in quanto diverse lunghezze d'onda hanno un diverso indice di rifrazione



Ottica geometrica

LA DISPERSIONE DELLA LUCE



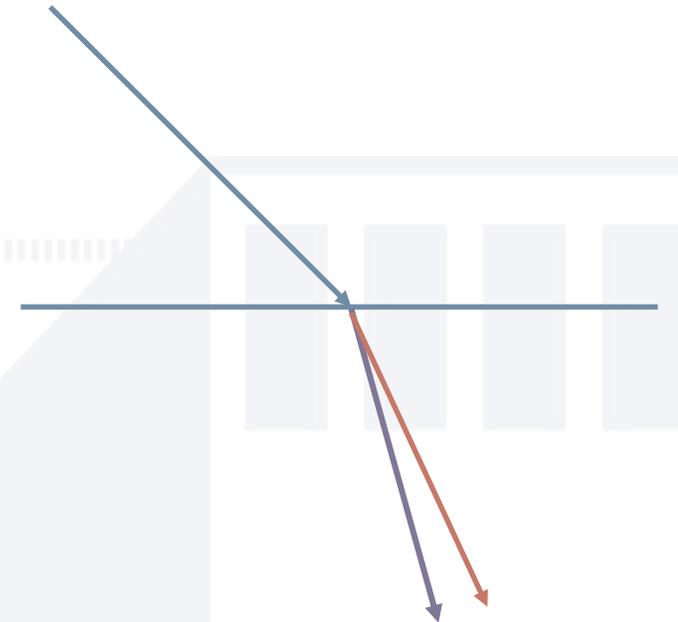
Le componente violetta nel passaggio da aria a vetro viene rifratta di più rispetto alla componente rossa

Ottica geometrica

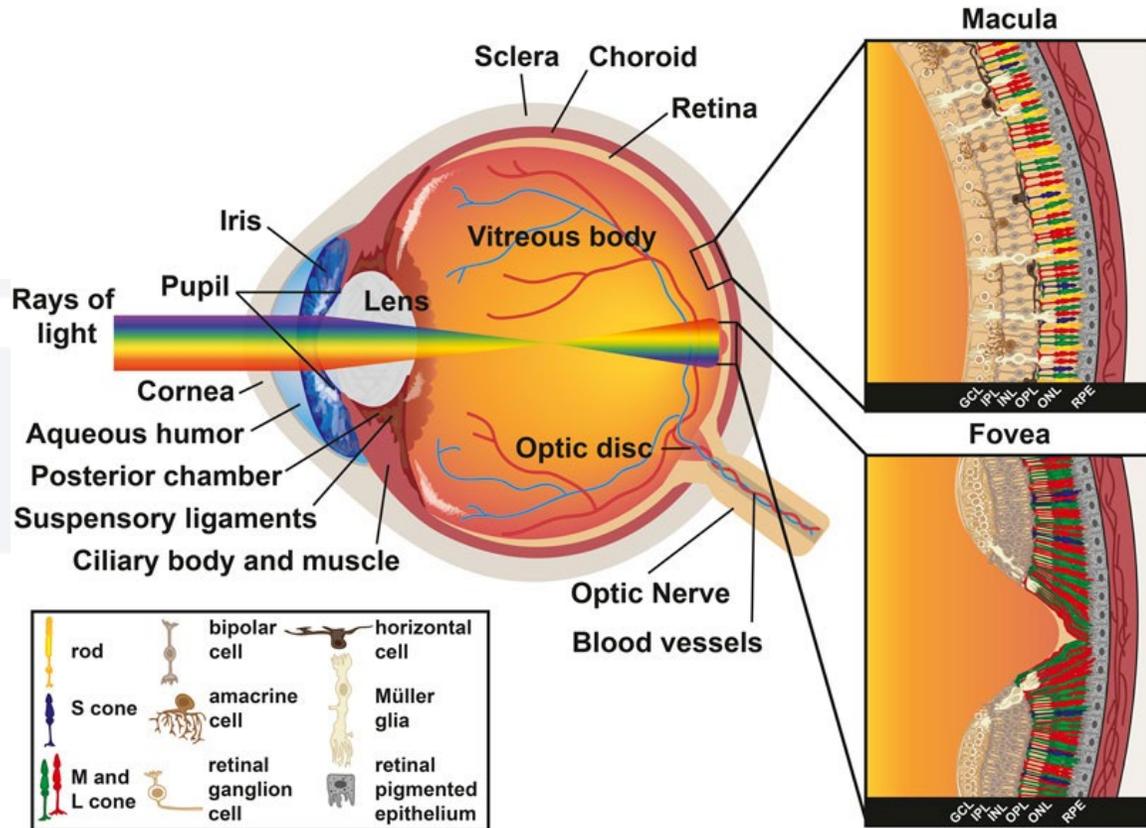
ESERCIZIO 1

Si consideri un raggio di luce policromatica incidente con un angolo di 45 gradi rispetto ad una superficie piana di vetro. Si calcoli la dispersione angolare – ovvero la differenza tra gli angoli di rifrazione – tra la componente violetta (380 nm) e quella rossa (750 nm) sapendo che l'indice di rifrazione vale per la luce violetta $n_v = 1.530$ e per la luce rossa $n_r = 1.512$

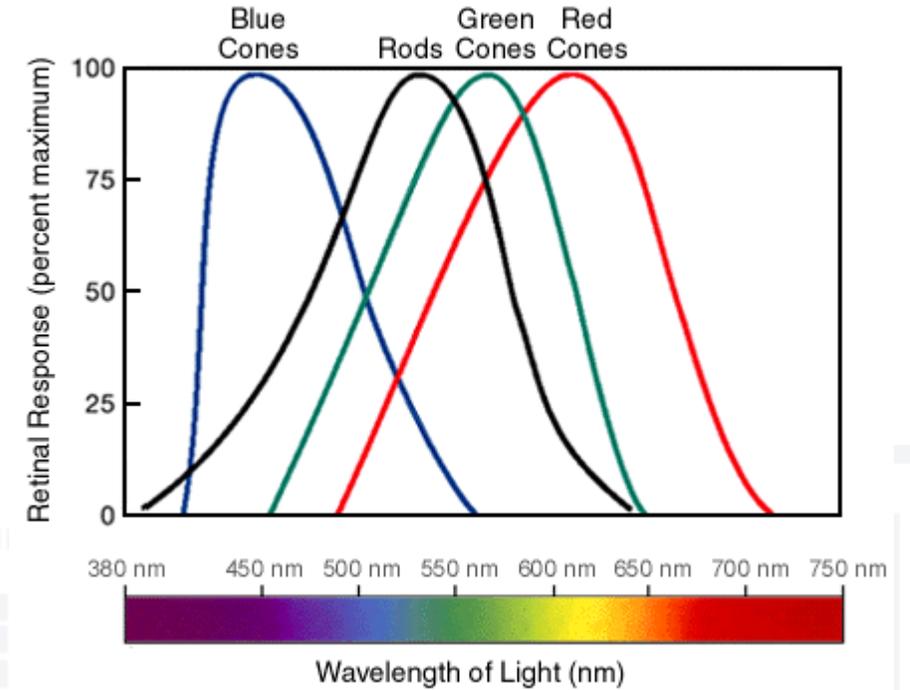
[0.356°]



LA VISIONE A COLORI



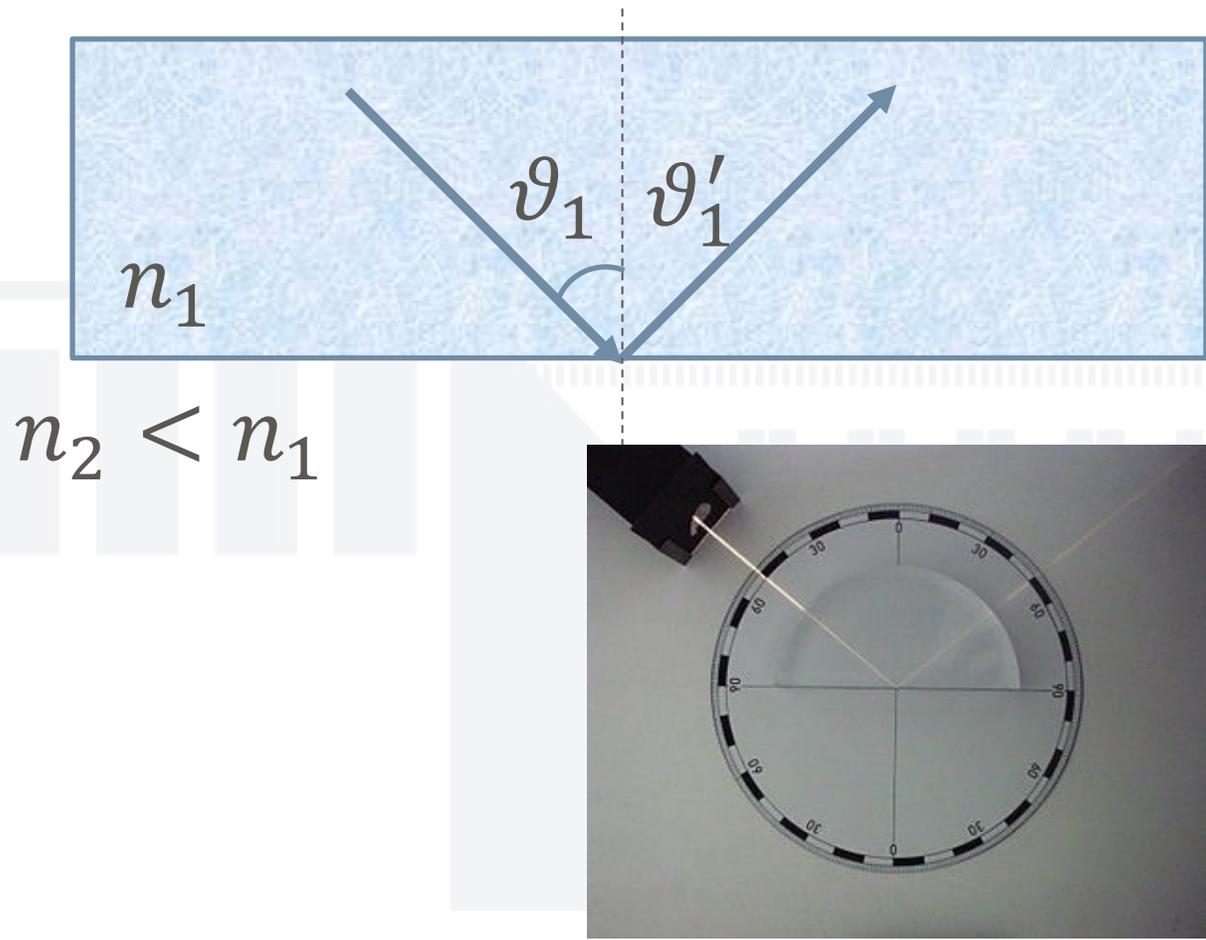
<https://askbiologist.asu.edu/rods-and-cones>



- La visione a colori avviene grazie ai **coni** (tipo S, blu; tipo M verde, tipo L rosso).
- In condizioni di scarsa luminosità vediamo tramite i bastoncelli (solo 1 colore – bianco/nero)

<https://doi.org/10.3389/fcell.2022.878350>

LA RIFLESSIONE INTERNA TOTALE

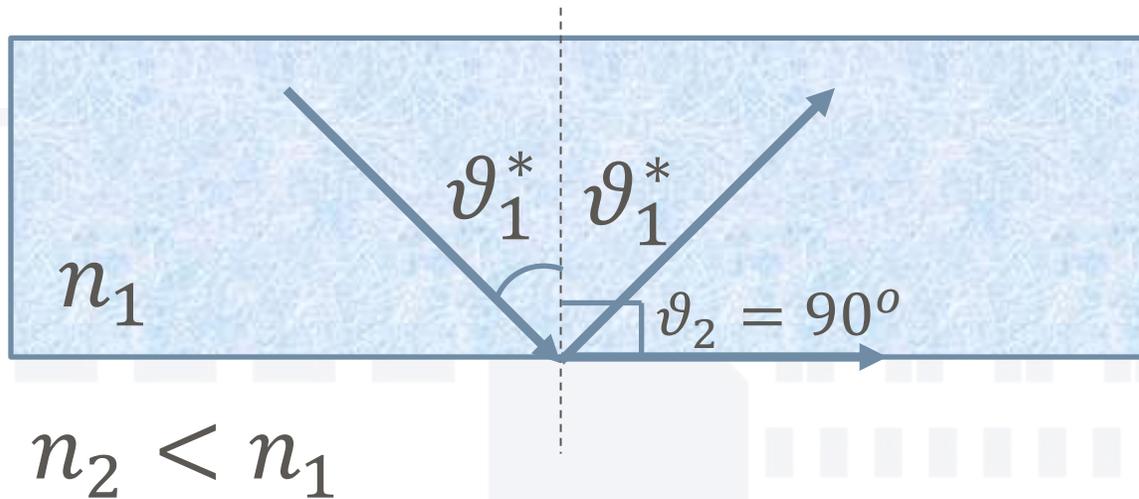


Se un raggio incide con grande angolo (= radente) nell'interfaccia tra un mezzo a più alto indice di rifrazione a uno a più basso indice di rifrazione avviene il fenomeno di **riflessione interna totale**

Riflessione interna totale = il raggio non attraversa la superficie ma viene riflesso all'interfaccia e rimane nello stesso mezzo iniziale.

LA RIFLESSIONE INTERNA TOTALE: ANGOLO CRITICO

L'angolo a cui si verifica la riflessione totale si chiama angolo critico e si trova facilmente dalla legge di Snell.



$$n_1 \sin(\vartheta_1) = n_2 \sin(\vartheta_2)$$

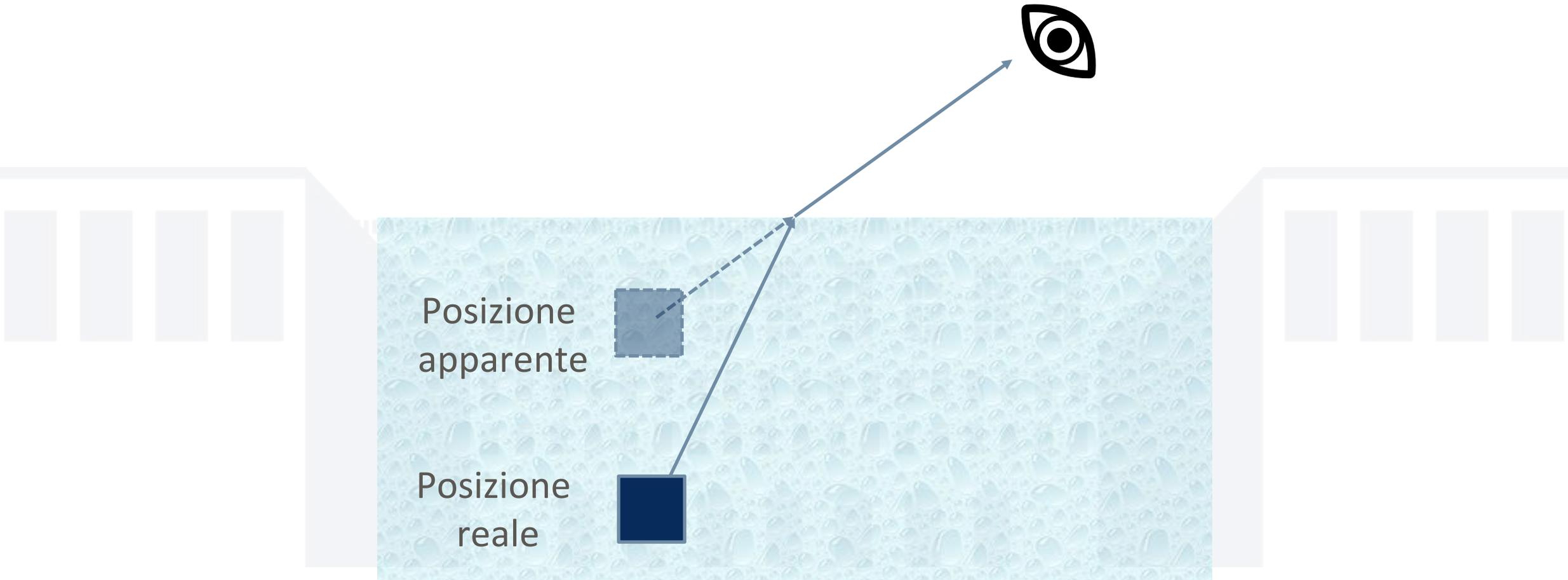
$$\sin(\vartheta_2) = \frac{n_1}{n_2} \sin(\vartheta_1) \leq 1$$

All'angolo critico ϑ_1^* , $\vartheta_2 = 90^\circ \rightarrow \sin(\vartheta_2) = 1$

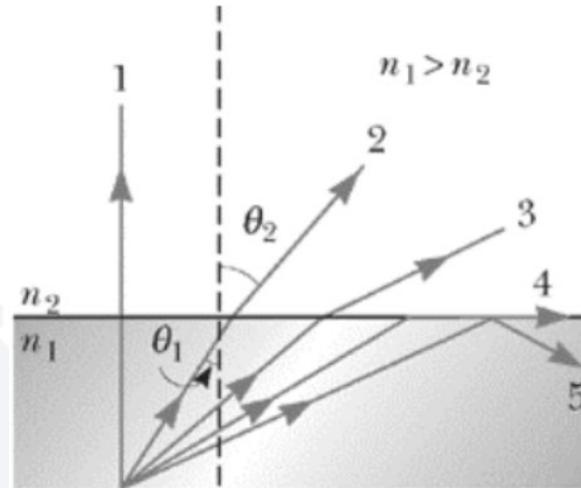
$$1 = \frac{n_1}{n_2} \sin(\vartheta_1^*)$$

$$\vartheta_1^* = \text{asin} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

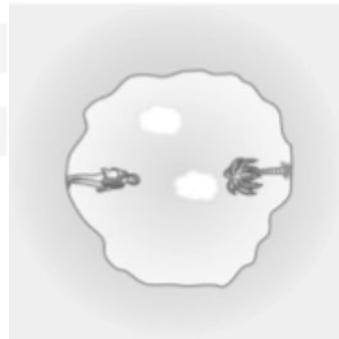
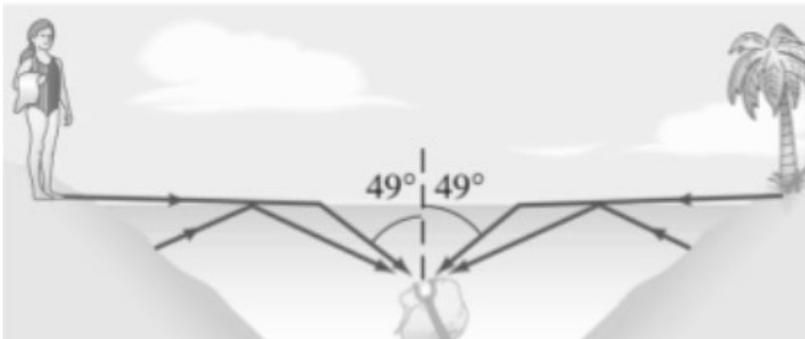
RIFRAZIONE: LA VISIONE SOTT'ACQUA



RIFRAZIONE E RIFLESSIONE INTERNA TOTALE: COSA VEDE UN SUB?



- Raggio 1: non viene deviato perché l'angolo di incidenza è 0
- Raggi 2 e 3: vengono rifratti allontanandosi dalla normale
- Raggio 4: angolo critico, ovvero «vede» a 90° rispetto alla normale
- Raggio 5: riflessione interna totale, vede l'interno dello stagno

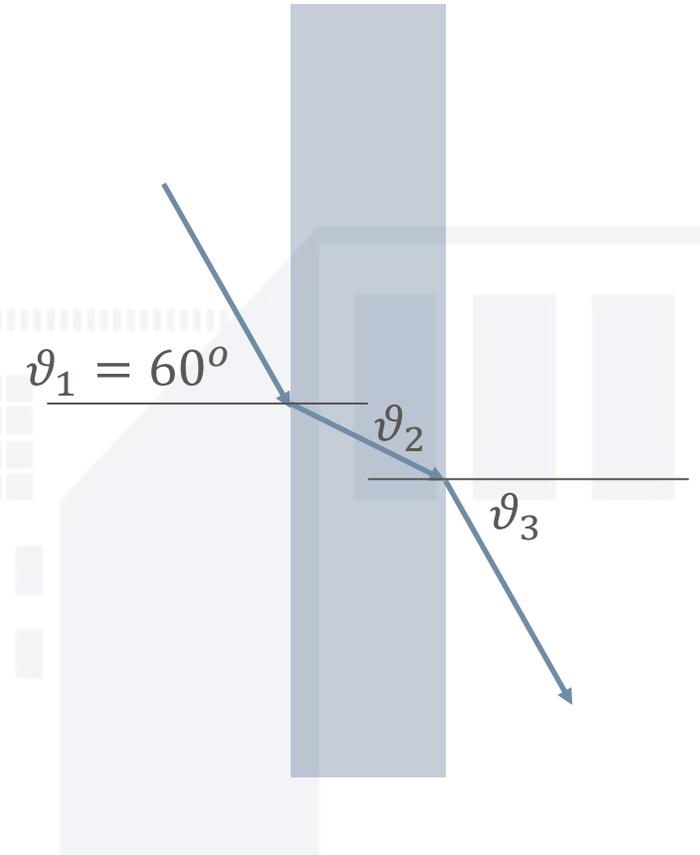


ESERCIZIO 2

Un raggio di luce che si propaga in aria colpisce una lastra di vetro con un angolo di 60° . Sapendo che $n_{vetro} = 1.50$, calcolare:

1. L'angolo di rifrazione nel vetro
2. L'angolo con cui emerge dalla lastra

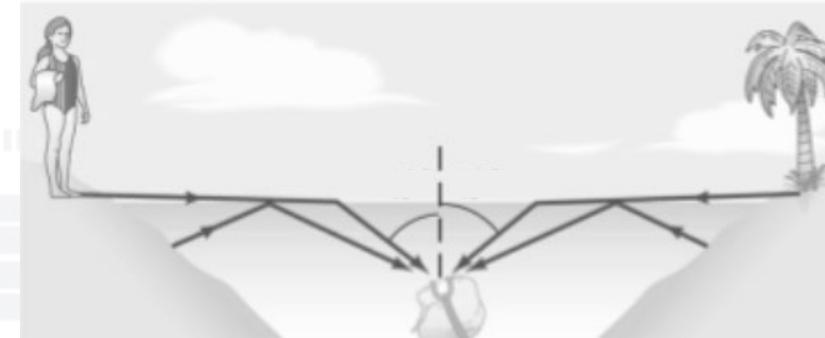
[35.2° ; 60°]



ESERCIZIO 3

Trovare l'angolo limite acqua-aria se l'indice di rifrazione dell'aria e' 1.33

[49°]



Ottica geometrica

LA FIBRA OTTICA

La riflessione interna totale è alla base del funzionamento delle fibre ottiche

- La fibra ottica è costituita da un fascio di filamenti di quarzo o resine plastiche dal diametro dell'ordine delle decine di micron
- Il filamento è ricoperto da una guaina a basso indice di rifrazione. In questo modo $n_1 > n_2$ e la riflessione esterna totale è possibile

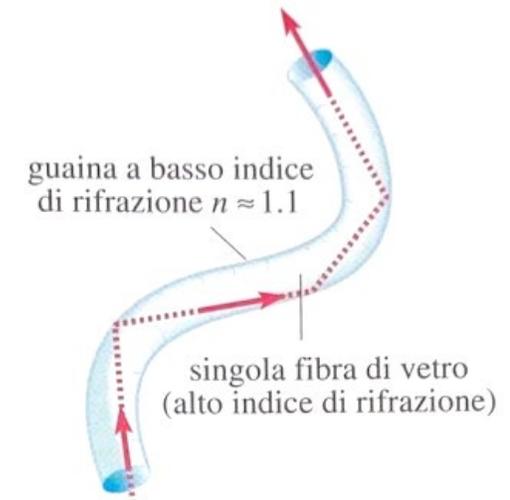
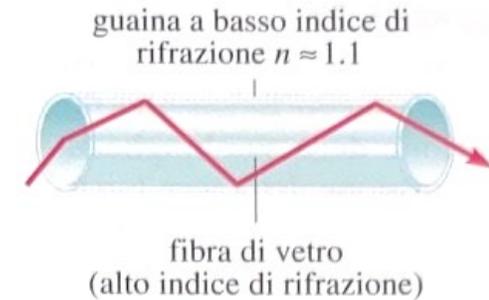


Figura 19.27

Il raggio di luce si trasmette lungo la fibra ottica per riflessione totale sulle pareti.

Ottica geometrica

L'ENDOSCOPIO

Disponendo fasci di fibre di ugual lunghezza in modo ordinato è possibile «trasmettere» un'immagine da un capo all'altro delle fibre grazie alla riflessione interna totale.

In chirurgia, questo principio è comunemente sfruttato negli **endoscopi**

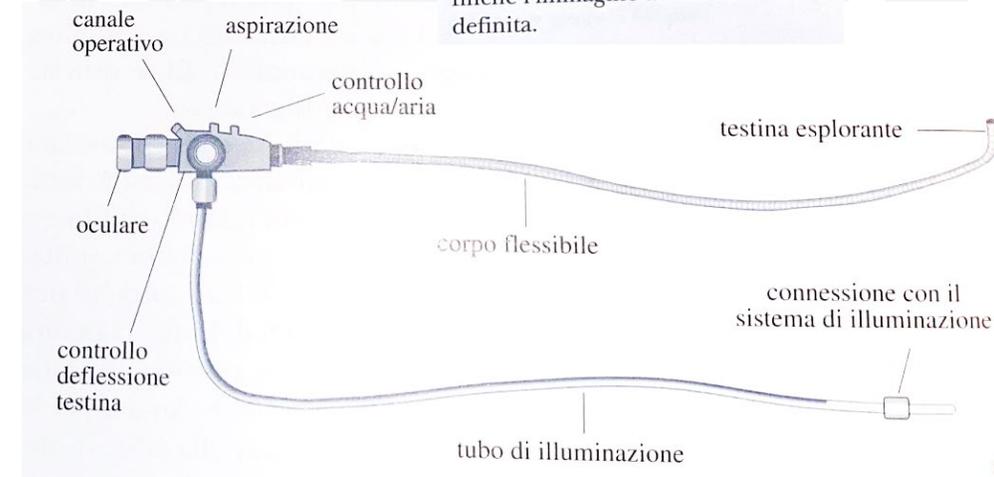
Un endoscopio è costituito da:

- Un a sorgente di luce per illuminare le cavità interne del corpo. La luce viene condotta all'estremità della sonda tramite fibra ottica
- Un sistema ottico di visione che consente di vedere l'immagine formata all'estremità (testina) della sonda
- Un insieme di diversi canali in cui far passare strumenti chirurgici, liquidi, sistemi di aspirazione
- Un sistema meccanico per il controllo della direzionalità della testina



Figura 19.28

Ciascuna fibra del fascio deve assumere la stessa posizione, rispetto alle altre, nelle due estremità, affinché l'immagine trasmessa risulti definita.



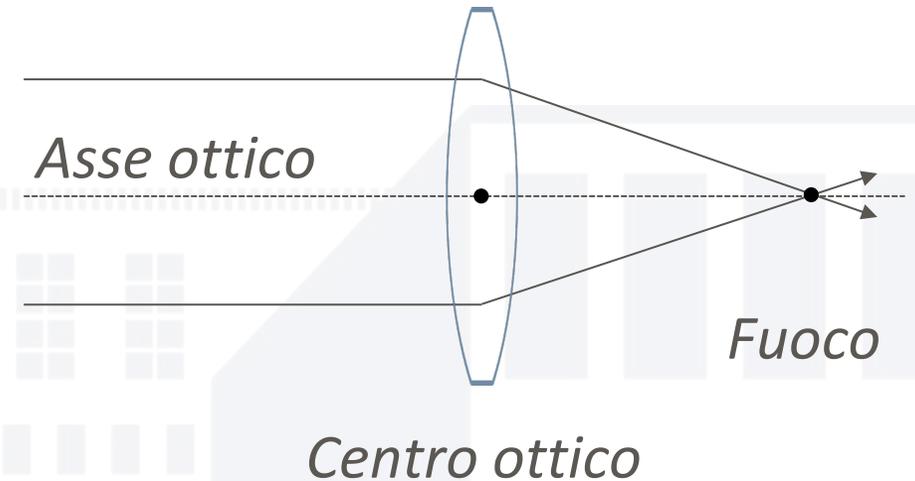
a)

LE LENTI: DEFINIZIONE

Il fenomeno della rifrazione si sfrutta per focalizzare la luce. Questo si ottiene utilizzando le lenti

Lente = un mezzo trasparente alla luce, limitato da due superfici ben definite (levigate), di cui almeno una è curva.

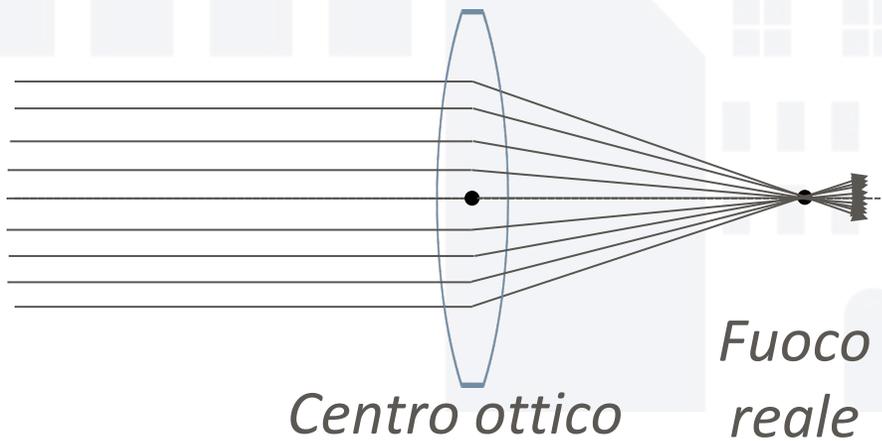
- Asse ottico: retta che congiunge i centri di curvatura delle due superfici
- Centro ottico: punto, sull'asse ottico, che divide a metà lo spessore della lente
- Fuoco: punto in cui convergono tutti i raggi che attraversano la lente parallelamente all'asse ottico



LE LENTI: CLASSIFICAZIONE

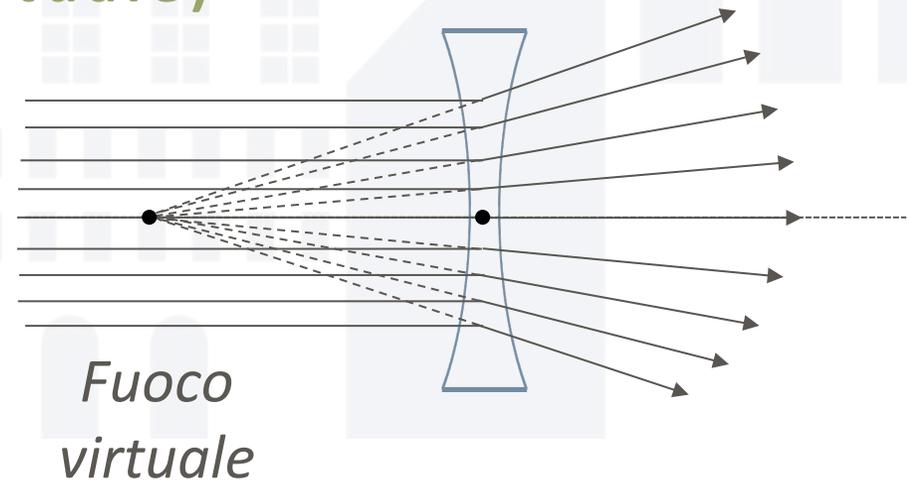
CONVERGENTI

Fanno convergere i raggi paralleli all'asse ottico nel fuoco (reale)



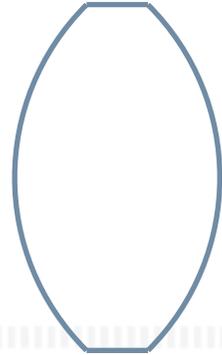
DIVERGENTI

Fanno divergere i raggi paralleli all'asse ottico, di modo che i prolungamenti dei raggi emergenti convergano in un fuoco (virtuale)



LE LENTI: CLASSIFICAZIONE

CONVERGENTI



biconvessa

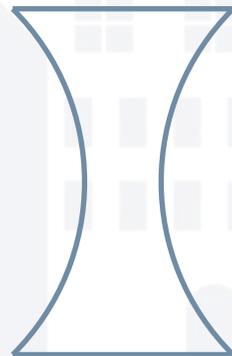


piano-convessa



cavo-convessa (piu' spessa al centro)

DIVERGENTI



biconcava



piano-concava



convesso-concava (piu' sottile al centro)

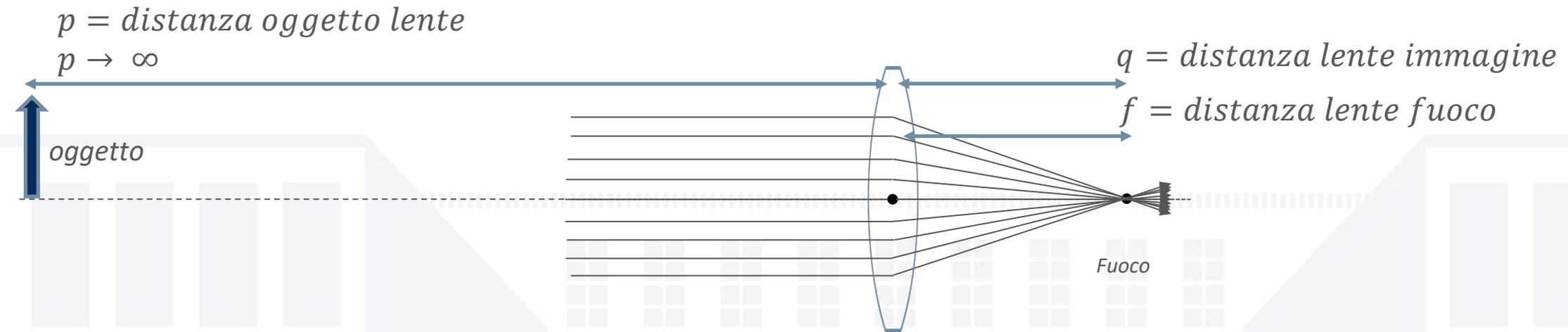
LE LENTI SOTTILI

I problemi con le lenti possono essere facilmente risolti geometricamente se le lenti soddisfano la condizione di “lente sottile”

- Lo spessore della lente è piccolo rispetto ai raggi di curvatura di ciascuna delle due superfici della lente
- Tutti i raggi provenienti dall’oggetto formano angoli piccolo con l’asse ottico (raggi parassiali)
- L’indice di rifrazione della lente è omogeneo in tutta la lente e indipendente dal colore della luce

FORMAZIONE DELL'IMMAGINE ATTRAVERSO UNALENTE

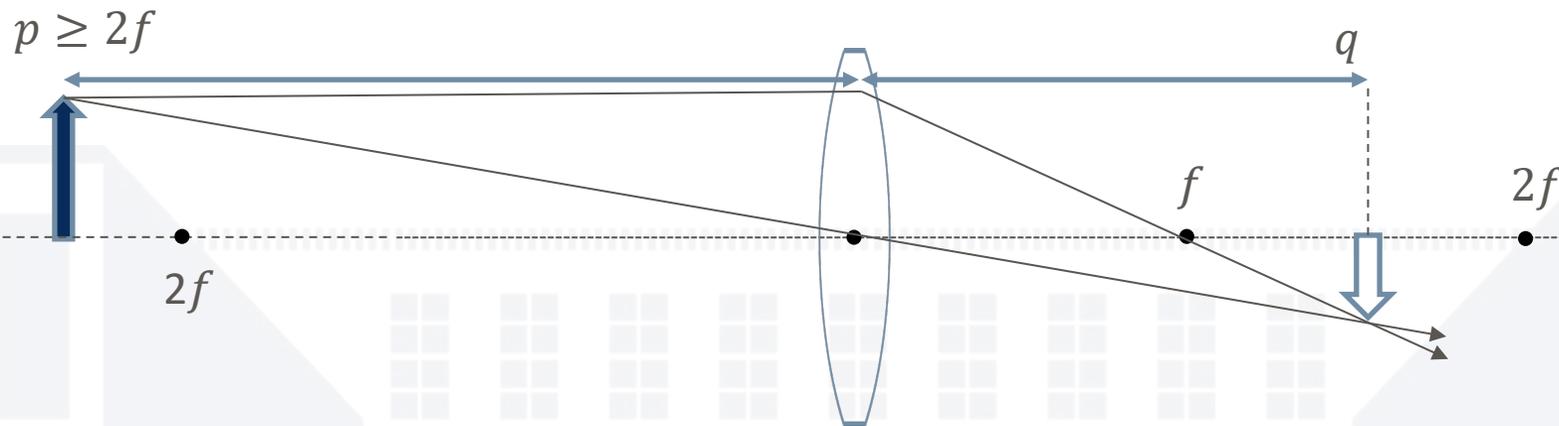
CASO 1 = oggetto all'infinito



POSIZIONE OGGETTO	POSIZIONE IMMAGINE	TIPO IMMAGINE	APPLICAZIONI
$p \rightarrow \infty$	Sul fuoco, $q = f$	Punto	Determinazione fuoco lente

FORMAZIONE DELL'IMMAGINE ATTRAVERSO UNALENTE

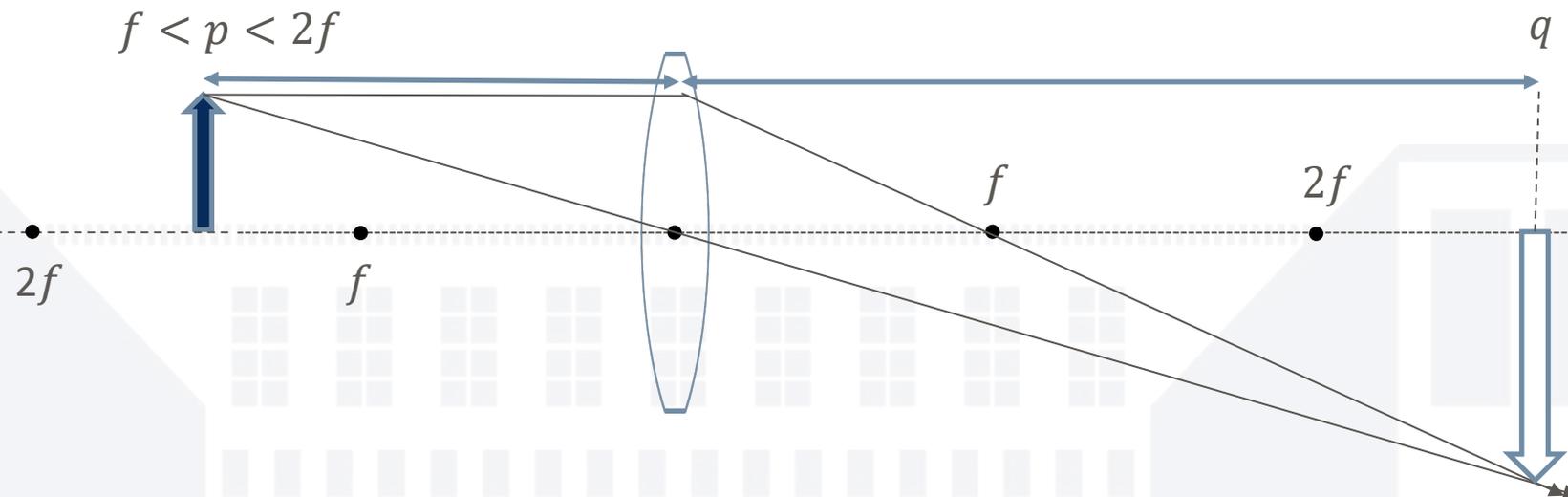
CASO 2 = $p \geq 2f$



POSIZIONE OGGETTO	POSIZIONE IMMAGINE	TIPO IMMAGINE	APPLICAZIONI
$p \geq 2f$	$f < q \leq 2f$	<ul style="list-style-type: none">• Reale• Capovolta• Rimpicciolita (o uguale se $p = 2f$)	Macchina fotografica

FORMAZIONE DELL'IMMAGINE ATTRAVERSO UNA LENTE

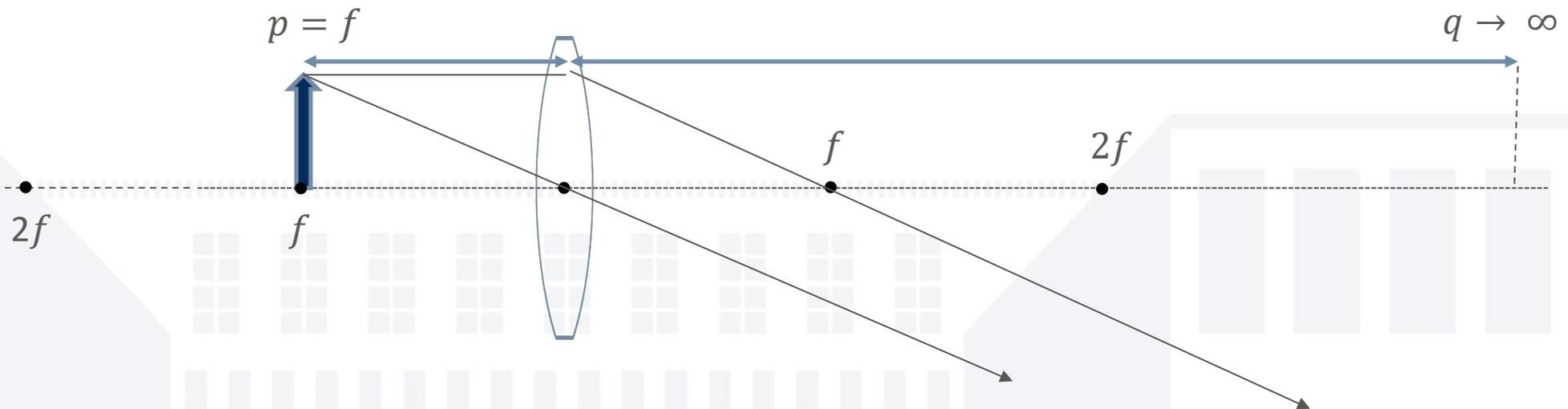
CASO 3 = $f < p < 2f$



POSIZIONE OGGETTO	POSIZIONE IMMAGINE	TIPO IMMAGINE	APPLICAZIONI
$f < p < 2f$	$q > 2f$	<ul style="list-style-type: none">• Reale• Capovolta• Ingrandita	Microscopio Proiettore

FORMAZIONE DELL'IMMAGINE ATTRAVERSO UNA LENTE

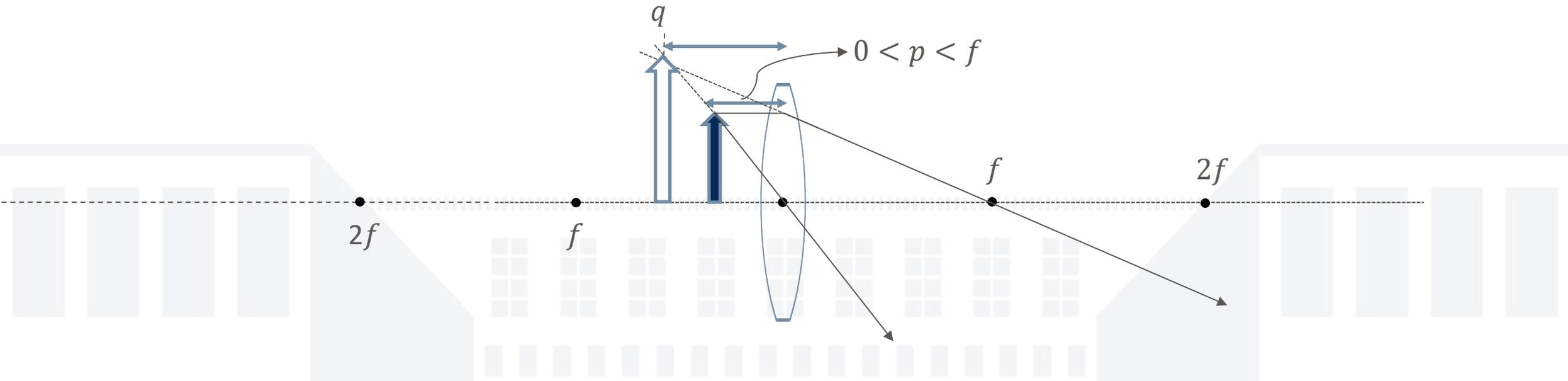
CASO 4 = $p = f$



POSIZIONE OGGETTO	POSIZIONE IMMAGINE	TIPO IMMAGINE	APPLICAZIONI
$p = f$	$q \rightarrow \infty$	• Non si crea	Fari Riflettori

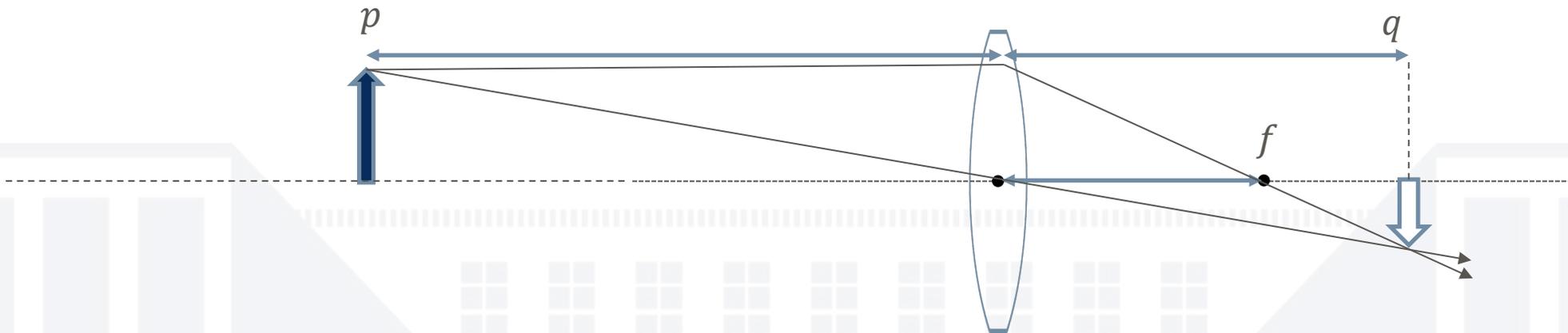
FORMAZIONE DELL'IMMAGINE ATTRAVERSO UNALENTE

CASO 5 = $0 < p < f$



POSIZIONE OGGETTO	POSIZIONE IMMAGINE	TIPO IMMAGINE	APPLICAZIONI
$0 < p < f$	$q < 0$	<ul style="list-style-type: none">• Virtuale• Dritta• Ingrandita	Lente di ingrandimento

LA LEGGE DELLE LENTI SOTTILI

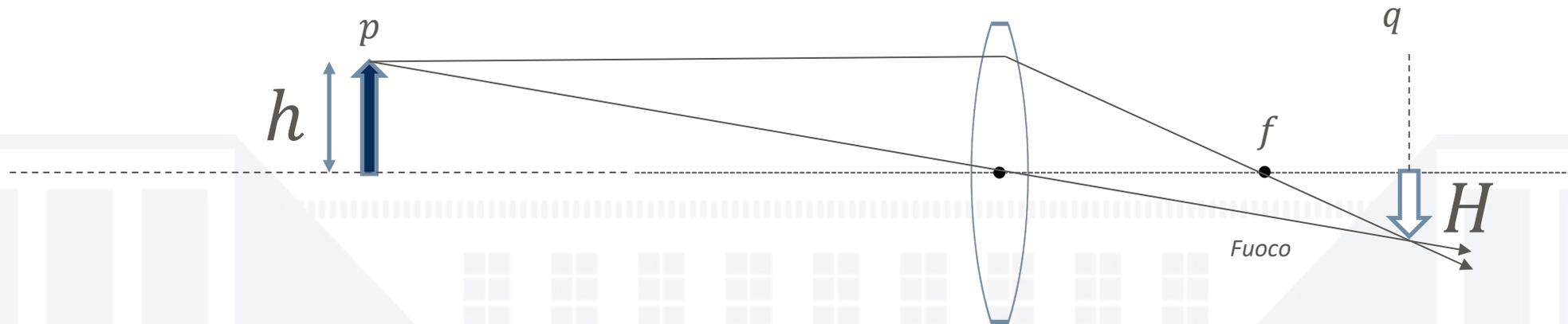


In generale, per le lenti sottili, una volta dato il fuoco della lente e la posizione dell'oggetto è possibile ricavare la posizione dell'immagine dalla legge delle lenti sottili

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Dove se $q > 0$ l'immagine è reale
 $q < 0$ l'immagine è virtuale

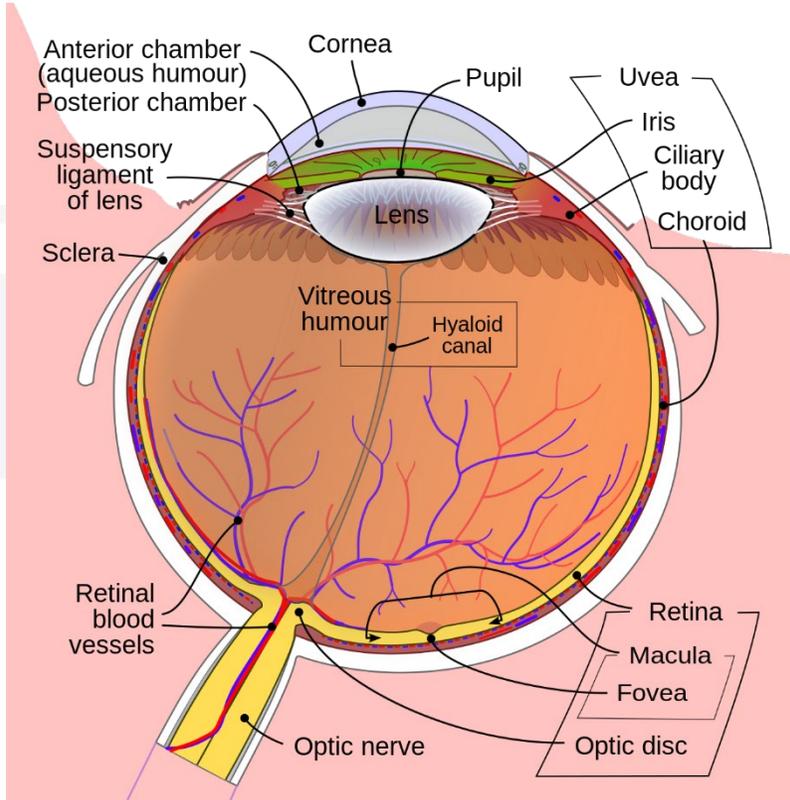
L'INGRANDIMENTO



Se h e' la dimensione dell'oggetto ed H è la dimensione della sua immagine, definiamo come ingrandimento $M = H/h$ che si può dimostrare essere:

$$M = \frac{q}{p}$$

L'OCCHIO: EMMETROPIA



<https://en.wikipedia.org/wiki/Eye>

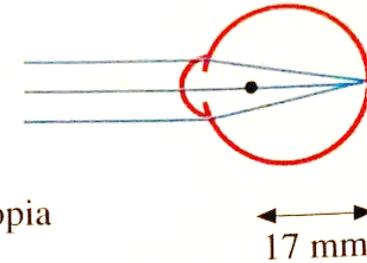


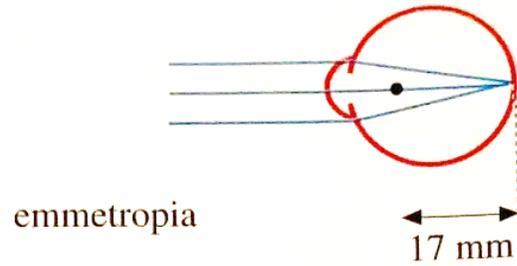
Figura 20.9

In condizioni di riposo, l'immagine proveniente dall'infinito è foceggiata sulla retina di un occhio normale (emmetrope). Il punto rappresenta il centro del cristallino.

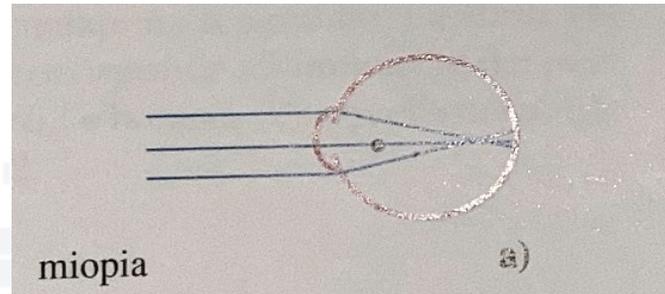
Tratto da: Scannicchio, Domenico, et al.
Fisica biomedica. EdISES, 2013.

L'OCCHIO: MIOPIA

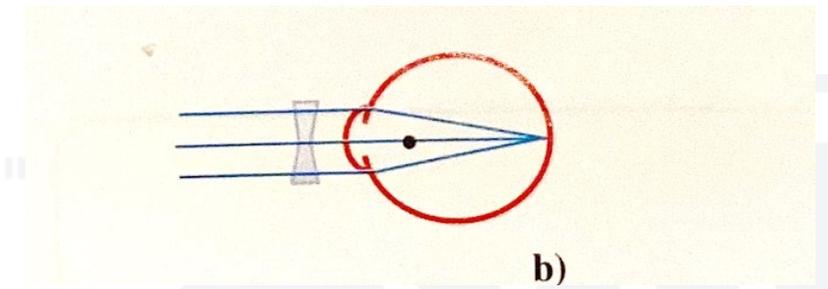
EMMETROPE



MIOPE



MIOPE CORRETTO



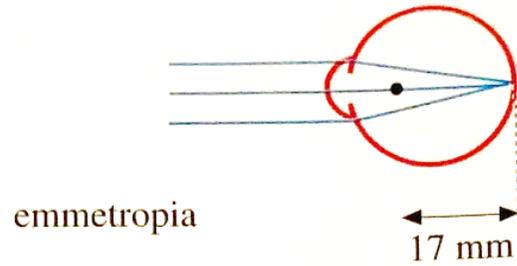
lente biconcava divergente

Figura 20.9

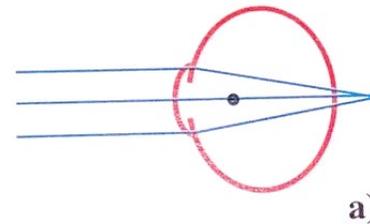
In condizioni di riposo, l'immagine proveniente dall'infinito è foceggiata sulla retina di un occhio normale (emmetrope). Il punto rappresenta il centro del cristallino.

L'OCCHIO: IPERMETROPIA

EMMETROPE



IPERMETROPE



IPERMETROPE CORRETTO

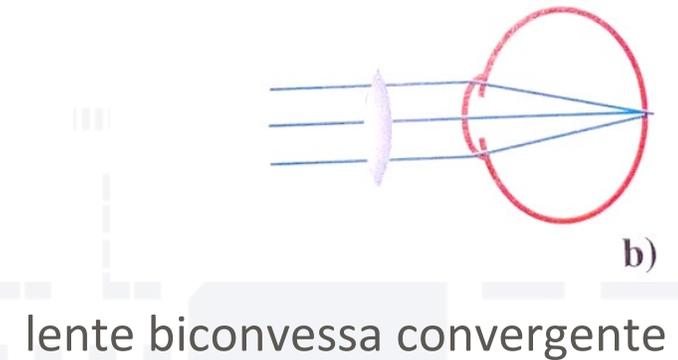


Figura 20.9

In condizioni di riposo, l'immagine proveniente dall'infinito è foceggiata sulla retina di un occhio normale (emmetrope). Il punto rappresenta il centro del cristallino.

ESERCIZIO 4

Un fotografo usa una macchina fotografica con una lente di distanza focale di 5 cm per fotografare un uomo alto 1.98 m. A che distanza dall'uomo deve essere posta la lente della macchina fotografica affinché l'immagine sulla pellicola sia alta 2 cm? Quale è la distanza giusta fra pellicola e lente?

[$p = 5 \text{ m}$; $q = 5.05 \text{ cm}$]

ESERCIZIO 5

Due punti A e B sono a distanza $d=100$ cm. Una lente sottile convergente, di distanza focale $f= 10$ cm, viene posta fra i due punti in modo che il suo asse ottico coincida con la retta passante per A e B. A quale distanza da A bisognerà collocare la lente affinché l'immagine di A si formi in B?

[$p=91\text{cm}$; $q = 9$ cm]

ESERCIZIO 6

Un oggetto è posto a 12 cm da una lente divergente con una lunghezza focale di -8 cm. Trovare la posizione, il tipo e l'ingrandimento dell'immagine.

[virtuale, dritta, rimpicciolita (ingrandimento = 0.65)]

ESERCIZIO 7

Le diapositive di un proiettore casalingo devono essere ingrandite 143 volte affinché l'immagine formata sullo schermo a 576 cm dalla lente del proiettore, sia abbastanza grande da soddisfare gli spettatori. A quale distanza deve essere la pellicola della lente e quale è la distanza focale della lente?

[$p = 3.93$ cm; $f = 3.89$ cm]