



Ottica



Roberto Cirio

Corso di Laurea in Chimica e Tecnologia Farmaceutiche

Anno accademico 2007 – 2008

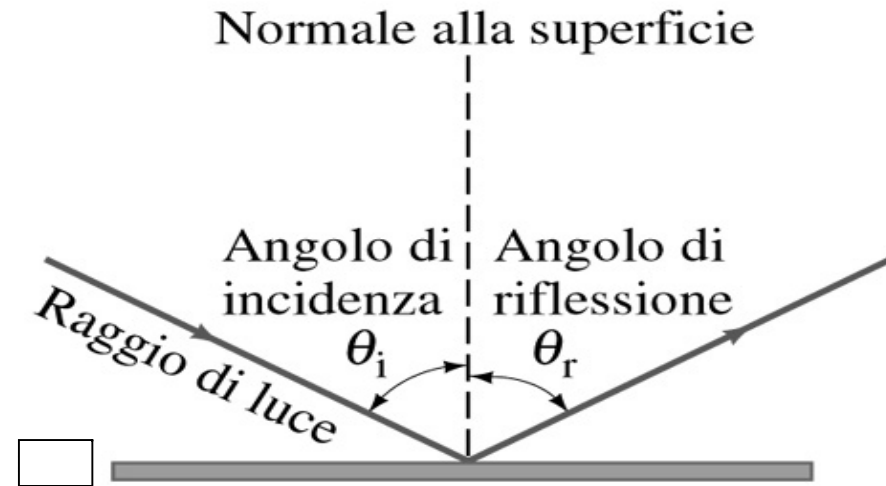
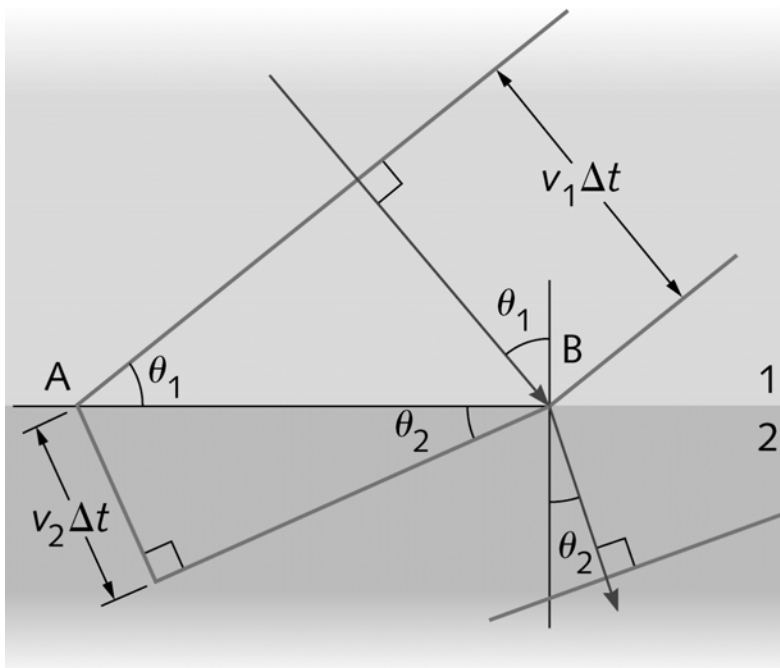
Corso di Fisica

La lezione di oggi

La luce

Riflessione e rifrazione

Interferenza e diffrazione



Fibre ottiche

L'occhio e le lenti

- **L'ottica geometrica**
- **Riflessione e rifrazione**
- **Le fibre ottiche**
- **Le lenti sottili**
- **L'occhio e le lenti**
- **Interferenza e diffrazione**
- **Diffrazione di raggi X**

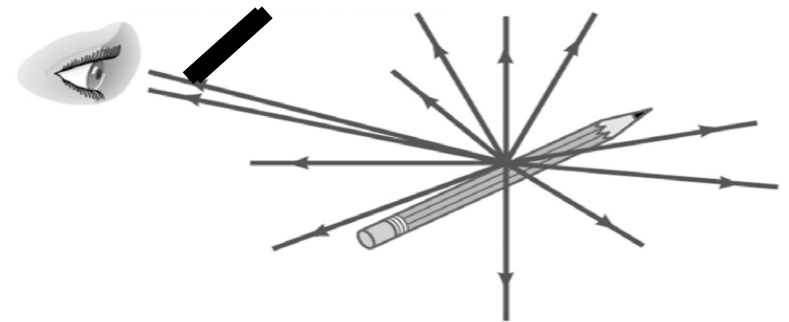
La luce e l'ottica geometrica

- La luce ha una natura elettromagnetica, come già visto
- La nostra esperienza sulla luce è legata all'occhio, che rivela la luce emessa dagli oggetti
- Questi possono:
 - Essere sorgenti di luce (sole, lampadina,)
 - Riflettere la luce (specchio, tavolo, ...)

Modello a raggi

La luce si propaga lungo cammini rettilinei detti raggi

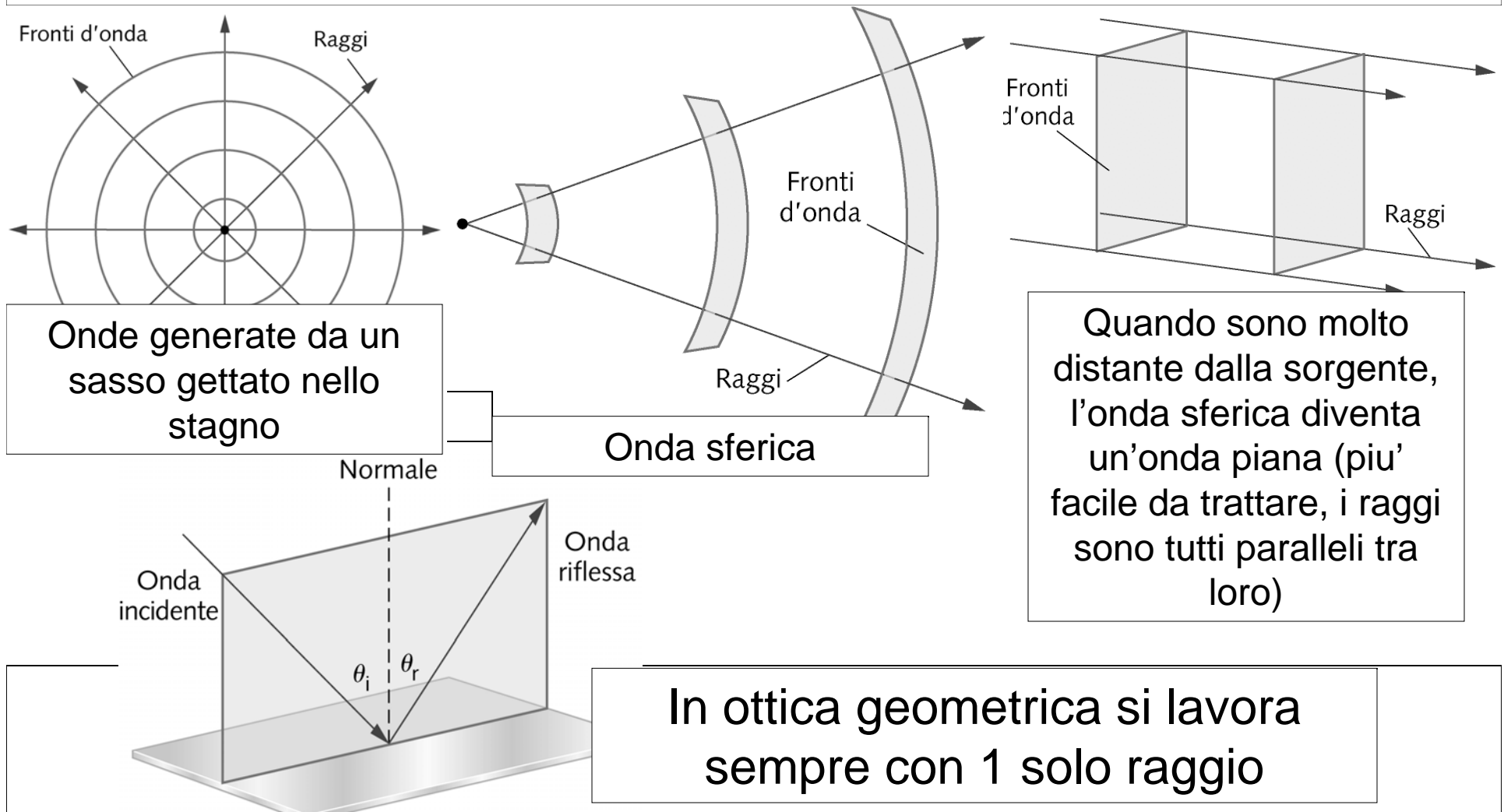
- Un raggio è l'idealizzazione di un fascio di luce molto stretto
- Vedo un oggetto perché la luce raggiunge i miei occhi da ogni punto dell'oggetto
- Solo una piccola parte dei raggi che escono dall'oggetto raggiunge i miei occhi



Si chiama ottica geometrica la teoria che descrive i fenomeni luminosi utilizzando direzioni e angoli di propagazione

I raggi e i fronti d'onda

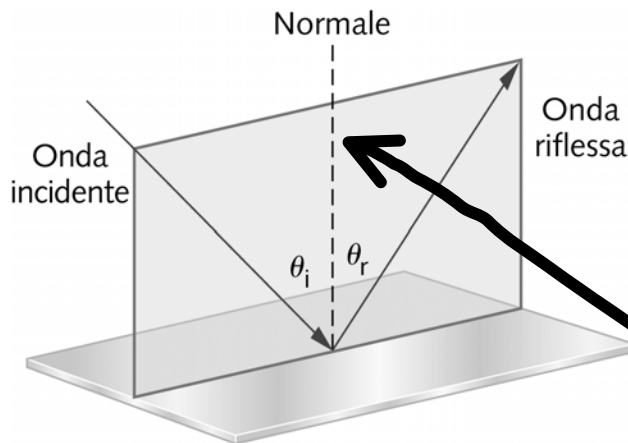
- La luce si propaga con onde
- Le creste delle onde possono essere rappresentate con fronti d'onda
- I raggi descrivono il moto delle onde



- **L'ottica geometrica**
- **Riflessione e rifrazione**
- **Le fibre ottiche**
- **Le lenti sottili**
- **L'occhio e le lenti**
- **Interferenza e diffrazione**
- **Diffrazione di raggi X**

La riflessione

- Se la luce incide su un oggetto, ho 2 effetti:
 - Assorbimento (se l'oggetto e' opaco) o rifrazione (se l'oggetto e' trasparente)
 - Riflessione
- Solo una parte di luce e' riflessa (uno specchio argentato ne riflette ~ 95 %)
- Se e' assorbita, viene trasformata in calore



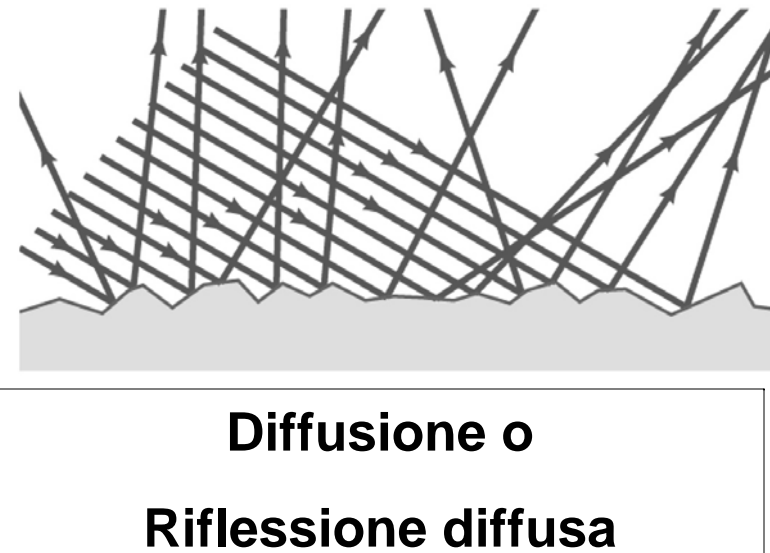
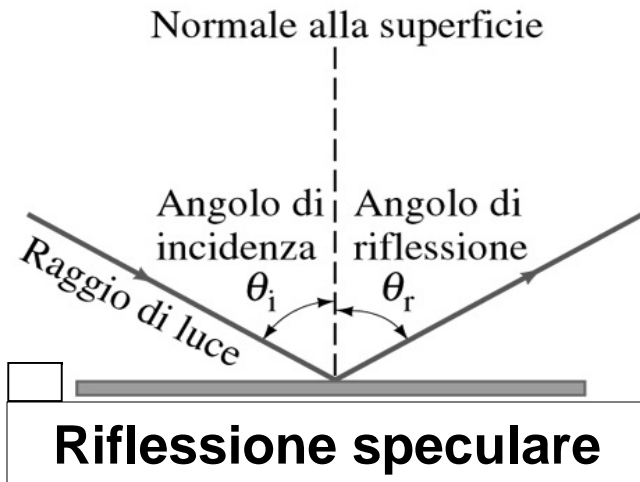
Nota.

E' importante ricordare che in ottica geometrica gli angoli sono riferiti alla NORMALE alla superficie

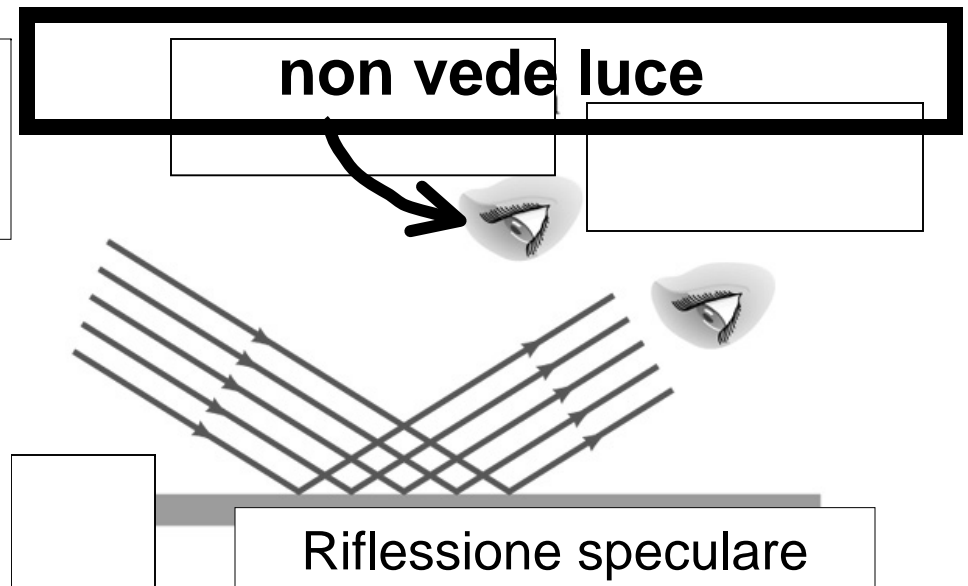
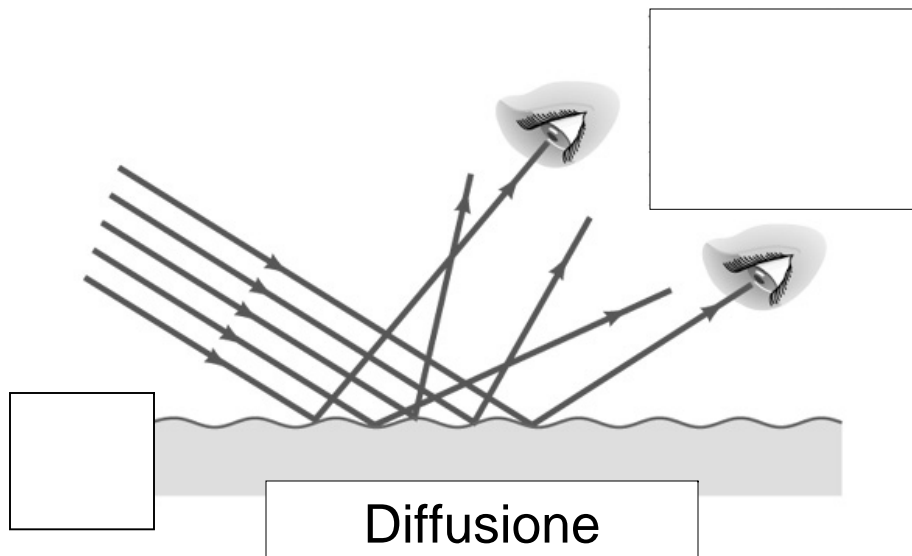
Legge della riflessione

1. Il raggio riflesso giace nel piano individuato dal raggio incidente e dalla normale alla superficie
2. L'angolo di riflessione e' uguale all'angolo di incidenza

La riflessione

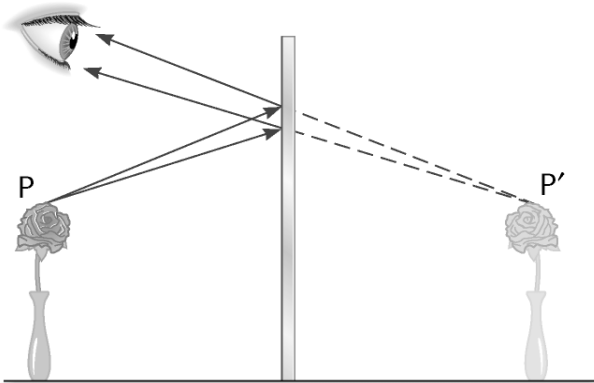


Nella costruzione, devo considerare ogni singolo raggio



La riflessione da uno specchio piano

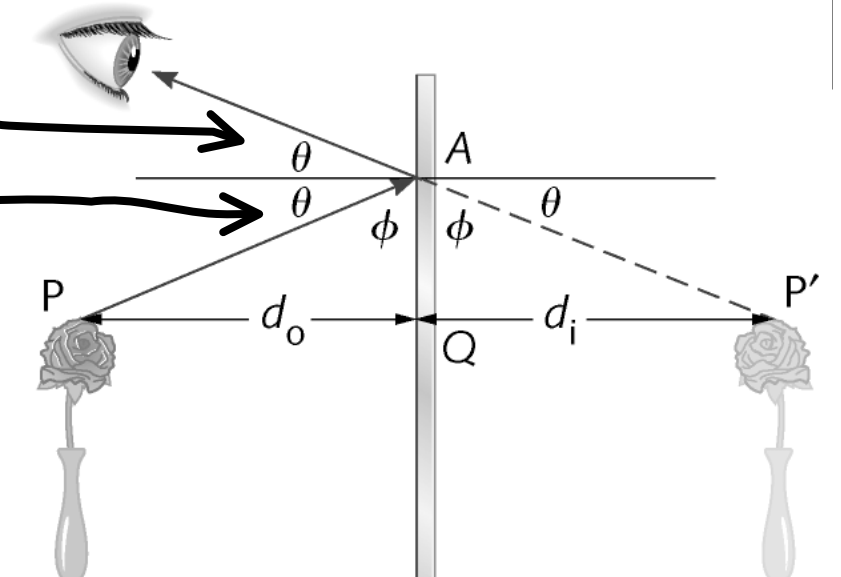
- Considero uno specchio piano
- Posiziono un oggetto di fronte allo specchio
- Ottengo un'immagine che appare oltre lo specchio, alla stessa distanza dell'oggetto dallo specchio



- L'immagine si dice virtuale

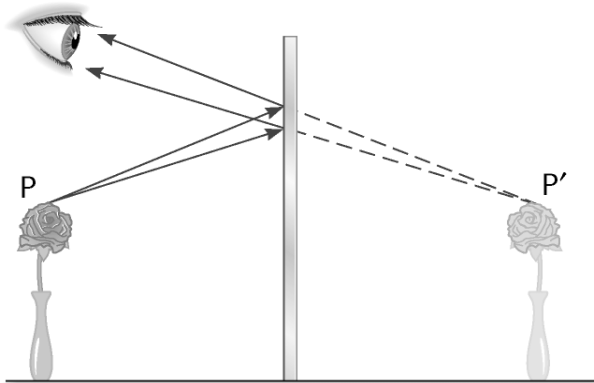
- Le linee rappresentano il prolungamento dei raggi, non i veri raggi
- Se posiziono una pellicola nella posizione in cui si forma l'immagine, non riesco a raccoglierla

● Legge della riflessione $\rightarrow \theta_{\text{incidente}} = \theta_{\text{diffuso}}$



La riflessione da uno specchio piano

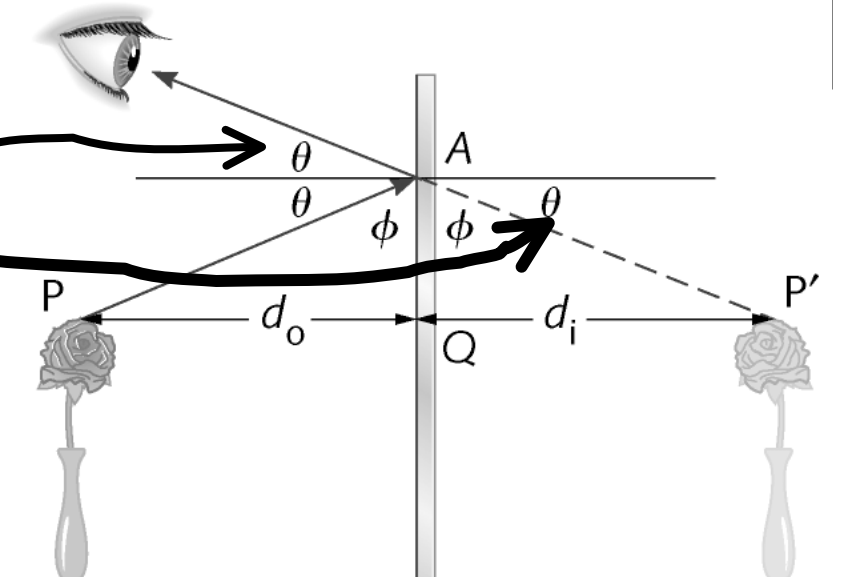
- Considero uno specchio piano
- Posiziono un oggetto di fronte allo specchio
- Ottengo un'immagine che appare oltre lo specchio, alla stessa distanza dell'oggetto dallo specchio



- L'immagine si dice virtuale

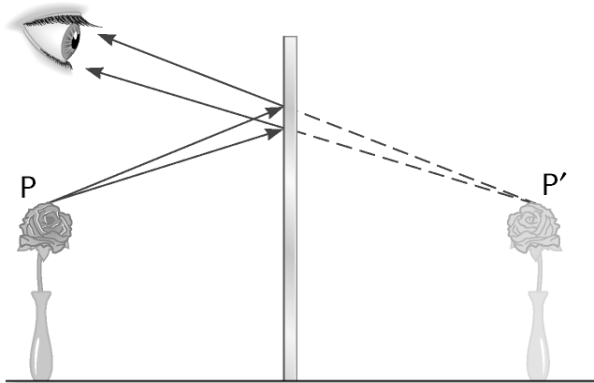
- Le linee rappresentano il prolungamento dei raggi, non i veri raggi
- Se posiziono una pellicola nella posizione in cui si forma l'immagine, non riesco a raccoglierla

● Angoli opposti al vertice (quindi uguali)



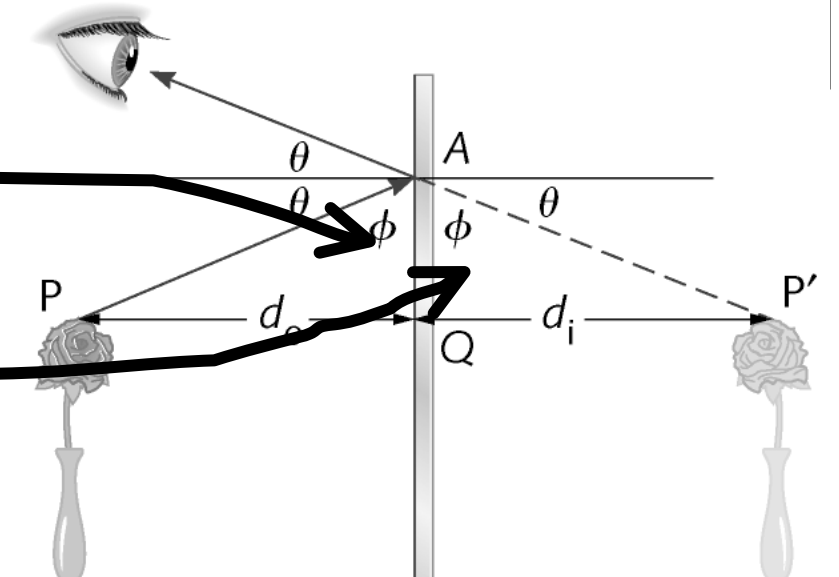
La riflessione da uno specchio piano

- Considero uno specchio piano
- Posiziono un oggetto di fronte allo specchio
- Ottengo un'immagine che appare oltre lo specchio, alla stessa distanza dell'oggetto dallo specchio



- L'immagine si dice virtuale

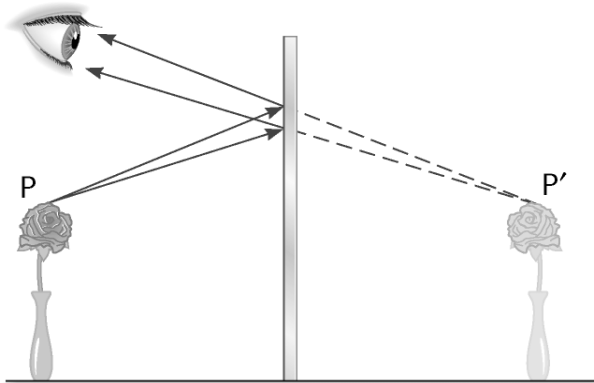
- Le linee rappresentano il prolungamento dei raggi, non i veri raggi
- Se posiziono una pellicola nella posizione in cui si forma l'immagine, non riesco a raccoglierla



● Anche $\phi = \phi$

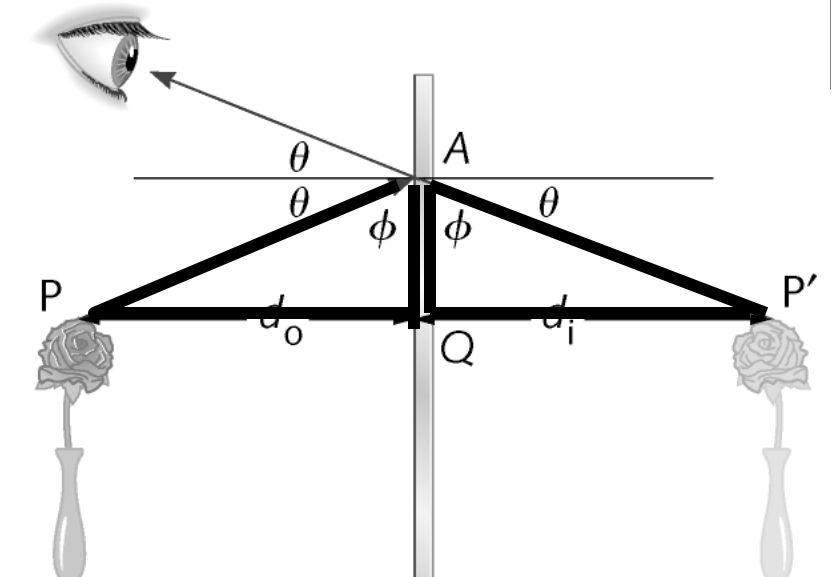
La riflessione da uno specchio piano

- Considero uno specchio piano
- Posiziono un oggetto di fronte allo specchio
- Ottengo un'immagine che appare oltre lo specchio, alla stessa distanza dell'oggetto dallo specchio



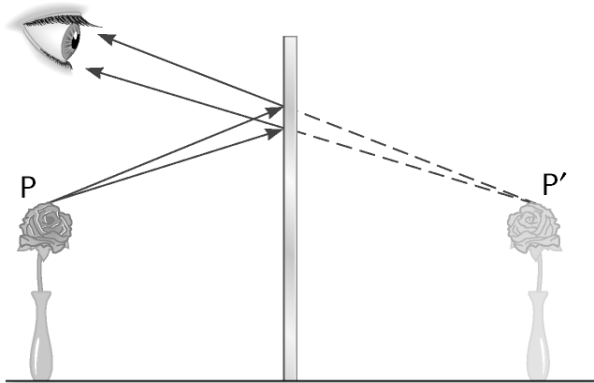
- L'immagine si dice virtuale
 - Le linee rappresentano il prolungamento dei raggi, non i veri raggi
 - Se posiziono una pellicola nella posizione in cui si forma l'immagine, non riesco a raccoglierla

● I due triangoli rettangoli APQ e AQP' sono uguali



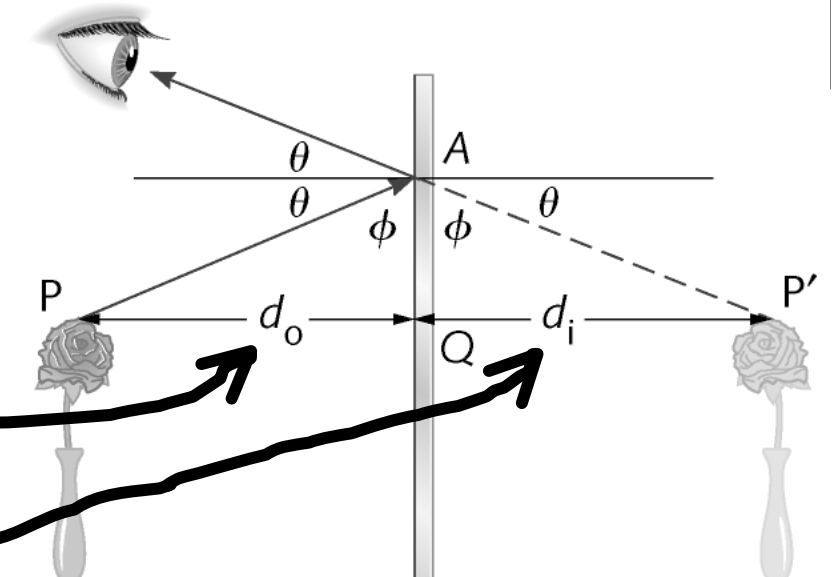
La riflessione da uno specchio piano

- Considero uno specchio piano
- Posiziono un oggetto di fronte allo specchio
- Ottengo un'immagine che appare oltre lo specchio, alla stessa distanza dell'oggetto dallo specchio



- L'immagine si dice virtuale

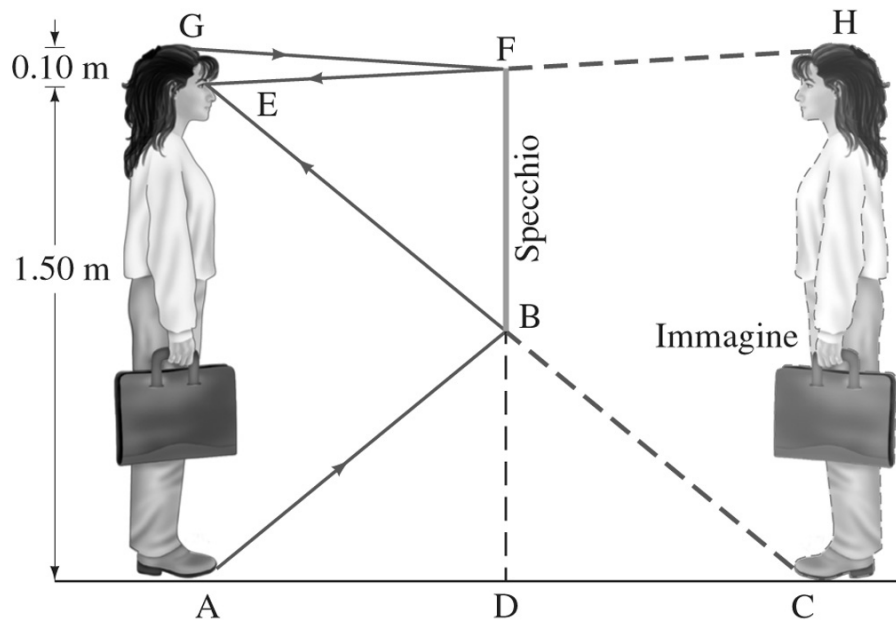
- Le linee rappresentano il prolungamento dei raggi, non i veri raggi
- Se posiziono una pellicola nella posizione in cui si forma l'immagine, non riesco a raccoglierla



● La distanza dei due oggetti rispetto allo specchio è uguale ($d_{\text{oggetto}} = d_{\text{immagine}}$)

Esercizio

Problema. Una donna alta 1.60 m si trova di fronte ad uno specchio piano verticale. Quale deve essere l'altezza minima dello specchio e quanto al più deve essere sollevato da terra il suo bordo inferiore affinché la donna possa vedersi riflessa la sua intera figura? Assumete che gli occhi si trovino 10 cm più in basso rispetto al punto più alto della sua testa.



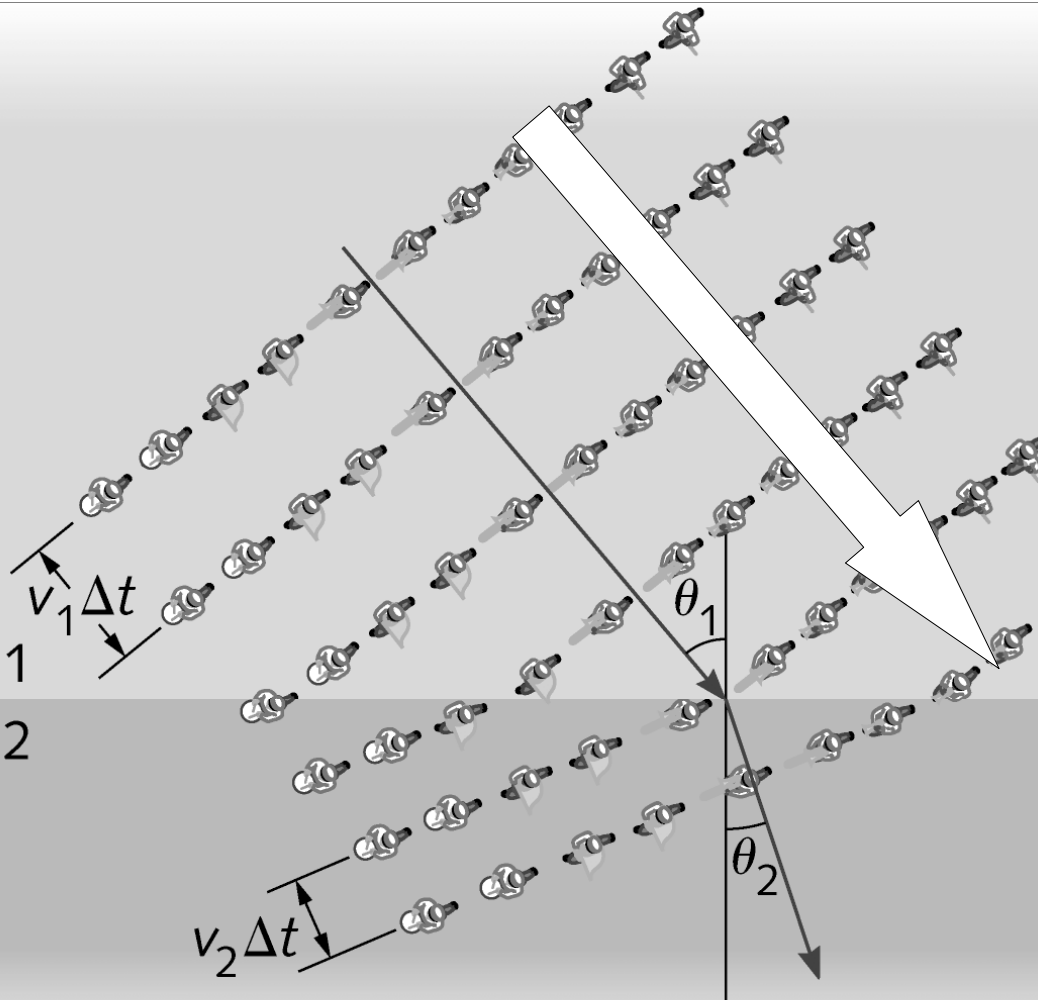
- Il raggio ABE e' il più basso possibile
- Lo specchio non deve estendersi più in basso del punto B
- F e' il punto più alto necessario

$$AE = (160 - 10) \quad GE = 10 \text{ cm} \quad h_{\min} = (155 - 75) \text{ cm} = 80 \text{ cm}$$

$$B = (160 - 10) / 2 = 75 \text{ cm} \quad F = 10 / 2 = 5 \text{ cm} \quad h_B = 75 \text{ cm}$$

La rifrazione della luce

- La velocità della luce non è costante e varia da mezzo a mezzo
- Passando da un mezzo con v_1 a un mezzo con v_2 avviene un fenomeno chiamato **rifrazione**



- Considero una banda musicale che cammina
- Nel tempo Δt si muovono di uno spazio $\Delta x_1 = v_1 \cdot \Delta t$
- Quando arrivano nella zona 2, la velocità diminuisce ($v_2 < v_1$)
- Nello stesso lasso di tempo Δt si muovono di uno spazio $\Delta x_2 = v_2 \cdot \Delta t$
- Cambia la direzione del fronte d'onda

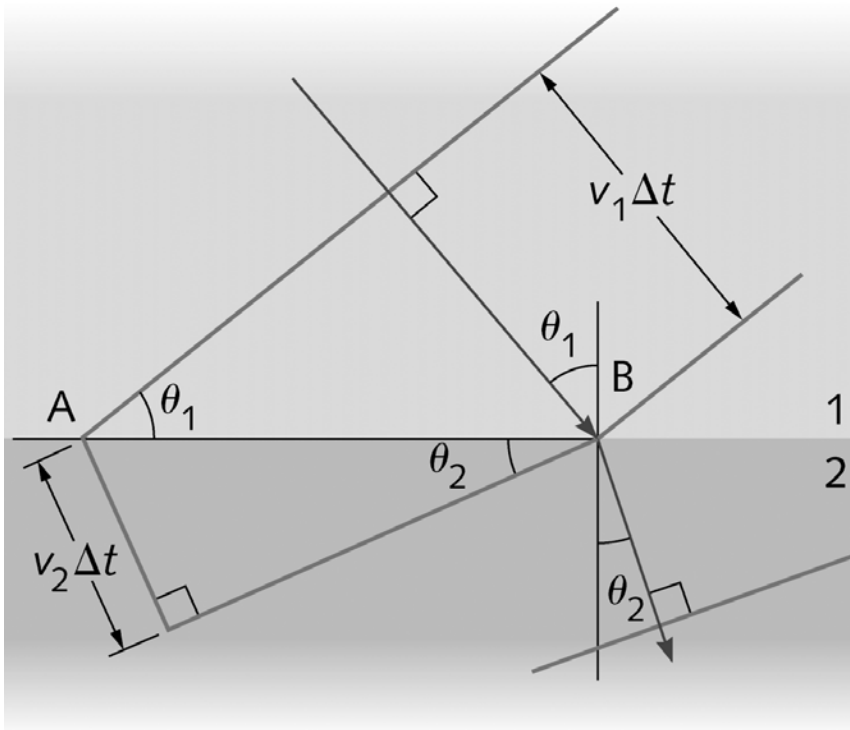
E' la rifrazione

L'indice di rifrazione

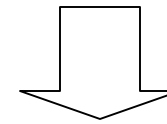
- La luce si propaga nel vuoto alla velocità $c = 3.00 \cdot 10^8$ m/s
- In qualunque altro mezzo, la velocità è inferiore
- Questo è dovuto al fatto che la radiazione luminosa è assorbita e riemessa dagli atomi e le molecole del mezzo
- Definisco **l'indice di rifrazione $n = c/v$**

Sostanza	Indice di rifrazione ($n = c/v$)
Vuoto	1.00
Aria	1.000293
Ghiaccio	1.31
Acqua	1.33
Vetro	~1.52
Diamante	2.42

La legge di Snell



$$v_1 \Delta t = AB \operatorname{sen} \theta_1 \quad v_2 \Delta t = AB \operatorname{sen} \theta_2$$



$$\frac{\operatorname{sen} \theta_1}{v_1} = \frac{\operatorname{sen} \theta_2}{v_2}$$

$$\frac{\operatorname{sen} \theta_1}{c/n_1} = \frac{\operatorname{sen} \theta_2}{c/n_2}$$

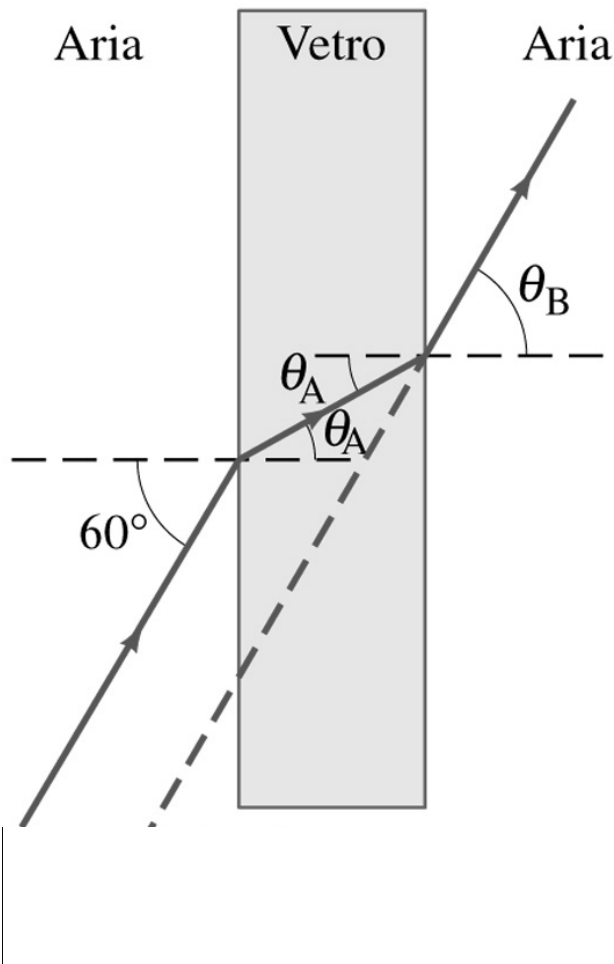
$$n_1 \operatorname{sen} \theta_1 = n_2 \operatorname{sen} \theta_2$$

- Occhio: l'angolo θ e' l'angolo tra raggio e normale
- Se il raggio entra in un mezzo con velocita' della luce inferiore, il raggio si avvicina alla normale
- Se il raggio entra in un mezzo con velocita' della luce superiore, il raggio si allontana dalla normale
- Se il raggio e' lungo la normale, non varia direzione

Esercizio

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

1. L'angolo di rifrazione nel vetro θ_A
2. L'angolo θ_B con il quale emerge dalla lastra.



$$\text{Legge di Snell} \quad n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2$$

$$n_{\text{aria}} \text{sen} 60 = n_{\text{vetro}} \text{sen} \theta_A$$

$$\text{sen} \theta_A = \frac{n_{\text{aria}} \text{sen} 60}{n_{\text{vetro}}} = 0.577 \quad \theta = 35.2^\circ$$

$$n_{\text{aria}} \text{sen} \theta_B = n_{\text{vetro}} \text{sen} \theta_A$$

$$\text{sen} \theta_B = \frac{n_{\text{vetro}} \text{sen} \theta_A}{n_{\text{aria}}} = \frac{1.5 \cdot 0.577}{1} = 0.866 \quad \theta = 60^\circ$$

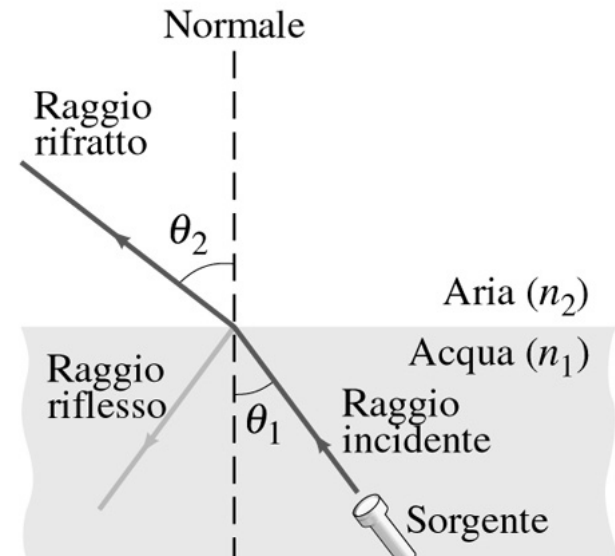
La riflessione totale

- Considero il caso in cui la luce passa da un mezzo con n maggiore, a un mezzo con n minore

- Il raggio tende ad allontanarsi dalla normale

- Infatti:

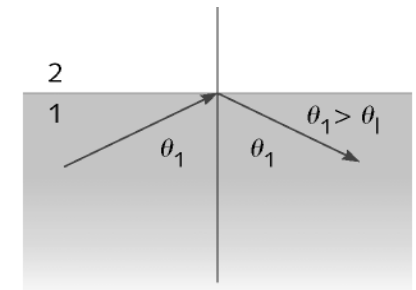
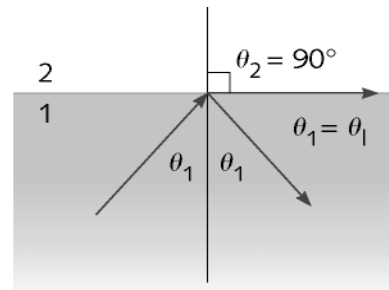
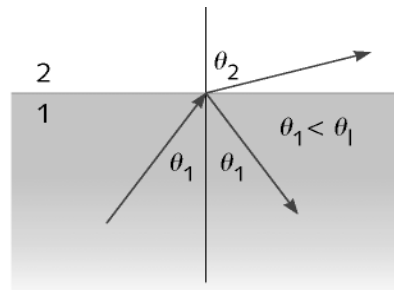
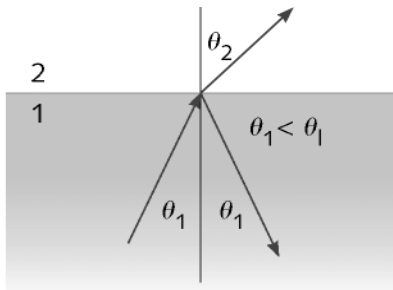
- $n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}\theta_2$
- $\text{sen}\theta_2 = (n_1/n_2) \text{sen}\theta_1$
- $(n_1/n_2) > 1$
- $\text{sen}\theta_2 > \text{sen}\theta_1$



- Al limite, vale la relazione:

- $n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2 \text{sen}(90)$
- $n_1 \text{sen}\theta_1 = n_2$
- $\text{sen}\theta_1 = n_2/n_1$

- Ovvero, esiste un angolo θ_{limite} per il quale la luce viene totalmente riflessa

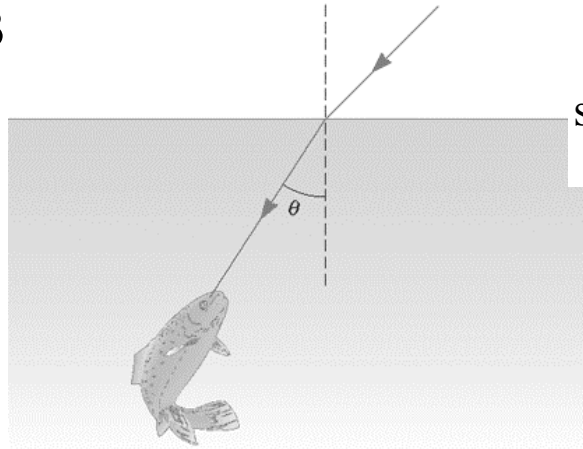


Esercizio

Esempio. Trovare l'angolo limite per la superficie acqua-aria se l'indice di rifrazione dell'acqua e' 1.33

Angolo limite

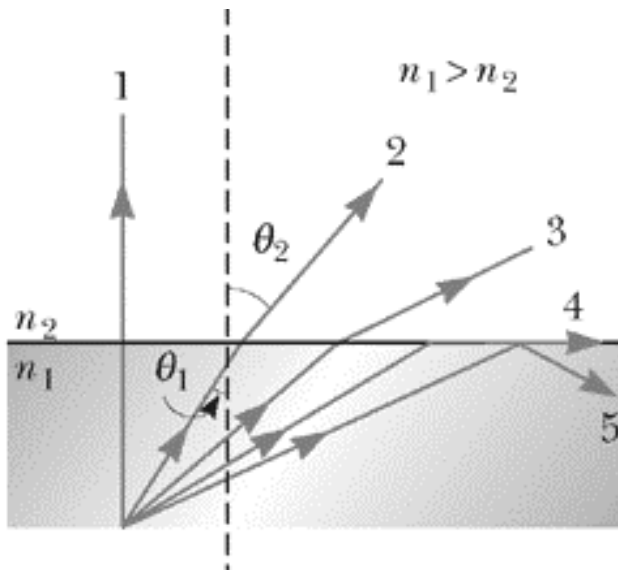
$$\text{sen } \theta_{\text{limite}} = \frac{n_2}{n_1}$$



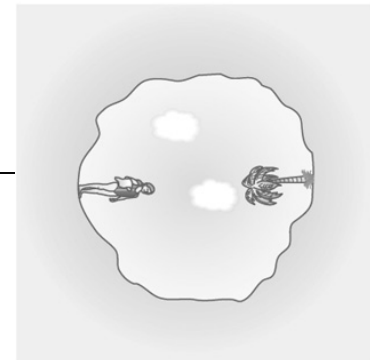
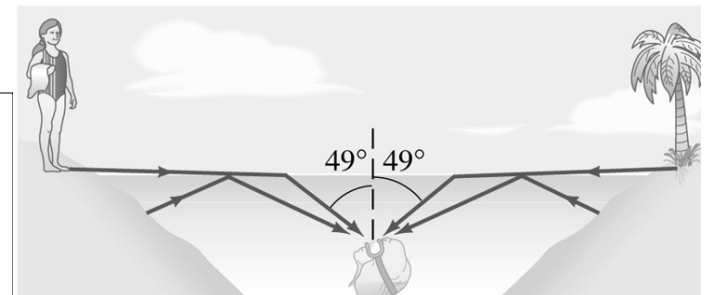
$$\text{sen } \theta_{\text{limite}} = \frac{n_{\text{aria}}}{n_{\text{acqua}}} = \frac{1}{1.33} = 0.752$$

$$\theta_{\text{limite}} = \arcsen(0.752) = 49^\circ$$

Cosa vede il pesce guardando dal fondo dello stagno ?



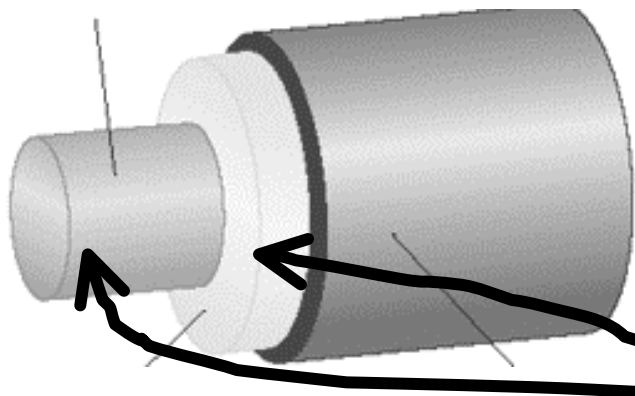
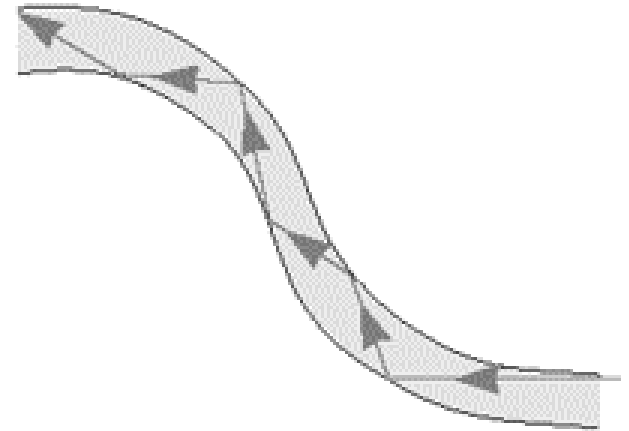
- Raggio 1: non e' deviato
- Raggi 2 e 3: si allontanano dalla normale
- Raggio 4: 'vede' a 90° rispetto alla normale
- Raggio 5: riflessione totale



- **L'ottica geometrica**
- **Riflessione e rifrazione**
- **Le fibre ottiche**
- **Le lenti sottili**
- **L'occhio e le lenti**
- **Interferenza e diffrazione**
- **Diffrazione di raggi X**

Le fibre ottiche

- Applicazione della riflessione totale: guida di luce



- Se uso un fascio di fibre sottili: fibre ottiche
- In genere il diametro di una fibra ottica e' di qualche decina di micron (20-100 μm)

- Sono composte da:
 - un nucleo di vetro o plastica

**In una fibra ottica,
la luce rimbalza
sfruttando la
riflessione totale**

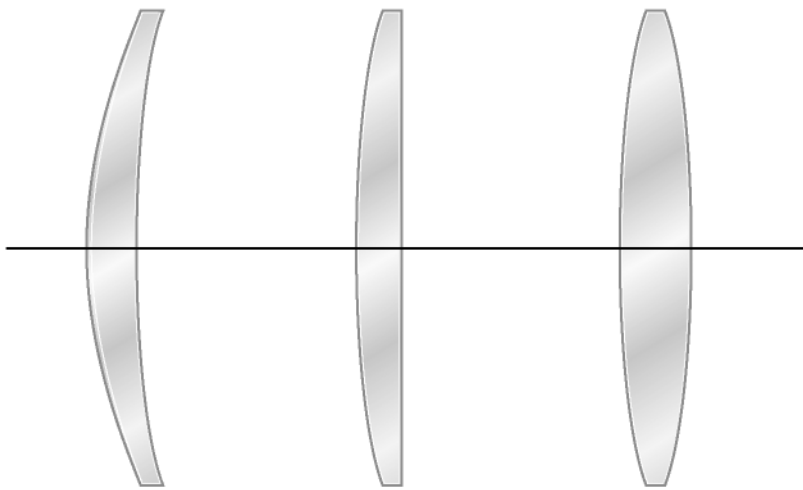
- Per la legge di Snell
 - $\sin\theta_{\text{riflessione totale}} = n_{\text{rivestimento}}/n_{\text{nucleo}}$
 - $n_{\text{rivestimento}} < n_{\text{nucleo}} \rightarrow n_{\text{rivestimento}}/n_{\text{nucleo}} < 1$
 - esiste un $\theta_{\text{riflessione totale}}$

- **L'ottica geometrica**
- **Riflessione e rifrazione**
- **Le fibre ottiche**
- **Le lenti sottili**
- **L'occhio e le lenti**
- **Interferenza e diffrazione**
- **Diffrazione di raggi X**

Le lenti sottili

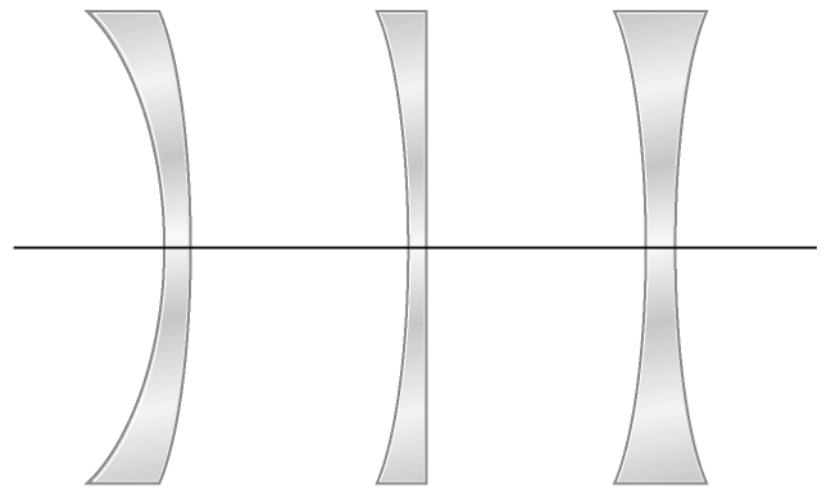
Lenti sottili: pezzi di vetro o plastica sagomati in modo che le due superfici siano porzioni di piano o sfera

Lenti convergenti



Menisco
convesso Lente
piano-convessa Lente
biconvessa

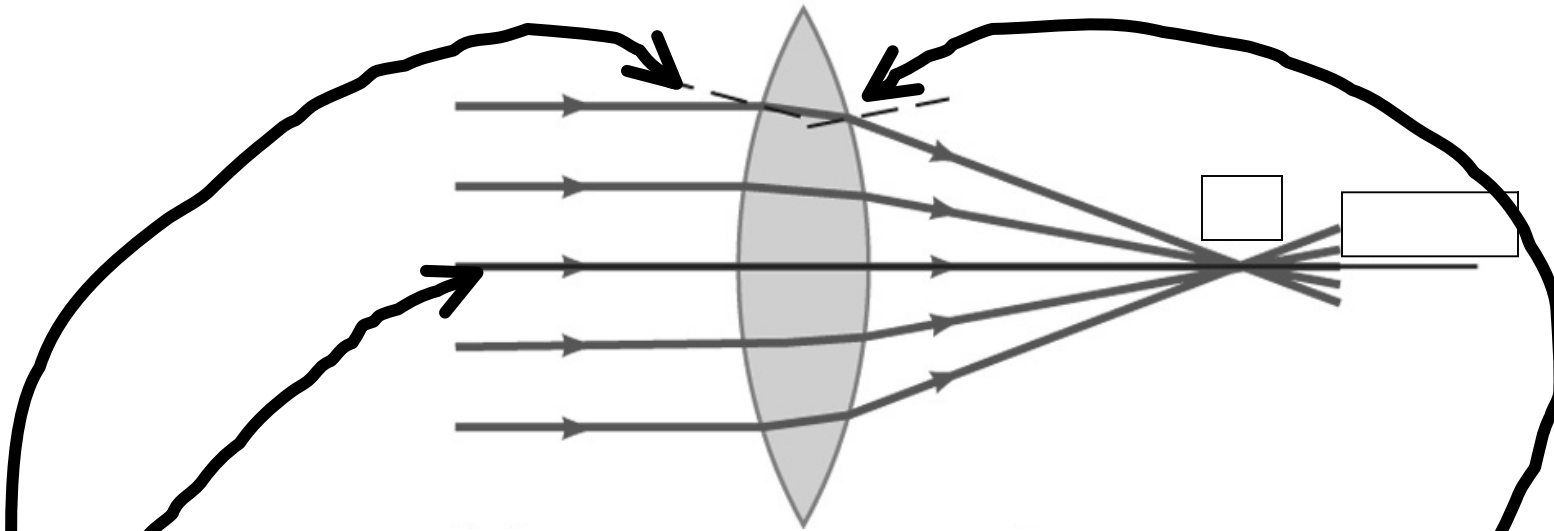
Lenti divergenti



Menisco
concavo Lente
piano-concava Lente
biconcava

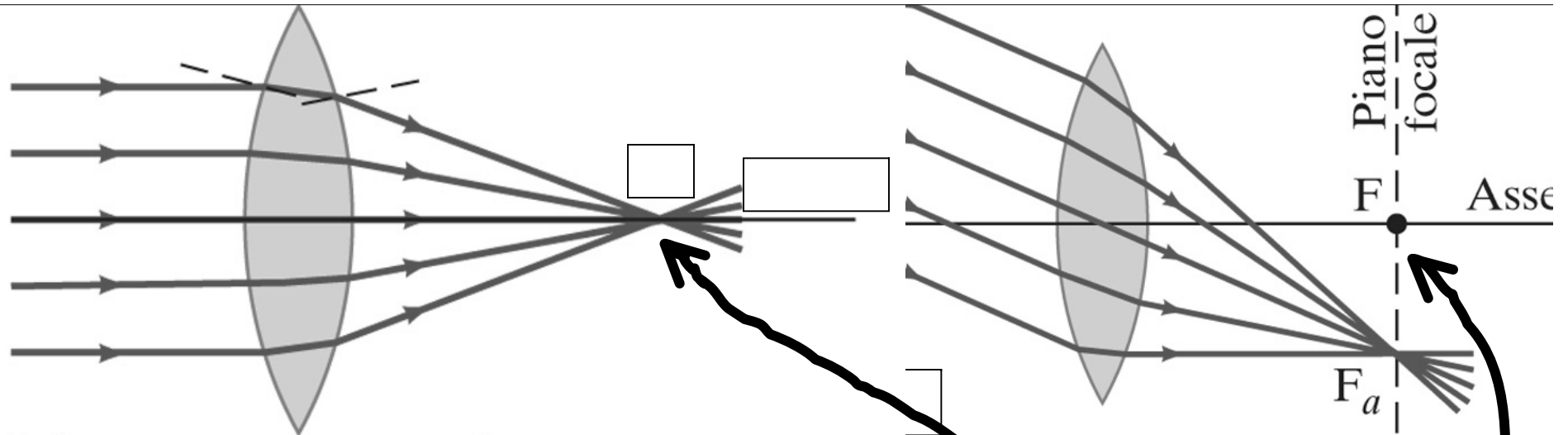
Si definisce lente sottile una lente che abbia uno spessore molto inferiore al diametro

Lenti biconvesse



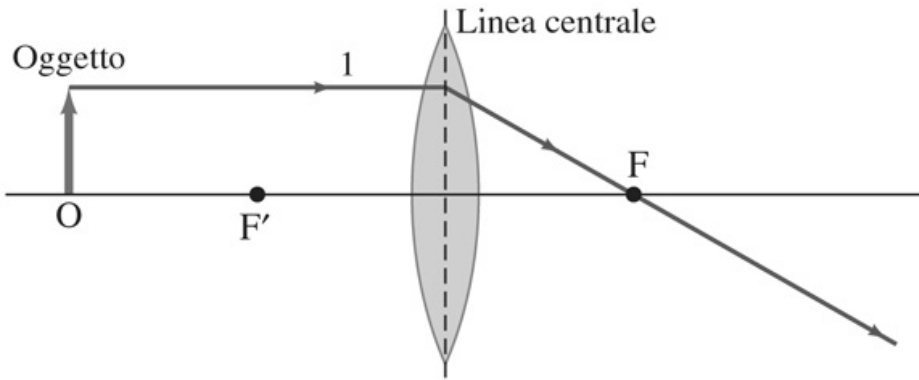
- Asse: la retta passante per il centro della lente e ortogonale alle due superfici
- Rifrazione (Snell):
 - Da aria a vetro: il raggio viene deviato e si avvicina alla normale (va verso il basso)
 - Da vetro ad aria: il raggio viene deviato e si allontana dalla normale (va nuovamente verso il basso)
- Questa lente viene chiamata convergente

Il fuoco di una lente convergente



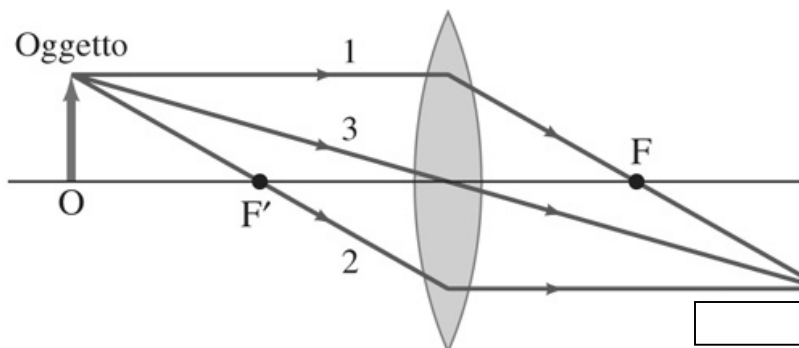
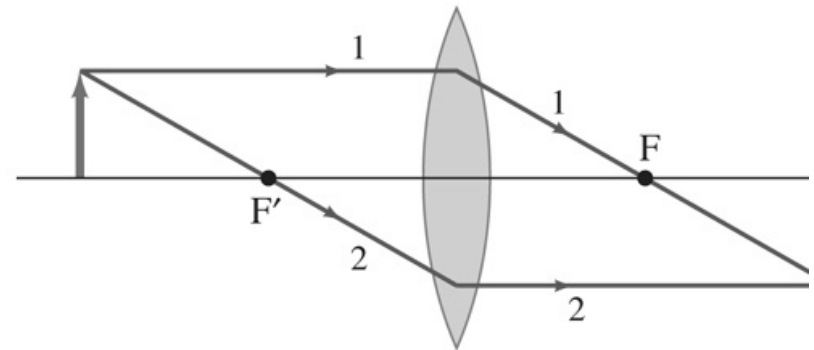
- Se un fascio di raggi paralleli incide su una faccia della lente, i raggi verranno deviati tutti sullo stesso punto, chiamato fuoco della lente
- Fuoco di una lente e' l'immagine di un oggetto posto in un punto, sull'asse, a distanza infinita dalla lente
- I raggi uscenti da una sorgente puntiforme posta nel fuoco di una lente, escono dalla lente stessa sotto forma di raggi paralleli
- La distanza del fuoco dal centro della lente e' detta distanza (o lunghezza) focale (f)
- Raggi paralleli che incidono sulla lente con un angolo diverso da 0, sono focalizzati su un punto che appartiene al piano focale della lente

I 3 raggi principali di una lente convergente



1. Raggio parallelo (P)

2. Raggio focale (F)



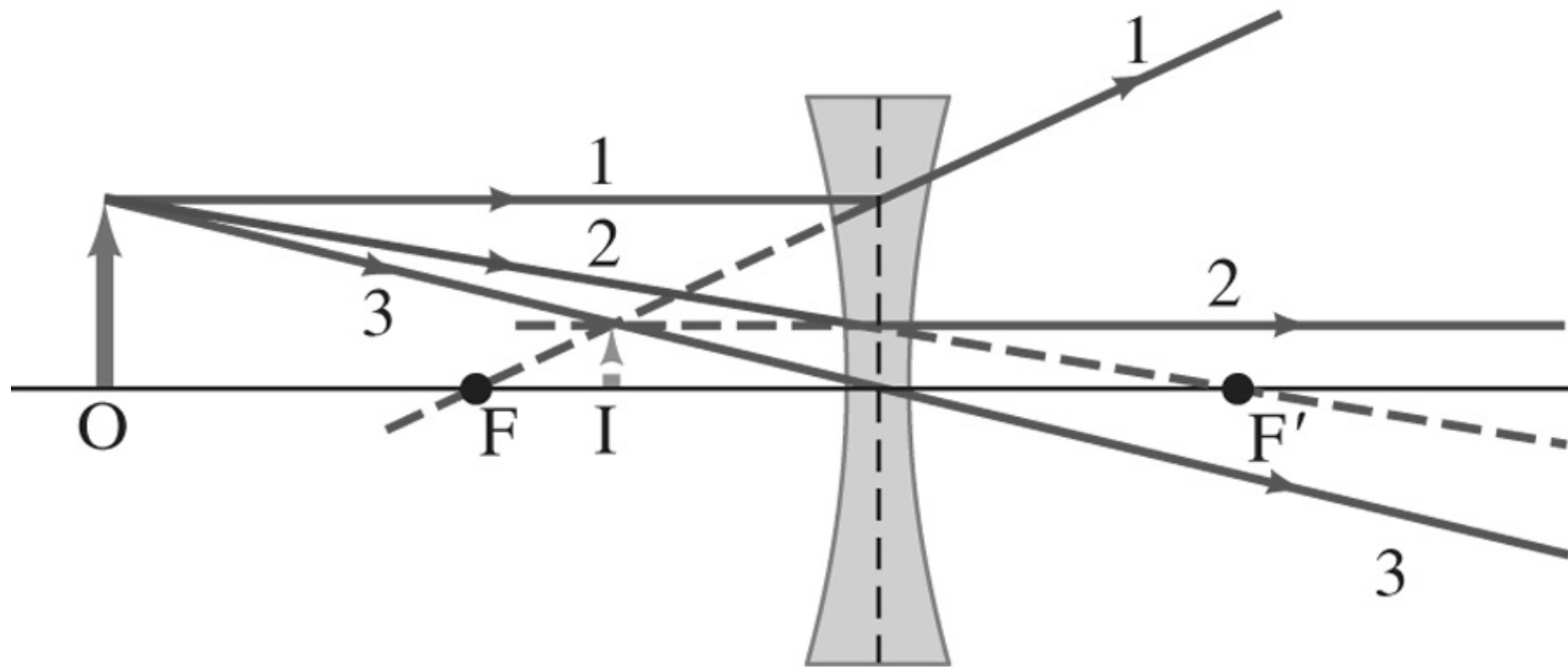
3. Raggio mediano (M)

I 3 raggi principali di una lente divergente

Una lente biconcava e' detta divergente

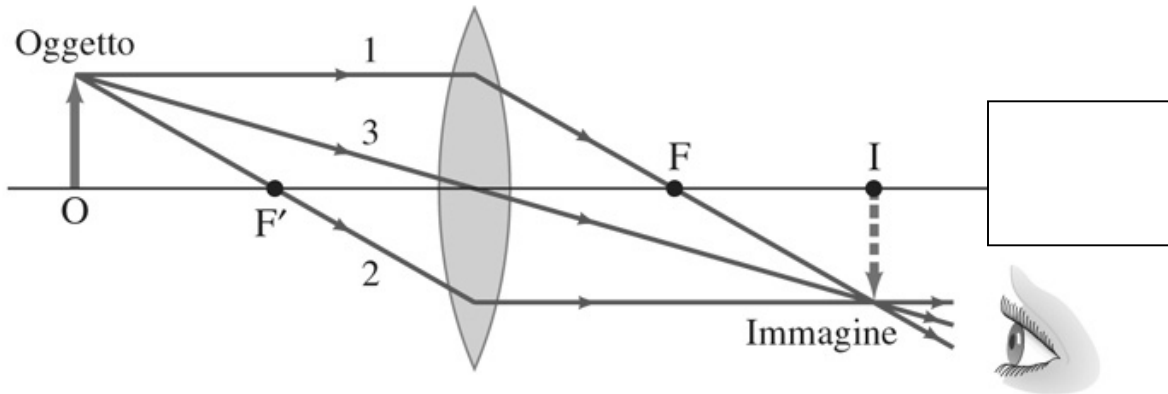
2. Raggio focale (F)

1. Raggio parallelo (P)



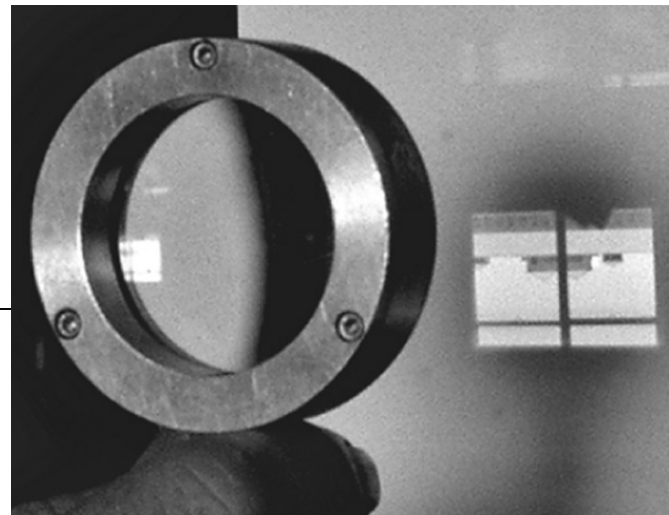
3. Raggio mediano (M)

Costruzione di un'immagine



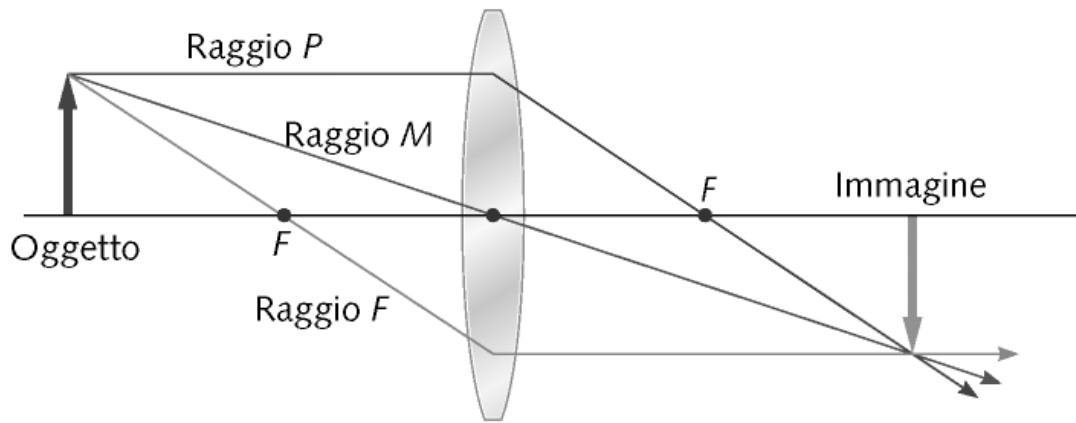
- Ripeto la costruzione per tutti i punti di un oggetto
- I raggi di luce passano effettivamente attraverso i punti che costituiscono l'immagine (immagine reale)
- L'immagine puo' impressionare una pellicola

- Anche l'occhio puo' raccogliere i raggi, ma:
 - L'immagine non puo' costruirsi dentro l'occhio (ovvero, il fuoco non puo' essere dentro l'occhio)
 - L'occhio deve raccogliere i raggi divergenti, a valle del fuoco



Costruzione di un'immagine

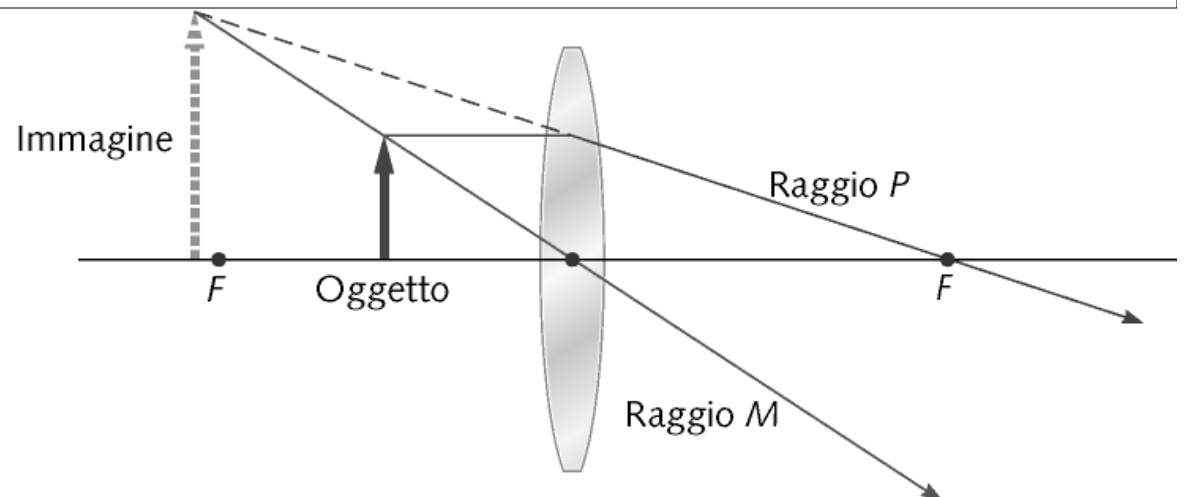
Lente convergente – Fuoco tra oggetto e lente



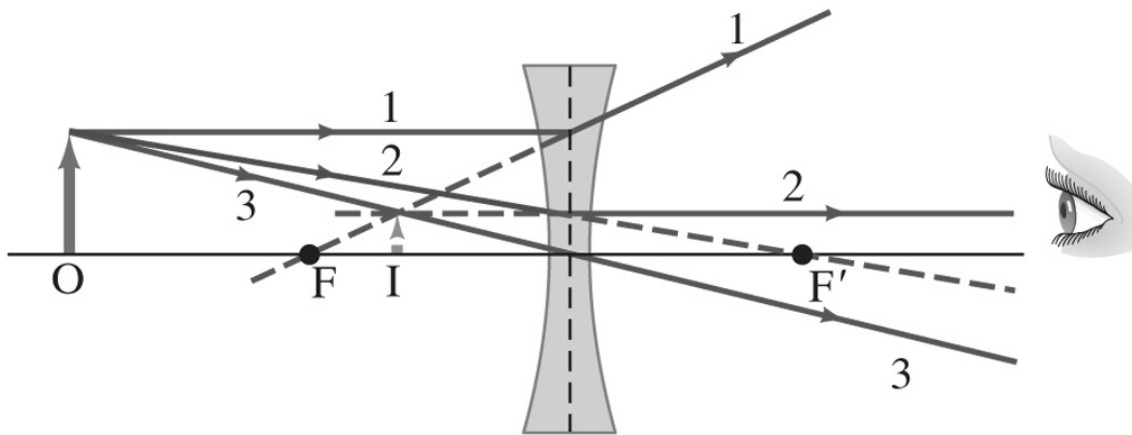
- L'immagine è:
 - dalla parte opposta della lente, rispetto all'oggetto
 - rovesciata
 - reale

Lente convergente – Oggetto tra fuoco e lente

- L'immagine è:
 - dietro a oggetto e fuoco, dalla stessa parte della lente
 - dritta
 - virtuale



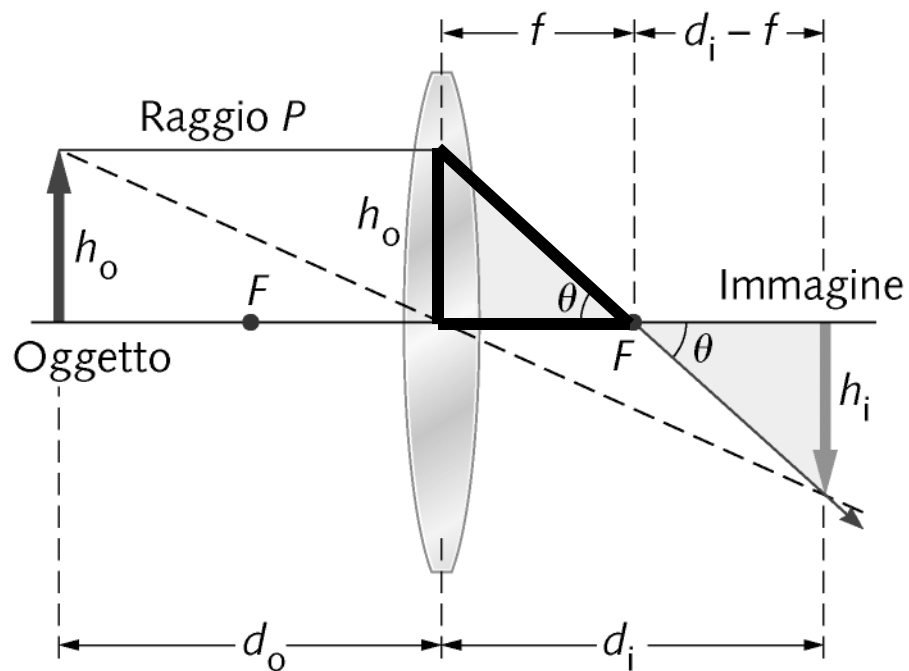
Costruzione di un'immagine



- Posso fare lo stesso con una lente divergente
- I 3 raggi sembrano provenire dallo stesso punto:
 - I e' l'immagine dell'oggetto O
 - e' alla sinistra della lente
 - i raggi non passano per l'immagine I
 - l'immagine e' virtuale

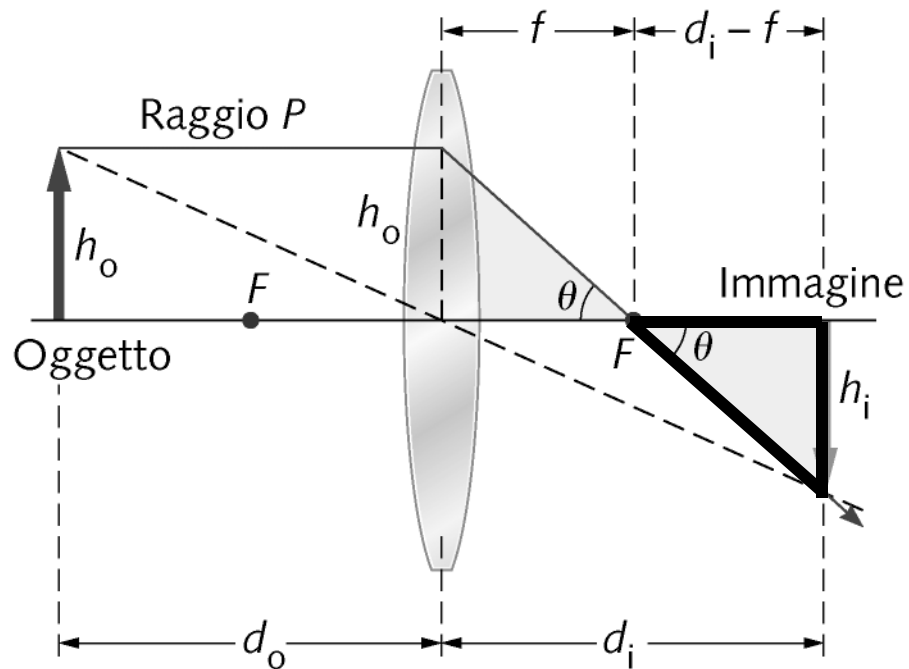
- L'occhio umano non distingue tra immagine virtuale e immagine reale
- L'immagine e' virtuale e dritta
- L'immagine e' posta tra lente e piano focale
- L'immagine e' dallo stesso lato dell'oggetto, rispetto alla lente

Equazione delle lenti sottili



- Considero il raggio P
- Alla destra della lente ho due triangoli simili

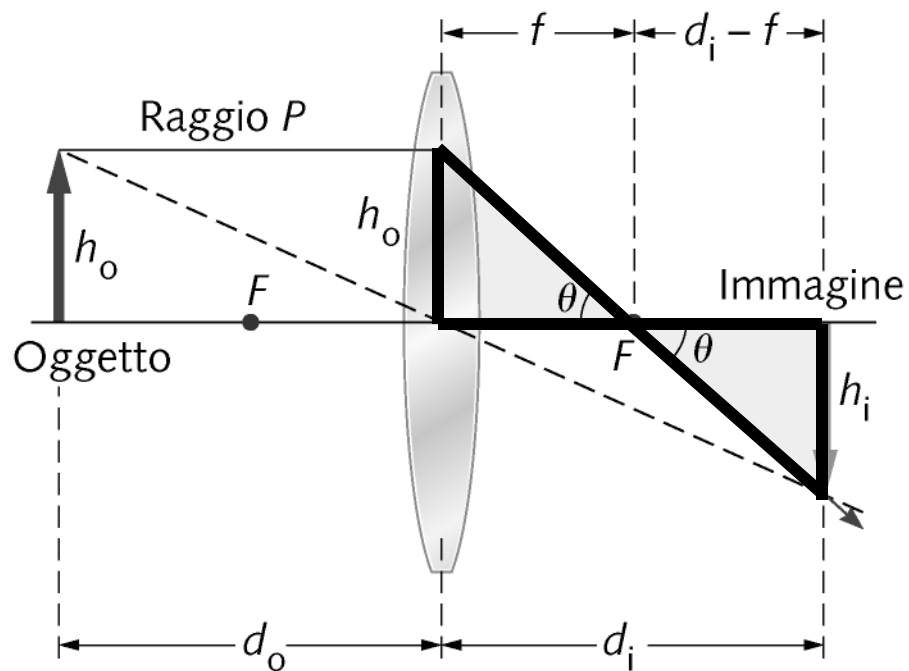
Equazione delle lenti sottili



- Considero il raggio P
- Alla destra della lente ho due triangoli simili

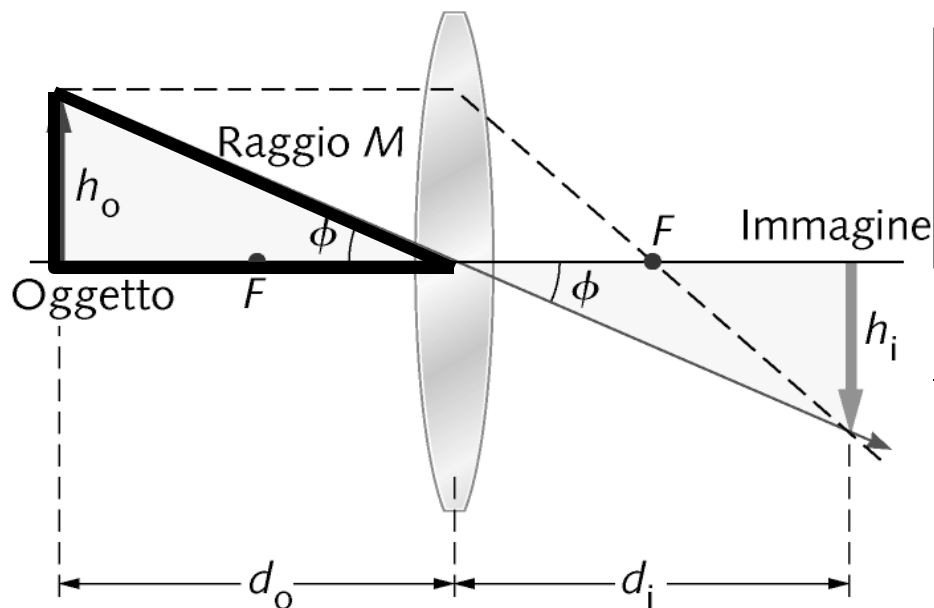
Equazione delle lenti sottili

- Considero il raggio P
- Alla destra della lente ho due triangoli simili

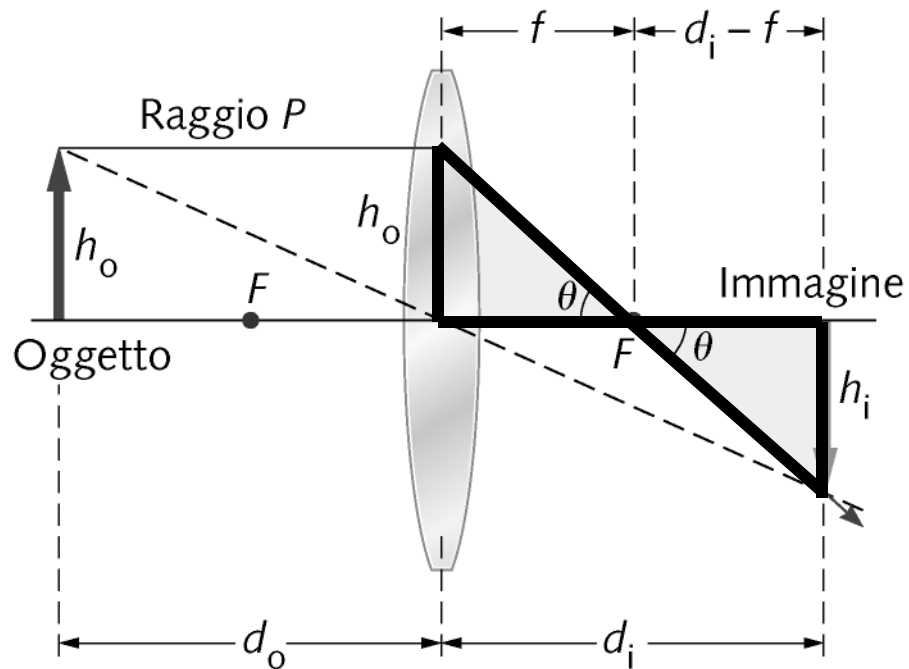


$$\frac{h_o}{f} = \frac{-h_i}{d_i - f}$$

- Considero il raggio M
- Anche qui ho due triangoli simili

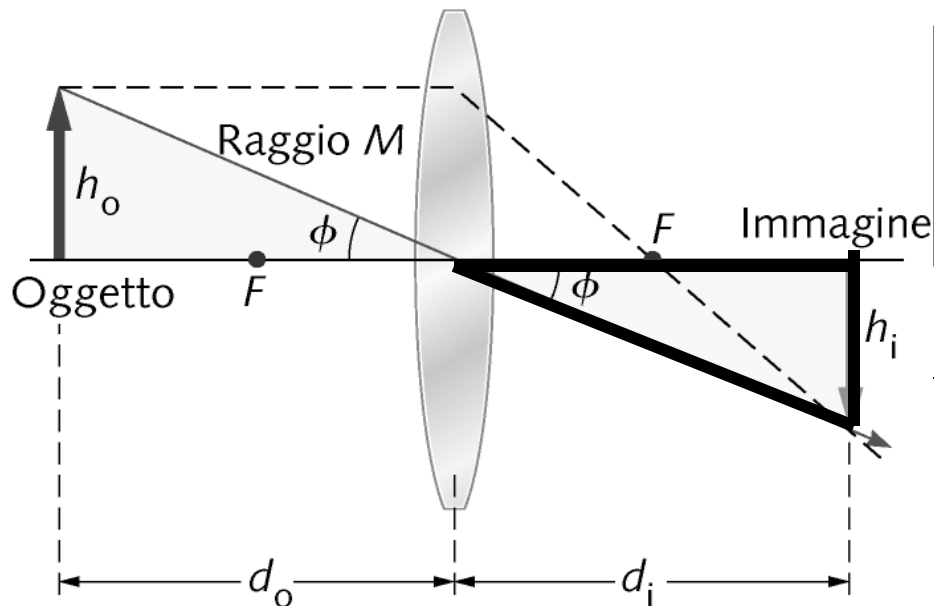


Equazione delle lenti sottili



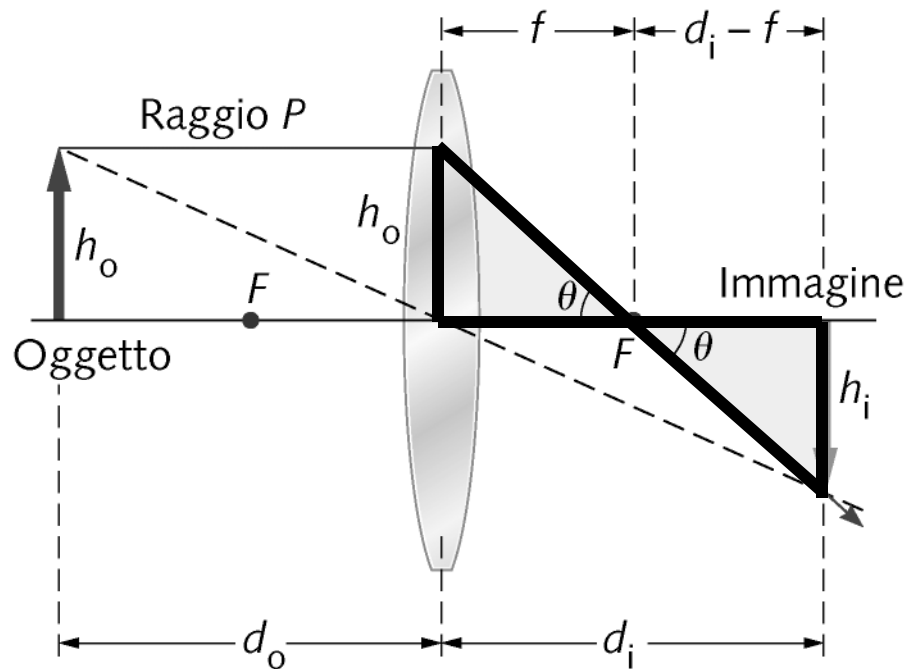
- Considero il raggio P
- Alla destra della lente ho due triangoli simili

$$\frac{h_o}{f} = \frac{-h_i}{d_i - f}$$



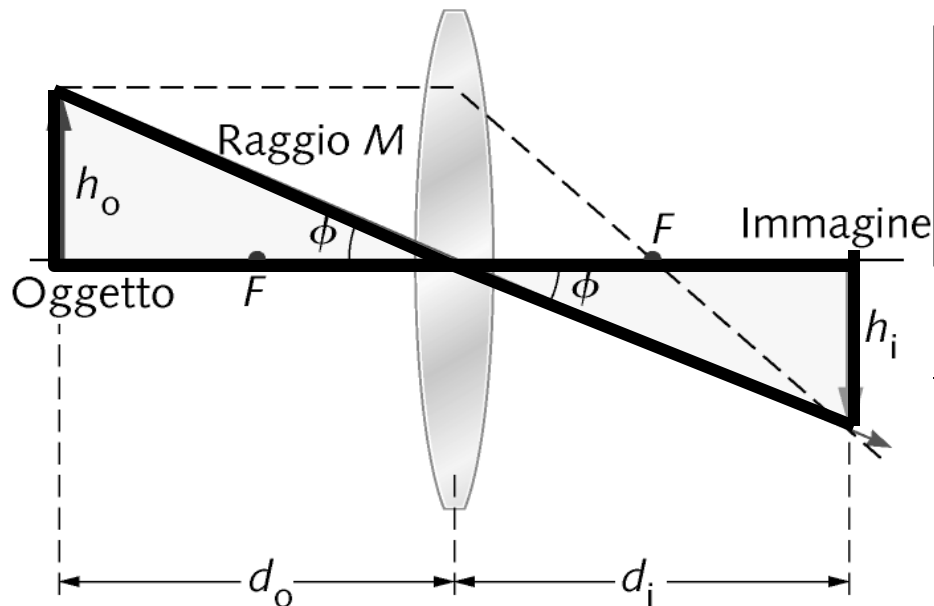
- Considero il raggio M
- Anche qui ho due triangoli simili

Equazione delle lenti sottili



- Considero il raggio P
- Alla destra della lente ho due triangoli simili

$$\frac{h_o}{f} = \frac{-h_i}{d_i - f}$$



- Considero il raggio M
- Anche qui ho due triangoli simili

$$\frac{h_o}{d_o} = \frac{-h_i}{d_i}$$

Equazione delle lenti sottili

Ho appena ottenuto le due relazioni:

$$\frac{h_o}{f} = \frac{-h_i}{d_i - f} \quad \frac{h_o}{d_o} = \frac{-h_i}{d_i}$$

Definisco l'ingrandimento di un'immagine come:

$$m = \frac{h_i}{h_o}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{h_o}{f} = \frac{-h_i}{d_i - f} \\ \frac{h_o}{d_o} = \frac{-h_i}{d_i} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d_i - f}{f} = \frac{-h_i}{h_o} \\ \frac{d_i}{d_o} = \frac{-h_i}{h_o} \end{array} \right.$$

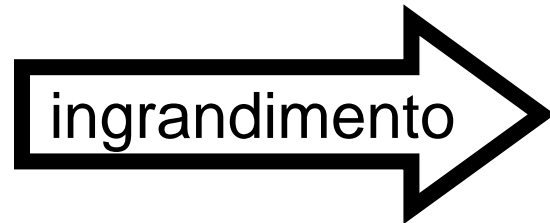

$$\frac{d_i - f}{f} = \frac{d_i}{d_o}$$

Equazione delle lenti sottili

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

Equazione delle lenti sottili

$$\frac{d_i - f}{f} = \frac{d_i}{d_o} = \frac{-h_i}{h_o}$$



ingrandimento $m = \frac{-d_i}{d_o}$

- Il segno '-' indica che l'immagine e' rovesciata

Convenzioni

- Distanza focale

- $f > 0$ per lenti convergenti (convesse)
- $f < 0$ per lenti divergenti (concave)

- Ingrandimento

- $m > 0$ per immagini dritte
- $m < 0$ per immagini rovesciate

- Distanza dell'immagine

- $d_i > 0$ per immagini reali
- $d_i < 0$ per immagini virtuali

- Distanza dell'oggetto

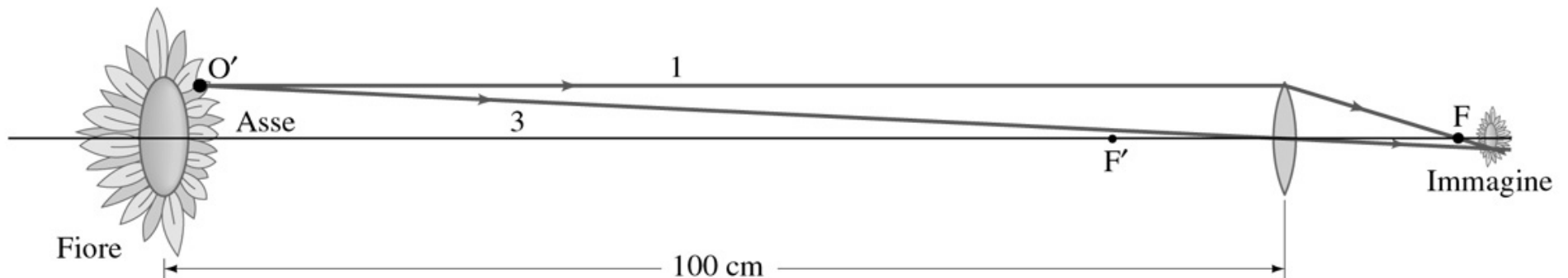
- $d_o > 0$ per oggetti reali (dai quali la luce diverge)
- $d_o < 0$ per oggetti virtuali (verso i quali la luce converge)

Esempio 1

Problema. Un fiore, alto 7.6 cm, viene posto ad una distanza 1.00 m dalla lente di una macchina fotografica, di lunghezza focale +50.0 mm. Determinare:

1. La posizione dell'immagine

Disegno il diagramma a raggi



Scrivo l'equazione delle lenti sottili

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{100 \text{ cm}} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{5.00 \text{ cm}} \quad \Rightarrow \quad d_i = \frac{100 \text{ cm}}{19} = 5.26 \text{ cm}$$

Esempio 1

Problema. Un fiore, alto 7.6 cm, viene posto ad una distanza 1.00 m dalla lente di una macchina fotografica, di lunghezza focale +50.0 mm. Determinare:

2. La dimensione dell'immagine prodotta dalla lente

$$m = \frac{-d_i}{d_o} \quad \Rightarrow \quad m = \frac{-5.26 \text{ cm}}{100 \text{ cm}} = -0.0526$$

$$m = \frac{h_i}{h_o} \quad \Rightarrow \quad h_i = mh_o = (-0.0526) \cdot (7.6 \text{ cm}) = -0.40 \text{ cm}$$

Il segno '-' indica che l'immagine e' rovesciata

Esempio 2

Problema. Un oggetto viene posto a 10.0 cm di distanza da una lente convergente di lunghezza focale 15.0 cm. Determinare la posizione e la dimensione dell'immagine:

1. analiticamente

Scrivo l'equazione delle lenti sottili

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{10.0 \text{ cm}} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{15.0 \text{ cm}} \quad \Rightarrow \quad d_i = \frac{-150 \text{ cm}}{5} = -30.0 \text{ cm}$$

$d_i < 0$, quindi l'immagine e' virtuale e si trova dallo stesso lato dell'oggetto, rispetto alla lente

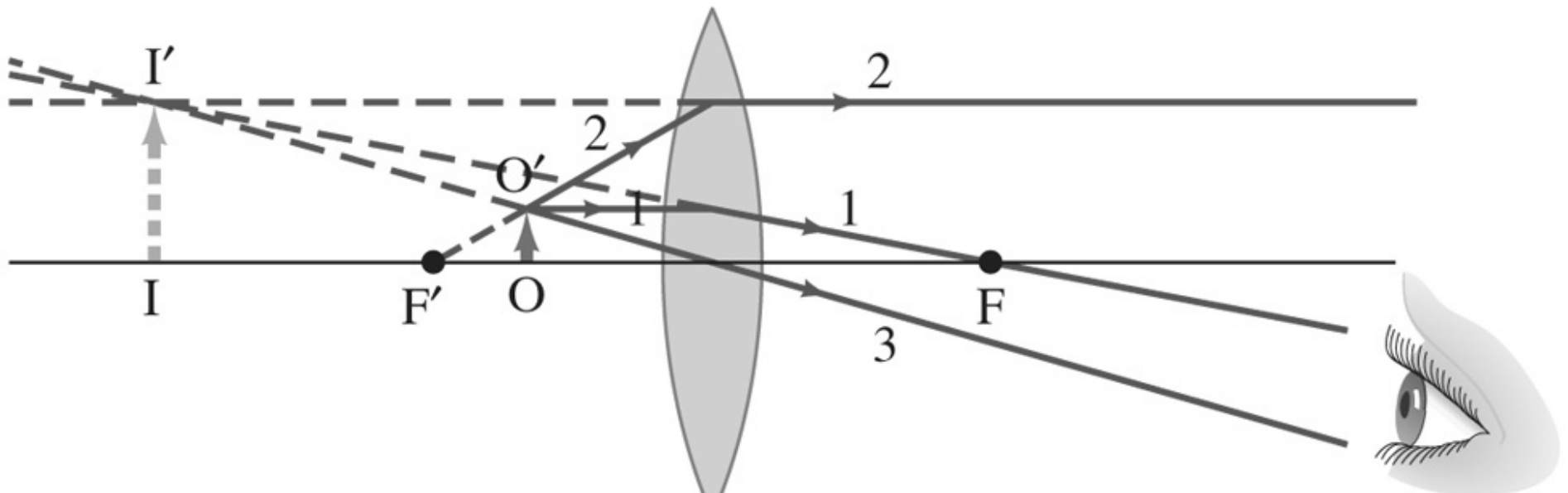
$$m = \frac{-d_i}{d_o} \quad \Rightarrow \quad m = \frac{30.0 \text{ cm}}{10.0 \text{ cm}} = 3$$

L'ingrandimento e' 3 (ovvero > 0) e l'immagine e' dritta

Esempio 2

Problema. Un oggetto viene posto a 10.0 cm di distanza da una lente convergente di lunghezza focale 15.0 cm. Determinare la posizione e la dimensione dell'immagine:

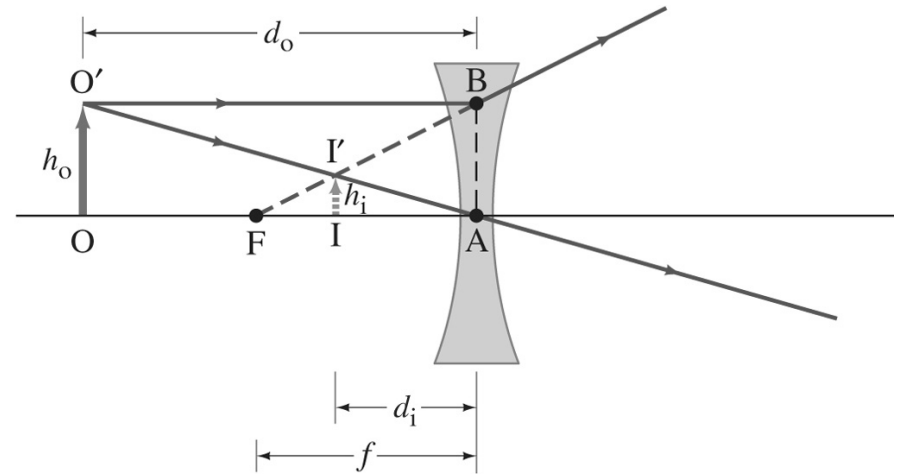
2. Disegnando il diagramma a raggi



Esempio 3

Problema. L'immagine di un insetto prodotta da una lente divergente di lunghezza focale 25.0 cm deve trovarsi dallo stesso lato dell'oggetto e distare 20.0 cm dal centro della lente. Dove deve esser posto l'insetto ?

Disegno il diagramma a raggi



Scrivo l'equazione delle lenti sottili

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{d_o} + \frac{1}{-20.0 \text{ cm}} = \frac{1}{-25.0 \text{ cm}} \quad \Rightarrow \quad d_o = 100 \text{ cm}$$

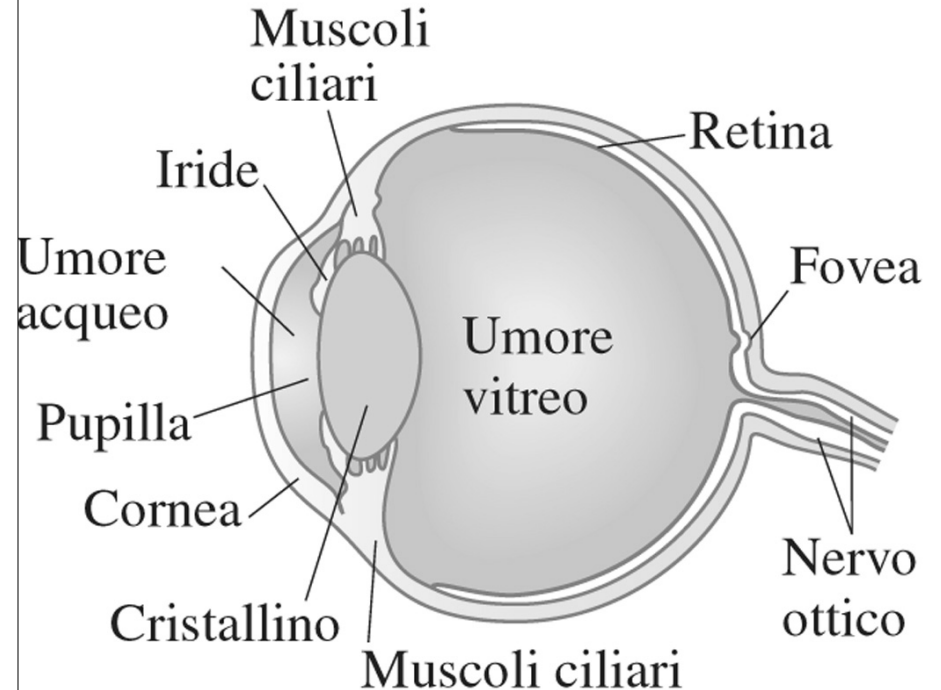
- **L'ottica geometrica**
- **Riflessione e rifrazione**
- **Le fibre ottiche**
- **Le lenti sottili**
- **L'occhio e le lenti**
- **Interferenza e diffrazione**
- **Diffrazione di raggi X**

L'occhio umano

- L'occhio e' una macchina meravigliosa (come l'orecchio, il sistema circolatorio, ...)
- L'occhio e' un trasduttore (trasforma la luce in segnali elettrici)
- Tutto il funzionamento dell'occhio e' basato sulla rifrazione

Percorso di un raggio luminoso:

- Cornea (rivestimento)
- Umor acqueo
- Iride/pupilla (diaframma)
- Cristallino (lente, regolabile)
- Umor vitreo
- Retina (coni e bastoncelli), con la fovea



• Aria, $n=1$

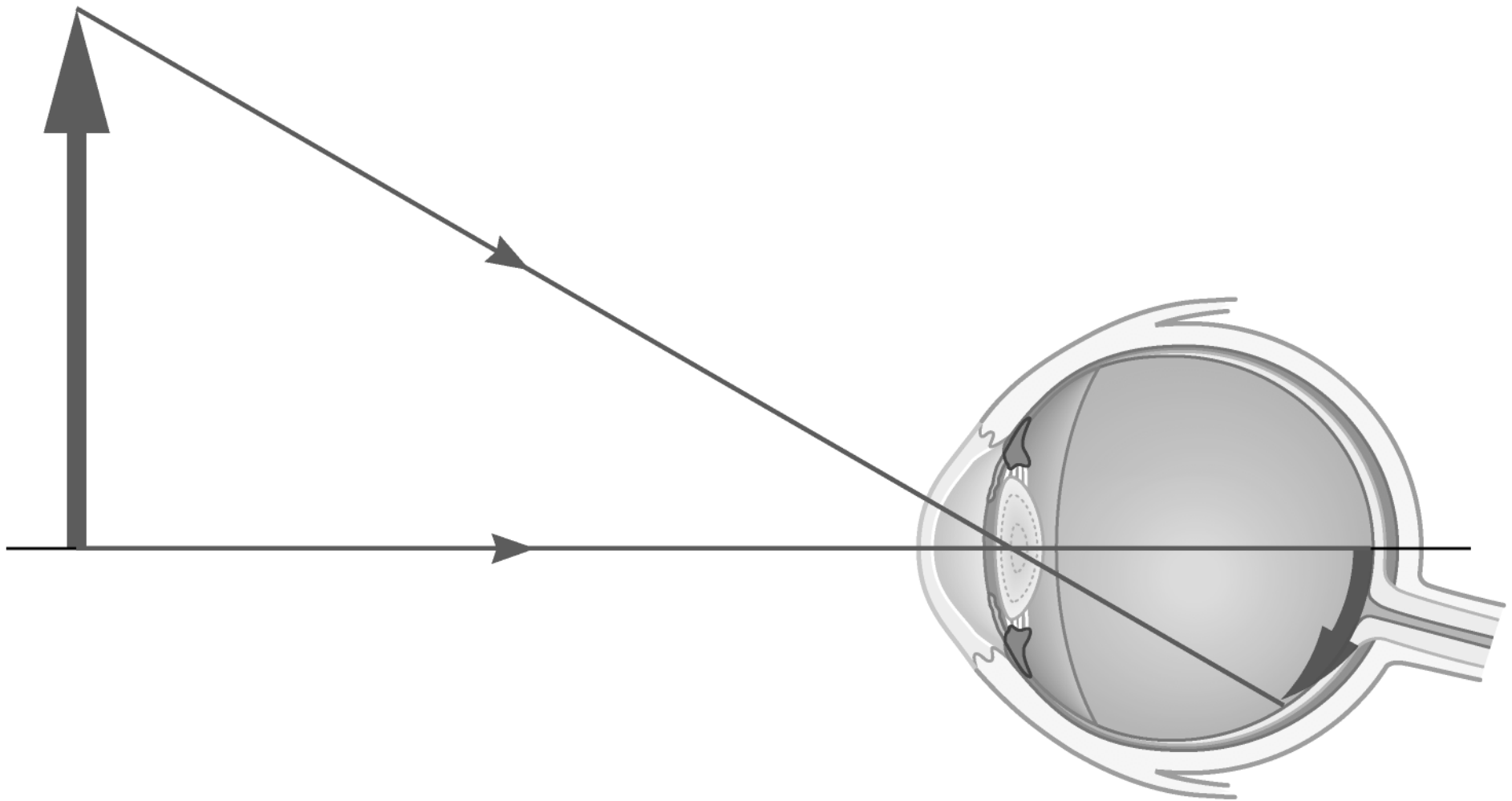
• Cornea, $n=1.38$

• Umor acqueo, $n=1.33$

• Cristallino, $n=1.40$

• Umor vitreo, $n=1.34$

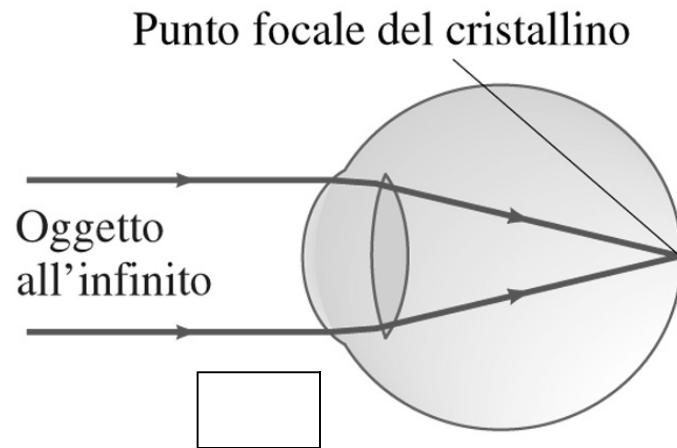
L'immagine nell'occhio



L'immagine formata sulla retina e' reale e capovolta

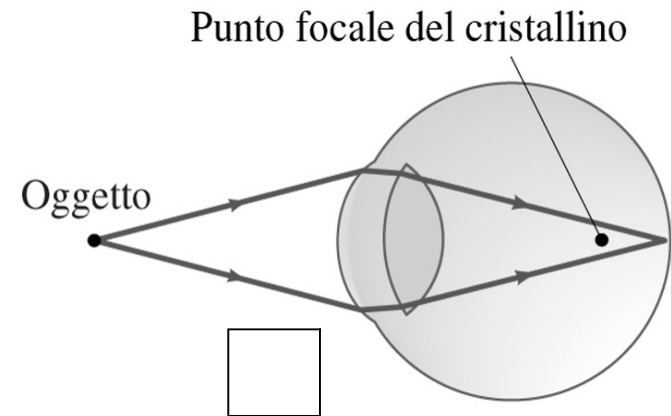
L'accomodamento

- Il cristallino ha un ruolo marginale per la rifrazione ($n_{\text{cornea}}=1.38$, $n_{\text{umor acqueo}}=1.33$ e $n_{\text{cristallino}}=1.40$)
- E' invece fondamentale per la visione vicino/lontano



- Oggetto all'infinito (raggi paralleli)
- Muscoli ciliari rilassati
- Cristallino sottile
- Contributo alla rifrazione piccolo

- Oggetto vicino (raggi divergenti)
- Muscoli ciliari contratti
- Cristallino ispessito
- Contributo alla rifrazione grande



Oggetto vicino = raggi non paralleli = necessita' di maggiore rifrazione

Questa proprieta' e' detta **accomodamento**

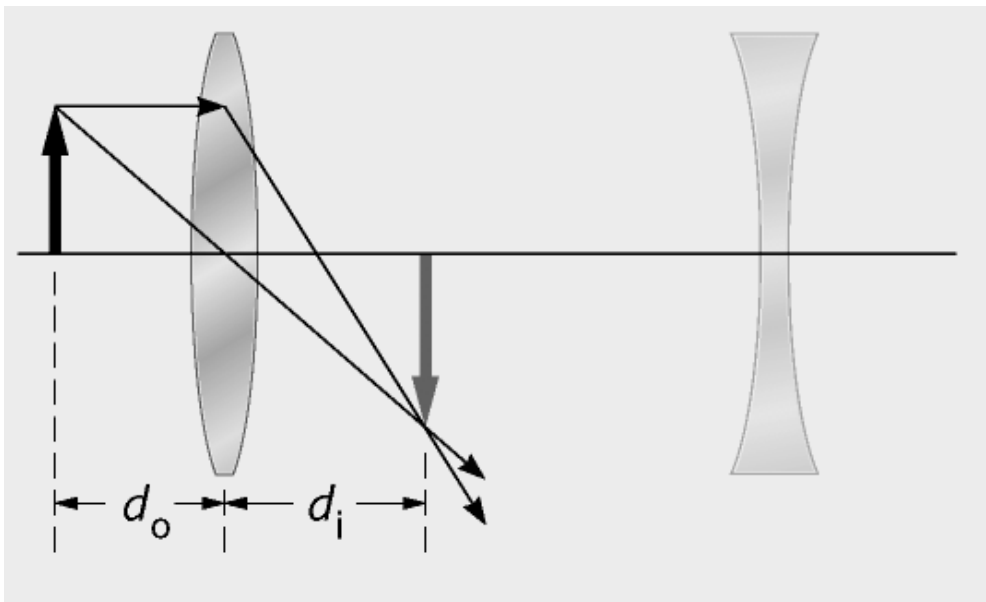
Punti prossimo e remoto

- Punto prossimo: minima distanza alla quale si riesce a mettere a fuoco un oggetto:
 - Persona giovanissima: 10 cm
 - Persona giovane: 25 cm
 - Persona matura: > 40 cm
- Punto remoto: massima distanza alla quale si riesce a mettere a fuoco un oggetto:
 - Normalmente e' all'infinito
- Occhio normale (media sulla popolazione mondiale):
 - Punto prossimo: 25 cm
 - Punto remoto: infinito

Combinazione di lenti

In una sequenza di lenti, l'immagine prodotta da una lente diventa l'oggetto per la lente successiva
(indipendentemente dal fatto che sia reale/virtuale o davanti/dietro la lente)

Distanza tra le due lenti 50 cm



Condizioni a contorno

$$d_o = 20.0 \text{ cm} \quad f_{\text{conv}} = 10.0 \text{ cm}$$

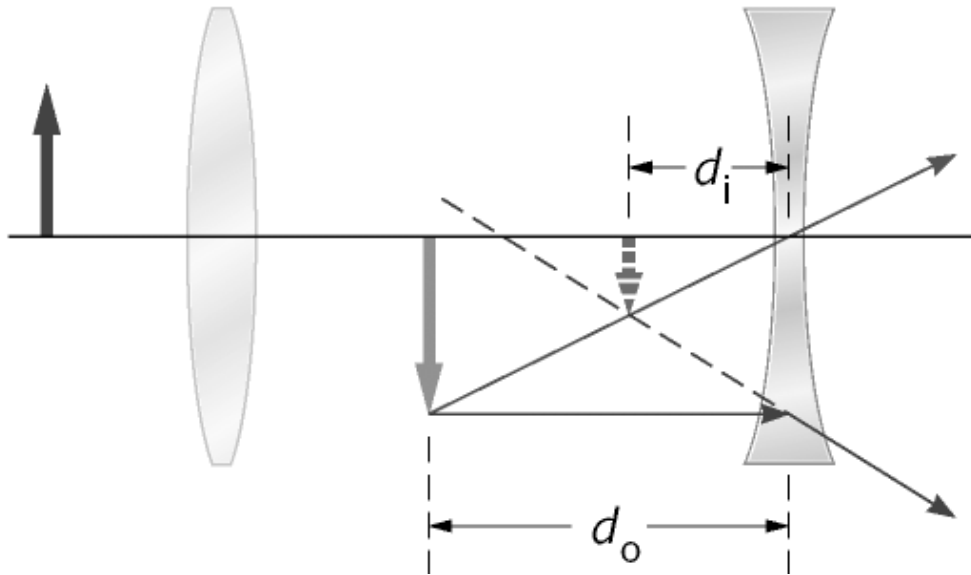
Equazione delle lenti sottili

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{20 \text{ cm}} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{10.0 \text{ cm}}$$

$$d_i = 20.0 \text{ cm}$$

Combinazione di lenti



Condizioni a contorno

$$d_o = (50.0 - 20.0) = 30.0 \text{ cm}$$

$$f_{\text{conc}} = -12.5 \text{ cm}$$

Equazione delle lenti sottili

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{30 \text{ cm}} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{-12.5 \text{ cm}} \quad d_i = -8.82 \text{ cm}$$

Otengo un'immagine alla sinistra della lente concava

Combinazione di lenti

Ingrandimento dovuto alla prima lente (convessa)

$$m_1 = \frac{-d_i^1}{d_o^1} \quad d_i = 20.0 \text{ cm} \quad m = \frac{-20.0 \text{ cm}}{20.0 \text{ cm}} = -1$$
$$d_o = 20.0 \text{ cm}$$

L'immagine ingrandita e'
capovolta rispetto all'originale

Ingrandimento dovuto alla seconda lente (concava)

$$m_2 = \frac{-d_i^2}{d_o^2} \quad d_i = 30.0 \text{ cm} \quad m = \frac{-(-8.82) \text{ cm}}{30.0 \text{ cm}} = 0.294$$
$$d_o = -8.82 \text{ cm}$$

L'immagine ingrandita e'
dritta rispetto all'originale

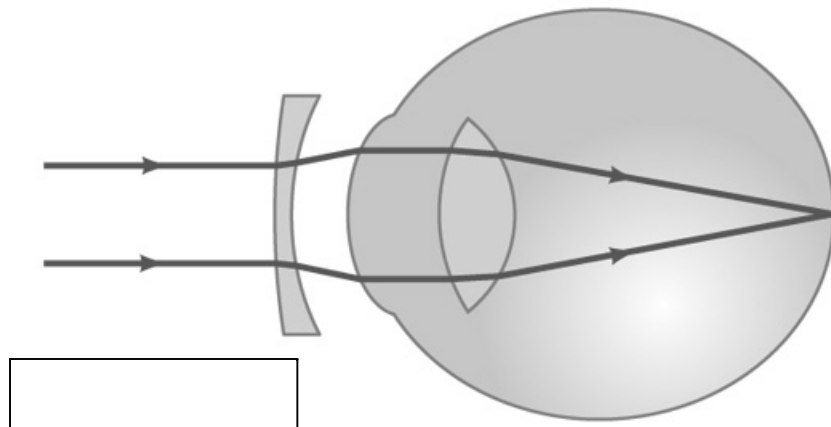
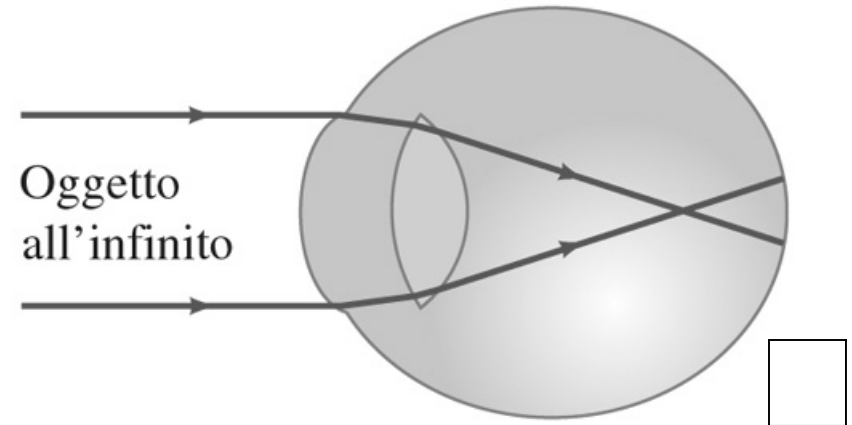
Ingrandimento totale dovuto alle due lenti

$$m = \frac{d_i^2}{d_o^1} = \frac{m_2 d_o^2}{d_i^1 / m_1} = \frac{m_1 m_2 d_o^2}{d_i^1} = m_1 m_2$$

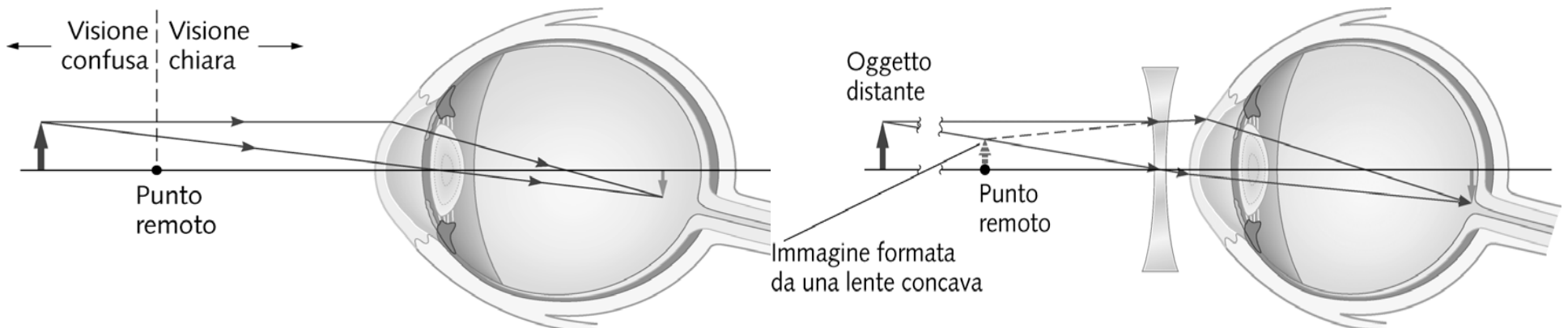
L'ingrandimento totale dovuto a un sistema di lenti e' uguale al prodotto degli ingrandimenti generati da ciascuna lente

L'occhio miope

- Problema: non vedo bene oggetti lontani
- Causa: bulbo oculare troppo 'lungo' o curvatura eccessiva della cornea

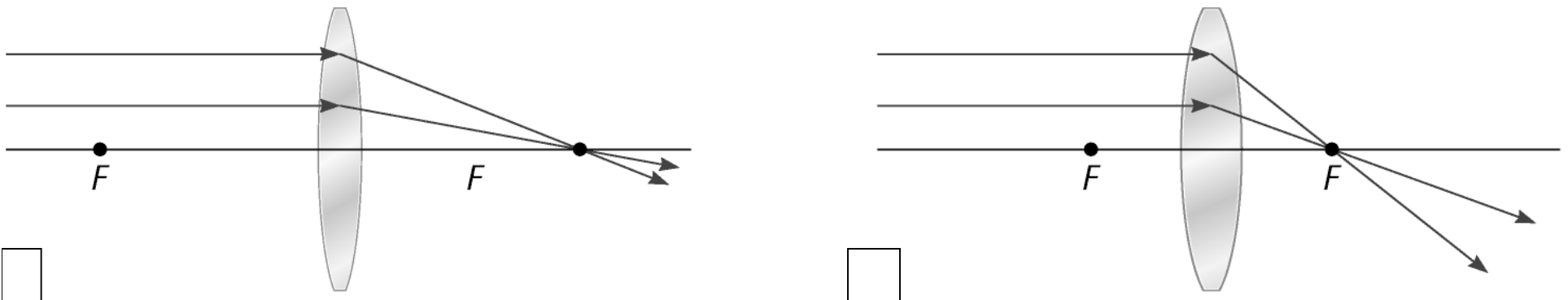


- Soluzione: annullo l'eccesso di convergenza
- Uso lenti divergenti



Il potere diottrico

- La capacità di una lente di rifrangere la luce è legata alla sua distanza focale
 - Distanza focale grande, piccola rifrazione
 - Distanza focale piccola, grande rifrazione



Definisco operativamente il potere diottrico (o potenza) di una lente

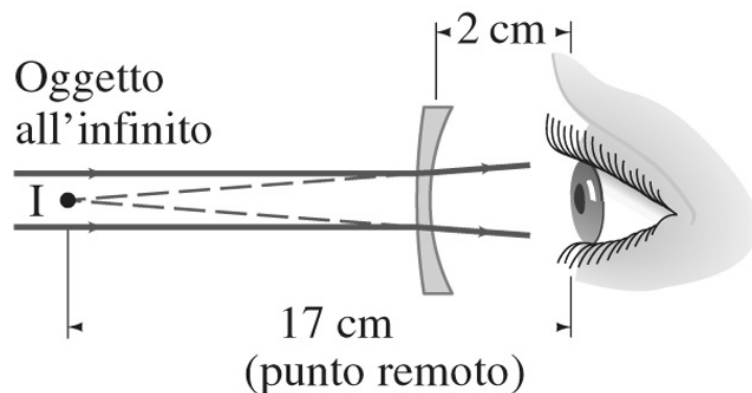
$$P = 1/f$$

- Il fuoco è misurato in metri
- Il potere diottrico ha le dimensioni di m^{-1} e si misura in diottrie
- Esempio:
 - lente con 10 diottrie ha distanza focale $f = 1/(10 m^{-1}) = 0.1 m = 10 cm$ (convergente)
 - lente con -10 diottrie ha distanza focale $f = 1/(-10 m^{-1}) = -0.1 m = -10 cm$ (divergente)

Esempio

Problema. Un occhio miope ha un punto prossimo 12 cm e un punto remoto 17 cm.

1. Quale deve essere la potenza delle lenti correttive per permettergli di vedere in modo nitido gli oggetti lontani?



Devo fare in modo che un oggetto all'infinito formi l'immagine al punto remoto (17 cm dall'occhio)

Equazione delle lenti sottili

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{-(17 - 2) \text{ cm}} = \frac{1}{f}$$

$$f = -15 \text{ cm} = -0.15 \text{ m}$$

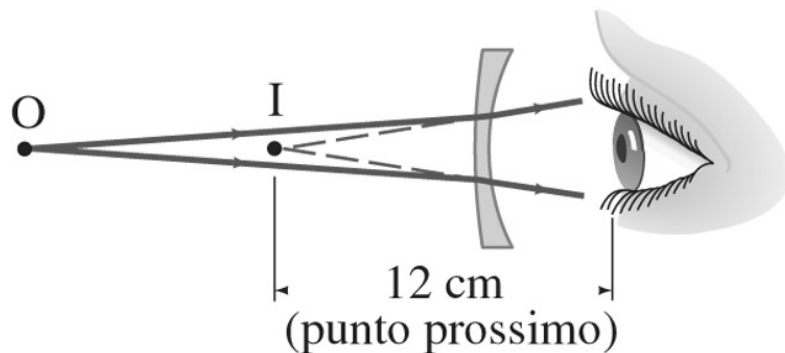
$$P = \frac{1}{-0.15 \text{ m}} = -6.7 \text{ diottrie}$$

Segno '-', lente divergente

Esempio

Problema. Un occhio miope ha un punto prossimo 12 cm e un punto remoto 17 cm.

2. Quale sarà la posizione del punto prossimo a occhiali inforcati (assumendo che le lenti siano a 2.0 cm dagli occhi) ?



E' la posizione di un oggetto, l'immagine del quale cade nel punto prossimo dell'occhio

Equazione delle lenti sottili

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{-(0.12 - 0.02) \text{ m}} = \frac{1}{-0.15 \text{ m}}$$

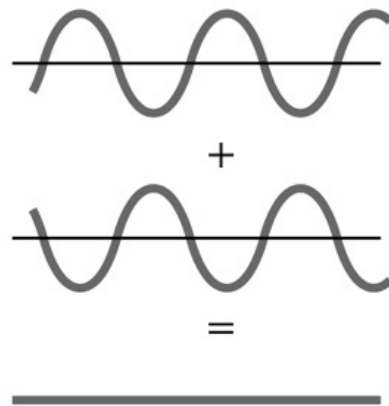
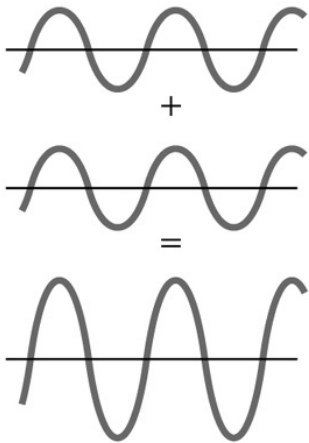
$$d_o = 0.30 \text{ m}$$

0.30 m dalla lente = 0.32 m dall'occhio

- **L'ottica geometrica**
- **Riflessione e rifrazione**
- **Le fibre ottiche**
- **Le lenti sottili**
- **L'occhio e le lenti**
- **Interferenza e diffrazione**
- **Diffrazione di raggi X**

L'ottica fisica o ottica ondulatoria

- Vi sono dei fenomeni non spiegabili dalle regole dell'ottica geometrica
- Questi casi sono facilmente interpretabili in termini di onde
- Interferenza per le onde luminose:
 - Luce monocromatica (ovvero, stesso colore, ovvero stessa λ e ν)
 - Luce coerente (ovvero, le onde devono essere in fase)

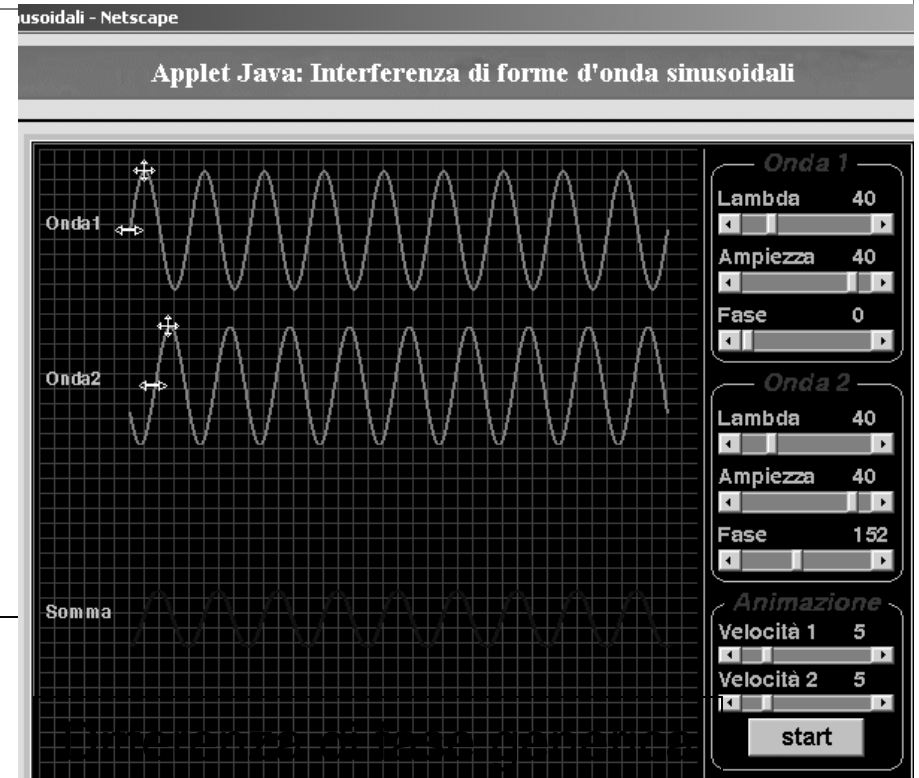


Interferenza
costruttiva

Interferenza
distruttiva

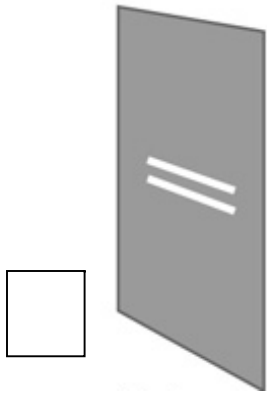
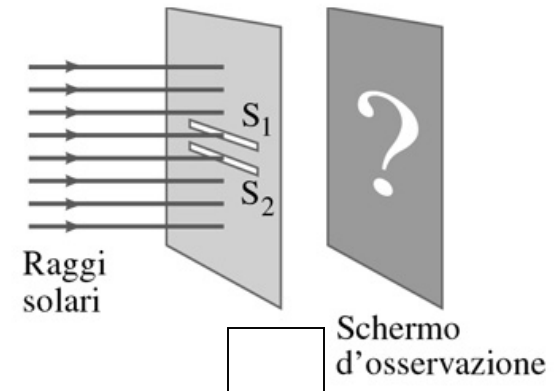
Differenza di
fase = 0

Differenza di
fase = 180



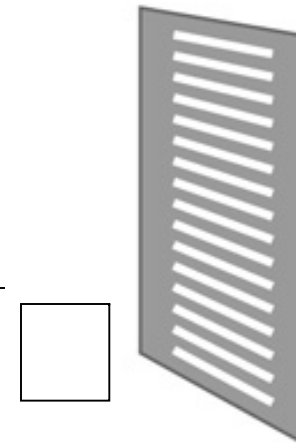
Esperimento della doppia fenditura di Young

- Considero una sorgente luminosa, uno schermo con 2 fenditure, uno schermo sul quale guardo la luce prodotta



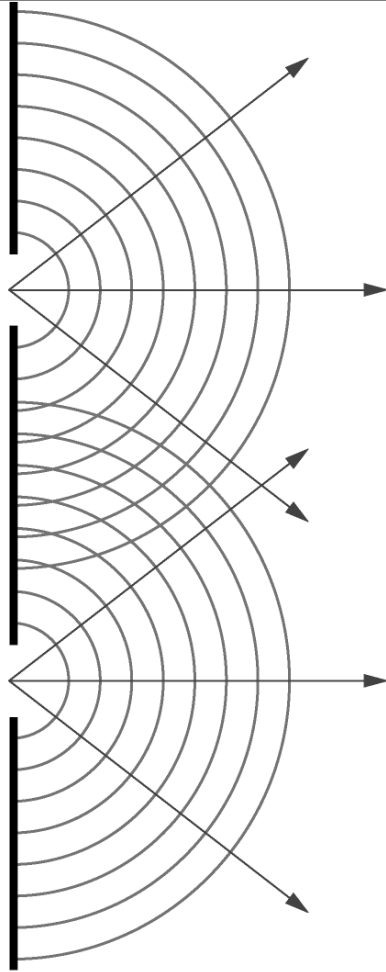
- Se la luce procedesse con raggi dritti → ombra delle 2 fenditure

- Invece ottengo figure di interferenza (frange)

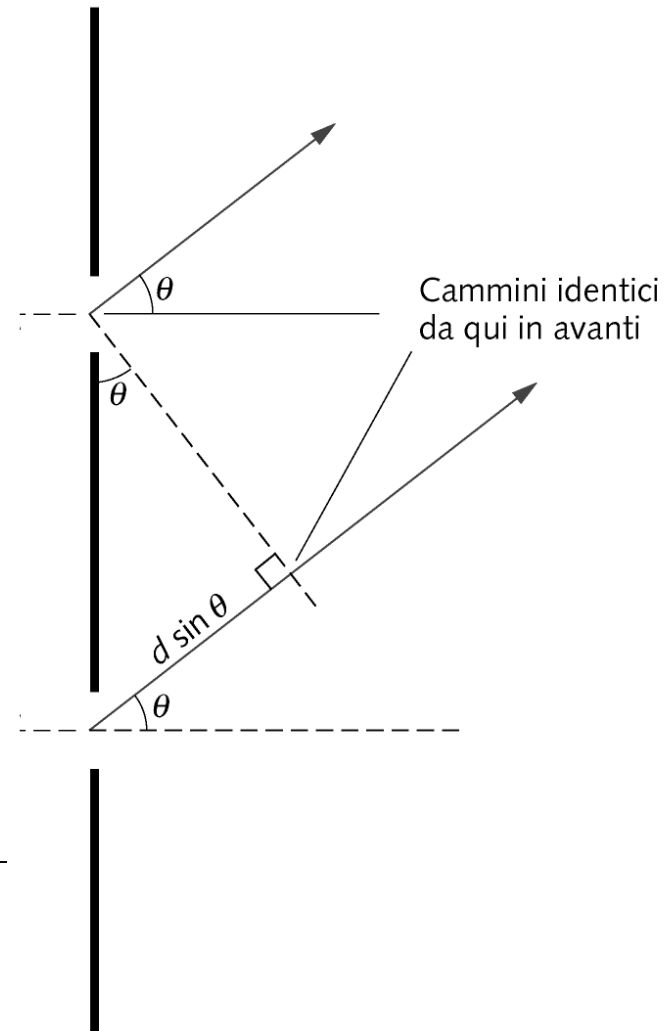


Il principio di Huygens

Ogni fenditura diventa a sua volta una sorgente



La differenza di cammino tra 2 raggi paralleli e' $d \cdot \sin \theta$



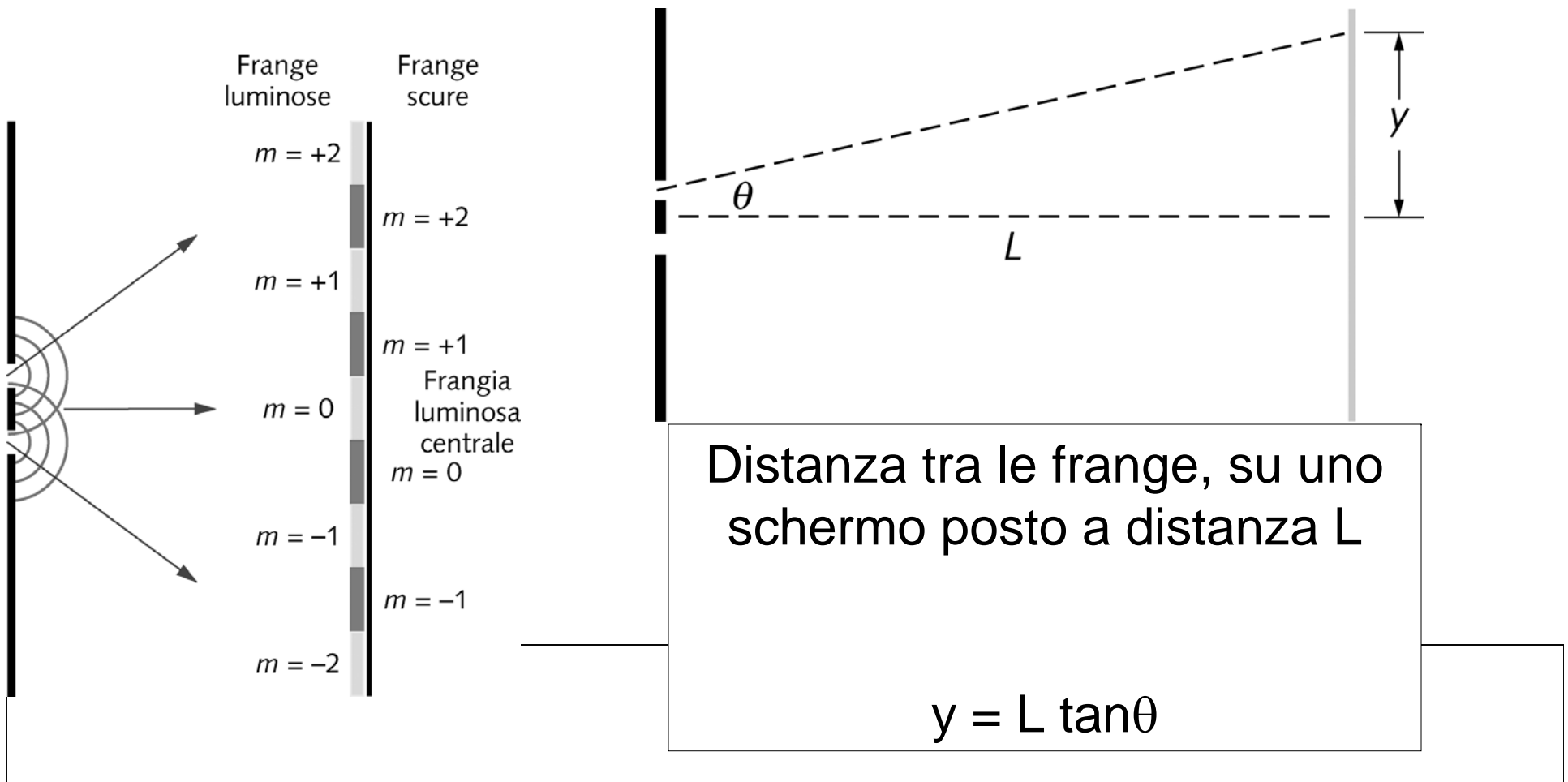
Esperimento della doppia fenditura di Young

Interferenza costruttiva

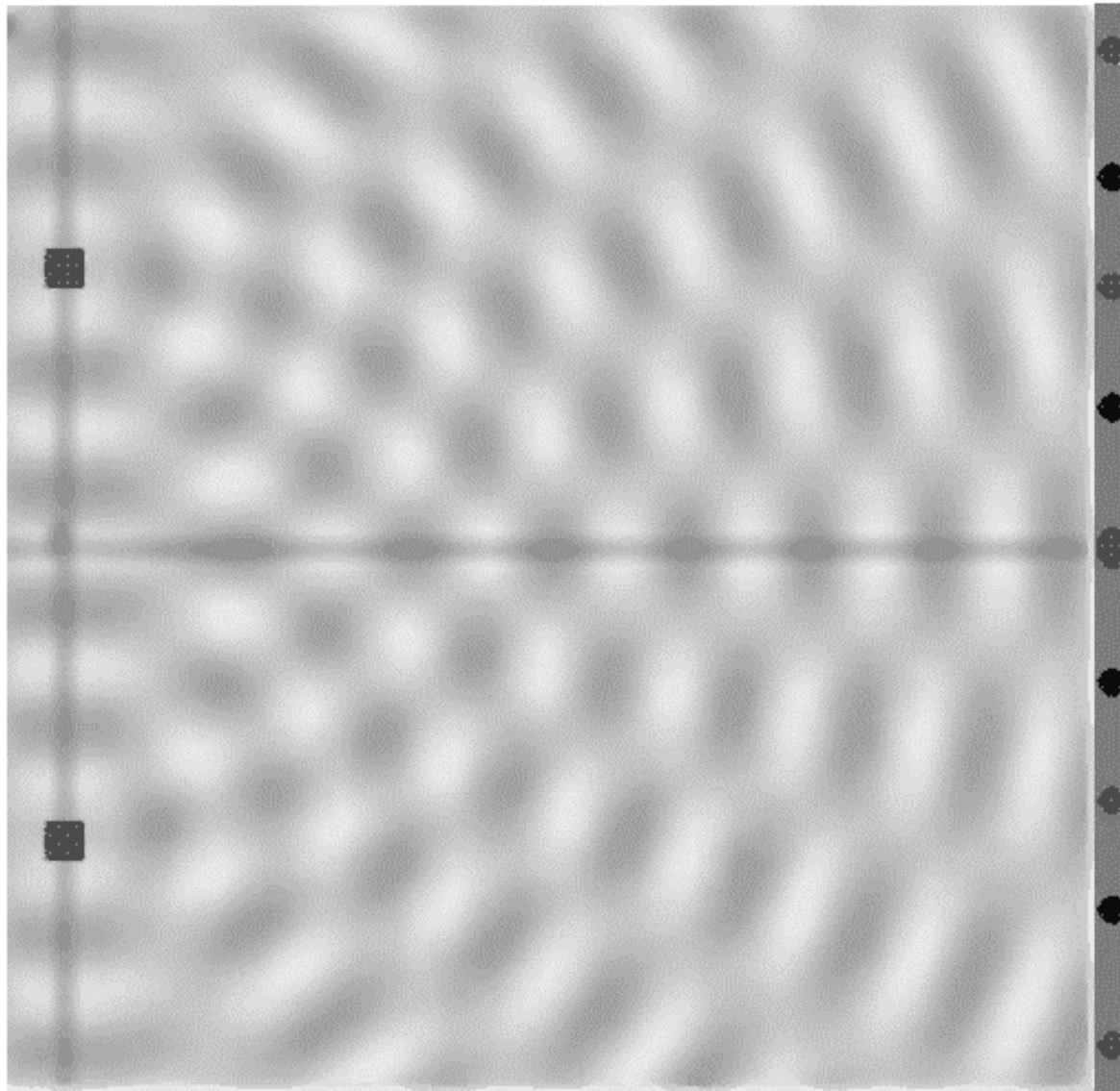
Interferenza distruttiva

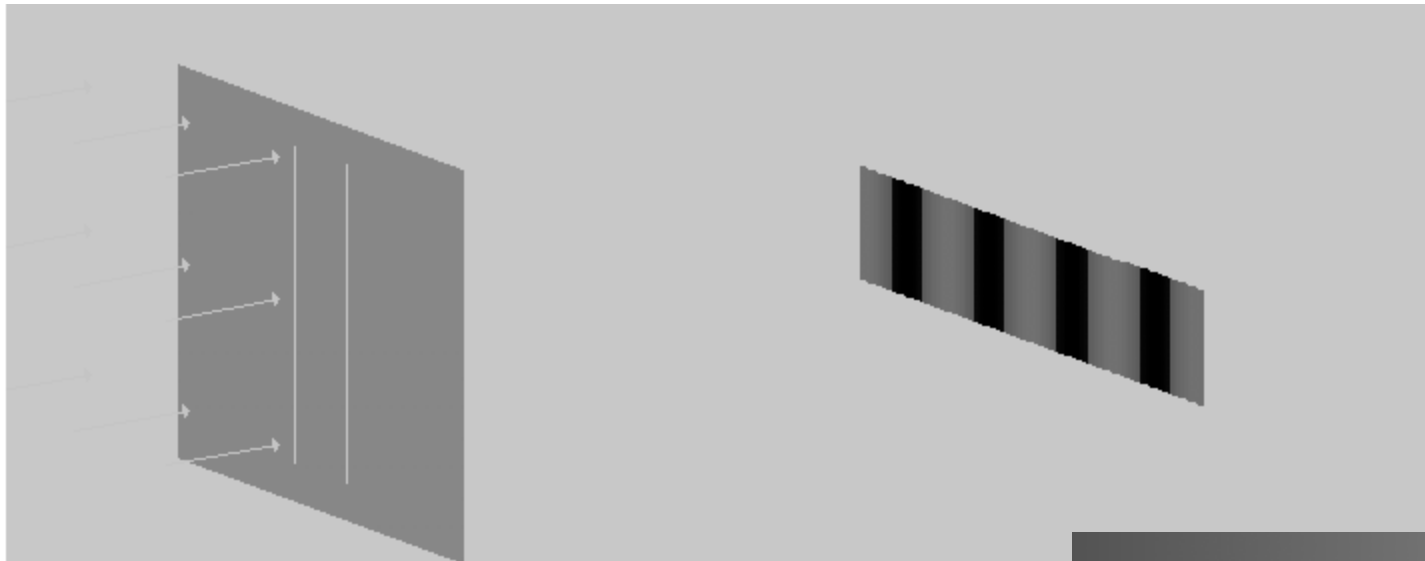
$$d \cdot \sin\theta = m\lambda \quad (\text{con } m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

$$d \cdot \sin\theta = (m-1/2)\lambda \quad (\text{con } m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$



Esperimento della doppia fenditura di Young





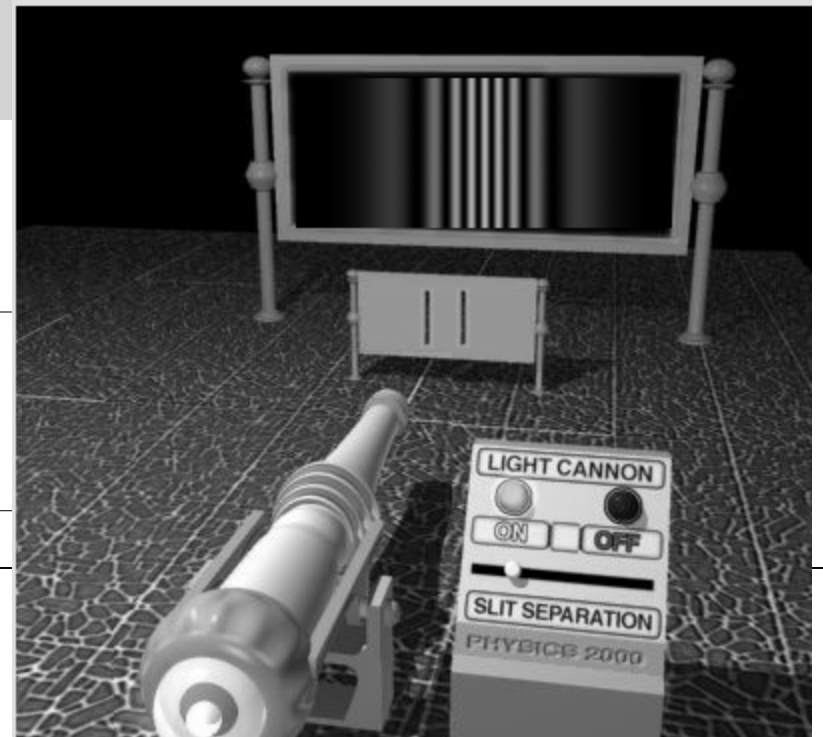
lambda = 479.68 nm frange

d = 0.455 mm distanza tra le fenditure

D = 435 cm distanza barriera-schermo

Esperimento della doppia fenditura di Young

Applet Java: Interferenza tra due fenditure



Esempio

Problema. In un piano sono praticate due strette fenditure alla distanza di $100\mu\text{m}$ e uno schermo bianco e' posto alla distanza di 1.20 m . Un fascio di luce di $\lambda=500\text{ nm}$ incide sulle due fenditure provenendo da una sorgente molto lontana. Quanto vale la distanza tra le due frange luminose consecutive che si osservano sullo schermo ?

Interferenza costruttiva

$$d \cdot \text{sen}\theta = m\lambda \quad (\text{con } m=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$$

Distanza tra le frange, su uno schermo posto a distanza L

$$x = L \tan\theta$$

$$\text{sen}\theta = \frac{m\lambda}{d} = \frac{(1)(500 \cdot 10^{-9}\text{ m})}{(100 \cdot 10^{-6})\text{ m}} = 5 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta = \arcsen(5 \cdot 10^{-3}) = 0.005 \text{ radianti}$$

NOTA. Quando gli angoli sono molto piccoli, vale la relazione (IN RADIANTI)

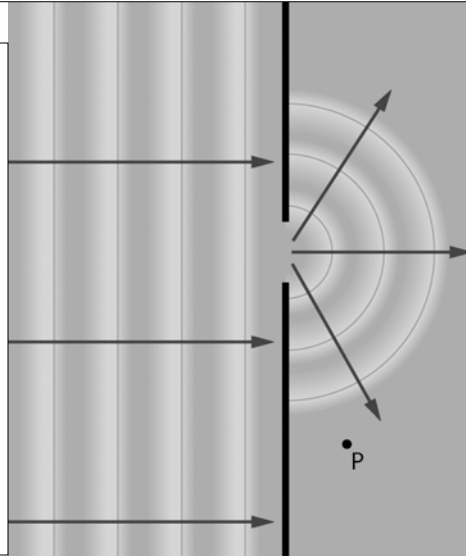
$$\theta \sim \text{sen}\theta \sim \text{tg}\theta$$

$$x = L \cdot \tan \theta = (1.20\text{ m}) \cdot \tan(5.00 \cdot 10^{-3}) = (1.20\text{ m}) \cdot (5.00 \cdot 10^{-3}) =$$

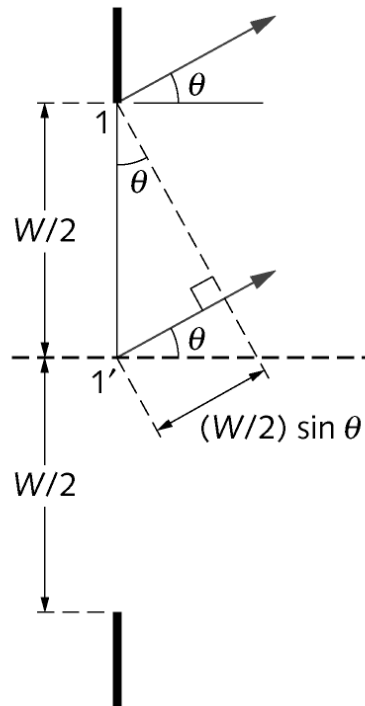
$$6.00\text{ mm}$$

Diffrazione: frangia scura

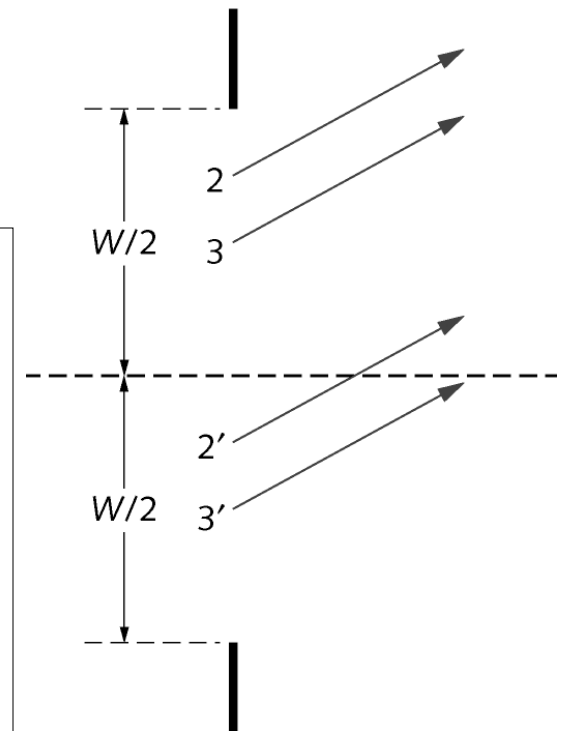
- Un altro effetto della teoria ondulatoria della luce e' la diffrazione
- Singola fenditura, interferenza tra le onde che attraversano la fenditura
- Principio di Huygens



Ogni punto all'interno della fenditura e' una sorgente di onde che si propagano verso lo schermo



- Considero la coppia di punti 1 e 1'
- La differenza di percorso delle onde generate in questi punti e' $(W/2)\sin\theta$
- Differenza di percorso $\lambda/2$
→ interferenza distruttiva
- Frangia scura
- Lo stesso vale per tutte le coppie di punti

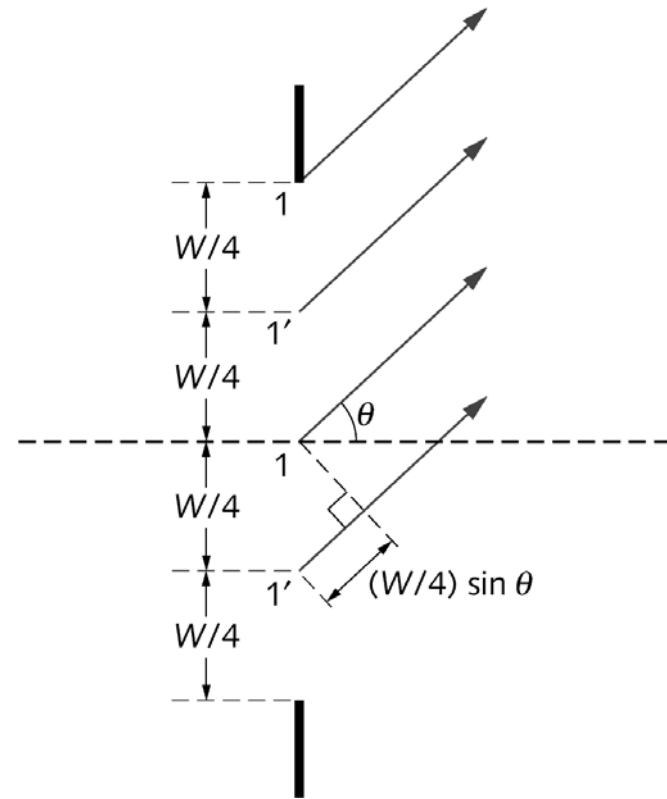


Frangia scura

$$W \cdot \sin\theta = \lambda$$

Diffrazione: frange scura e chiara

- Se divido in 4 la fenditura → seconda frangia scura
- $(W/4)\text{sen}\theta = \lambda/2 \rightarrow$
- $W\text{sen}\theta = 2\lambda$
- Condizione di frangia scura:
 - $W\text{sen}\theta = m\lambda$
 - con $m = \pm 1, \pm 2, \dots$



- Le frange chiare stanno a meta' tra le frange scure
- La frangia centrale ha ampiezza (ricordando che quando θ e' piccolo, vale $\text{sen}\theta \sim \theta$):

- $2\lambda / W$

Esempio

Problema. Una luce di $\lambda=580$ nm incide su una fenditura larga $300 \mu\text{m}$. Lo schermo di osservazione e' posto a 2.00 m. Trovare:

1. Le posizioni delle prime frange scure
2. La larghezza della frangia centrale chiara

Posizione delle frange scure	→	$W \sin\theta = \lambda$
------------------------------	---	--------------------------

$$\sin\theta = \frac{\lambda}{W} = \frac{580 \cdot 10^{-9} \text{ m}}{300 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 1.93 \cdot 10^{-3} \quad \theta \cong 1.93 \cdot 10^{-3} \text{ radianti}$$

$$d \cong L\theta = (2.00 \text{ m}) \cdot (1.93 \cdot 10^{-3} \text{ radianti}) = 3.87 \text{ mm}$$

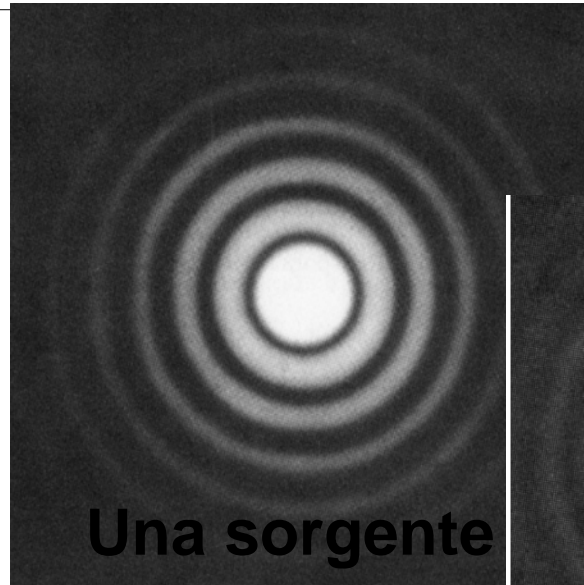
Larghezza della frangia centrale chiara	→	$2d = 7.74 \text{ mm}$
---	---	------------------------

Nota. La fenditura e' larga 0.3 mm e la frangia centrale chiara e' $\sim 8 \text{ mm}$

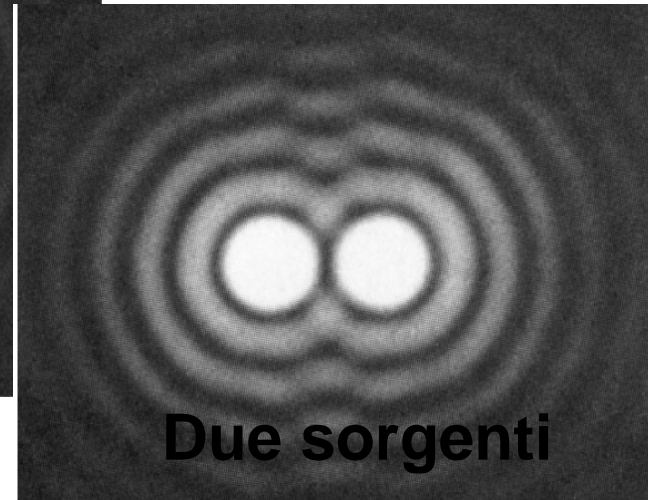
Conseguenze della diffrazione



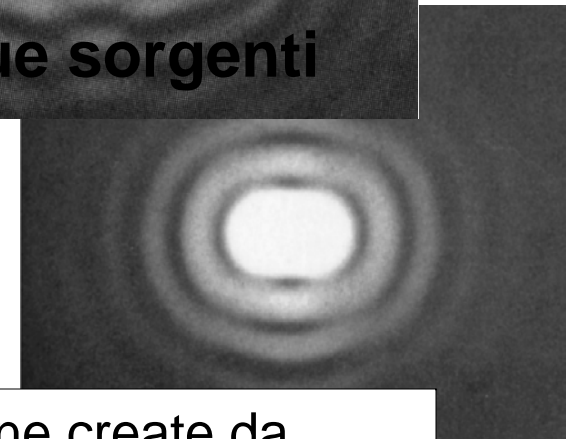
I bordi di un oggetto
non sono nitidi



Una sorgente



Due sorgenti

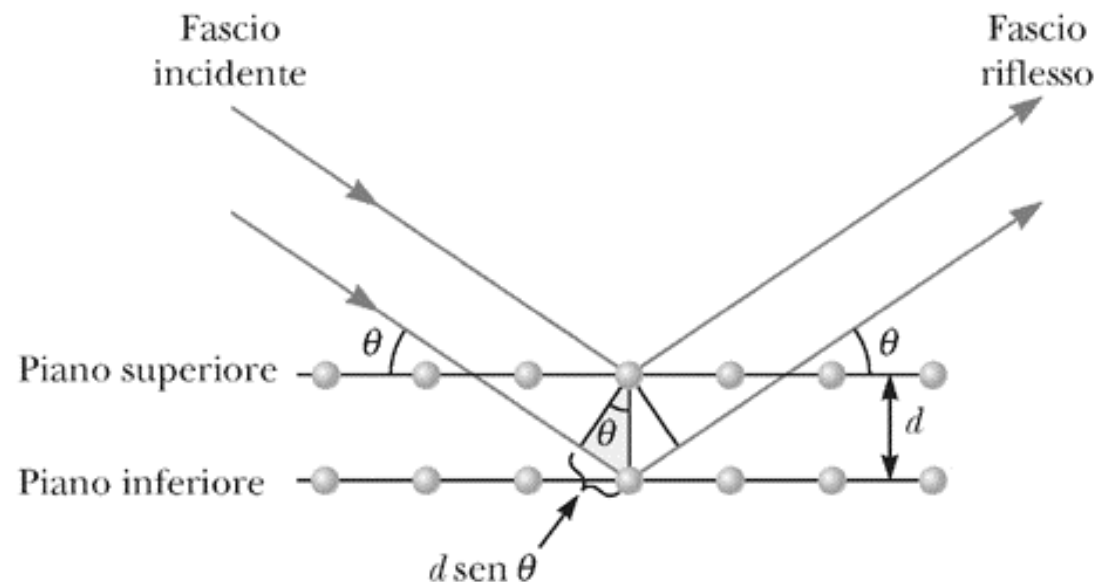
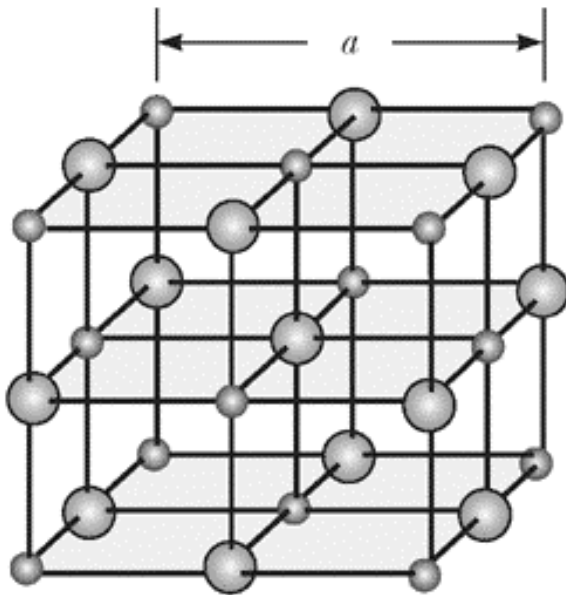


Le figure di diffrazione create da
un'apertura circolare mi impediscono di
distinguere due oggetti molto vicini

- **L'ottica geometrica**
- **Riflessione e rifrazione**
- **Le fibre ottiche**
- **Le lenti sottili**
- **L'occhio e le lenti**
- **Interferenza e diffrazione**
- **Diffrazione di raggi X**

Diffrazione di raggi X

- I raggi X sono radiazione e.m.
- In pratica, sono luce con λ molto piccola ($\sim 1\text{\AA}$ –angstrom- , $\sim 10^{-10}$ m)
- Nel 1913 Max von Laue penso' di illuminare un cristallo con raggi X



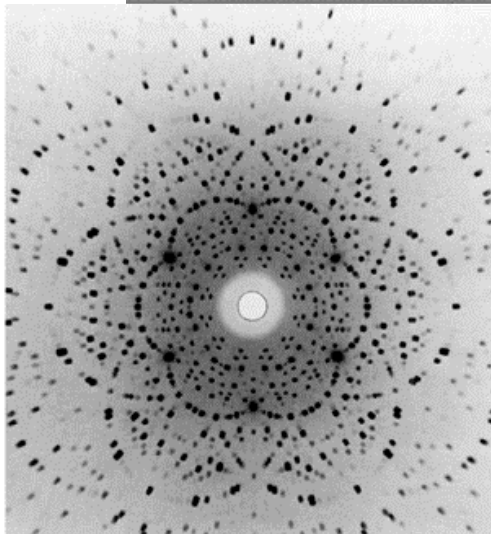
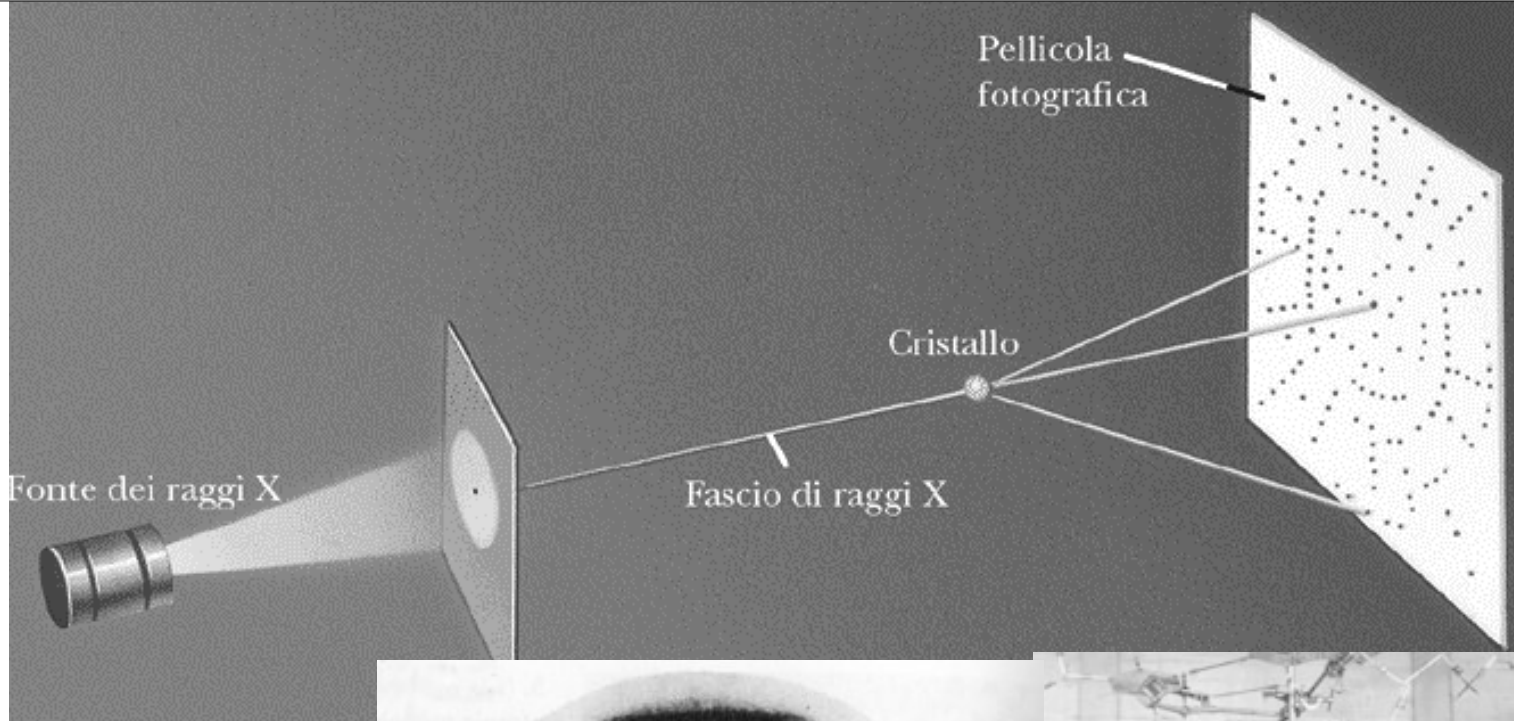
La differenza di cammino e' $2d \sin \theta$

($d \sin \theta$ scendendo + $d \sin \theta$ salendo)

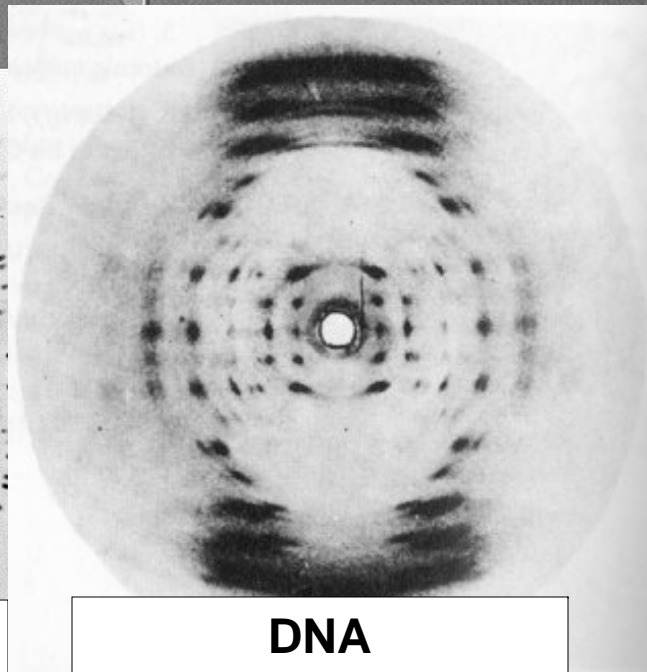
Legge di Bragg

Ho interferenza costruttiva quando vale: $2d \sin \theta = m\lambda$ con $m=1,2,3,\dots$

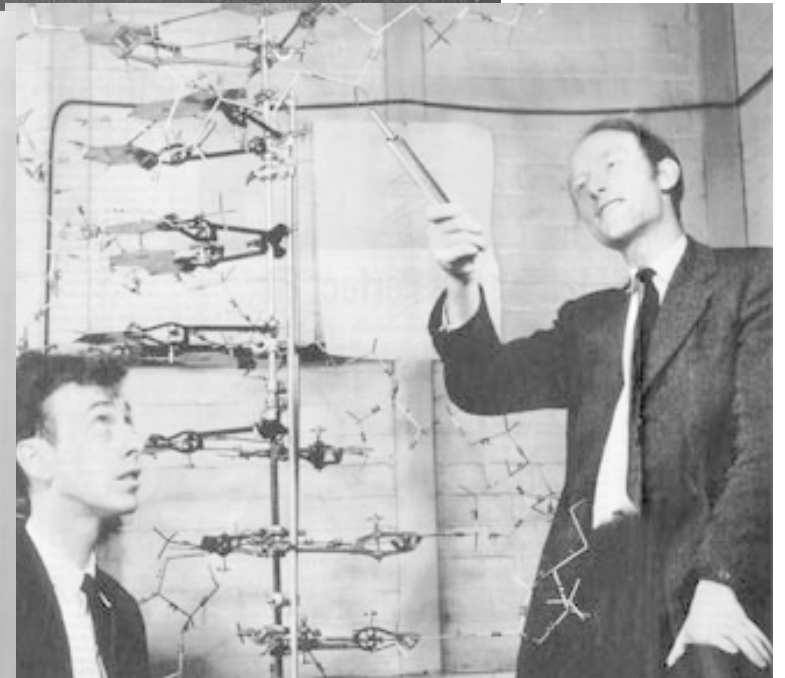
Diffrazione di raggi X e molecole biologiche



Minerale berillo

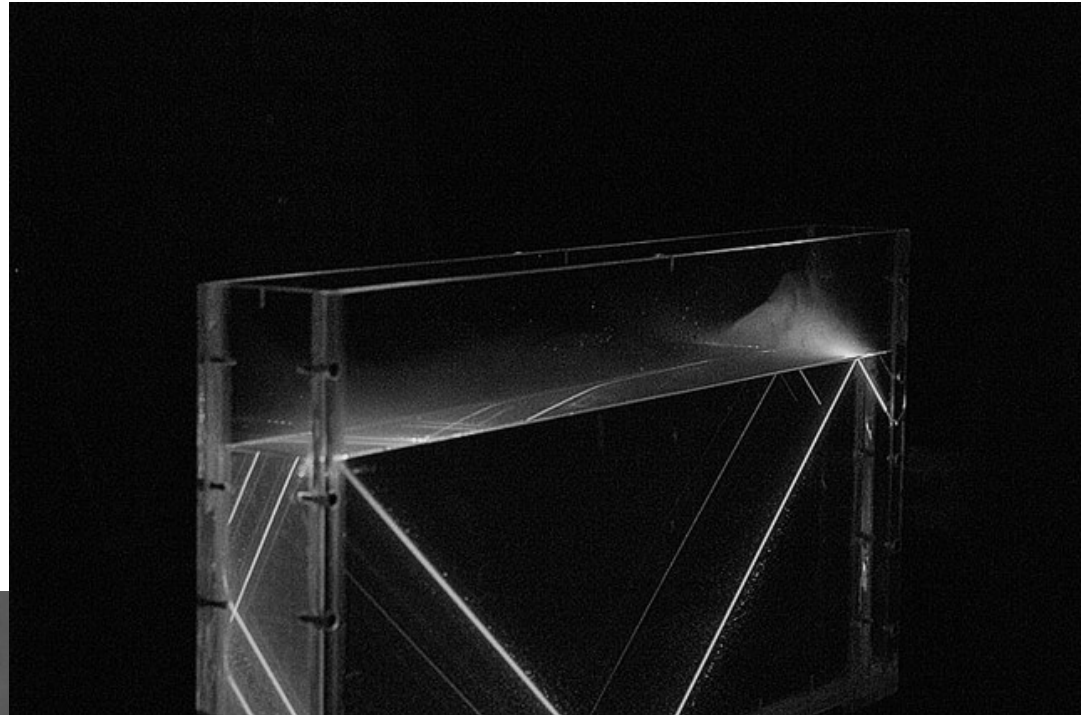


DNA



Riassumendo

La luce ha una doppia natura
Ottica geometrica (lenti, ecc.)
Ottica fisica (dimensioni
paragonabili alla λ)



**Prossima lezione:
Le radiazioni in medicina**