



FISICA

CdS Scienze Biologiche

Stefania Spagnolo

Dip. di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi"

<http://www.dmf.unisalento.it/~spagnolo>

stefania.spagnolo@le.infn.it

(please, usate **oggetto/subject: CdS Biologia**)

Diario del programma e delle lezioni svolte

http://www.dmf.unisalento.it/~spagnolo/Fis_ScienzeBiologiche_2017-18.htm



Ottica geometrica

cenni

*M. Taiuti, M.T. Tuccio "Appunti di Fisica per Biologia" in
<http://www.fisica.unige.it/~biologia/NOfisica.html> (Università di Genova)*

INDICE

- Caratteristiche generali delle soluzioni di onda delle equazioni di Maxwell
- velocità di propagazione delle onde e.m. nei mezzi materiali.
 - indice di rifrazione.
- Leggi di riflessione e di rifrazione
- sistemi ottici semplici:
 - specchio piano e sferico
 - lente sottile
 - equazione dei punti coniugati
 - costruzione delle immagini di oggetti reali
 - la lente di ingrandimento come prototipo di strumento ottico

INDUZIONE ELETTROMAGNETICA

Le equazioni di Maxwell riassumono questi fatti sperimentali,

* legge di Coulomb / Gauss

- le cariche elettriche statiche puntiformi sono sorgenti di campo E proporzionale a $1/r^2$ - gli effetti delle cariche elettriche si sommano (principio di sovrapposizione)

* Legge di Faraday Neumann:

- B variabile nel tempo sorgente di campo E (non conservativo)

* flusso di B attraverso qualunque sup. chiusa è 0 =>

- non esistono monopoli magnetici

* legge di Ampere-Maxwell

- le correnti e le variazioni nel tempo di campo elettrico sono sorgenti di campo magnetico

Una conseguenza fondamentale:

- * La luce è radiazione elettromagnetica (un'onda elettromagnetica) che si propaga nel vuoto con velocità costante $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$;

- * c è un invariante relativistico, non dipende dal sistema di riferimento.

LE ONDE ELETTROMAGNETICHE E LA LUCE

Le leggi dell'elettromagnetismo prevedono che i campi elettrico e magnetico generati da cariche elettriche in movimento possano propagarsi nello spazio trasportando energia sotto forma di onde elettromagnetiche.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3.0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

* Proprietà delle onde elettromagnetiche:

- i vettori E e B oscillano mantenendosi sempre tra loro perpendicolari; $|E|=c|B|$;
- la direzione di propagazione dell'onda è perpendicolare a E e a B (onde trasversali)
- la velocità c di propagazione nel vuoto dell'onda elettromagnetica è finita

Il campo \vec{E} di una radiazione elettromagnetica che si propaga nella direzione x con oscillazioni di frequenza costante f è data, nella forma più semplice, dalla

$$\text{espressione } E(x, t) = E_0 \cos\left[2\pi\left(\frac{x - ct}{\lambda}\right)\right]$$

dove λ è la lunghezza d'onda della radiazione, corrispondente alla distanza tra due massimi di intensità. Lunghezza d'onda λ e frequenza di oscillazione f sono legate dalla relazione $\lambda f = c$. Al diminuire del valore della lunghezza d'onda la radiazione

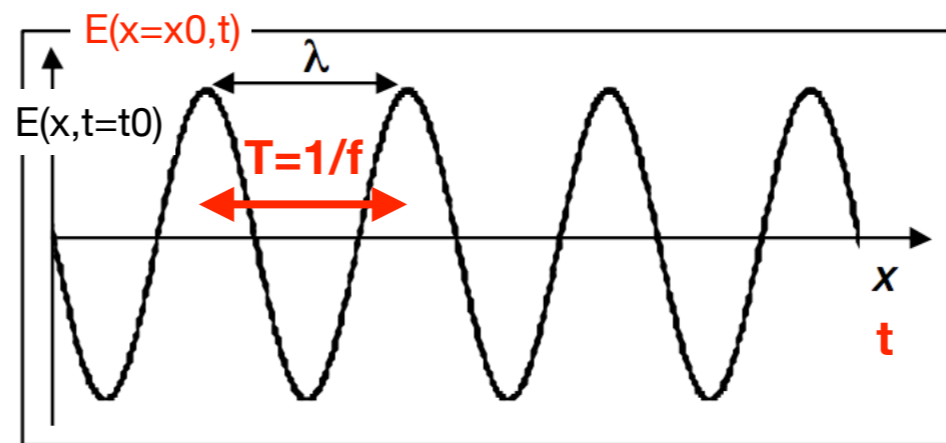


Fig. 51. Onda sinusoidale.

In nero abbiamo il grafico di $|E|$ in funzione di x a t fissato $t=t_0$

L'andamento di $|E|$ in funzione di t a x fissato ($x=x_0$) è identico a quello in funzione dello spazio, con λ periodicità spaziale sostituita da $T=1/f$ periodo temporale

$$\lambda / T = c$$

LE ONDE ELETTROMAGNETICHE E LA LUCE

Le leggi dell'elettromagnetismo prevedono che i campi elettrico e magnetico generati da cariche elettriche in movimento possano propagarsi nello spazio trasportando energia sotto forma di onde elettromagnetiche.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3.0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

* Proprietà delle onde elettromagnetiche:

- i vettori E e B oscillano mantenendosi sempre tra loro perpendicolari; $|E|=c|B|$;
- la direzione di propagazione dell'onda è perpendicolare a E e a B (onde trasversali)
- la velocità c di propagazione nel vuoto dell'onda elettromagnetica è finita

x direzione di propagazione dell'onda

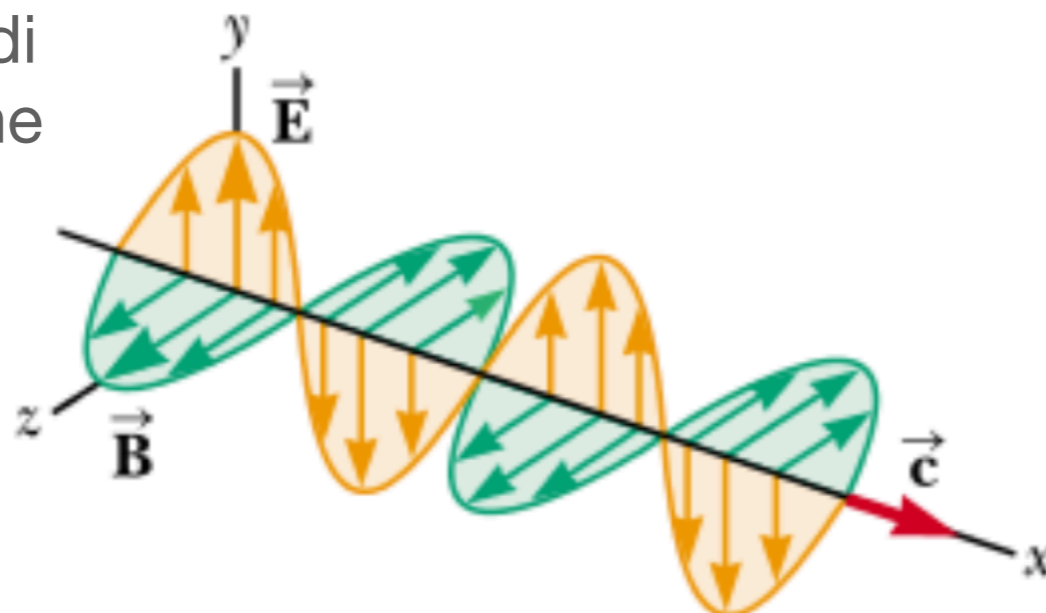


FIGURA 24.7 Un'onda elettromagnetica sinusoidale si muove nel verso positivo dell'asse x con velocità c .

$$\vec{E}(x, t) = E_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{x - ct}{\lambda} \right) \right] \hat{y}$$

$$\vec{B}(x, t) = B_0 \cos \left[2\pi \left(\frac{x - ct}{\lambda} \right) \right] \hat{z}$$

$$E_0 = cB_0$$

una possibile configurazione:
Ampiezza costante (E_0, B_0), E lungo y e B lungo z per propagazione lungo x

LUCE VISIBILE:

radiazione elettromagnetica con λ nell'intervallo 400-700 nm

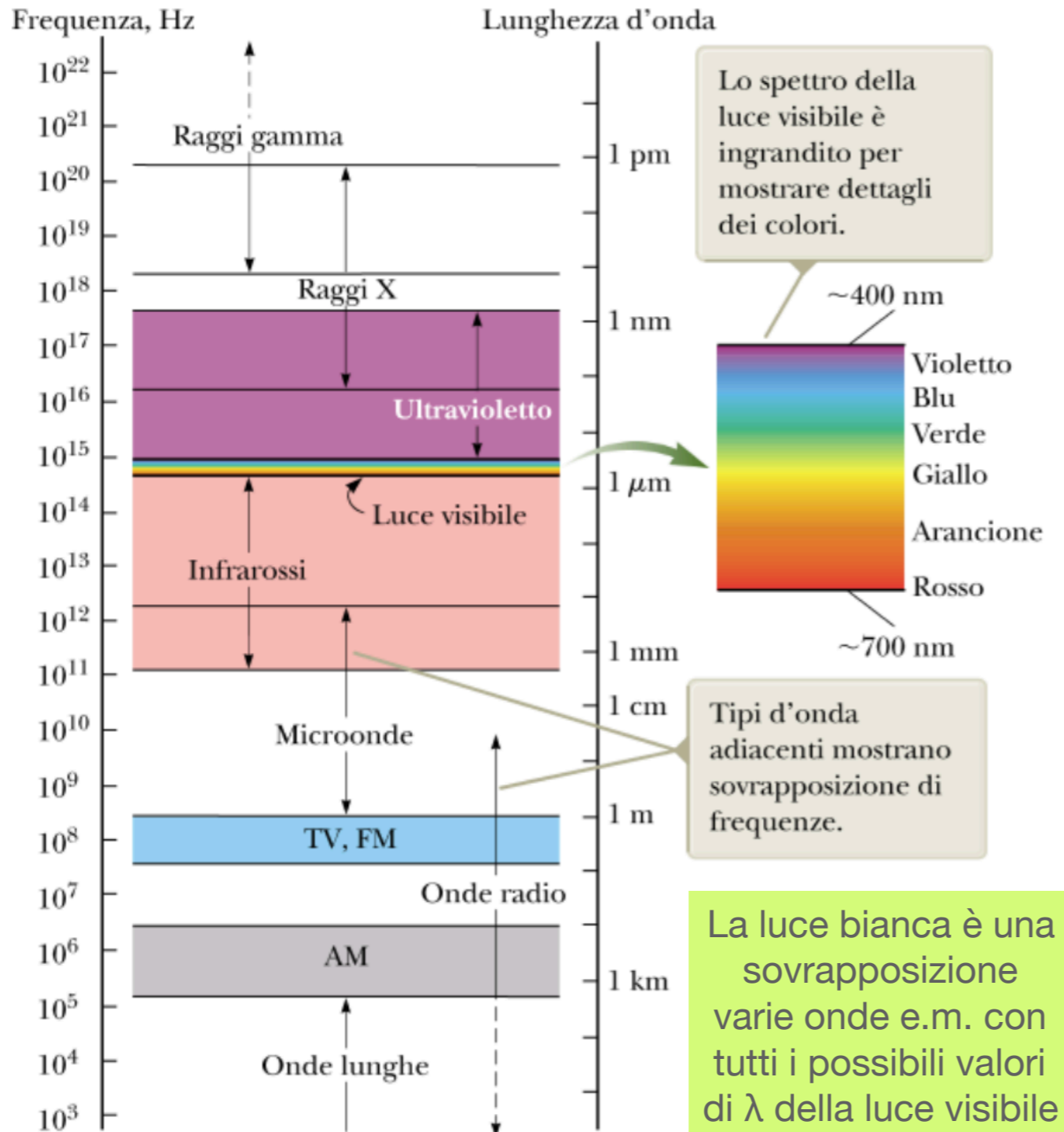


FIGURA 24.11 Lo spettro elettromagnetico.

La velocità v di propagazione della luce in un mezzo materiale è diversa (sempre inferiore) a c (velocità nel vuoto)

* $n = c/v$ indice di rifrazione del mezzo

- considerata un'onda elettromagnetica prodotta nel vuoto (\sim aria) da una sorgente con frequenza f , essa si propagherà nel vuoto con $\lambda = c/f$, quando incontrerà un altro mezzo (\sim acqua, vetro, ecc) con $\lambda' = v/f = nc/f$

Nell'attraversamento di una superficie di separazione tra mezzi diversi la luce cambia velocità di propagazione e lunghezza d'onda

* di conseguenza il cammino della luce risulta alterato -> **rifrazione**

Alcuni mezzi non sono trasparenti alla luce -> **riflessione**

LEGGI DI SNELL



è un vettore che ha la direzione dell'onda incidente (i) / riflessa (j) / rifratta (r)

Leggi di Snell: quando un raggio luminoso incide obliquamente sulla superficie che separa due mezzi otticamente trasparenti, una frazione dell'intensità viene riflessa con un angolo rispetto alla normale uguale a quello di incidenza i , mentre una seconda frazione viene rifratta nel secondo mezzo lungo una direzione che forma un angolo r

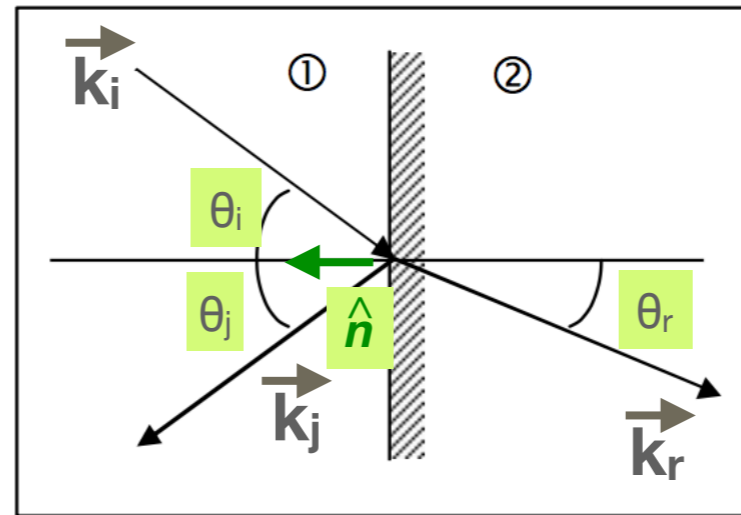


Fig. 52. Legge della riflessione e della rifrazione.

In generale quando un'onda e.m. incide su una superficie di separazione tra due mezzi, provenendo dal mezzo 1, è in parte riflessa e in parte rifratta

rispetto alla normale secondo la relazione

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$$

$$\theta_i = \theta_j$$

La costante n_i è detta **indice di rifrazione** del mezzo, e corrisponde al rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la velocità della luce nel mezzo $n = \frac{c}{v} \geq 1$ dove $n = 1$ per il vuoto o con buona approssimazione per l'aria. Per l'acqua ad esempio $n = 1.33$. La

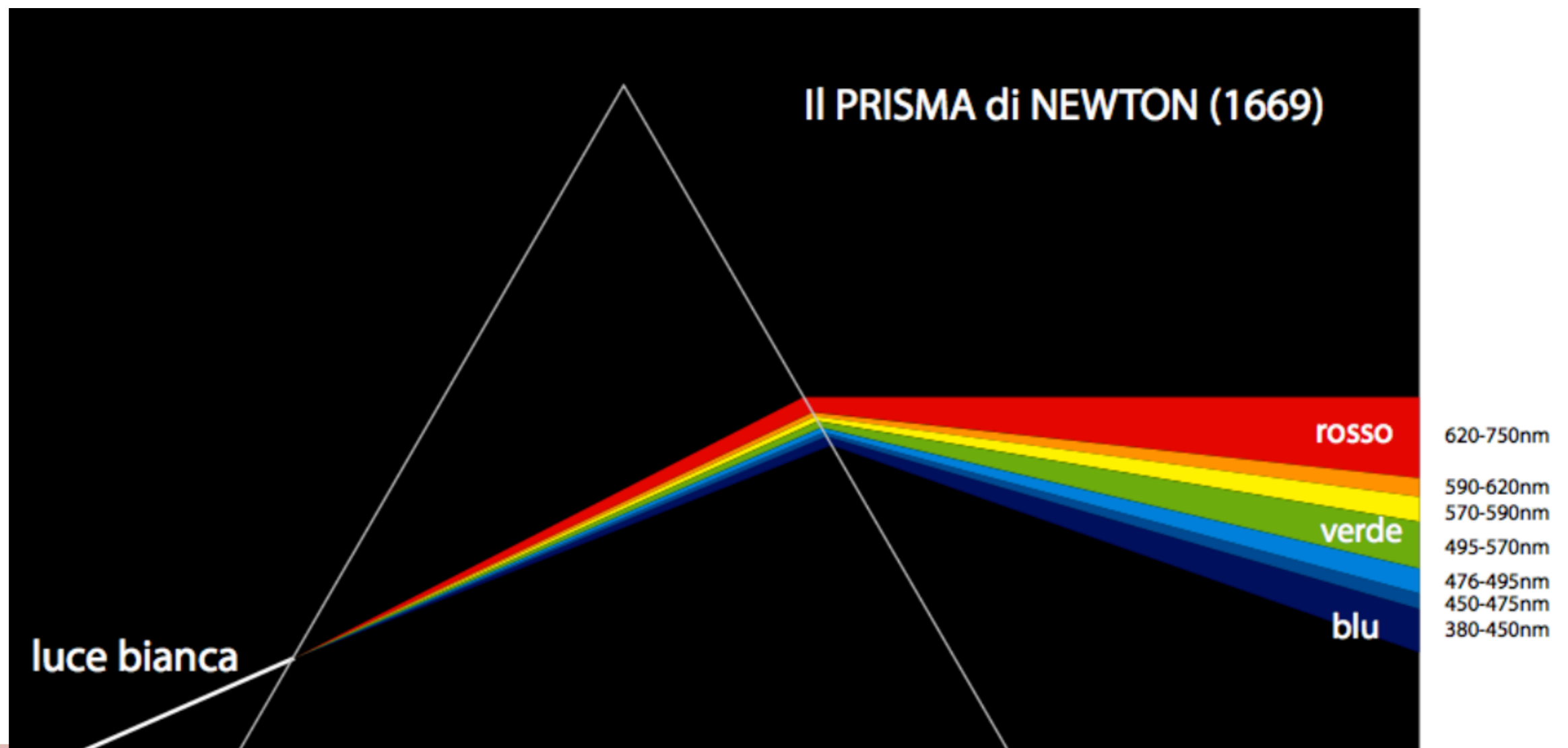
costante $n_{12} = \frac{n_2}{n_1}$ è detta indice di rifrazione del secondo mezzo relativo al primo.

k_{ijr} se \hat{n} (versore perpendicolare alla superficie di separazione dei due mezzi) sono tutti contenuti nello piano: il piano perpendicolare alla superficie a cui appartiene k_i

θ_{ijr} un angolo tra l'onda incidente/riflessa/rifratta e \hat{n} versore (normale alla superficie di separazione)

RIFRAZIONE DELLA LUCE BIANCA

L'indice di rifrazione è una funzione decrescente della lunghezza d'onda ed è massima per la luce violetta e minima per la luce rossa. Questo ci spiega il fenomeno della **dispersione cromatica della luce bianca (l'arcobaleno, per esempio)**. Quando un fascio di luce bianca incide su una superficie rifrangente, le diverse componenti cromatiche vengono rifratte con angoli di rifrazione diversi: le componenti a lunghezza d'onda minore, il blu e il violetto per esempio, vengono rifratte maggiormente di quelle a lunghezza d'onda maggiore, il rosso per esempio.

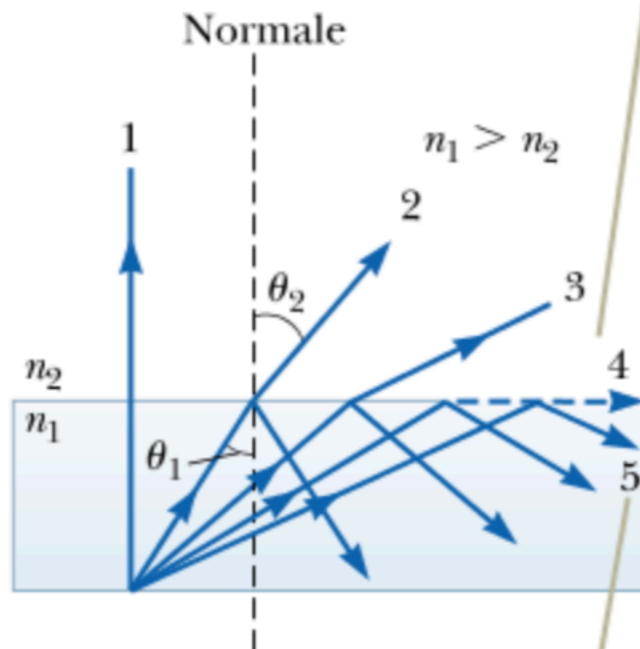


RIFLESSIONE TOTALE

Riflessione totale: se la luce passa da un mezzo ① più rifrangente ad un mezzo ② meno rifrangente si avrà $n_1 > n_2$ e quindi l'angolo $r > i$. Pertanto esisterà un **angolo limite** di incidenza i_0 in corrispondenza del quale l'angolo di rifrazione vale $r = 90^\circ$. Il valore dell'angolo limite, facilmente ricavabile dalla legge di Snell, è $i_0 = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$. Si noti che per angoli di incidenza $i > i_0$ non si avrà rifrazione nel mezzo ② e il raggio luminoso verrà totalmente riflesso dalla superficie di separazione e quindi l'energia trasportata dal raggio incidente la si ritrova tutta nel raggio riflesso. Per esempio, nel caso della superficie di contatto tra acqua ed aria l'angolo limite per un raggio luminoso proveniente dall'acqua vale $i_0 = \arcsin\left(\frac{1}{1.33}\right) = 49^\circ 20'$. Il fenomeno della riflessione totale ha numerose applicazioni, tra cui la più importante sono le fibre ottiche, molto utilizzate nelle telecomunicazioni e in campo medico (endoscopia).

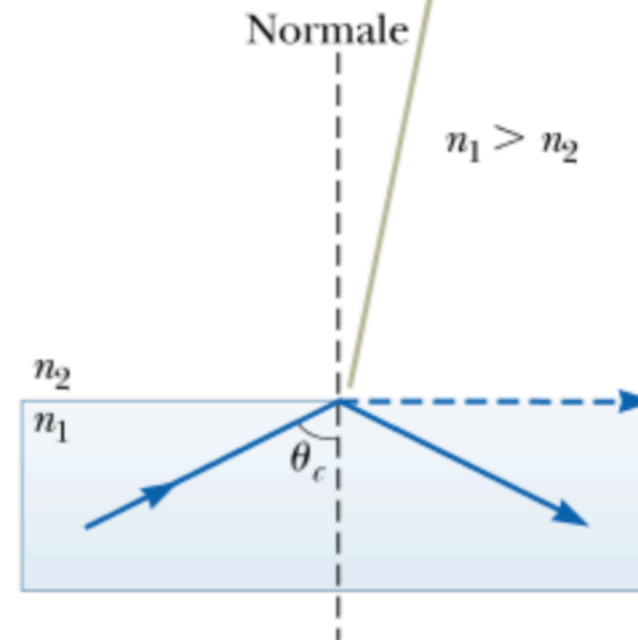
RIFLESSIONE TOTALE

All'aumentare dell'angolo di incidenza θ_1 , l'angolo di rifrazione θ_2 aumenta fino a raggiungere 90° (raggio 4). La linea tratteggiata indica che in realtà nessuna energia si propaga in quella direzione.



Per angoli di incidenza maggiori, si verifica riflessione interna totale (raggio 5).

L'angolo di incidenza che produce un angolo di rifrazione uguale a 90° è l'angolo critico θ_c . A questo angolo di incidenza, tutta l'energia della luce incidente viene riflessa.



SISTEMI OTTICI E IMMAGINI

specchi e lenti forniscono immagini di un oggetto (ingrandite o rimpicciolite, modificate) in posizioni diverse da quella in cui si trova l'oggetto per effetto dei fenomeni di rifrazione e riflessione della luce

Nel caso dello **specchio piano** riportato in figura 53 consideriamo anzitutto la punta della freccia nera. Di tutti i raggi emessi seguiamo quello che incide perpendicolarmente allo specchio (e che viene riflesso all'indietro nella stessa direzione) e quello che incide nel punto in cui lo specchio interseca il piano orizzontale (e che viene riflesso con lo stesso angolo di incidenza).

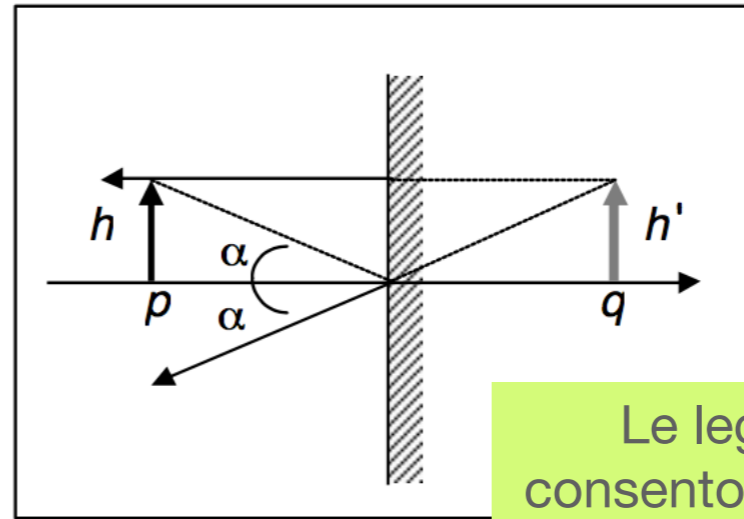


Fig. 53. Specchio piano.

Le leggi dell'ottica geometrica consentono di costruire le immagini di un sistema ottico (insieme di diottri e specchi) nell'approssimazione di **raggi parassiali** raggi luminosi che incidono con piccoli angoli di incidenza sulla superficie di separazione tra i vari mezzi

Noi vediamo l'oggetto perché esso (la sua estremità) **emette luce (riflette luce)** che arriva ai nostri occhi **in tutte le direzioni**

schematizzazione: un oggetto è una sorgente di luce che si propaga in tutte le direzioni

rappresentazione: usiamo una freccia per rappresentare un oggetto (l'estremità di un oggetto) Tutti i punti intermedi tra la base e l'estremità si comporteranno in modo intermedio tra i due estremi

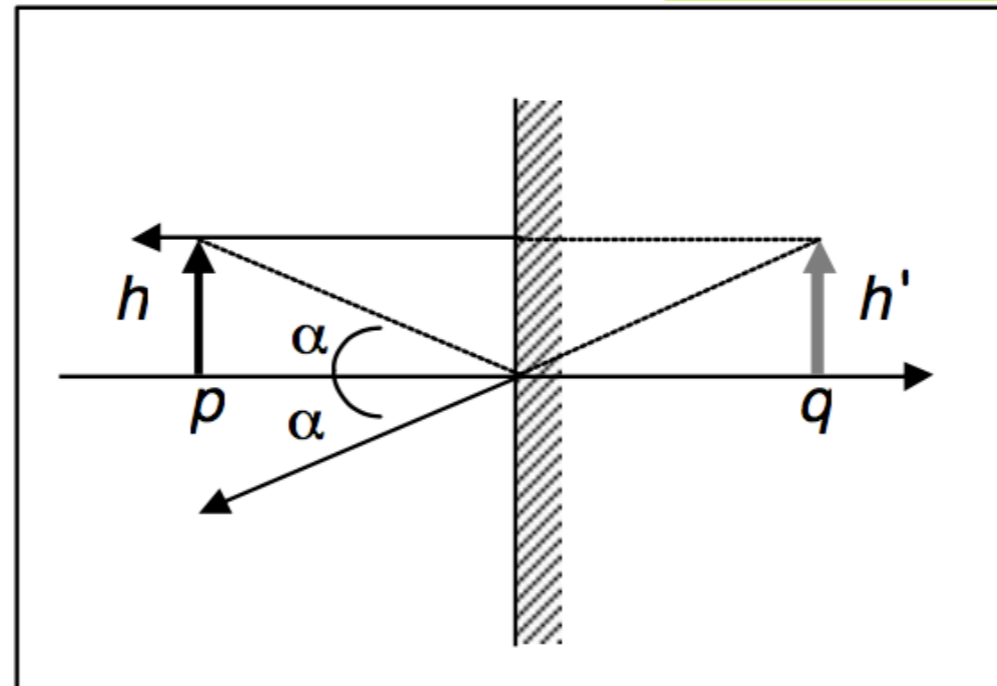
Per costruire l'immagine di un sistema ottico, basta considerare il punto di incrocio di sue raggi che partono dall'estremità dell'oggetto

SISTEMI OTTICI E IMMAGINI

Definizioni



specchio piano

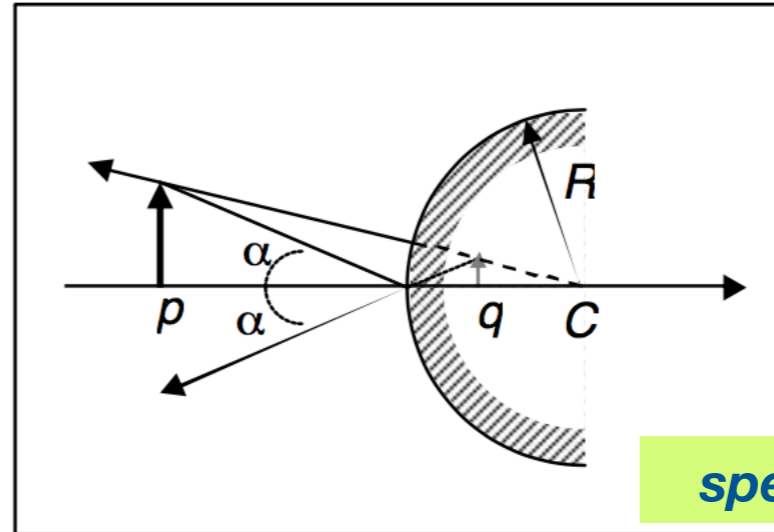


Per le leggi della riflessione:
(coordinata immagine) $q = p$ (coordinata oggetto)
($h'/h =$ ingrandimento trasversale) $h' = h$

SISTEMI OTTICI E IMMAGINI

Analizziamo ora come si formano le immagini per **specchi sferici**. Uno specchio sferico è caratterizzato da un centro di curvatura C ed un raggio di curvatura R e si chiama convesso o concavo a seconda di come è disposta la curvatura.

Consideriamo ora uno **specchio sferico convesso** di raggio R . In analogia al caso precedente, tracciamo due raggi che si dipartono dalla punta della freccia nera, quello diretto verso il centro C di



specchio sferico convesso

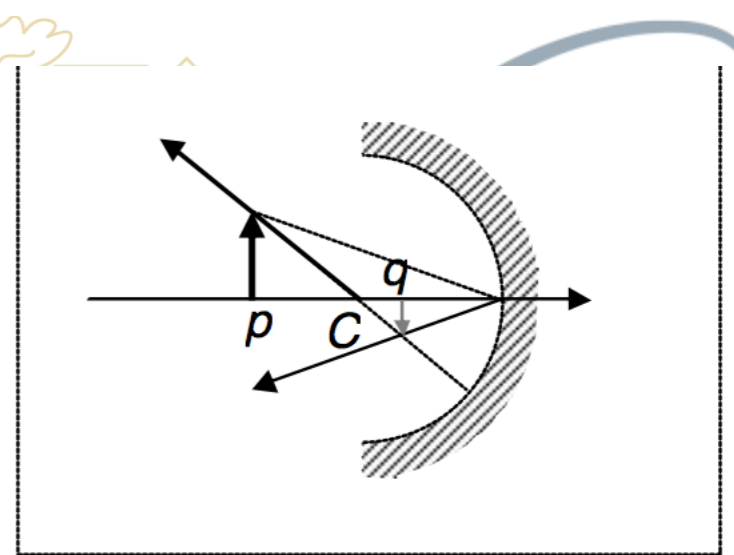
curvatura dello specchio (e che verrà quindi riflesso all'indietro nella stessa direzione) e quello che incide nel punto in cui lo specchio interseca il piano orizzontale (e che viene riflesso con lo stesso angolo di incidenza). Anche in questo caso i raggi dopo la riflessione divergono, ma se prolungati all'indietro, oltre la superficie dello specchio, le linee si incontrano nel punto corrispondente alla punta della freccia grigia. Si può verificare facilmente che in questo punto si incontrano i prolungamenti di tutti i raggi emessi dalla punta della freccia nera.

L'immagine che si forma è virtuale, diritta, rimpicciolita e la sua posizione è tra lo specchio ed il centro di curvatura.

Fig. 54. Specchio sferico convesso.

SISTEMI OT

Consideriamo infine uno **specchio sferico concavo** di raggio R ed una freccia nera posta alla distanza $p > R$. Tracciamo i due raggi che si dipartono dalla punta della freccia nera, quello diretto verso il centro C di curvatura dello specchio (riflesso



**specchio sferico
concavo**

all'indietro nella stessa direzione) e quello che incide nel punto in cui lo specchio interseca il piano orizzontale (riflesso con lo stesso angolo di incidenza). I raggi dopo la riflessione si incontrano ad una distanza q a sinistra dello specchio. Si può verificare facilmente che in questo punto si incontrano tutti i raggi emessi dalla punta della freccia nera. Il tipo d'immagine che si forma è, pertanto, reale, capovolta, rimpicciolita e la sua posizione è compresa tra lo specchio e il centro. Se l'oggetto è posto a distanze più ravvicinate si può verificare facilmente, con la costruzione grafica, che il tipo d'immagine dipende dalla posizione dell'oggetto. Riassumendo possiamo affermare, che:

- se $p > R$ l'immagine è reale, capovolta e rimpicciolita
- se $\frac{R}{2} < p < R$ l'immagine è reale, capovolta e ingrandita
- se $p < \frac{R}{2}$ l'immagine è virtuale, diritta e ingrandita

SISTEMI OTTICI E IMMAGINI

E' possibile dimostrare che la relazione che lega la posizione dell'oggetto e dell'immagine, detta anche **legge dei punti coniugati**, può essere espressa in generale

dalla relazione $\frac{1}{q} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$ dove f è la distanza focale dello specchio e vale $f = \frac{R}{2}$ per

specchi concavi e $f = -\frac{R}{2}$ per quelli convessi. Attenzione ai segni in questa equazione:

se si ottiene $q > 0$ l'immagine è reale, altrimenti per $q < 0$ si ha un'immagine virtuale.

Si ossevi inoltre che la posizione dell'immagine di un oggetto posto all'infinito ($p \rightarrow \infty$) coincide con quella del fuoco dello specchio.

Il rapporto G tra le dimensioni dell'immagine h' e dell'oggetto h è detto

ingrandimento e si può facilmente dimostrare che vale $G = -\frac{q}{p}$. Se $G > 0$ l'immagine

è diritta, mentre se $G < 0$ l'immagine è capovolta.

LENTE SOTTILE

Una **lente** è costituita da un mezzo trasparente alla luce con indice di rifrazione n_2 , delimitato da due superfici curve o da una superficie curva e una piana. Una **lente sottile** ha uno spessore piccolo in confronto ai raggi di curvatura delle due superfici. Similmente allo specchio, una lente sottile è in grado di ricostruire ad una distanza q (posto sull'asse ottico) l'immagine di un oggetto distante p .

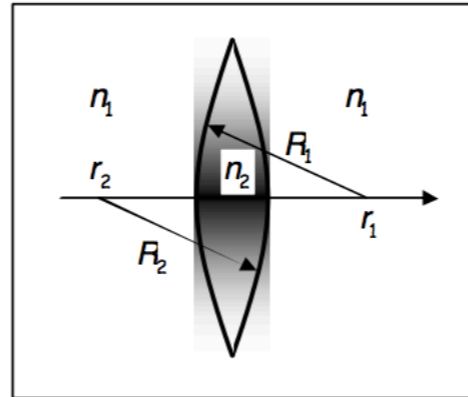


Fig. 57. Lente sottile biconvessa.

La **legge dei punti coniugati di una lente** ha la stessa forma di quella dello specchio, ma l'espressione del **fuoco** è più complessa, perché deve tenere conto delle due superfici della lente e del diverso indice di rifrazione. Nel caso di una lente sottile la

legge dei punti coniugati vale $\frac{1}{q} + \frac{1}{p} = \frac{1}{f}$ dove l'espressione per la coordinata del


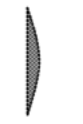

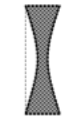


fuoco f o **lunghezza focale** è legata alle coordinate r_1 e r_2 dei centri di curvatura (r_1 corrisponde alla superficie della lente più vicina all'oggetto), all'indice di rifrazione n_2 della lente ed anche all'indice di rifrazione n_1 del mezzo dove è immersa la lente

secondo la relazione $\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$. Anche in questo caso se si ottiene $q > 0$

l'immagine è reale, altrimenti per $q < 0$ si ha un'immagine virtuale.

Dalla legge dei punti coniugati si ricava la seguente proprietà comune a tutte le lenti: nel caso di un oggetto posto a distanza infinita ($p \rightarrow \infty$), l'immagine si forma nel **fuoco**

Le proprietà di convergenza della lente variano a seconda del tipo di curvatura delle superfici. Nella tabella seguente sono riportati i casi più importanti nell'ipotesi $n_2 > n_1$

						
Tipo lente	biconvessa	piano convessa	convesso-concava	biconcava	piano concava	concavo-convessa
r_1	> 0	$\rightarrow \infty$	< 0	< 0	$\rightarrow \infty$	< 0
r_2	< 0	< 0	< 0	> 0	> 0	> 0
f	> 0	> 0	> 0	< 0	< 0	< 0
focalizzazione	convergente	convergente	convergente	divergente	divergente	divergente

Anche per la lente si definisce **ingrandimento lineare** G , il rapporto tra le dimensioni dell'immagine h' e dell'oggetto h e si può facilmente dimostrare che vale $G = \left| \frac{q}{p} \right|$.

LENTE SOTTILE



p (coordinata oggetto) >0 se l'oggetto si trova nello spazio della luce incidente

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

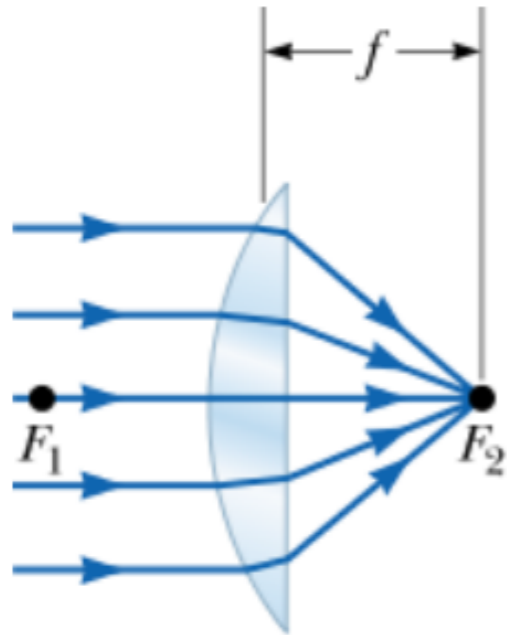
f (distanza focale) >0 per una lente convergente; rappresenta la distanza del fuoco 2 (F2) dalla lente ed è >0 se F2 si trova nello spazio della luce rifratta. F1 è sempre simmetrico nell'altro lato.

q (coordinata immagine) >0 se l'immagine si trova nello spazio della luce rifratta. In tal caso si parla di immagine reale, che corrisponde a un effettivo punto di convergenza dei raggi luminosi rifratti

$q <0$ l'*immagine* si dice *virtuale* e si trova nello spazio della luce incidente. Essa corrisponde a un punto di convergenza geometrica dei prolungamenti all'indietro dei dei raggi luminosi rifratti

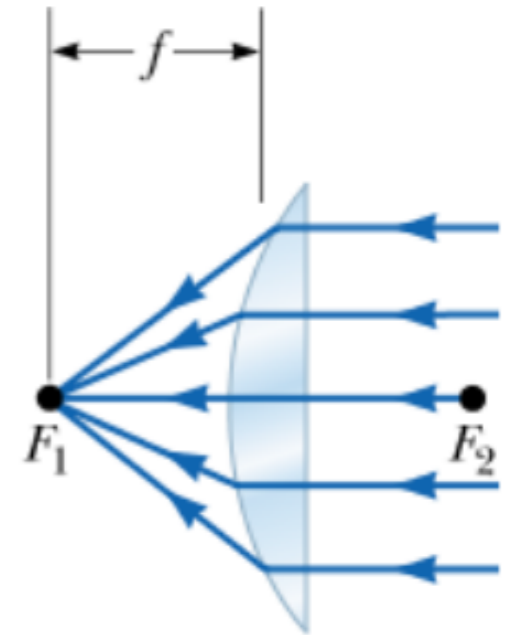
LENTE SOTTILE

DEFINIZIONE di fuochi



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

f (distanza focale) >0 per una lente convergente; rappresenta la distanza del fuoco 2 (F_2) dalla lente ed è >0 se F_2 si trova nello spazio della luce rifratta. F_1 è sempre simmetrico nell'altro lato.



Un fascio di raggi di luce paralleli tra di loro e paralleli all'asse ottico (fascio di luce proveniente dall'infinito) che incide sulla lente converge nel punto chiamato **Secondo Fuoco del sistema ottico (F_2)**
Per una lente convergente F_2 si trova nello spazio della luce rifratta

Un fascio di raggi di luce emesso dal **Primo Fuoco (F_1) di un sistema ottico** che incide sulla lente si propaga come un fascio di raggi paralleli (converge all'infinito)
Per una lente convergente F_1 si trova nello spazio della luce incidente

L'immagine di un punto all'infinito si forma a $q = f >0$ (limite della eq. dei punti coniugati per $p \rightarrow \text{inf}$), quindi F_2 dista f dalla lente

L'immagine di un punto che si trova in F_1 si forma all'infinito $q = \text{inf}$ (limite della eq. dei punti coniugati per $p \rightarrow f$), quindi F_1 dista f dalla lente

COSTRUZIONE DELLE IMMAGINI PER UNALENTE SOTTILE CONVERGENTE

Nel caso in cui l'oggetto è lontanissimo dalla lente (si dice all'infinito). I raggi corrono tutti quasi paralleli all'asse ottico e convergono presso il fuoco. Si forma un'immagine reale quasi puntiforme praticamente nel fuoco come mostrato in figura 5-(a). Se l'oggetto ha una distanza maggiore di $2F$ (doppio della distanza focale) si forma un'immagine reale rovesciata rimpicciolita fra F e $2F$ come mostrato in figura 5-(b). Avvicinando l'oggetto (sempre a distanza maggiore di $2F$), l'immagine si allontana da F (sempre fra F e $2F$) e si ingrandisce, quando l'oggetto è su $2F$ si forma un'immagine reale rovesciata uguale in $2F$: 5-(c). Quando l'oggetto è fra $2F$ ed F , si forma un'immagine reale rovesciata ingrandita oltre $2F$: 5-(d). Quando invece l'oggetto è sul fuoco F non si forma alcuna immagine e tutti i raggi procedono parallelamente (5-(e)). Infine se l'oggetto è fra F e la lente si forma un'immagine virtuale diritta e ingrandita dalla stessa parte dell'oggetto. Tale immagine non esiste fisicamente. Si tratta di una illusione ottica che un osservatore percepisce come reale in quanto i raggi gli sembrano provenire da punti ben definiti: 5-(f).

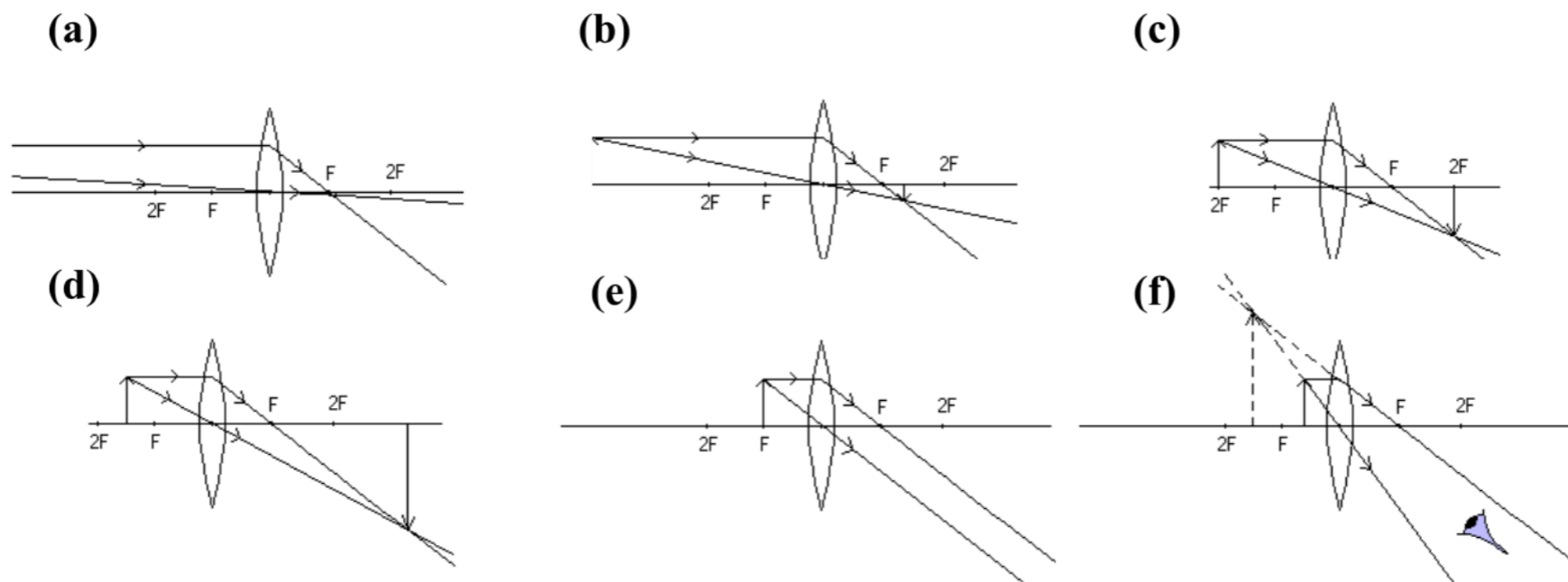


Figure 5: Formazione dell'immagine da parte di una lente convessa in dipendenza della distanza dell'oggetto dalla lente.

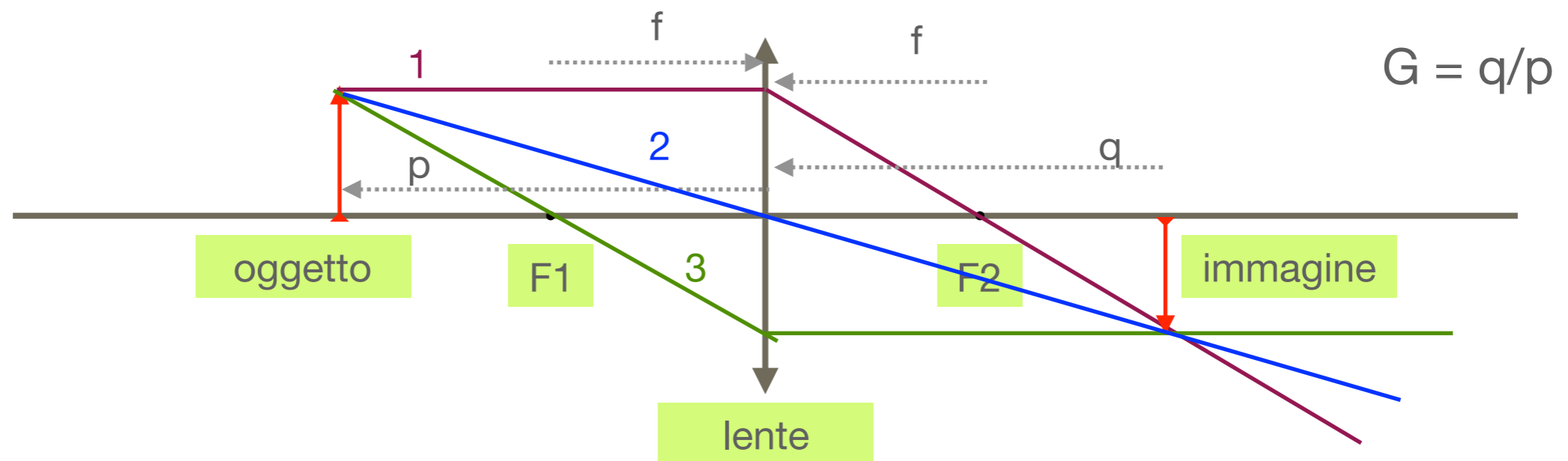
COSTRUZIONE DELLE IMMAGINI PER UNALENTE SOTTILE CONVERGENTE

Considerare almeno due raggi (sono sufficienti due raggi) che partono dal vertice dell'oggetto e stabilire come si propagano oltre la lente (il sistema ottico)

* quali raggi scegliere ?

- 1) il raggio che si propaga parallelamente all'asse ottico e dopo aver incontrato al lente converge in F_2
- 2) il raggio che passa per il vertice della lente prosegue indeflesso
- 3) il raggio che passa dal fuoco F_1 quando incontra la lente prosegue in direzione parallela all'asse ottico

L'incrocio dei raggi (o della loro prosecuzione) dà l'estremità dell'immagine



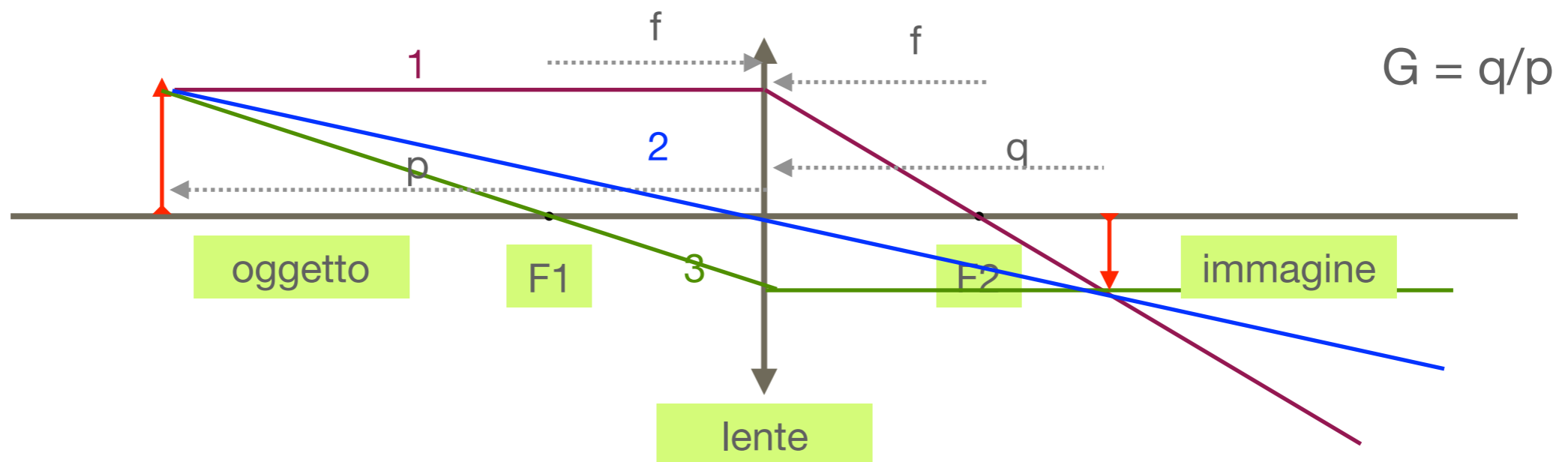
COSTRUZIONE DELLE IMMAGINI PER UNALENTE SOTTILE CONVERGENTE

Considerare almeno due raggi (sono sufficienti due raggi) che partono dal vertice dell'oggetto e stabilire come si propagano oltre la lente (il sistema ottico)

* quali raggi scegliere ?

- 1) il raggio che si propaga parallelamente all'asse ottico e dopo aver incontrato la lente converge in F_2
- 2) il raggio che passa per il vertice della lente prosegue indeflesso
- 3) il raggio che passa dal fuoco F_1 quando incontra la lente prosegue in direzione parallela all'asse ottico

L'incrocio dei raggi (o della loro prosecuzione) dà l'estremità dell'immagine



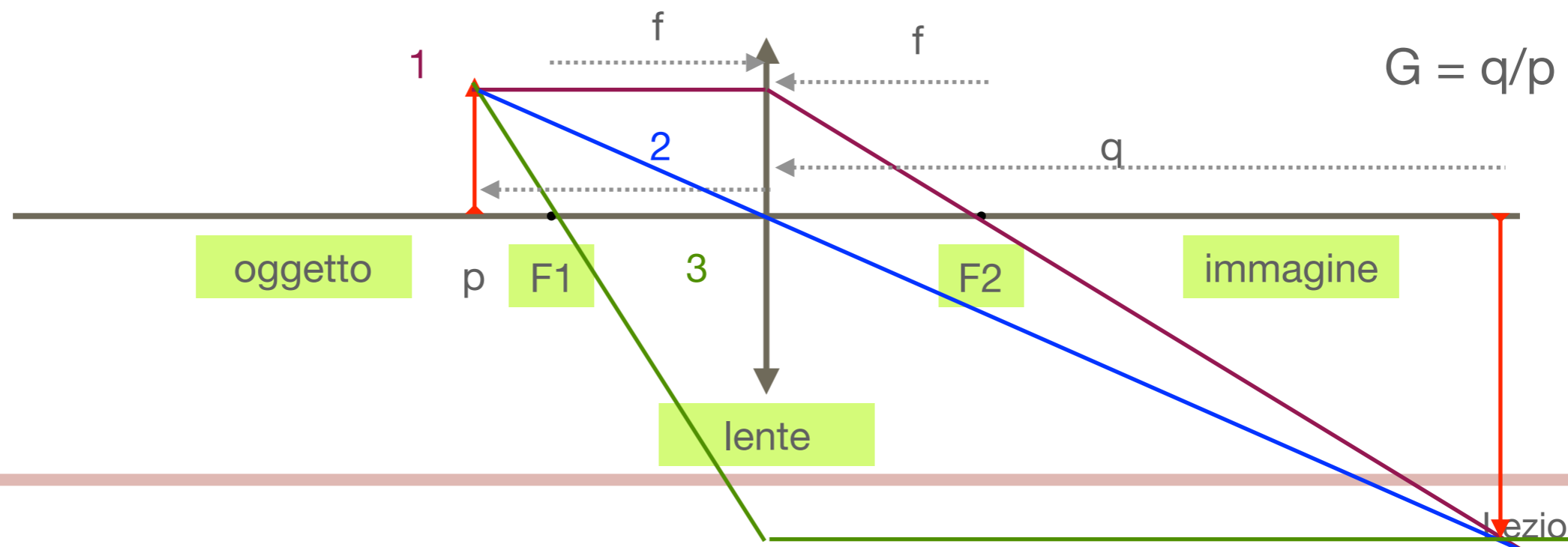
COSTRUZIONE DELLE IMMAGINI PER UNALENTE SOTTILE CONVERGENTE

Considerare almeno due raggi (sono sufficienti due raggi) che partono dal vertice dell'oggetto e stabilire come si propagano oltre la lente (il sistema ottico)

* quali raggi scegliere ?

- 1) il raggio che si propaga parallelamente all'asse ottico e dopo aver incontrato al lente converge in F_2
- 2) il raggio che passa per il vertice della lente prosegue indeflesso
- 3) il raggio che passa dal fuoco F_1 quando incontra la lente prosegue in direzione parallela all'asse ottico

L'incrocio dei raggi (o della loro prosecuzione) dà l'estremità dell'immagine



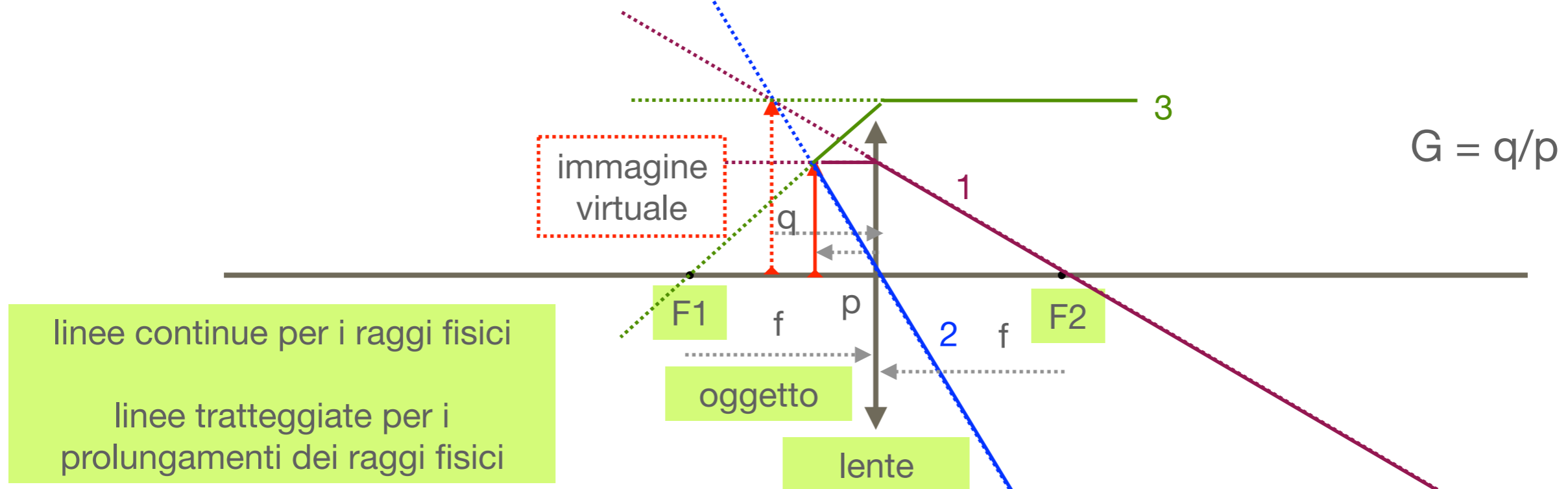
COSTRUZIONE DELLE IMMAGINI PER UNALENTE SOTTILE CONVERGENTE

Considerare almeno due raggi (sono sufficienti due raggi) che partono dal vertice dell'oggetto e stabilire come si propagano oltre la lente (il sistema ottico)

* quali raggi scegliere ?

- 1) il raggio che si propaga parallelamente all'asse ottico e dopo aver incontrato al lente converge in F_2
- 2) il raggio che passa per il vertice della lente prosegue indeflesso
- 3) il raggio che passa dal fuoco F_1 quando incontra la lente prosegue in direzione parallela all'asse ottico

L'incrocio dei raggi (o della loro prosecuzione) dà l'estremità dell'immagine



LENTE D'INGRANDIMENTO

Si chiama **lente d'ingrandimento** una semplice lente biconvessa usata per osservare piccoli oggetti. L'oggetto viene posto tra il fuoco e la lente ad una distanza p dalla lente, come mostrato in figura 61, pertanto, come si vede dalla costruzione grafica, si forma un'immagine virtuale, diritta e ingrandita ad una distanza q dalla lente (immagine che per essere osservata ha bisogno dell'occhio che ne raccolga i raggi luminosi).

L'ingrandimento, in generale, dipende dalla distanza p dell'oggetto:

infatti dalla legge dei punti coniugati

$$q = \frac{pf}{p-f} \quad (\text{si osservi che, essendo}$$

$p < f$, si ha $q < 0 \Rightarrow$ immagine virtuale)

e pertanto $G = \left| \frac{q}{p} \right| = \left| \frac{f}{p-f} \right|$ che

dipende anche dalla posizione p

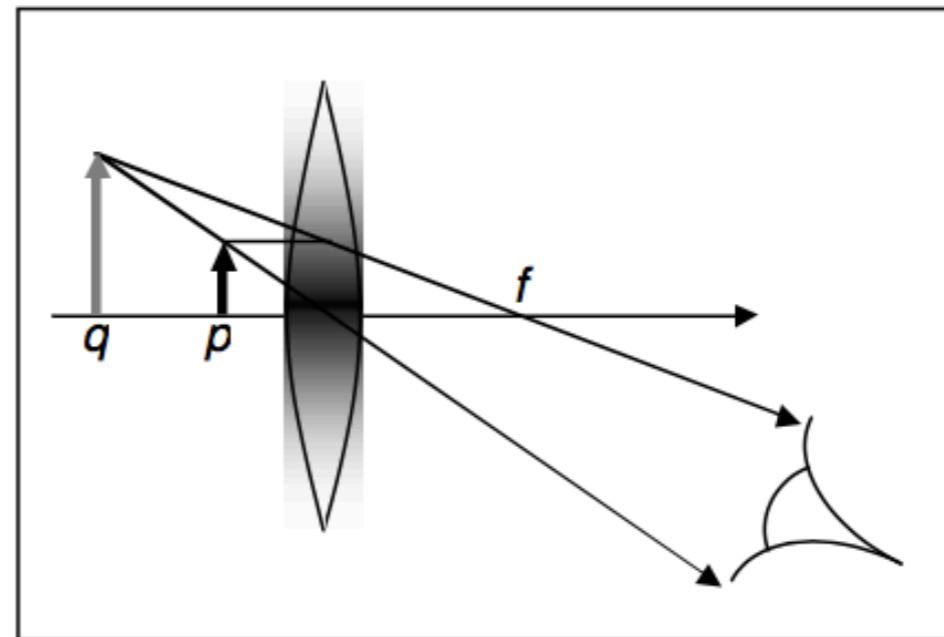


Fig. 61. Ricostruzione dell'immagine da una lente d'ingrandimento.

L'OCCHIO UMANO

L'**occhio umano** è un sistema ottico che forma e proietta le immagini su una superficie sensibile - la *retina* - ricca di fotorecettori (coni e bastoncelli). Il sistema ottico è costituito da un diottro (*cornea, umor acqueo, e umor vitreo*) di indice di rifrazione 1.33 e da una lente biconvessa, il *cristallino*, di indice di rifrazione 1.44. Cornea, camera anteriore, cristallino e camera posteriore nel loro complesso formano una lente convergente che proietta le immagini sulla retina, rimpicciolite e capovolte. Una membrana muscolare, l'*iride*, al cui centro è ricavata un'apertura, la *pupilla*, serve a diaframmare, cioè a regolare la quantità di luce che entra nell'occhio. Poiché la distanza tra la retina ed il cristallino (q) è fissa, affinché l'immagine di oggetti posti a diverse distanze (p) sia a fuoco sulla retina, occorre variare la lunghezza focale f della lente. Questo si ottiene mediante il **meccanismo di accomodazione**, durante il quale la curvatura della faccia anteriore del cristallino viene modificata dalla contrazione dei muscoli ciliari, variando così la distanza focale f fra 2,4 e 1,7 cm (quasi 60 diottrie). Se i muscoli ciliari sono rilassati, un occhio normale mette a fuoco sulla retina i raggi provenienti da oggetti lontani. Quando l'occhio deve mettere a fuoco oggetti vicini, intervengono i muscoli ciliari diminuendo la curvatura della lente in modo da ottenere distanze focali minori. La **distanza ottimale (visione distinta)** fra oggetto ed occhio è, in media, di $d_0 = 25\text{cm}$, questa distanza aumenta con l'invecchiamento della persona, a causa di una maggior rigidità dei muscoli ciliari (**presbiopia**).

Un occhio **miope**, è un occhio in cui l'immagine - a causa di difetti anatomici tipo eccessiva curvatura della cornea o del cristallino, oppure eccessiva lunghezza della cavità oculare - invece di formarsi sulla retina, si forma in un punto che si trova davanti alla retina. Un occhio miope riesce a mettere a fuoco sulla retina solo le immagini di oggetti vicini, mentre le immagini di oggetti a distanze maggiori risultano confuse. Per correggere il difetto della miopia è necessaria una lente correttiva divergente.

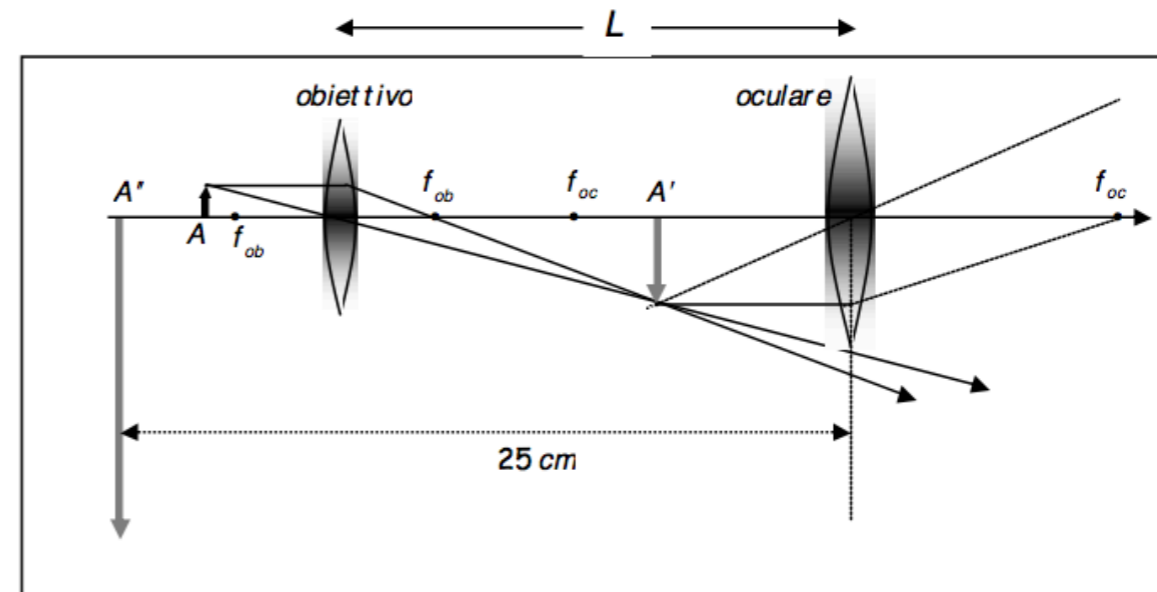
Al contrario, il difetto visivo per cui l'immagine si forma in un punto che si trova al di là della retina, prende il nome di **ipermetropia**, quando la causa sono dei difetti anatomici costituzionali, o di **presbiopia**, quando la causa è, come abbiamo visto, l'invecchiamento fisiologico dei muscoli ciliari. In questi casi il cristallino riesce a focalizzare bene le immagini di oggetti lontani, ma non riesce a mettere a fuoco oggetti vicini. Per correggere questo difetto occorrerà porre davanti all'occhio una lente convergente.

Il difetto dell'**astigmatismo**, infine, è dovuto a irregolarità nei raggi di curvatura delle varie sezioni del cristallino ed è quello meno facilmente correggibile.

MICROSCOPIO

È costituito nel caso più semplice da una prima lente convergente con focale f_{ob} (obiettivo) e da una seconda lente con focale f_{oc} che può essere convergente (oculare positivo) o divergente (oculare negativo) montate all'estremità di un tubo lungo L .

Fig. 62. Ricostruzione dell'immagine da un microscopio con oculare positivo.



L'oggetto da osservare è posto in prossimità dell'obiettivo ad una distanza A appena maggiore della distanza focale f_{ob} , pertanto l'obiettivo forma un'immagine reale capovolta nel punto A' . Questa immagine funge da oggetto per la seconda lente. La posizione dell'oculare è tale per cui il punto A' viene a trovarsi ad una distanza dall'oculare inferiore alla sua distanza focale e quindi l'oculare formerà un'immagine virtuale ingrandita. Lo strumento è costruito in modo che l'immagine finale che si forma in A' venga a trovarsi ad una distanza $d_0 = 25\text{ cm}$ (punto della visione distinta) dall'occhio dell'osservatore posto in prossimità dell'oculare.

L'**ingrandimento** lineare definito come il rapporto tra le dimensioni dell'immagine e dell'oggetto è dato dal prodotto dell'ingrandimento delle due lenti:

$$G = G_{ob} \cdot G_{oc} = \frac{q_{ob}}{p_{ob}} \cdot \frac{q_{oc}}{p_{oc}} \cong \frac{L - f_{oc}}{f_{ob}} \cdot \left(\frac{25\text{ cm}}{f_{oc}} + 1 \right)$$

Per esempio con $f_{ac} = f_{ab} = 1\text{ cm}$ ed $L = 16\text{ cm}$ si otterrebbe $G = 390$.