Esperimentazioni 2

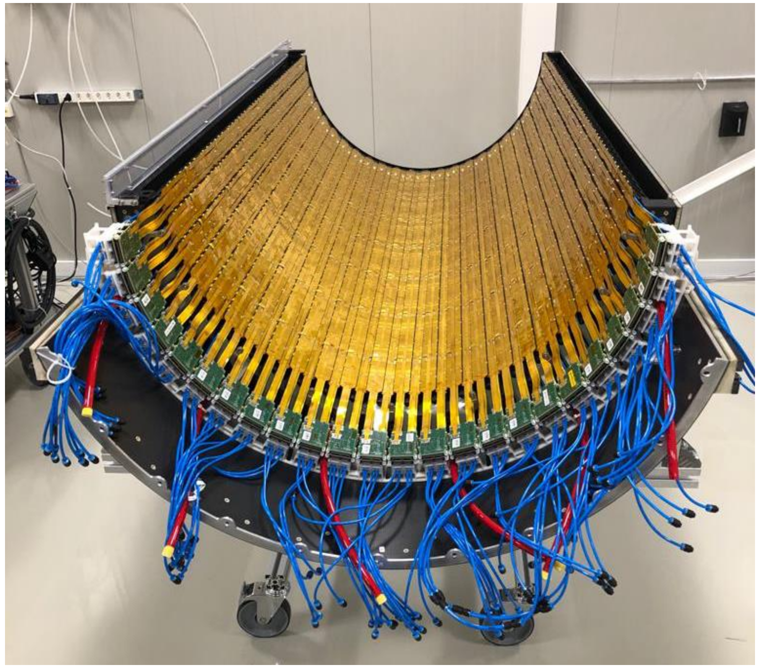
A.A. 2024/25 Ottica e Fisica Moderna

Docenti e contatti

- Maxim Alekseev, Stefania Beolé, Michela Chiosso
- Stefania Beolé:
  - UFFICIO: 1 piano istituto vecchio, tel 0116707368
  - CONTATTI: email: stefania.beole@unito.it skype: stefania.beole
    webex: https://unito.webex.com/meet/stefania.beole
  - RICEVIMENTO: in orario flessibile, previo appuntamento. Ma se bussate e sono in ufficio siete sempre benvenuti

Foto di Stefania Beolé fatta con rivelatore ALPIDE (CMOS MAPS particle detector)

- Attività di Ricerca:
  - Progettazione e costruzione di rivelatori a stato solido di particelle cariche per sistemi di tracciamento e tempo di volo
    - Monolithic Active Pixel sensors
    - Silicon Drift Detectors
  - Esperimento ALICE a CERN LHC
  - Esperimento Limadou2 su satellite



semi cilindro dell'ITS di ALICE

Struttura del corso

Lezioni introduttive

- Argomenti: richiami di ottica geometrica, ottica fisica e descrizione degli strumenti e delle esperienza

Esperimentazioni in laboratorio

- Misura della distanza focale di un sistema di lenti
- Misura dell'indice di rifrazione del vetro in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente con il metodo della deviazione minima in un prisma equilatero
- Verifica della legge di Malus;
- Misura della concentrazione di zucchero in un liquido con il Polarimetro di Laurent
- Interferometro di Michelson & Morley
- Misura della costante di Planck
- Osservazione di fenomeni di interferenza e diffrazione con fenditure e reticoli
- Misura del coefficiente di assorbimento di un liquido;

Introduzione

Il corso si propone di verificare fenomeni di ottica (geometrica e fisica) attraverso esperienze di laboratorio

Ogni esperienza prevede di utilizzare strumenti ottici semplici (lenti, prismi, reticoli, filtri polarizzanti,...) e complessi (canocchiali, polarimetri, spettroscopi,...)

La metodologia seguita per l'acquisizione dei dati dipende dalla singola esperienza: alcune prevedono misure ripetute, altre misure singole.

Lo studio degli errori risulta particolarmente critico e le sorgenti di errore verranno discusse nel dettaglio per ogni caso specifico

TESTO consigliato: Fisica II, Mazzoldi Nigro Voci -

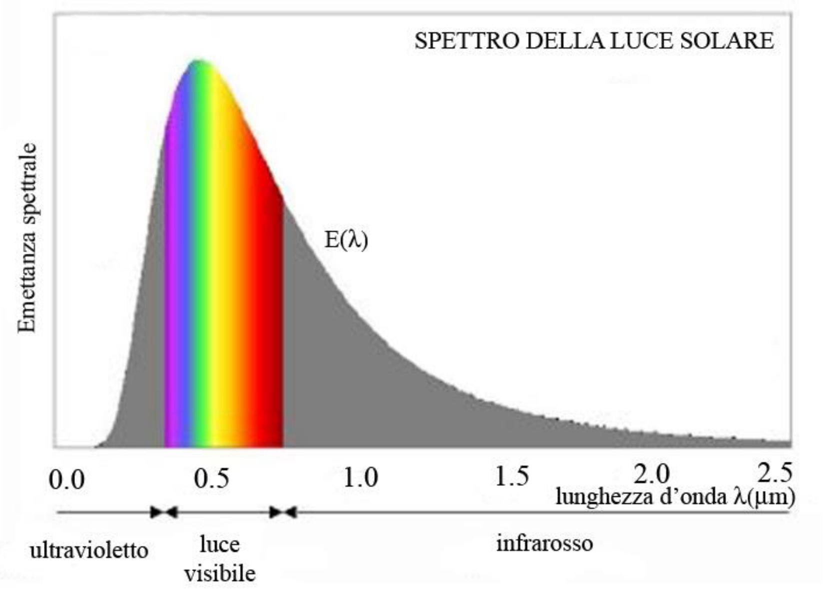
qualunque testo di Ottica in vostro possesso puo' essere usato come riferimento per la preparazione dell'esame

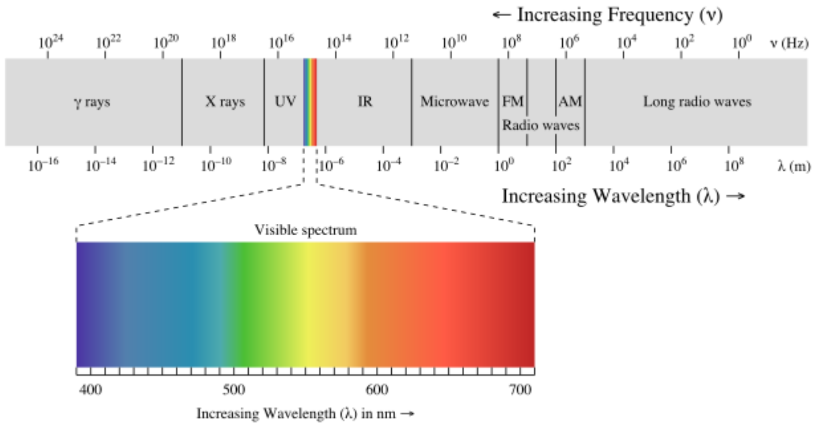
Lezione 1

La propagazione della luce

La luce visibile

- Le esperienze verranno svolte sfruttando sorgenti di luce visibile: la luce visibile consiste nella parte dello spettro della radiazione elettromagnetica compresa tra 400 e 700nm
- E' centrata sul picco dello spettro di emissione del sole
- Tra le diverse possibili sorgenti di luce utilizzeremo sorgenti che possono generare spettri continui (a incandescenza, alogene), spettri a righe (lampade a gas) oppure monocromatiche (laser o led)



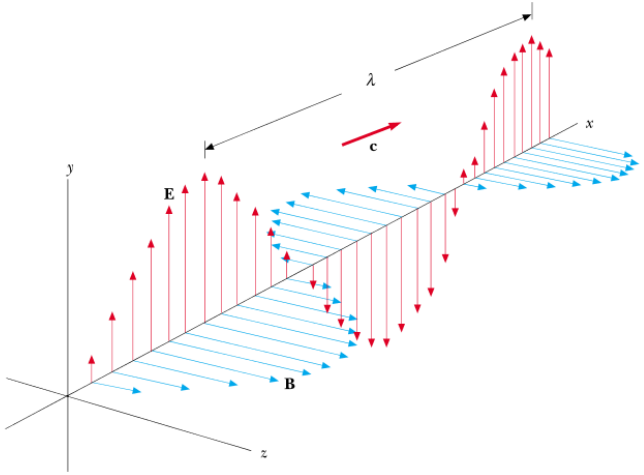


Onde elettromagnetiche

- L'esistenza delle onde elettromagnetiche fu prevista da Maxwell, il quale dimostrò come in effetti esse siano contenute nelle *equazioni integrali* , valide nello *spazio vuoto senza cariche e correnti*

$$\text{I} \quad \oint \mathbf{E}\cdot\mathbf{u}_n\, d\Sigma = 0 \qquad\qquad \text{II} \quad \oint \mathbf{B}\cdot\mathbf{u}_n\, d\Sigma = 0$$

$$\text{III} \quad \oint \mathbf{E}\cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi(\mathbf{B})}{dt} \qquad\qquad \text{IV} \quad \oint \mathbf{B}\cdot d\mathbf{s} = \epsilon_0\,\mu_0\,\frac{d\Phi(\mathbf{E})}{dt}$$



- La prova sperimentale dell'esistenza delle onde elettromagnetiche è dovuta a Hertz (1888). Per generarle Hertz usò sorgenti elettriche, ovvero dispositivi in cui le cariche elettriche di un conduttore venivano poste in rapida oscillazione
- consideriamo onde elettromagnetiche piane, onde per le quali, fissata una certa direzione di propagazione x il campo elettrico E(x,t) e il campo magnetico B(x,t) risultano costanti nel piano yz , in ciascun istante.
- La soluzione della prima e seconda equazione di Maxwell in queste ipotesi mostra che il campo elettrico E(x,t) e il campo magnetico B(x,t) devono avere necessariamente componente nulla rispetto all'asse x ,

$E_x(x,t)=B_x(x,t) = 0$

- onde elettromagnetiche piane: trasversali rispetto alla direzione di propagazione.

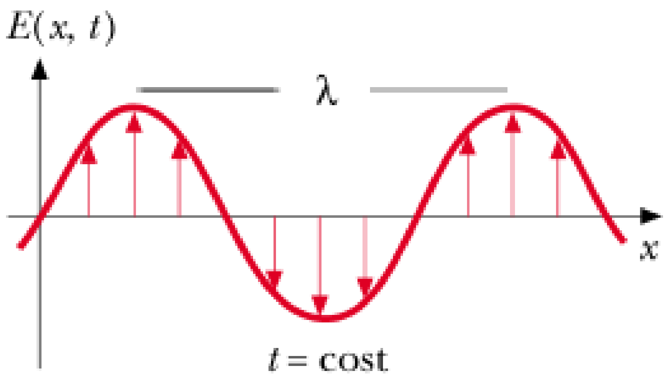
Onde piane armoniche: campo elettrico E

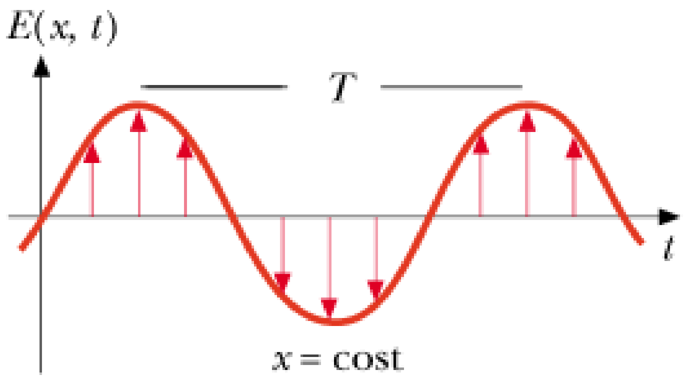
- Funzione d'onda:

$$E(x,\,t) = E_0 \,\mathrm{sen}\, k\,(x - v\,t)$$

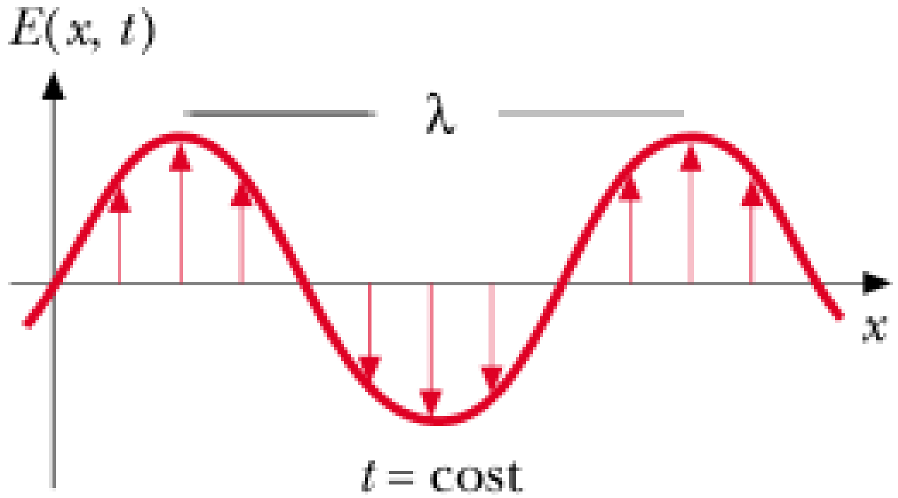
$$E(x,\,t) = E_0 \,\mathrm{sen}\,(kx - \omega t)$$

  - Ampiezza: E_0
  - numero d'onda: k
  - velocità di propagazione v
  - pulsazione ω = k v





Lunghezza d'onda



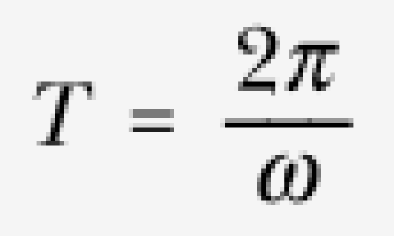
- Se fissiamo un determinato istante t_0 la funzione d'onda rappresenta, in quell'istante, il valore della funzione d'onda $E(x, t_0)$ in tutti i punti dell'asse *x:*
  - sinusoide nella variabile *x*
  - si ripete identica per ogni coppia di punti consecutivi x_1 e x_2 tali che $k(x_2 - x_1) = 2\pi$.
- La distanza $\lambda = x_2 - x_1$ data da:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \qquad \left(\Rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda} \right)$$

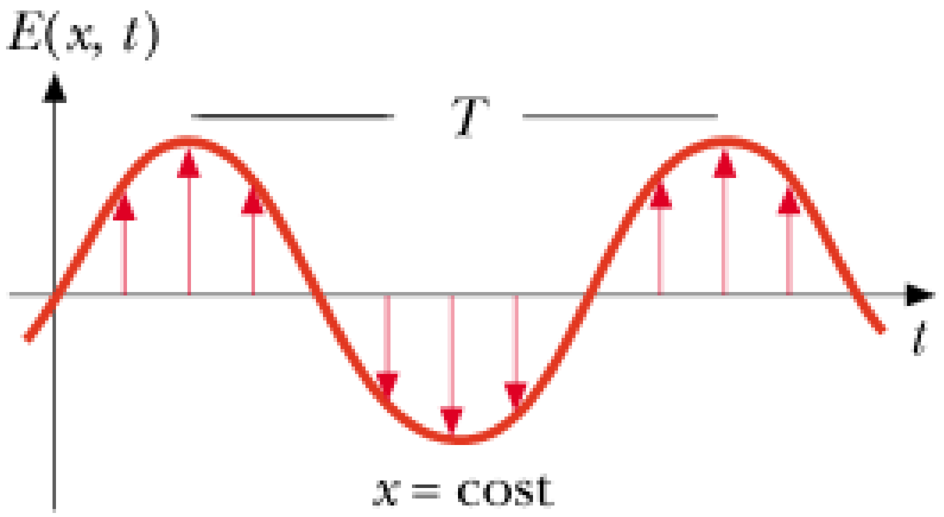
è detta **lunghezza d'onda** dell'onda armonica

Periodo dell'onda

- Se fissiamo una determinata posizione $x = x_0$ possiamo studiare nel punto di coordinata x_0 , la variazione nel tempo della funzione d'onda $E(x_0, t)$.
  - Variazione armonica ->
  - la funzione d'onda ha lo stesso valore in t_1 e t_2 tali che $\omega(t_2 - t_1) = 2\pi$
- L'intervallo di tempo $T = t_2 - t_1$ è il **periodo** dell'onda armonica ed è legato alla pulsazione dalla relazione



$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

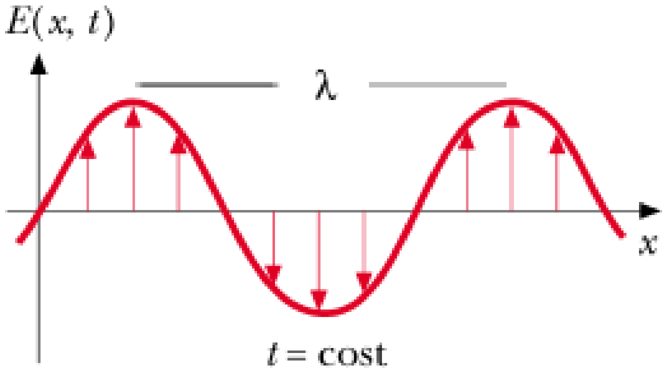


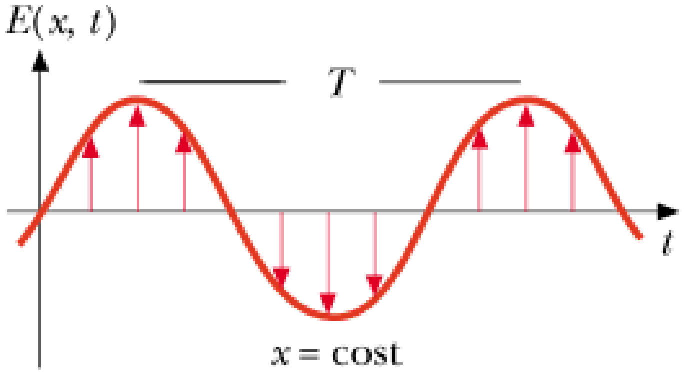
La velocità di propagazione dell'onda si può esprimere in termini di periodo e lunghezza d'onda come:

$$v = \frac{\lambda}{T}$$

Onde piane armoniche:

- Funzione d'onda: $E(x, t) = E_0 \,\mathrm{sen}(kx - \omega t)$
- le grandezze caratteristiche di un'onda chiaramente *non sono indipendenti*.
  - il periodo *T*, la frequenza ν=1/T, la pulsazione ω sono determinate *solamente* dalle caratteristiche della *sorgente*
  - se ad esempio la sorgente delle onde elettromagnetiche fosse un circuito risonante *LC* , allora $\omega = 1/\sqrt{LC}$
- Invece la velocità di propagazione e quindi λ e k, dipendono dal mezzo in cui si propaga l'onda:
  - vuoto: v=c
  - mezzo: v=c/n   (n= indice di rifrazione del mezzo)

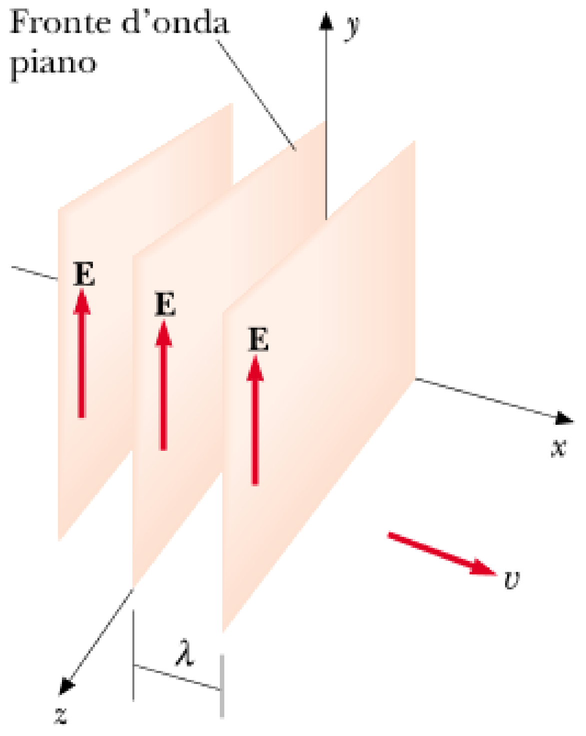




$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 2.99792 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Fronte d’onda piano

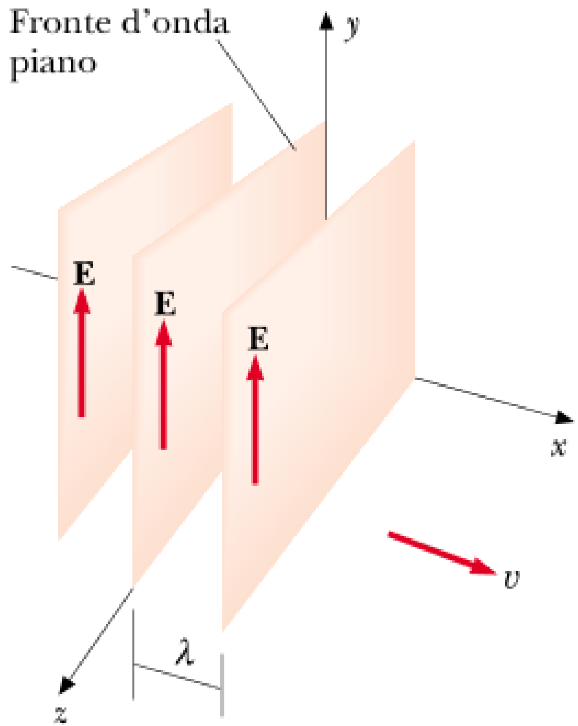
- La propagazione di un’onda elettromagnetica piana può essere descritta partendo dal concetto di **fronte d’onda** .
- FIGURA: il piano, che interseca l’asse *x* in una generica posizione, è il luogo dei punti nei quali il campo elettrico ha lo stesso valore
  - Definiamo ϕ = **fase dell’onda** = argomento della funzione d’onda
  - **ϕ ha nei punti del piano lo stesso valore** -> il piano si chiama ***fronte d’onda***

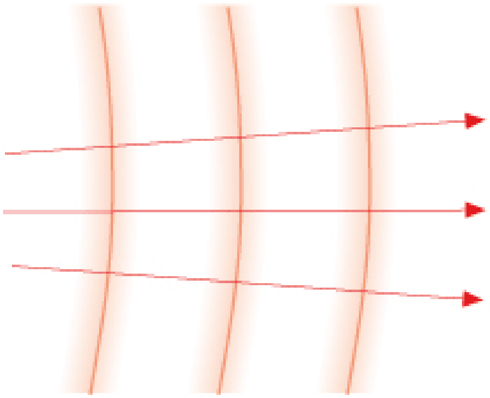


$$\phi = kx - \omega t$$

Fronte d’onda

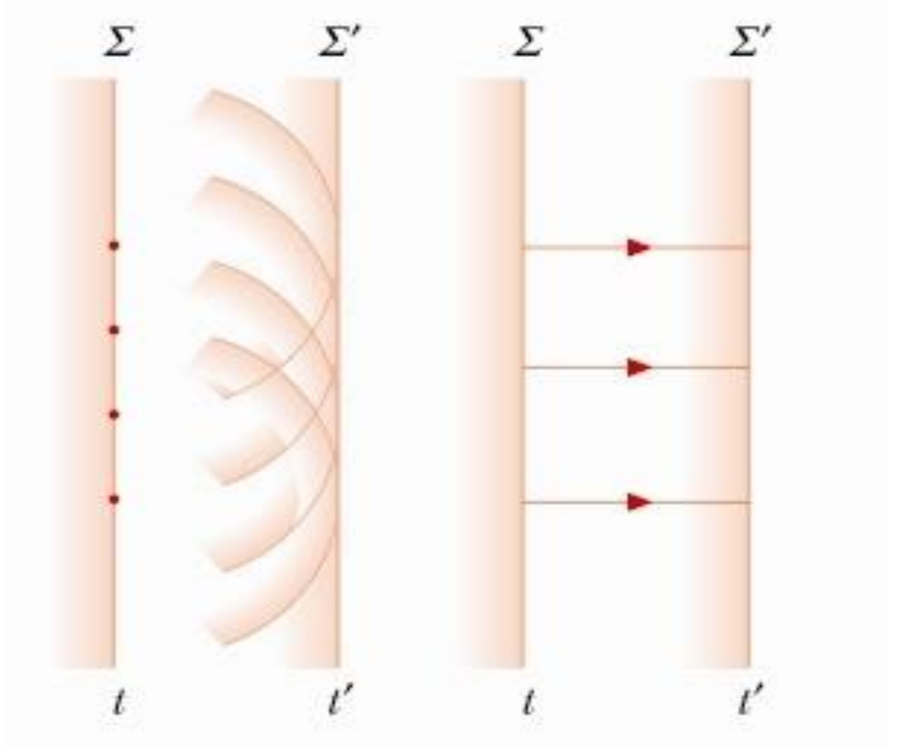
- Il secondo piano, distante λ dal primo, ripete la stessa identica situazione con uno sfasamento di 2π e così il terzo rispetto al secondo. Possiamo dire che un qualsiasi fronte d’onda piano si sposta, sempre rimanendo perpendicolare alla direzione di propagazione, con velocità **v** percorrendo in un tempo ***T*** la distanza **λ**.
- La nozione di fronte d’onda si generalizza a onde non piane, conservando il **significato di superficie nei cui punti la fase in un certo istante è costante**.

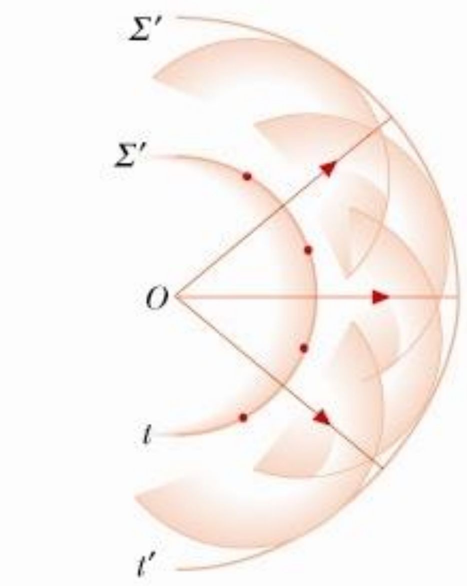




La propagazione della luce (1)

- Consideriamo un fronte d’onda, piano, sferico ecc... Una **linea ortogonale al fronte d’onda** in un punto rappresenta, in quel punto, la **direzione di propagazione dell’onda**
  - Il principio di Huygens-Fresnel, giustificato formalmente dal teorema di Kirchoff, consente di determinare fronti d’onda a istanti successivi
- In un **mezzo isotropo** la luce di propaga per raggi rettilinei, ortogonali ai fronti d’onda che sono comunemente definiti “raggi luminosi”
  - Una sorgente isotropa emetterà raggi in ogni direzione

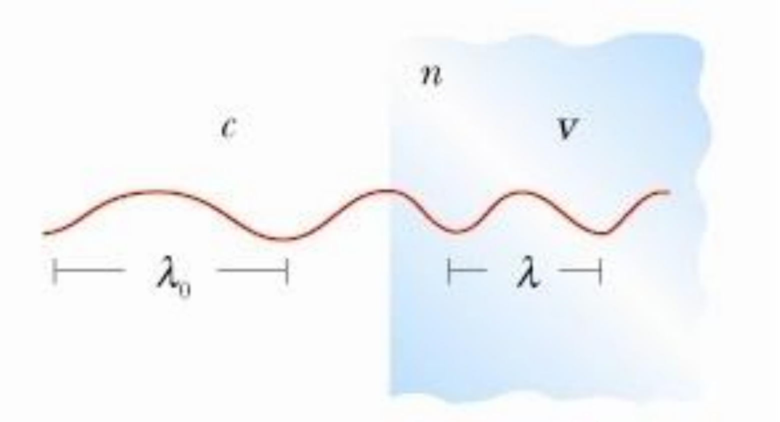




La propagazione della luce nei mezzi

Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

- Le onde elettromagnetiche possono propagarsi anche in mezzi materiali che abbiano determinate caratteristiche:
- ***mezzi dielettrici ideali***, materiali aventi proprietà magnetiche trascurabili
  - $\chi_m = 0$, $\kappa_m = 1$, $\mu = \mu_0$
  - caratterizzati dalla costante dielettrica relativa κ_e
- la teoria di Maxwell prevede che in questi mezzi possano propagarsi onde elettromagnetiche piane, con velocità



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

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\kappa_e}} = \frac{c}{n},$$

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\kappa_e}$$

l'indice di rifrazione n assume valori >1

aria secca: n~1

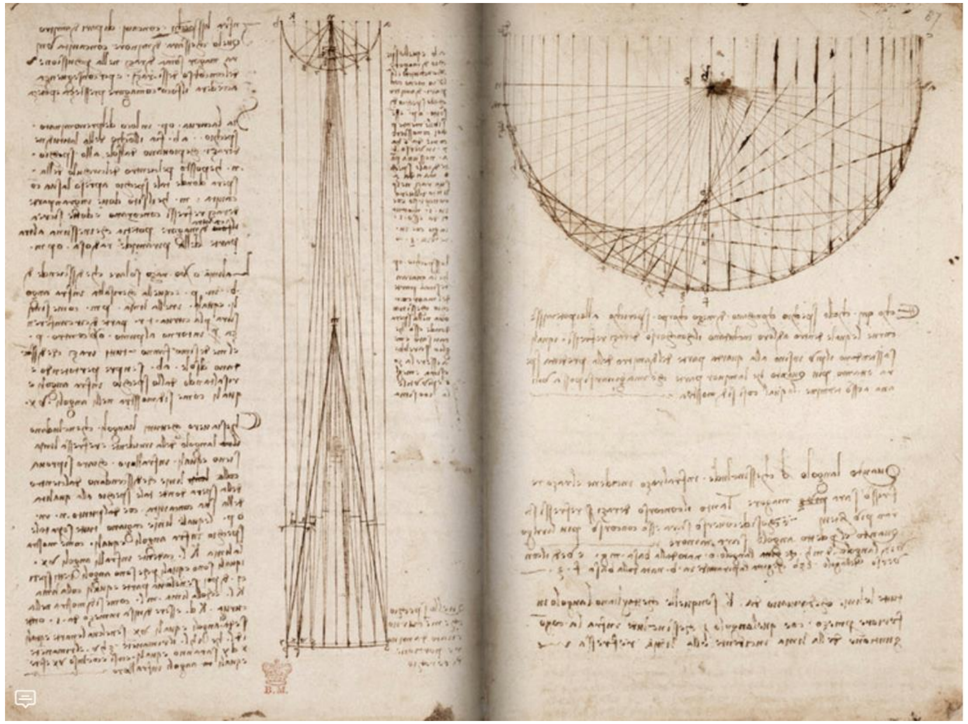
acqua: 1.33

vetro: 1.4-1.6

χ_m = suscettività magnetica K_m: permeabilità magnetica relativa = B/B_0

Ottica geometrica

- E’ il ramo più antico dell’ottica (Euclide III secolo AC)
- descrive la propagazione della luce in uno o più mezzi trasparenti
- studia le proprietà degli strumenti ottici
- le leggi dell’ottica geometrica restano valide fintanto che la luce interagisce con oggetti di dimensione molto maggiore della sua lunghezza d’onda

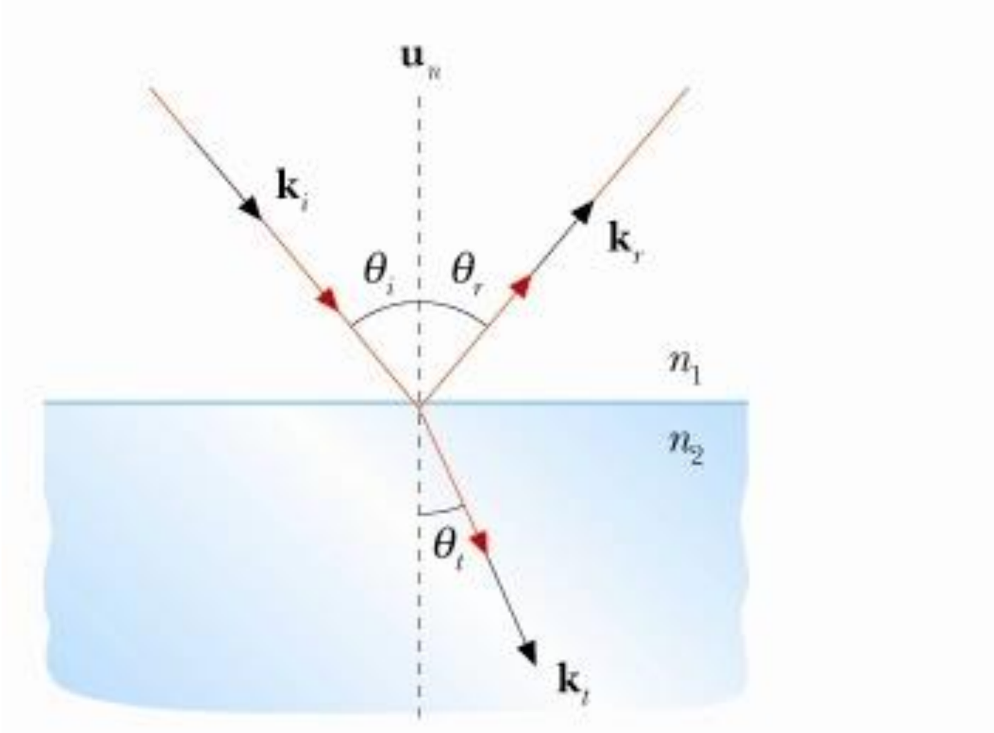


Ottica geometrica: legge della riflessione

- Consideriamo la superficie di interfaccia tra 2 mezzi con indici di rifrazione diversi, n1 e n2
- Il piano di incidenza è definito dalle direzioni del raggio incidente, di quello riflesso e di quello trasmesso
- Si definiscono gli angoli di incidenza, riflessione e trasmissione (o rifrazione) rispetto alla normale alla superficie di separazione

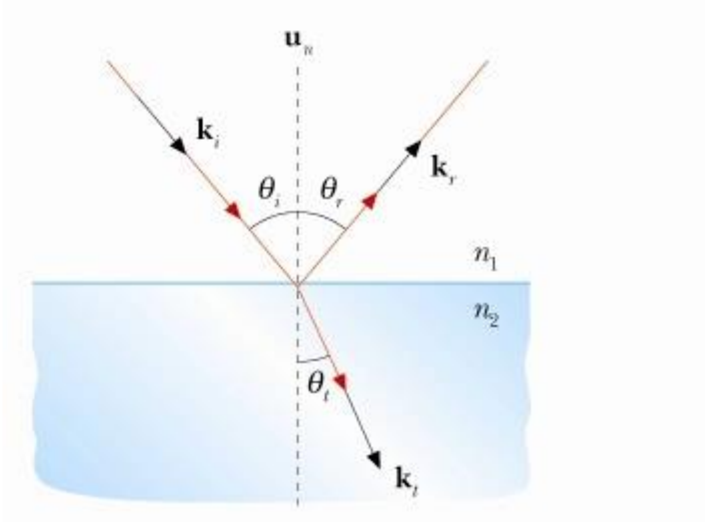
Prima legge di Snell: l'angolo di incidenza è uguale all'angolo di riflessione

$$\boldsymbol{\theta_i = \theta_r}$$



Ottica geometrica: legge della rifrazione

- Siano n1 e n2 gli indici di rifrazione del primo e del secondo mezzo
- Siano θ_i l'angolo di incidenza e θ_t l'angolo di rifrazione (trasmissione)



seconda legge di Snell:

$$\boldsymbol{n_1 \sin\theta_i = n_2\, sin\,\theta_t}$$

si evince che l'angolo di rifrazione sarà

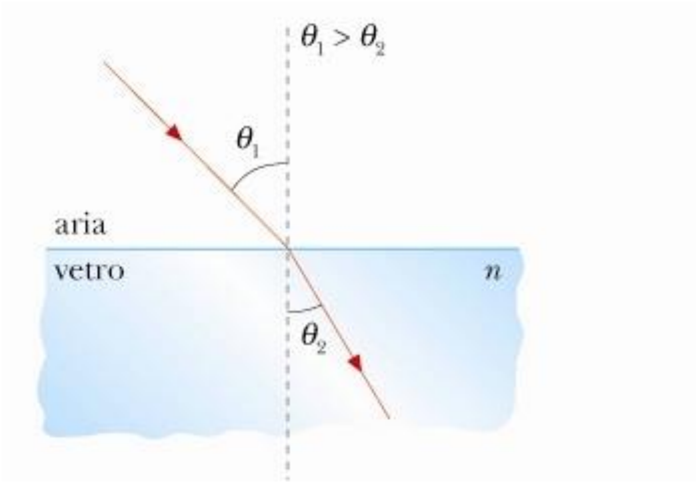
- minore dell'angolo di incidenza quando $n_2>n_1$
- maggiore dell'angolo di incidenza quando $n_2<n_1$

Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

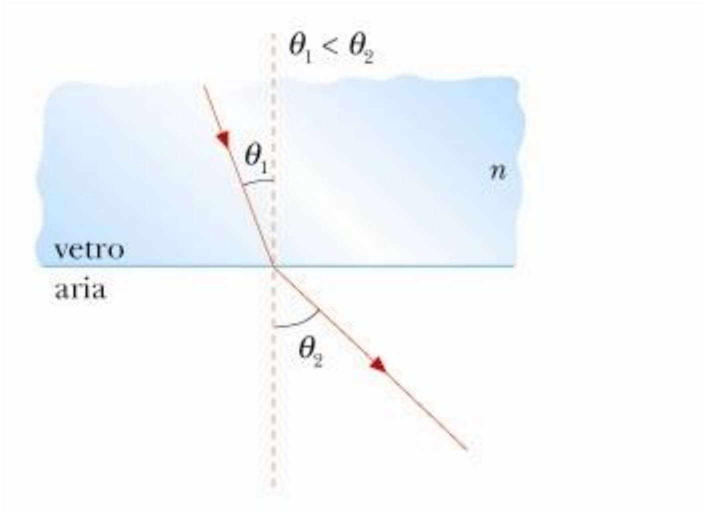
Rifrazione

Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

- Passaggio aria vetro



- Passaggio vetro aria



Ovviamente l’angolo di rifrazione varia a seconda che il passaggio della luce avvenga da un mezzo con n maggiore a uno con n minore o viceversa

l’angolo di rifrazione sarà

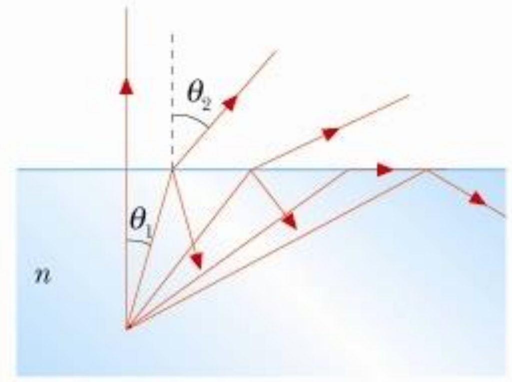
- minore dell’angolo di incidenza quando $n_2>n_1$
- maggiore dell’angolo di incidenza quando $n_2<n_1$

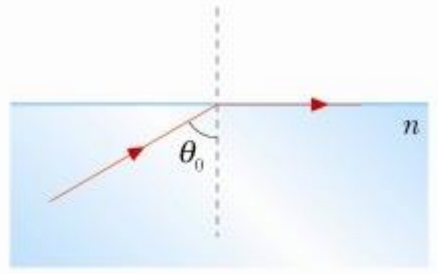
Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

riflessione totale

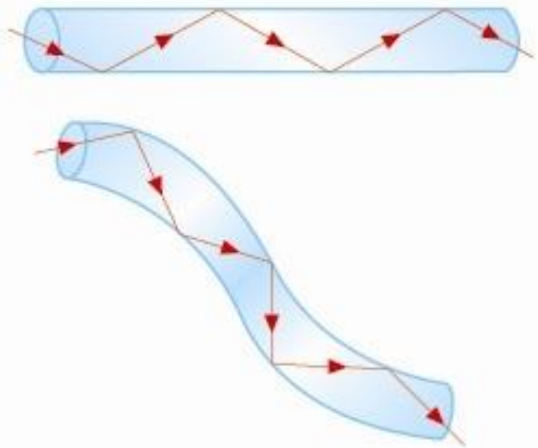
- quando il passaggio avviene da un mezzo otticamente + denso a uno meno denso, come nel caso vetro-aria, l'angolo di rifrazione θ_t assume il valore massimo di 90° in corrispondenza di un angolo di incidenza definito ***angolo limite***

$$\theta_{lim} = arcsin\frac{n_2}{n_1}$$

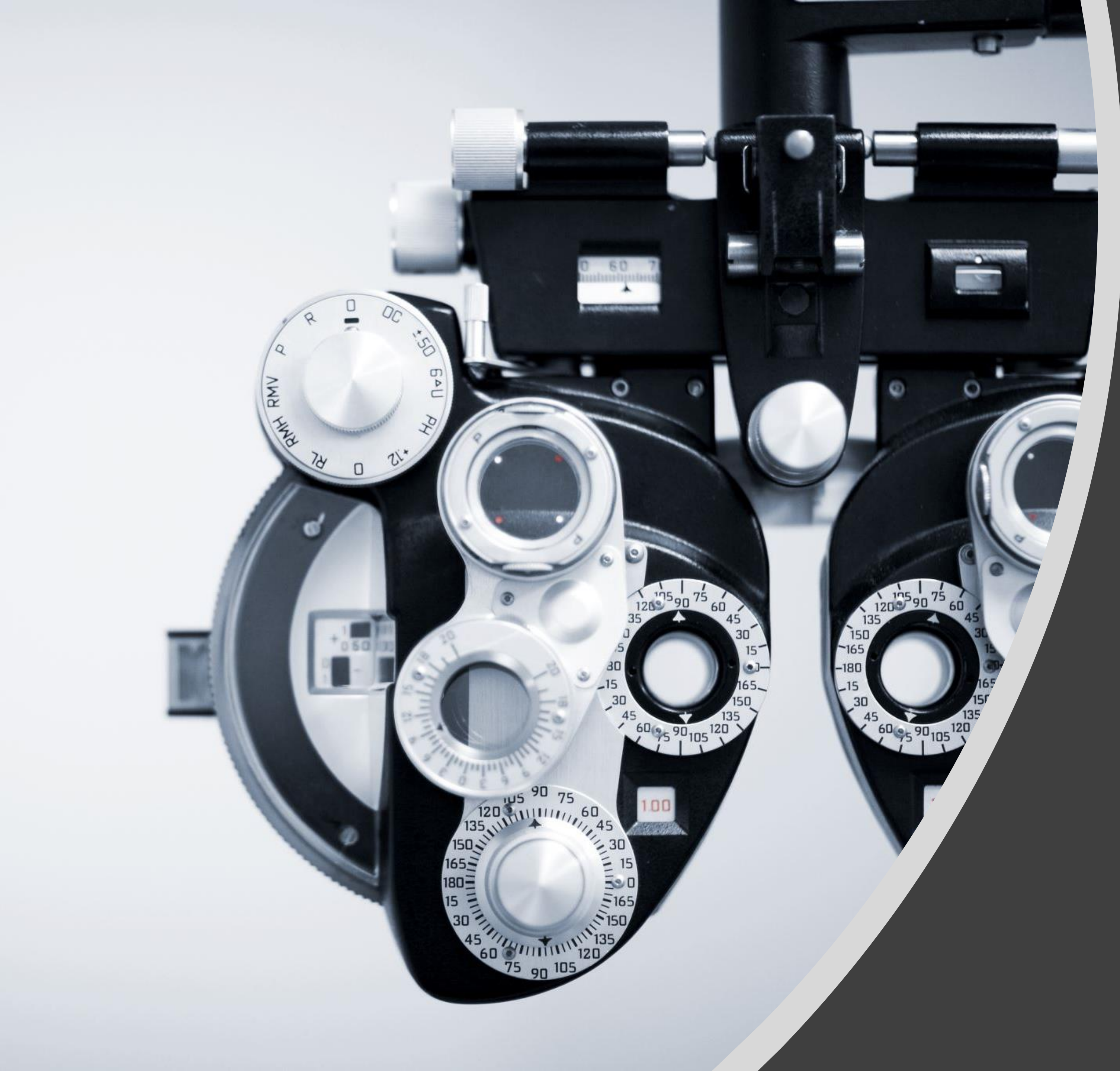




angolo limite



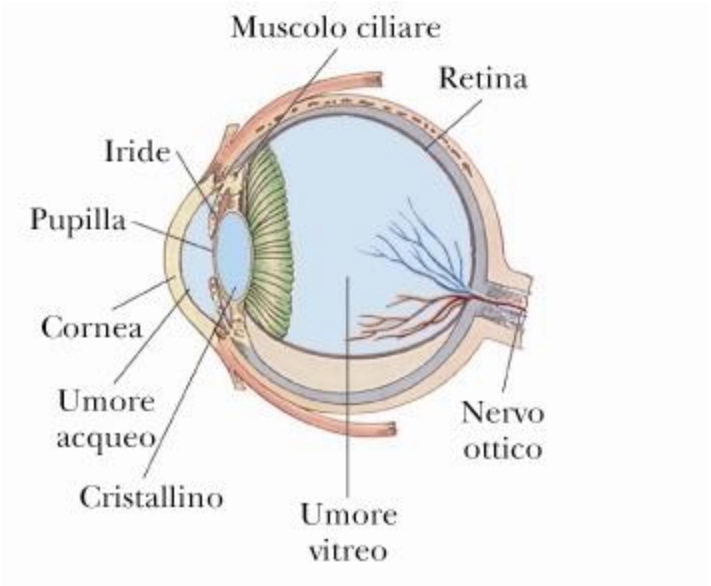
fibre ottiche

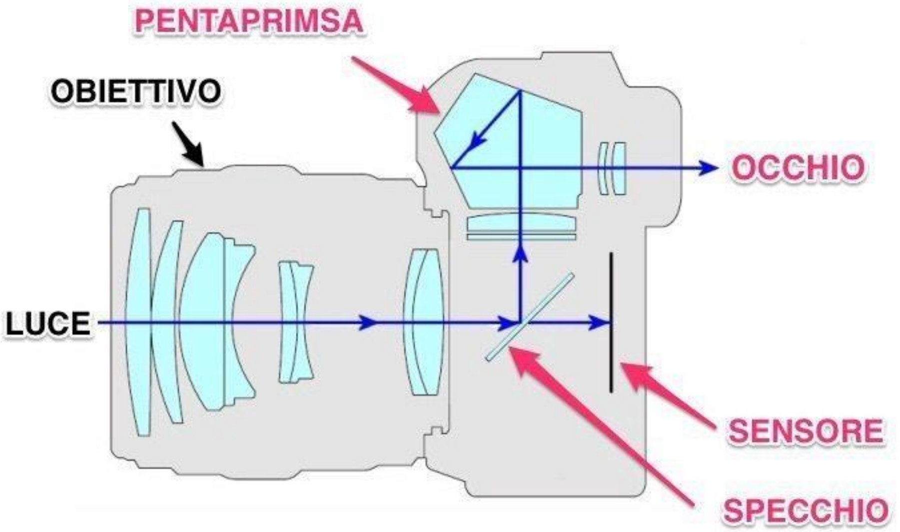


Sistemi ottici

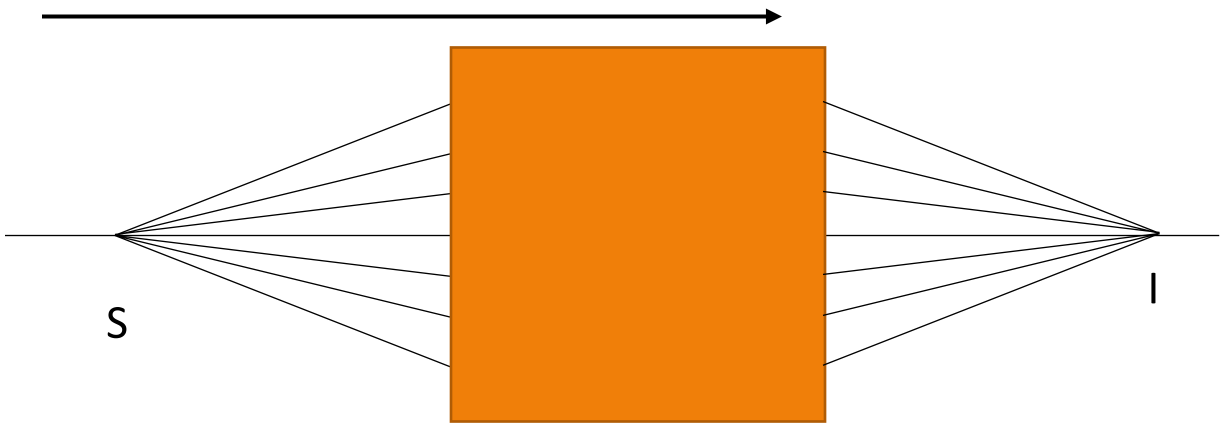
Sistemi ottici

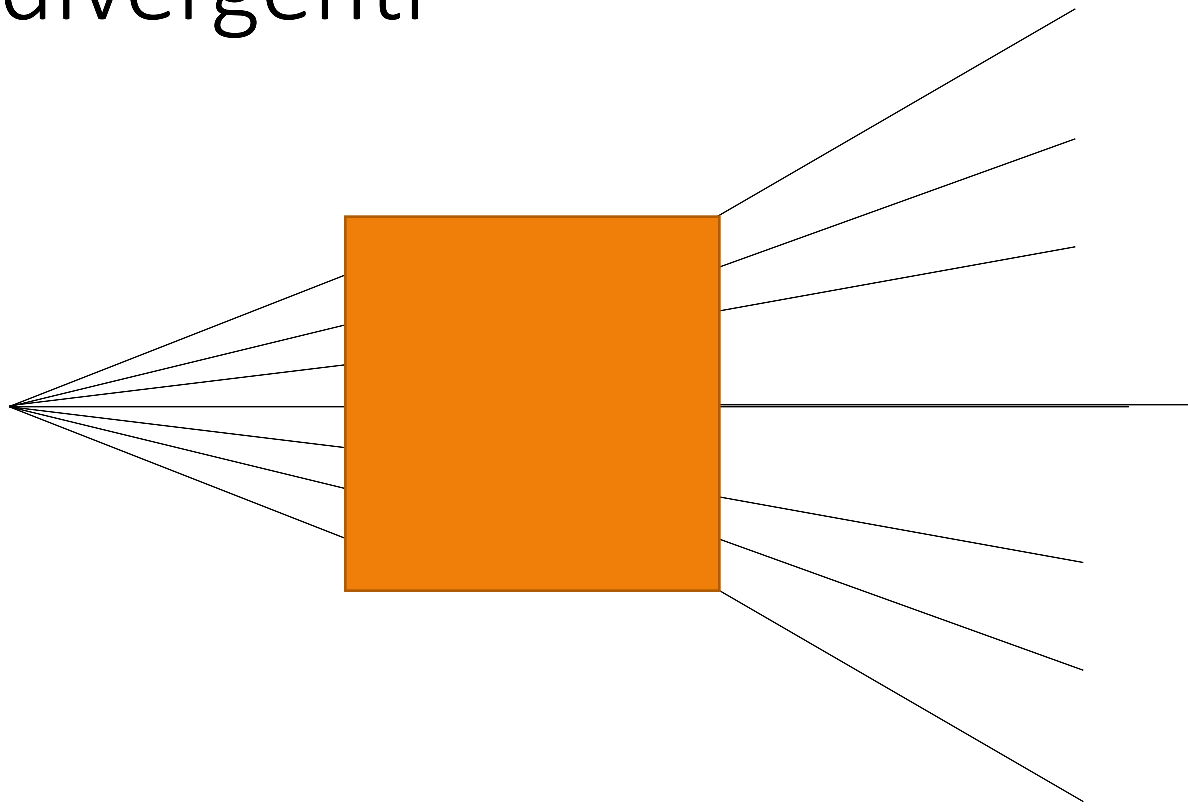
- La propagazione dei raggi luminosi avviene tipicamente attraverso mezzi diversi. L'insieme dei mezzi e delle superfici che li separano definisce un sistema ottico
- Un sistema ottico può essere composto da diversi elementi posti in successione lungo il percorso dei raggi luminosi
- Esempi:
  - macchina fotografica
  - telescopio
  - occhio umano





Sistemi ottici convergenti e divergenti

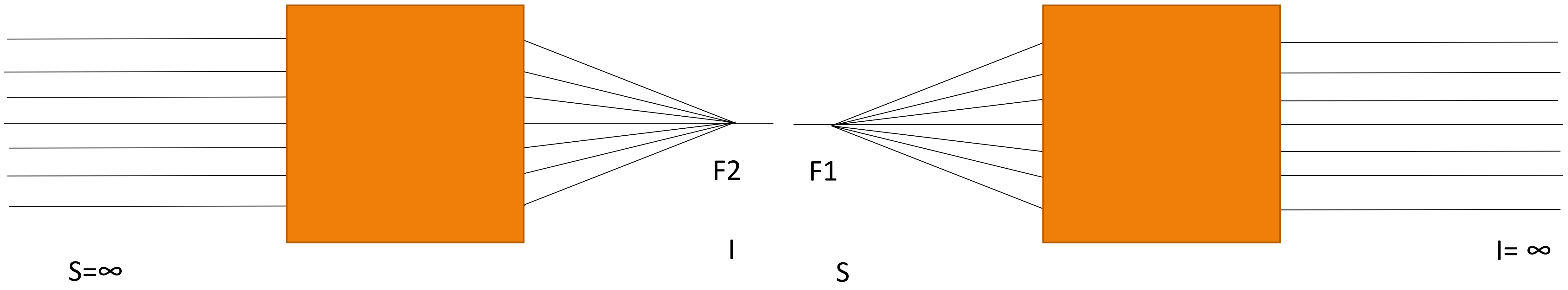




- Sistema convergente: raggi provenienti da sorgente puntiforme convergono in un punto detto immagine

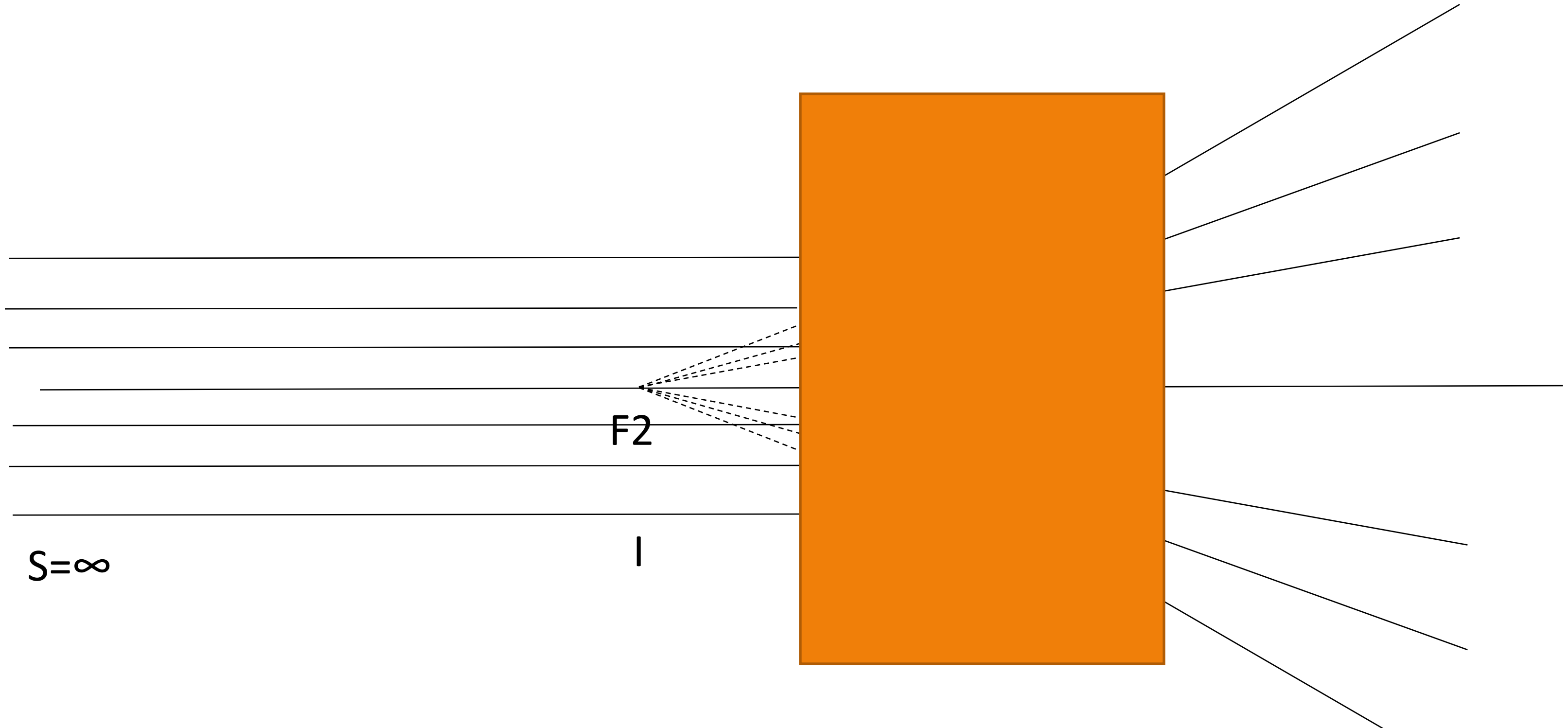
- Sistema divergente: raggi divergono e non si forma un’immagine

Sistemi convergenti: fuochi



- Secondo fuoco di un sistema convergente: punto in cui convergono i raggi provenienti da una sorgente posta all'infinito
- Primo fuoco ci un sistema convergente: punto da cui provengono i raggi la cui immagine si forma all'infinito

Sistemi divergenti: fuochi



- Secondo fuoco di un sistema convergente: punto in cui convergono i raggi provenienti da una sorgente posta all’infinito
- I raggi divergenti vengono prolungati all’indietro verso la direzione di provenienza
  - linee a tratto continuo: raggi reali
  - linee tratteggiate: raggi virtuali
- l’immagine si crea a sx del sistema ottico, nello spazio degli oggetti: IMMAGINE VIRTUALE

Sistemi ottici, definizioni e convenzioni

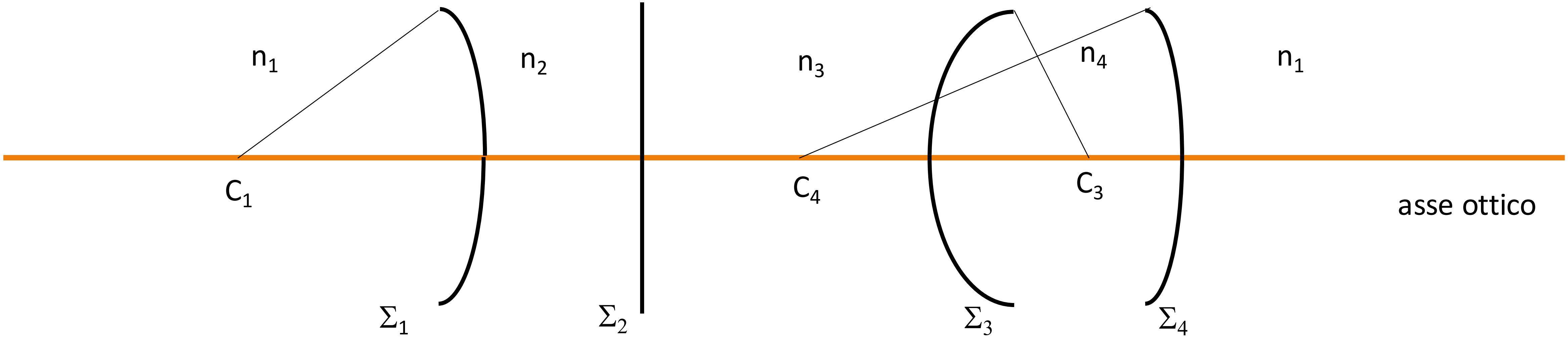
- Oggetto: corpo, puntiforme o esteso, che emette luce o la diffonde
- Immagine: punto in cui il sistema ottico fa convergere i raggi provenienti dall'oggetto
- Sistema stigmatico: sistema in cui tutti i raggi provenienti dall'oggetto convergono in un punto, detto immagine
- Oggetto e immagine sono detti punti coniugati
- L'immagine è reale quando formata da raggi reali, virtuale quando formata da prolungamenti virtuali dei raggi reali divergenti

Sistemi parassiali, approssimazione di Gauss

- La condizione di “stigmatismo” è difficile da raggiungere in un sistema ottico reale: l’immagine di un punto è quasi sempre estesa, non puntiforme
- Sotto certe condizioni è possibile ottenere un sistema quasi stigmatico
- l’insieme delle condizioni va sotto il nome di Approssimazione di GAUSS
  - asse ottico: asse di simmetria del sistema ottico
  - il fascio di raggi che incidono sul sistema ottico deve avere piccola apertura rispetto alle dimensioni del sistema (esempio: diametro della lente)
  - i raggi devono essere ragionevolmente parassiali, ovvero avere una piccola inclinazione rispetto all’asse ottico

Sistema ottico centrato: esempio

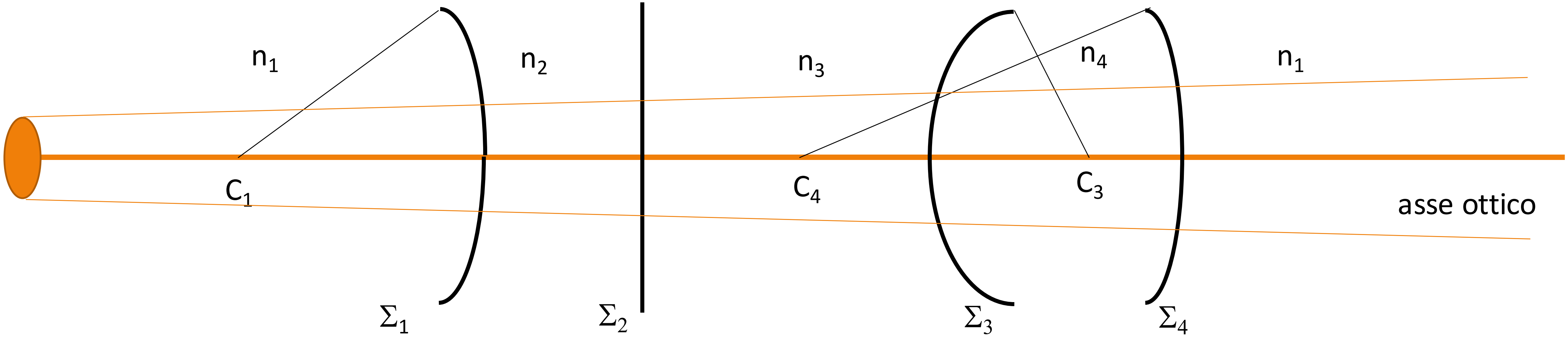
Supponiamo che il raggio si propaghi attraverso mezzi diversi, separati da diverse superfici



I centri di curvatura delle superfici giacciono sulla stessa retta che coincide con l'asse ottico

Sistema ottico centrato: esempio

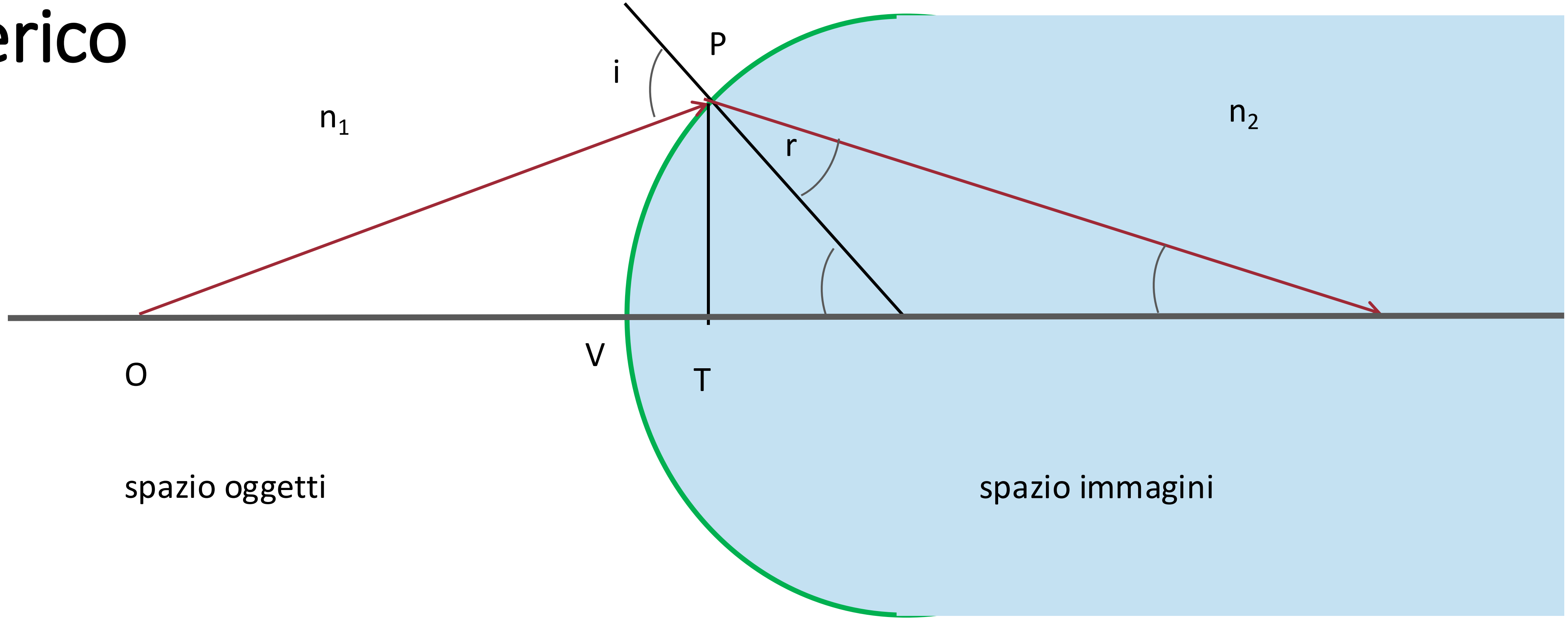
Supponiamo che il raggio si propaghi attraverso mezzi diversi, separati da diverse superfici



I centri di curvatura delle superfici giacciono sulla stessa retta che coincide con l'asse ottico

Approssimazione di Gauss: fascio di sezione inferiore alla dimensione delle superfici di separazione tra i mezzi, apertura angolare piccola (raggi parassiali)

Diottro sferico

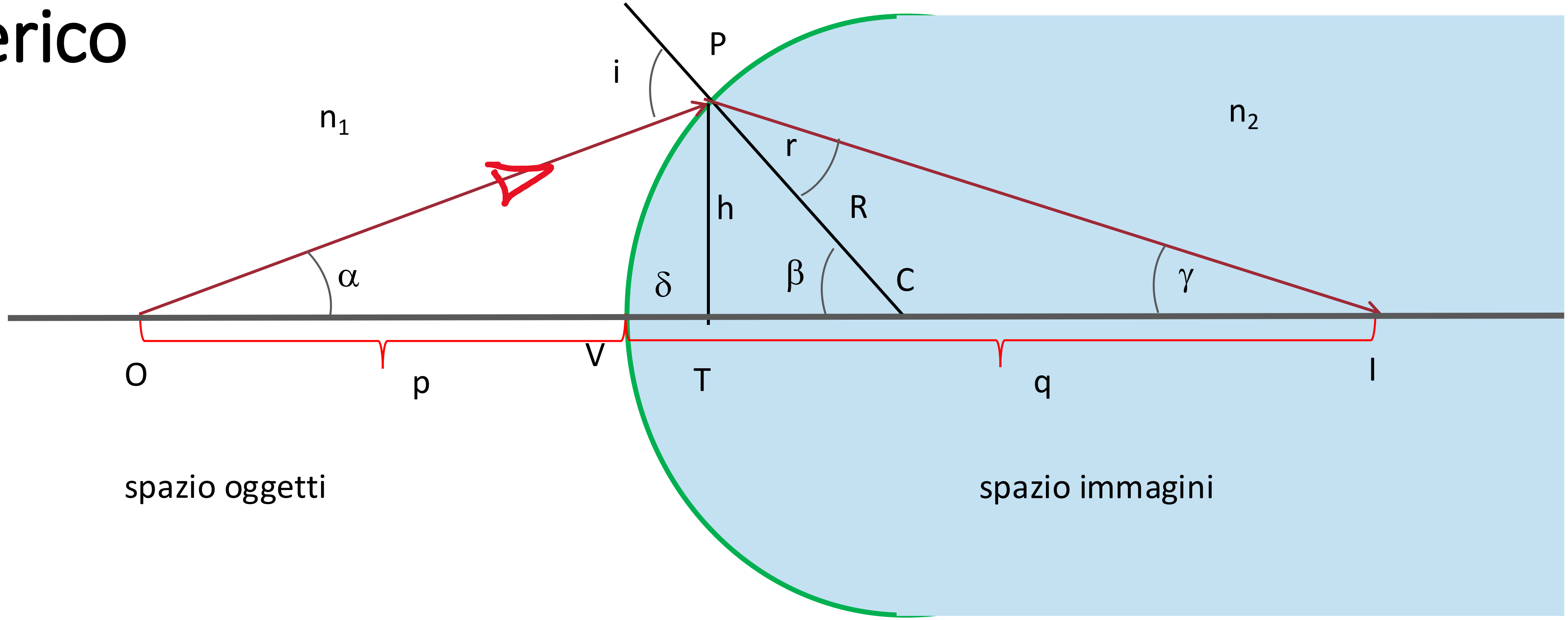


Un diottro sferico e' un sistema ottico costituito da due mezzi omogenei (di indice di rifrazione n_1 e n_2 diversi), trasparenti e isotropi, separati da una superficie sferica di raggio R

- l'asse ottico interseca la superficie sferica nel punto V. Questo punto e' preso come riferimento per la misura delle distanze
- O: oggetto

Consideriamo un raggio di luce che parte da O e incide sulla superficie S nel punto P

Diottro sferico

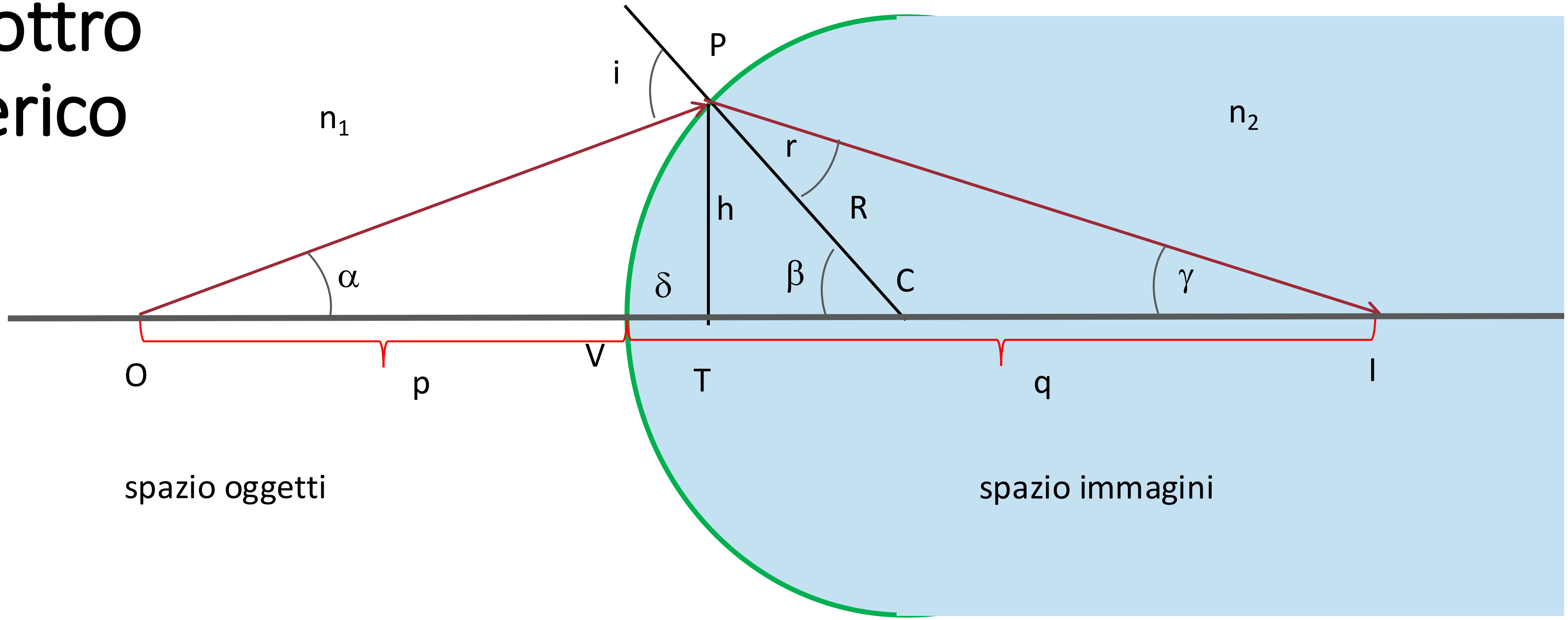


Un diottro sferico e' un sistema ottico costituito da due mezzi omogenei (di indice di rifrazione n_1 e n_2 diversi), trasparenti e isotropi, separati da una superficie sferica di raggio R

- l'asse ottico interseca la superficie sferica nel punto V. Questo punto e' preso come riferimento per la misura delle distanze
- O: oggetto

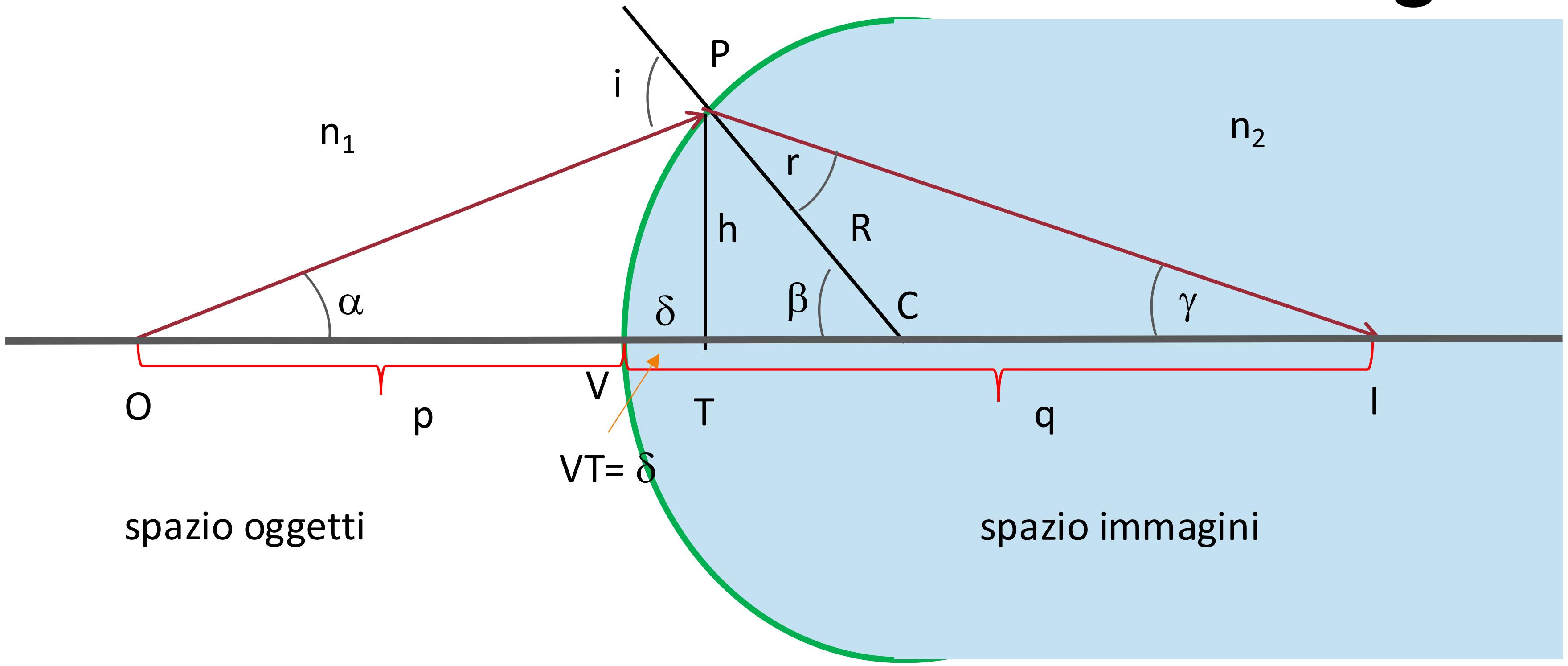
Consideriamo un raggio di luce che parte da O e incide sulla superficie S nel punto P

Diottro sferico



- *p* (distanza dell'oggetto dal diottro - OV):
  - \> 0 (oggetto reale) per oggetti che si trovano, nello *spazio di incidenza o spazio oggetti*;
  - < 0 (oggetto virtuale) per oggetti che si trovano, *spazio di trasmissione o spazio immagini*
- *q* (distanza dell'immagine dal diottro - VI):
  - \> 0 (immagine reale) per immagini nello spazio elle immagini o di i trasmissione ("dietro" la superficie di separazione);
  - < 0 (immagine virtuale) per immagini nello spazio degli oggetti, o di incidenza ("davanti" alla superficie di separazione)
- raggio di curvatura R :
  - \> 0 se il centro della superficie sferica e' nello spazio di trasmissione (diottro convesso: come in figura, n2>n1);
  - < 0 se il centro della superficie sferica e' nello spazio di incidenza (diottro concavo)

Diottro sferico: formazione dell'immagine



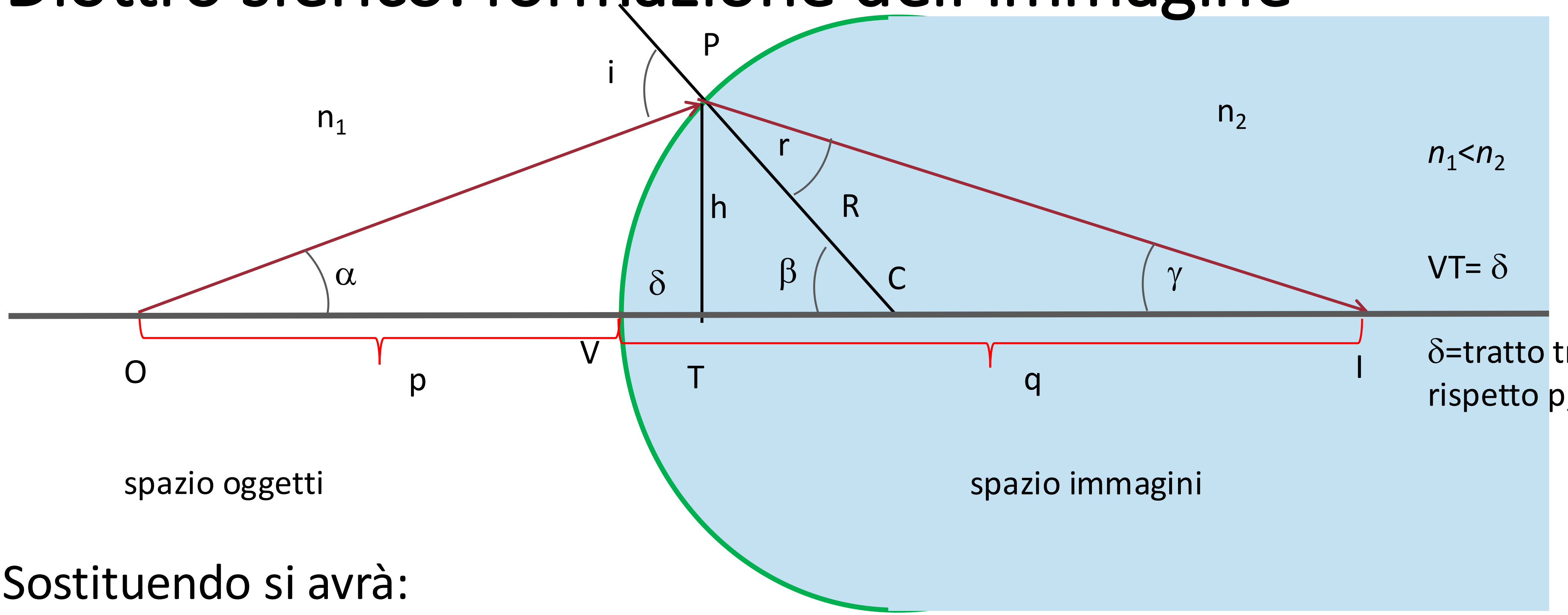
n_1<n_2

VT= δ

δ=tratto trascurabile rispetto p, q, R

- Consideriamo un generico raggio luminoso emesso dalla sorgente O con angolo α rispetto all'asse ottico; esso viene rifratto nel punto P e il raggio rifratto interseca l'asse ottico nel punto I.
- Posso applicare la legge di Snell nel punto P e scrivo n_1 seni=n_2 senr
- considerando le proprietà degli angoli si ricava che:
  - $i=\alpha+\beta$
  - $\beta=r+\gamma \rightarrow r=\beta-\gamma$

Diottro sferico: formazione dell'immagine



n_1<n_2

VT= δ

δ=tratto trascurabile rispetto p, q, R

Sostituendo si avrà:

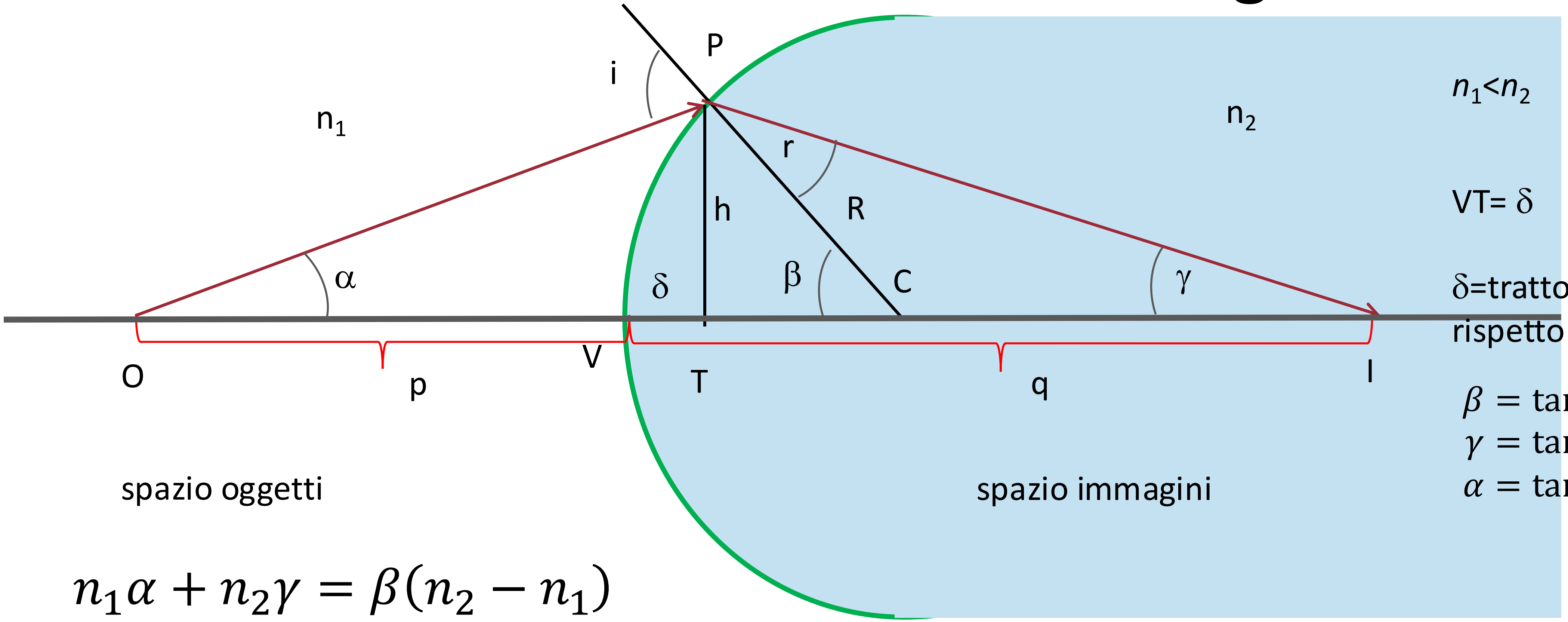
$$n_1 \sin(\alpha + \beta) = n_2 \sin(\beta - \gamma)$$

Ma considerando di essere nelle condizioni di validità dell'approssimazione di Gauss (sen $\alpha \cong \alpha \cong$ tg α) posso sostituire e ottengo:

$$n_1(\alpha + \beta) = n_2\,(\beta - \gamma)$$

da cui $$n_1\alpha + n_2\gamma = \beta(n_2 - n_1)$$

Diottro sferico: formazione dell'immagine



n_1<n_2

VT= δ

δ=tratto trascurabile rispetto p, q, R

$\beta = \tan\beta$
$\gamma = \tan\gamma$
$\alpha = \tan\alpha$

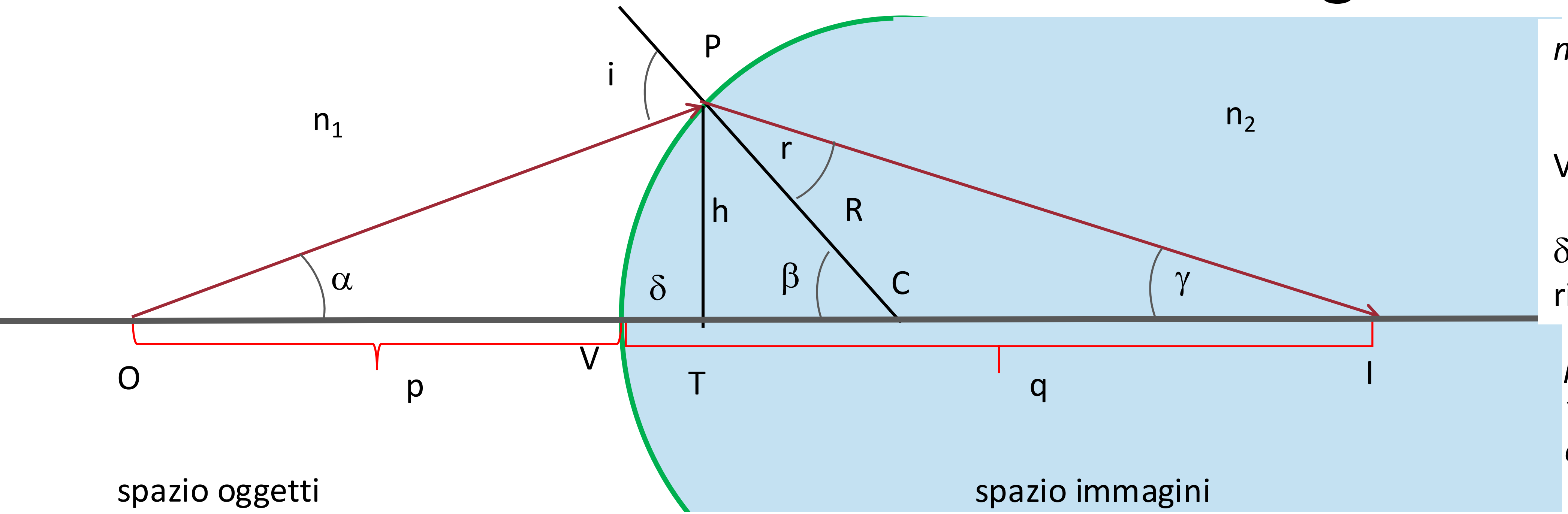
$$n_1\alpha + n_2\gamma = \beta(n_2 - n_1)$$

A questo punto posso applicare ancora l'approssimazione di Gauss, considerando che gli angoli possono essere approssimati alle tangenti

e che $\tan\beta = \frac{h}{R-\delta}$; $\tan\gamma = \frac{h}{q-\delta}$; $\tan\alpha = \frac{h}{p+\delta}$

si ottiene: $\frac{n_1}{p+\delta} + \frac{n_2}{q-\delta} = \frac{n_2-n_1}{R-\delta}$

Diottro sferico: formazione dell'immagine



$n_1 < n_2$

VT= δ

δ=tratto trascurabile rispetto p, q, R

$\beta = \tan\beta$
$\gamma = \tan\gamma$
$\alpha = \tan\alpha$

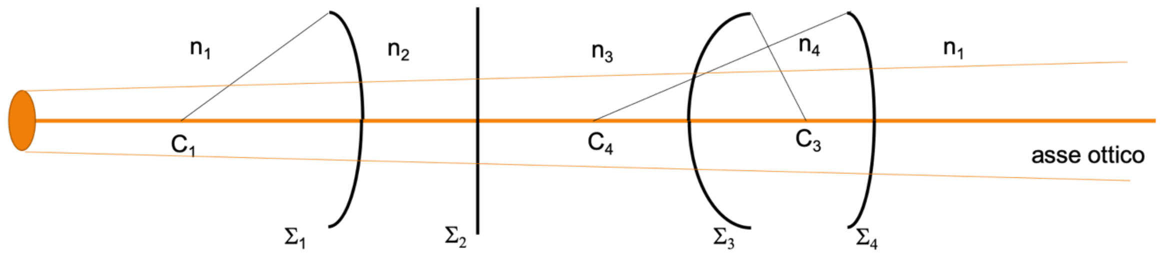
- $\frac{n_1}{p+\delta} + \frac{n_2}{q-\delta} = \frac{n_2-n_1}{R-\delta}$ diventa $\frac{n_1}{p} + \frac{n_2}{q} = \frac{n_2-n_1}{R}$

se assumiamo che il segmento δ sia trascurabile rispetto a p, q, R

- L'equazione del diottro ci fornisce una relazione tra la posizione *p* della sorgente e la posizione *q* dell'immagine **indipendentemente dal valore di α**
- in approssimazione di Gauss il diottro trasforma fasci omocentrici in fasci rifratti omocentrici.
- L'equazione del diottro e' detta anche equazione di Cartesio (formula di Abbe) e i punti di coordinate *p* e *q* che la soddisfano sono detti *punti coniugati* rispetto al diottro.

Sistema ottico centrato: convenzioni

Supponiamo che il raggio si propaghi attraverso mezzi diversi, separati da diverse superfici



Convenzioni:

a. la luce proviene da sx, spazio degli oggetti si trova a sx del sistema ottico
b. lo spazio delle immagini si trova a dx del sistema
c. i raggi di curvatura sono positivi quando il centro si trova a dx della superficie, negativi quando si trovano a sx

Fuochi di un diottro sferico

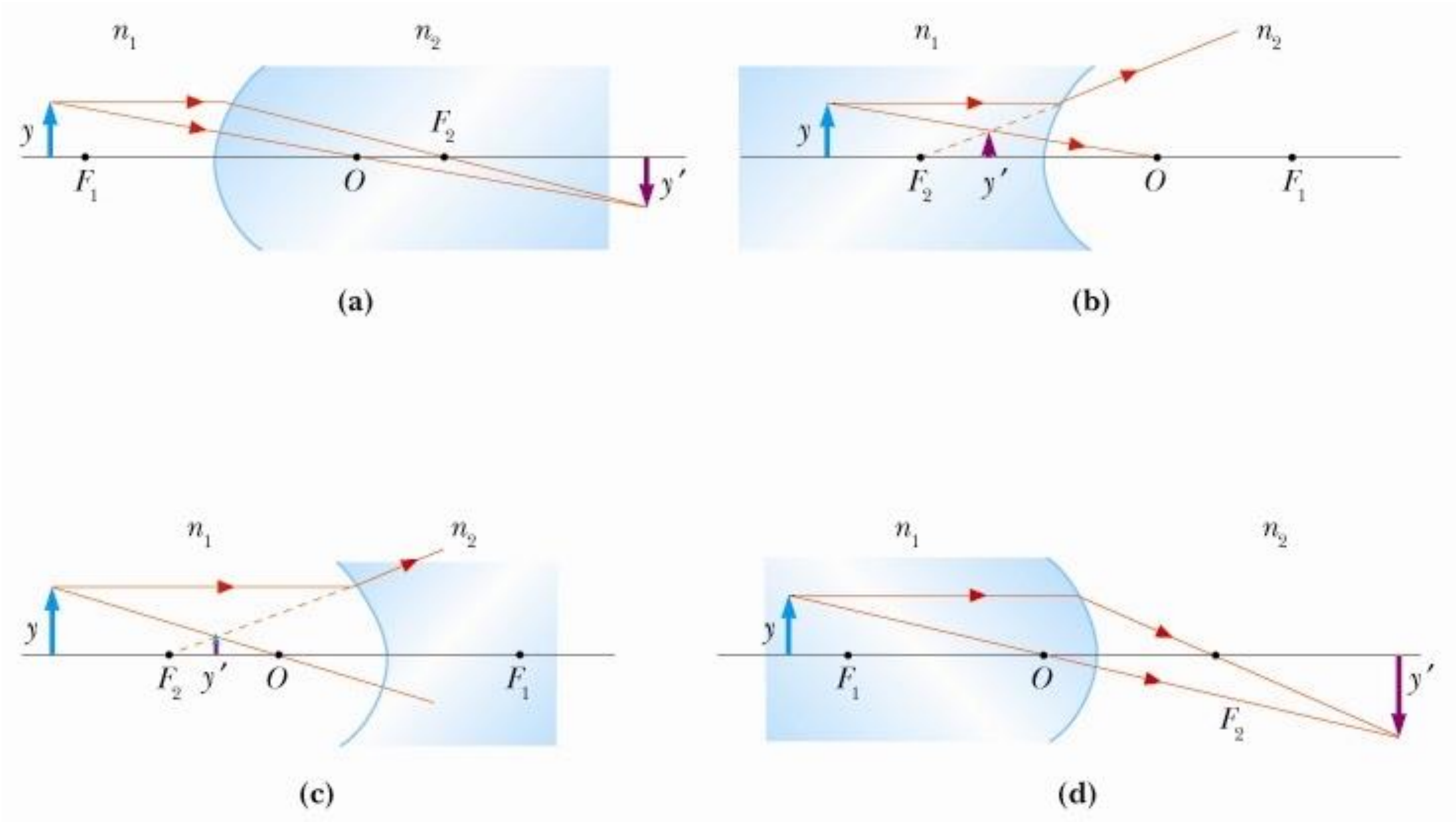
- Se la posizione *p* della sorgente tende all'infinito, l'immagine si trova in un punto F_2, posto a distanza f_2 dal diottro detto **secondo fuoco**;
- se l'immagine si forma a distanza infinita, l'oggetto si trova in un punto F_1, detto **primo fuoco,** a distanza f_1 dal diottro: i raggi uscenti da F_1 si rifrangono parallelamente all'asse ottico.
- dall'equazione del diottro si ricavano i valori delle distanze focali f_1 e f_2

  - $f_2 = \lim_{p\to\infty} q = R\frac{n_2}{n_2-n_1}$
  - $f_1 = \lim_{q\to\infty} p = R\frac{n_1}{n_2-n_1}$

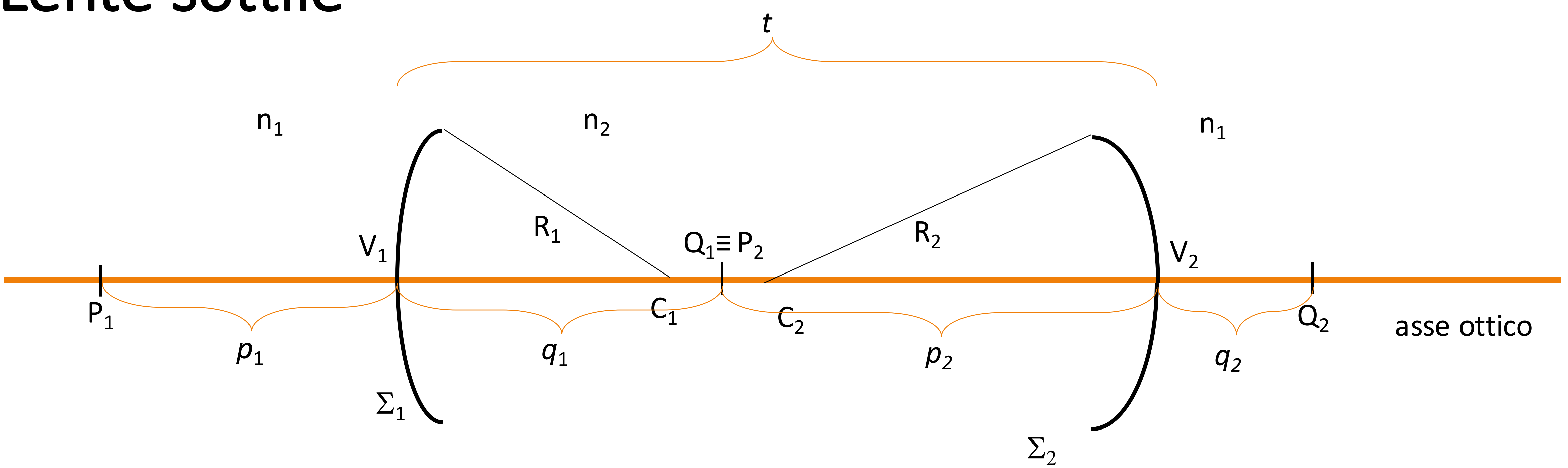
- l'equazione di Cartesio puo' essere riscritta come $\frac{f_1}{p} + \frac{f_2}{q} = 1$

da cui si ricava che se l'oggetto e' posto tra il primo punto focale e l'infinito (p> f_1), esso fornisce un'immagine reale, mentre fornisce un'immagine virtuale quando e' posta tra la superficie del diottro e il primo fuoco (p< f_1)

Diottro sferico: costruzione dell'immagine



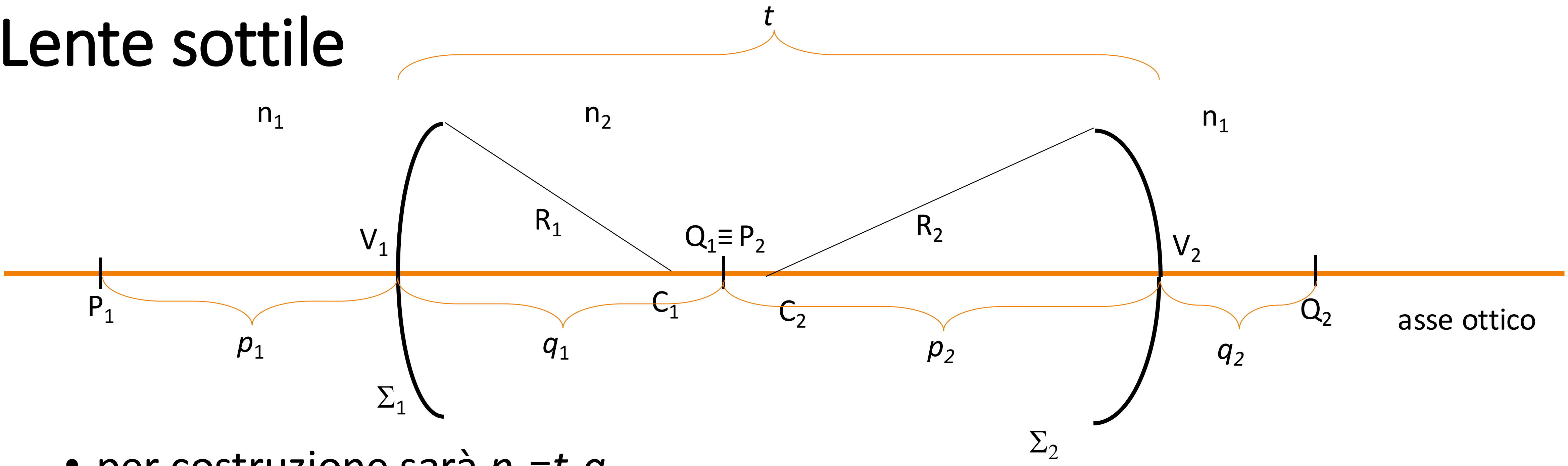
Lente sottile



- supponiamo di avere 2 diottri sferici in successione, e sia *t* la distanza tra i 2 vertici
- scriviamo l'equazione di cartesio per il primo e per il secondo diottro, assumendo che l'immagine generata dal primo diventi oggetto per il secondo ($Q_1 \equiv P_2$):
  - $\frac{n_1}{p_1}+\frac{n_2}{q_1}=\frac{n_2-n_1}{R_1}$
  - $\frac{n_2}{p_2}+\frac{n_1}{q_2}=\frac{n_1-n_2}{R_2}$

  - per costruzione sarà $p_2=t-q_1$

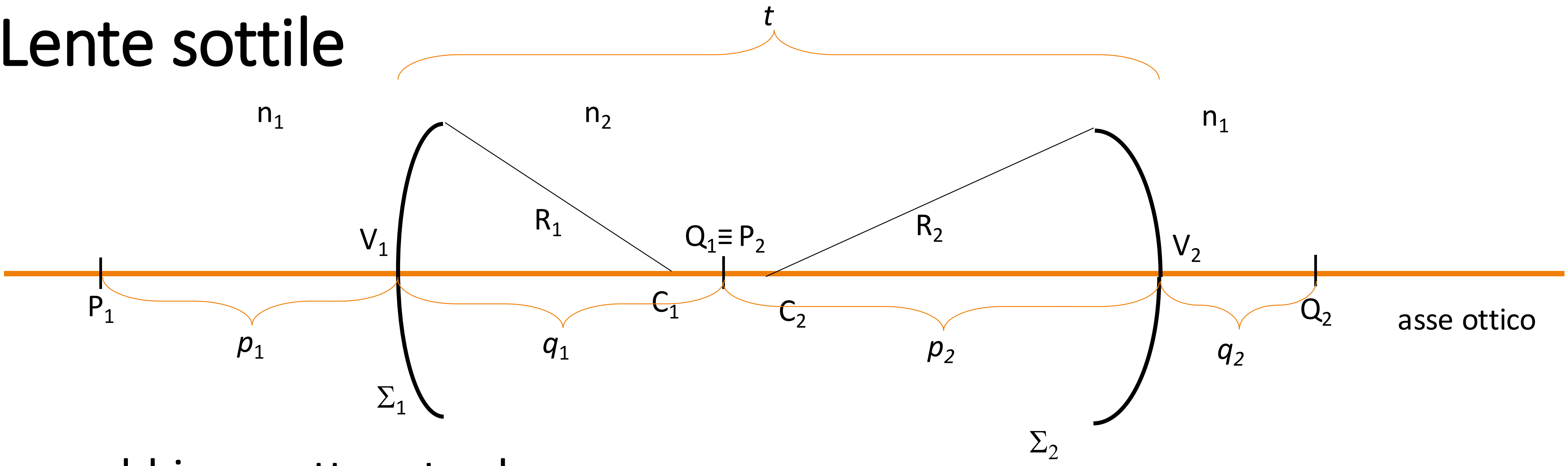
Lente sottile



- per costruzione sarà $p_2 = t - q_1$
  - $\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_2}{q_1} = \frac{n_2 - n_1}{R_1}$
  - $\frac{n_2}{t - q_1} + \frac{n_1}{q_2} = \frac{n_1 - n_2}{R_2}$
- supponendo t trascurabile rispetto alle altre grandezze in gioco (t-$q_1 \rightarrow$-q_1) e sommando membro a membro
  - $\frac{n_1}{p_1} + \frac{n_2}{q_1} - \frac{n_2}{q_1} + \frac{n_1}{q_2} = \frac{n_2 - n_1}{R_1} + \frac{n_1 - n_2}{R_2} \rightarrow \frac{n_1}{p_1} + \frac{n_1}{q_2} = (n_2 - n_1)\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$

$$\rightarrow \frac{1}{p_1} + \frac{1}{q_2} = \frac{(n_2 - n_1)}{n_1}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

Lente sottile



- abbiamo ottenuto che:
  - $\frac{1}{p_1}+\frac{1}{q_2}=\frac{(n_2-n_1)}{n_1}\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$
- a questo punto possiamo definire
  - p_1=p distanza oggetto
  - q_2=q distanza immagine

$$\frac{1}{p}+\frac{1}{q}=\frac{(n_2-n_1)}{n_1}\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

Lenti sottili: fuochi

- l'equazione

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{(n_2 - n_1)}{n_1}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$$

- ci permette di definire i fuochi di una lente sottile
  - $f_2 = \lim_{p\to\infty} q = \frac{1}{f_2} \to \frac{(n_2-n_1)}{n_1}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$ $\qquad f_1 = f_2 = f$
  - $f_1 = \lim_{q\to\infty} p = \frac{1}{f_1} \to \frac{(n_2-n_1)}{n_1}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$
- riscriviamo l'equazione della lente sottile
  - $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$ formula di Huygens
  - $\frac{1}{f} = \frac{(n_2-n_1)}{n_1}\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)$ equazione del costruttore di lenti

Lenti sottili: potere diottrico, punti coniugati, piano focale

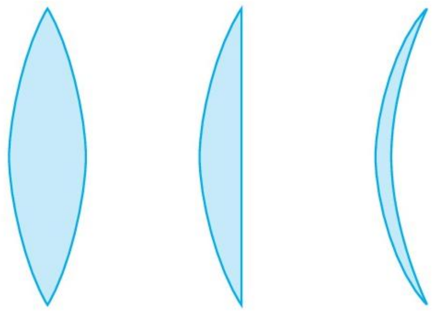
- **Potere diottrico** o potere rifrangente: e’ l’inverso della distanza focale espressa in metri. L’unita’ di misura e’ la **diottria**, cioe’ il potere rifrangente di una lente con distanza focale di un metro:

$$P(\textit{diottrie}) = 1 / f(\textit{metri})$$

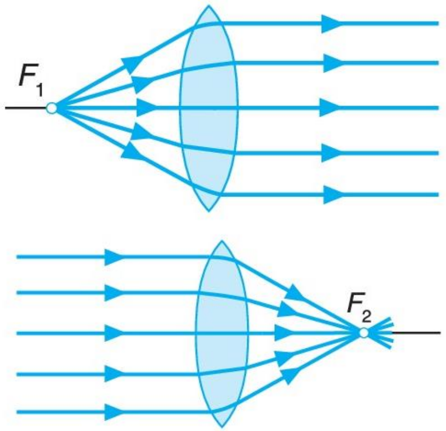
- Punto oggetto e punto immagine si dicono **punti coniugati**. Se il punto oggetto si muove su un piano, il punto immagine si muove su un altro piano: i due piani si dicono coniugati.
- I punti di un **piano focale** (piano perpendicolare all’asse ottico passante per un fuoco) hanno per coniugati punti all’infinito. Per questo tutti i raggi uscenti da un punto del piano focale hanno come immagine raggi tra loro paralleli

Lenti sottili convergenti

- Lenti convergenti: i raggi paralleli all'asse passano per F2 nello spazio di trasmissione (a destra della lente) in cui le immagini sono reali. Per queste lenti $f > 0$. Si possono avere lenti convergenti in diverse configurazioni :
  - lente biconvessa $R1 > 0$ $R2 < 0$ → $f > 0$
  - lente piano convessa $R1 > 0$ $R2 = \infty$ → $f > 0$
  - menisco convergente $R1 > 0$ $R2 > 0$ con $R1 < R2$ → $f > 0$

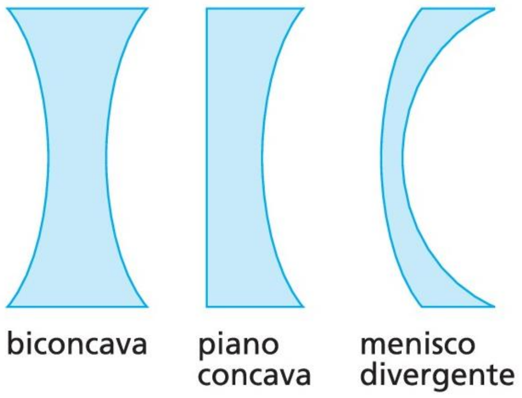


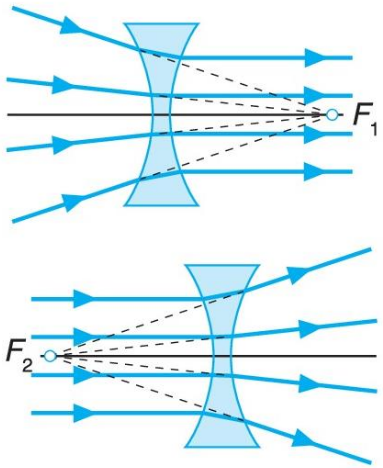
biconvessa piano convessa menisco convergente



Lenti sottili divergenti

- Lenti divergenti: i raggi paralleli all'asse divergono: i loro prolungamenti si incontrano in F2 nello spazio di incidenza (a sinistra della lente) in cui le immagini sono virtuali. Per le lenti divergenti $f < 0$. Si possono avere in diverse configurazioni:
  - lente biconcava $R1 < 0 \quad R2 > 0 \rightarrow f < 0$
  - lente piano concava $R1 < 0 \quad R2 = \infty \rightarrow f < 0$
  - menisco divergente $R1 > 0 \quad R2 > 0$ con $R1 > R2 \rightarrow f < 0$

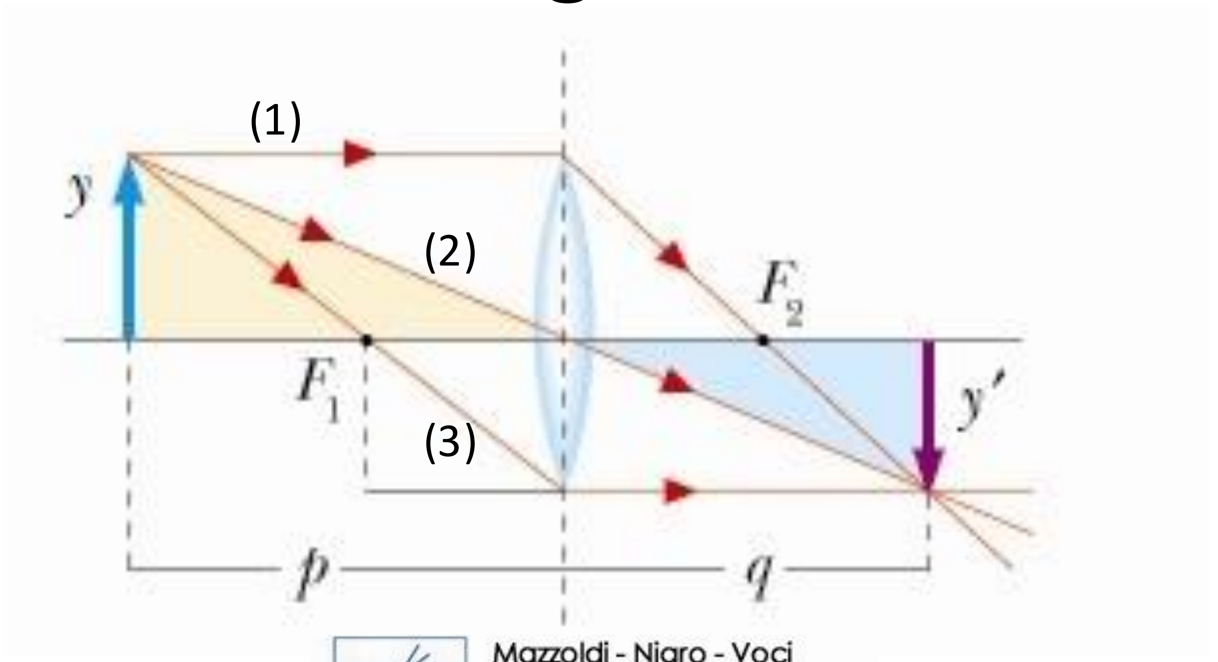




Costruzione dell’immagine: lente convergente

- Per costruire l’immagine di un oggetto si possono usare tre raggi
  - quello parallelo all’asse ottico che ha come immagine il raggio passante per il secondo fuoco (1),
  - quello che passa per il centro ottico, che non viene deviato (2)
  - quello passante per il primo fuoco che ha come immagine il raggio parallelo all’asse ottico (3).

- Con la stessa lente l’immagine è reale o virtuale a seconda della posizione dell’oggetto.

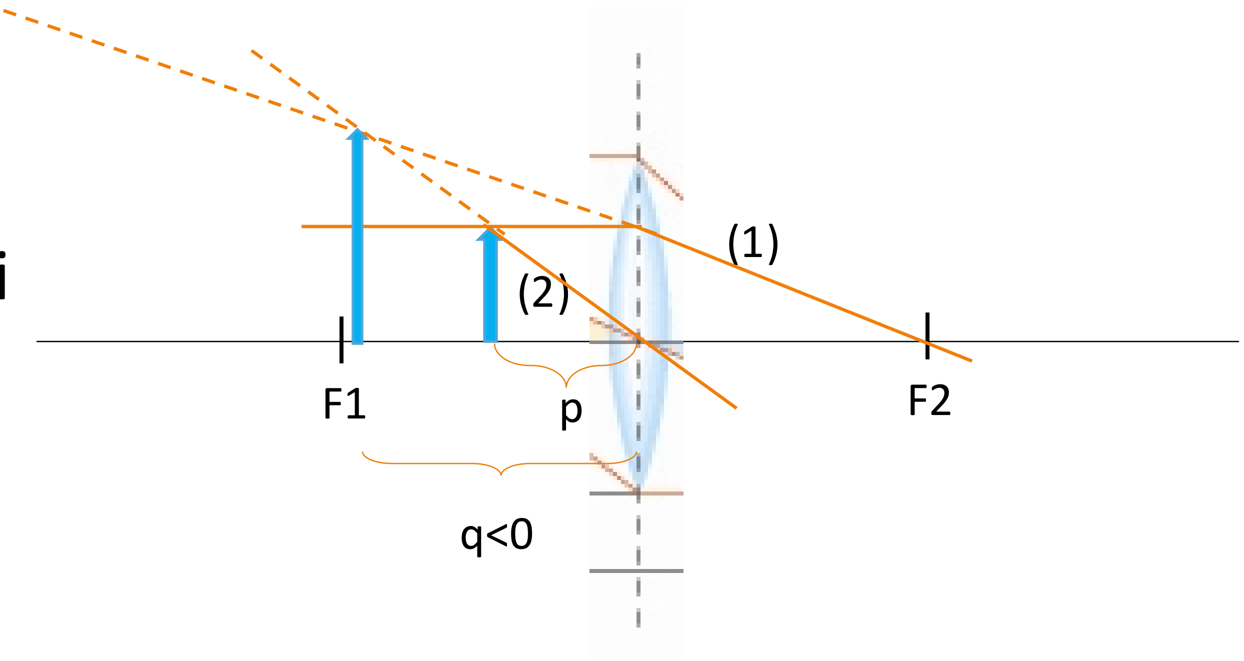


Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

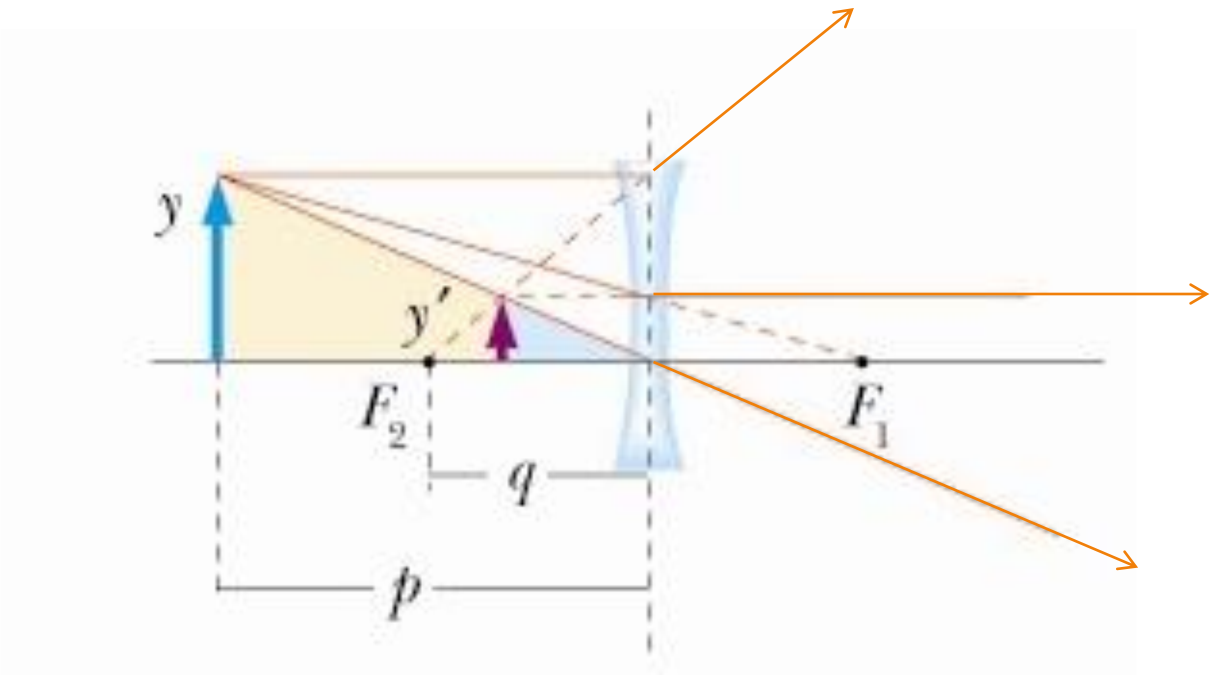
	> 0
p	sorgente reale
q	immagine reale
$f_1 = f_2$	lente convergente

Costruzione dell'immagine: lente convergente

- immagine virtuale ottenuta con una lente convergente: la distanza dell'oggetto dalla lente è inferiore alla distanza focale
- l'immagine è costruita sfruttando i prolungamenti dei raggi principali. Essi (linee tratteggiate) convergono in un punto nello spazio degli oggetti.
  - q<0
  - immagine virtuale



Costruzione dell'immagine: lente divergente



Mazzoldi - Nigro - Voci
Elementi di Fisica - Onde
EdiSES

- lente divergente:
  - usiamo sempre i 3 raggi fondamentali ma poichè divergono dopo la lente è necessario tracciare i prolungamenti (tratteggiati) per identificare l'immagine

	< 0
p	sorgente virtuale
q	immagine virtuale
$f_1 = f_2$	lente divergente