

# Ottica

- **Newton** → teoria **corpuscolare** con cui spiega leggi di riflessione e rifrazione (con ipotesi errata). Respinse la **teoria ondulatoria** anche se spiegava passaggio luce attraverso lamine sottili perché vedeva luce propagarsi in linea retta.
- **Huygens e Hooke** → teoria **ondulatoria** spiega **riflessione e rifrazione**, introduce interferenza e diffrazione


# Ottica

- **Fresnel** (1788-1827) → esperimenti su interferenza e diffrazione .  
Luce è rettilinea dato la bassa  $\lambda$  (lunghezza d'onda) della luce visibile
- **Focault** misura  $v_{\text{luce}}$  in acqua  $<$   $v_{\text{luce}}$  in aria
- Velocità luce in aria → **c** legata a costanti di teoria *em* di Maxwell
- Descrizione completa necessita di relatività e di meccanica quantistica. Luce è anche particella → **fotone** ( $\gamma$ )
- **c indipendente da sistema di riferimento, massima velocità di un segnale.** Molte misure da Roemer 1676 a Michelson etc

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

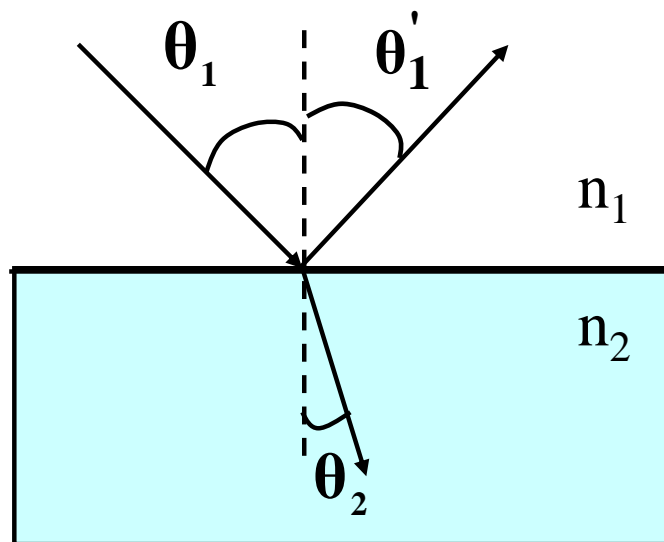
$$c = 299\,792\,457 \text{ m/s}$$

# Ottica

- **onde** di qualsiasi tipo che **incidono** su ostacolo piano **generano** onde che si allontanano dall'ostacolo → **Riflessione**
- Esempio in superficie di **separazione tra aria e vetro, aria e acqua**
- **Parte di energia** viene **riflessa** e parte **trasmessa**
- Legge di **Snellius**   $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
- $n_1 v_1 = n_2 v_2$

# Riflessione e Rifrazione

Un raggio di luce che si propaga in aria entra in acqua con un dato angolo di incidenza



$\theta_1$  = angolo di **incidenza**

$\theta_2$  = angolo di **rifrazione**

$\theta_1'$  = angolo di **riflessione**

l'indice di rifrazione **dell'acqua è  $n_2=1.33$**

l'indice di rifrazione per **l'aria è  $n_1=1$**

l'indice di rifrazione  **$n=c/v$**

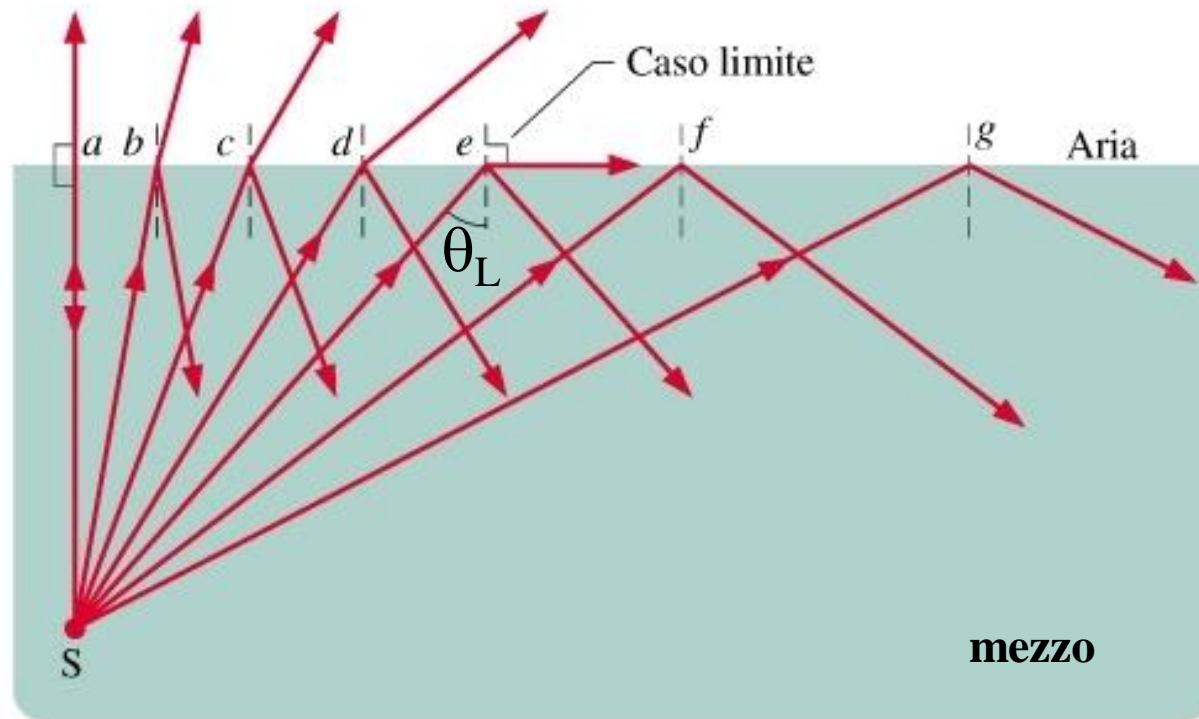
$c \rightarrow$  velocità luce **in aria**

$v \rightarrow$  velocità luce nel **mezzo**

Passando da un mezzo meno rifrangente a uno più rifrangente (cioè con indice di rifrazione più alto), **il raggio si avvicina alla normale  $\theta$  è più piccolo.**

# Riflessione totale

La **riflessione totale** della luce proveniente da una sorgente puntiforme  $S$  avviene per tutti gli angoli di incidenza maggiori dell'angolo limite  $\theta_L$ . In tal caso **non c'è luce rifratta**. Se invece il raggio incide con angolo pari all'angolo critico, il raggio rifratto segue la superficie di separazione tra i due mezzi.



# Riflessione totale

La riflessione totale si può verificare solo **passando da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente** (cioè con indice di rifrazione più basso). **Qualsiasi mezzo ha indice di rifrazione > di quello dell'aria (= 1)**, per cui consideriamo il caso del raggio che tenta di passare dal mezzo all'aria e non viceversa.

Se l'angolo di incidenza è uguale all'angolo limite, allora l'angolo di rifrazione è pari a  $90^\circ$  e il suo seno è 1:

$$n_1 \sin \theta_L = n_2 \sin 90^\circ$$

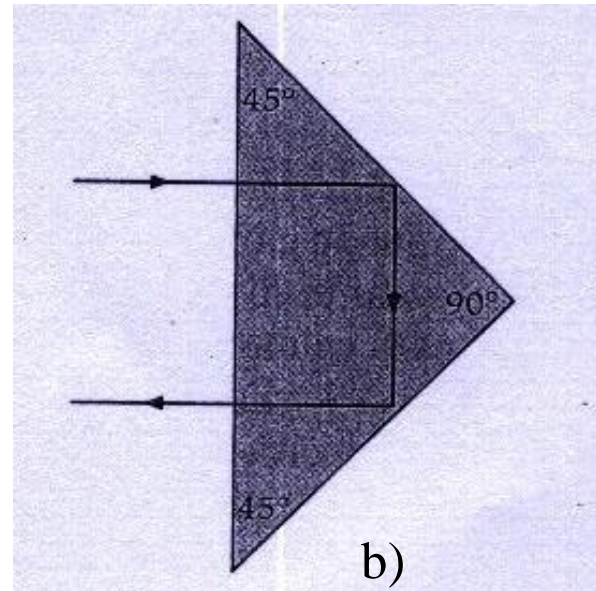
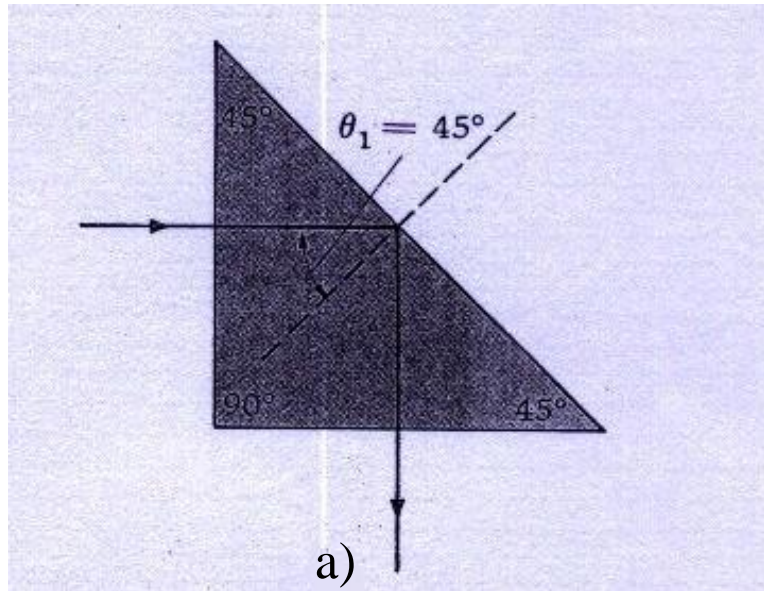
**Nota il valore di  $\theta_L$  si ricava il valore dell'indice di rifrazione del mezzo.**

# Rifrazione



Passando da un mezzo meno rifrangente (ad esempio aria) a uno più rifrangente (ad esempio l'acqua), il raggio si avvicina alla normale, cioè **l'angolo del raggio rifratto è minore**. E per questa ragione, ad esempio, che un cucchiaio o una matita immersi in un bicchiere d'acqua **sembrano piegati**.

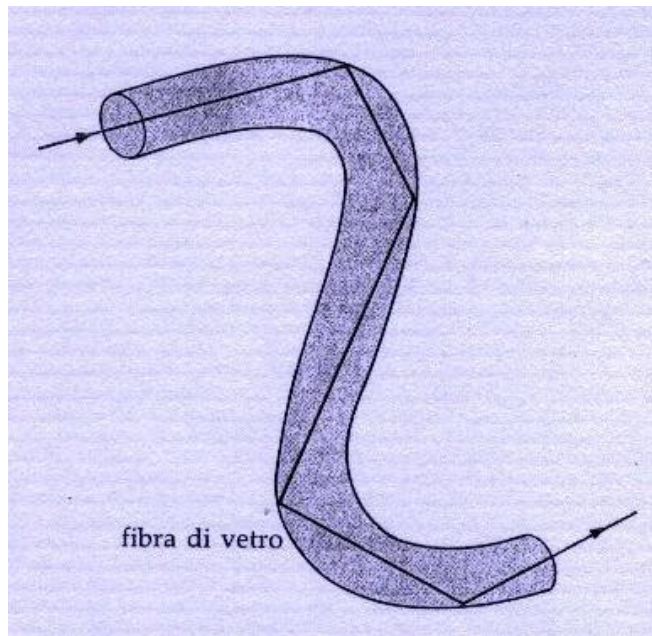
# Prismi



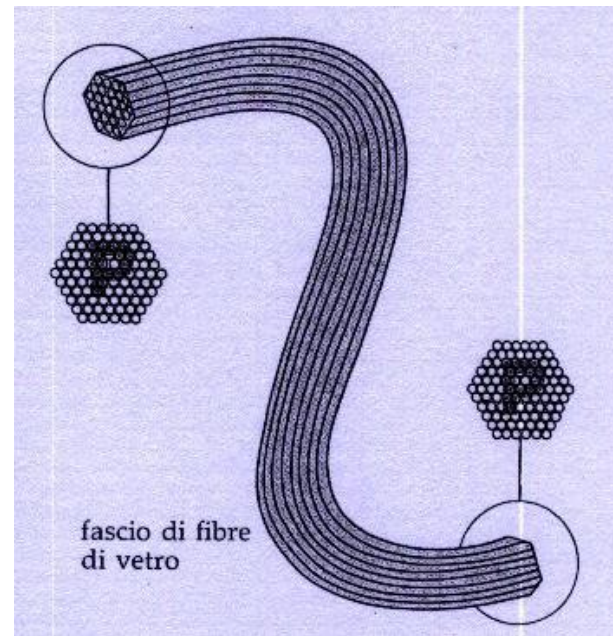
- a) La luce che entra attraverso una delle facce minori di un prisma di vetro  $45^\circ-90^\circ-45^\circ$  è riflessa totalmente nel prisma ed emerge attraverso l'altra faccia minore a  $90^\circ$  rispetto alla direzione del raggio incidente.
- b) La luce che entra attraverso la faccia maggiore del prisma viene riflessa totalmente due volte ed emerge in direzione opposta a quella della luce incidente.



# Fibre ottiche



**Una guida di luce:** la luce all'interno della guida incide sempre sotto un **angolo maggiore dell'angolo limite** e quindi non esce per rifrazione dalla guida

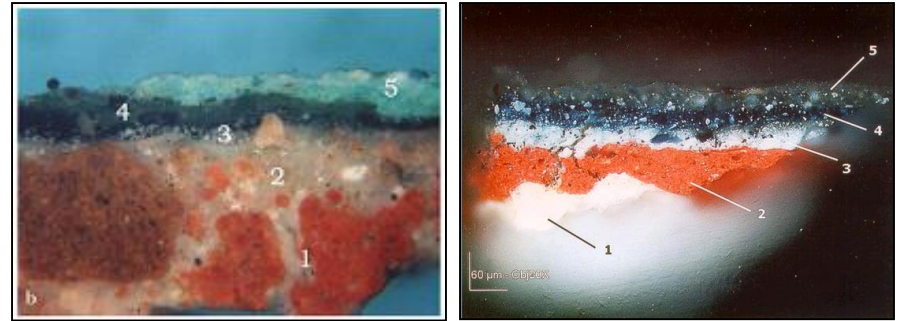


**Un fascio di fibre di vetro.**

La **luce proveniente dall'oggetto** è trasportata dalle fibre e forma **un'immagine** dell'oggetto **all'altra estremità**.

# Conservazione e restauro

Argomenti di fisica: ottica geometrica



Studio della composizione degli strati in un affresco  
Immagini ottenute per mezzo del **microscopio ottico**.



Filmato dell'endoscopia sul braccio destro della  
statua di Germanico  
Immagini ottenute per mezzo di **fibre ottiche**

# Tabella indice di rifrazione

## Tabella

Indici di rifrazione per la riga gialla del sodio ( $\lambda = 589 \text{ nm}$ )

Sostanza	Indice di rifrazione
<b>Solidi</b>	
ghiaccio ( $\text{H}_2\text{O}$ )	1,309
fluorite ( $\text{CaF}_2$ )	1,434
salgemma ( $\text{NaCl}$ )	1,544
quarzo ( $\text{SiO}_2$ )	1,544
zircono ( $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$ )	1,923
diamante (C)	2,417
<b>Vetri (valori tipici)</b>	
crown	1,58
flint leggero	1,58
flint medio	1,62
flint denso	1,66
<b>Liquidi a 20 °C</b>	
alcool metilico ( $\text{CH}_3\text{OH}$ )	1,329
acqua ( $\text{H}_2\text{O}$ )	1,333
alcool etilico ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ )	1,36
tetracloruro di carbonio ( $\text{CCl}_4$ )	1,460
essenza di trementina	1,472
glicerina	1,473
benzolo	1,501
bisolfuro di carbonio ( $\text{CS}_2$ )	1,628

# LA DISPERSIONE DELLA LUCE

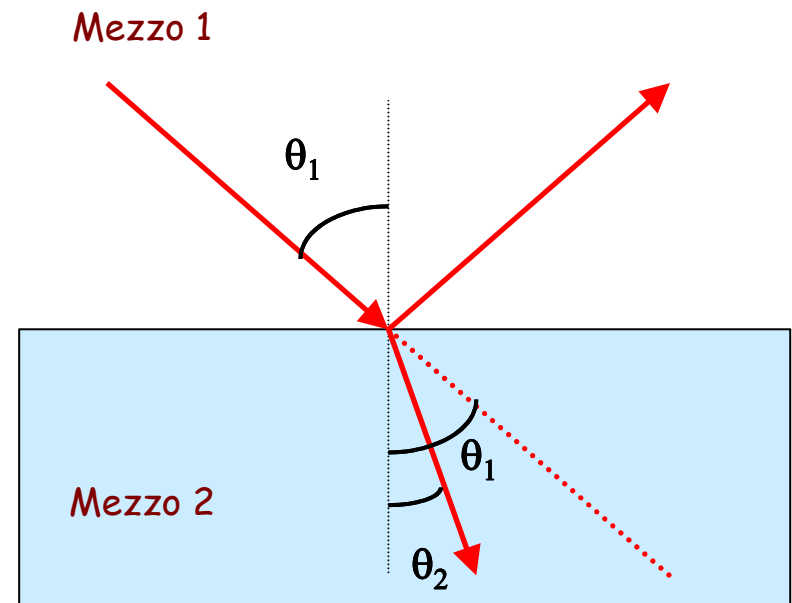
Il fenomeno che ha permesso una definizione oggettiva del colore è la cosiddetta dispersione della luce bianca nei mezzi trasparenti. Un raggio di luce bianca che incide su una goccia d'acqua o un pezzo di vetro, ne esce vivamente colorato. Se raccolto su uno schermo bianco, forma una macchia luminosa nella quale i colori si susseguono nello stesso ordine in cui li vediamo nell'arcobaleno.



A. Romero

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

**L'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della luce incidente, quindi anche l'angolo di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della luce incidente. La frequenza resta invariata .**



# Frequenza e indice di rifrazione

Se ho un'onda con una data frequenza in un mezzo, che passa in un altro mezzo, la frequenza resta costante e cambia la lunghezza d'onda.

Ricordando la relazione tra lunghezza d'onda e frequenza ho nel vuoto o aria (indice di rifrazione 1) e in un mezzo con indice di rifrazione  $n_1$  variabile a seconda della  $\lambda$

$$v\lambda = c \rightarrow \lambda = \frac{c}{v}$$

$$\lambda_0 = \frac{c}{v} \text{ e } \lambda_1 = \frac{v_1}{v} \Rightarrow \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{c}{v_1} = n_1$$

**Esempio :** Un fascio di luce gialla di lunghezza d'onda di 550 nm entra in una lastra di vetro. Qual è la lunghezza d'onda nel vetro se  $n_{\text{vetro}} = 1.58$  per questa lunghezza d'onda ?

$$\frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{c}{v_1} = n_1 \Rightarrow \lambda_1 = \frac{\lambda_0}{n_1} = \frac{550 \cdot 10^{-9}}{1,58} = 348 \cdot 10^{-9}$$

# OTTICA GEOMETRICA

Costruzione di immagini di determinati oggetti effettuata con strumenti ottici in cui la luce emessa dagli oggetti subisce *riflessione e rifrazione*

## Definizioni importanti per l'ottica geometrica

- **Oggetto:** corpo esteso o puntiforme che *emette luce* direttamente o *diffonde luce emessa da un altro corpo*.
- **Immagine:** figura puntiforme o estesa in cui *convergono i raggi luminosi* provenienti da oggetto che vengono seguiti attraverso gli strumenti ottici (lenti o specchi)
- **Punti coniugati:** coppia composta dal *punto oggetto* e dal relativo *punto immagine*
- **Immagine reale:** figura nei punti della quale si *incontrano fisicamente i raggi luminosi*
- **Immagine virtuale:** immagine per i punti della quale *passano i prolungamenti dei raggi* ma non i raggi stessi
- **Specchi:** superfici sulle quali avviene la sola *riflessione*
- **Diottri:** superfici su cui avviene la *trasmissione della luce* da un mezzo all'altro per *rifrazione* (importanti per lenti)

# Specchi piani

Basandosi sulla **legge della riflessione** si possono **ricostruire le immagini** da specchi piani

Dopo la riflessione, i raggi divergono esattamente **come se provenissero da un punto P'** posto dietro il piano dello specchio stesso

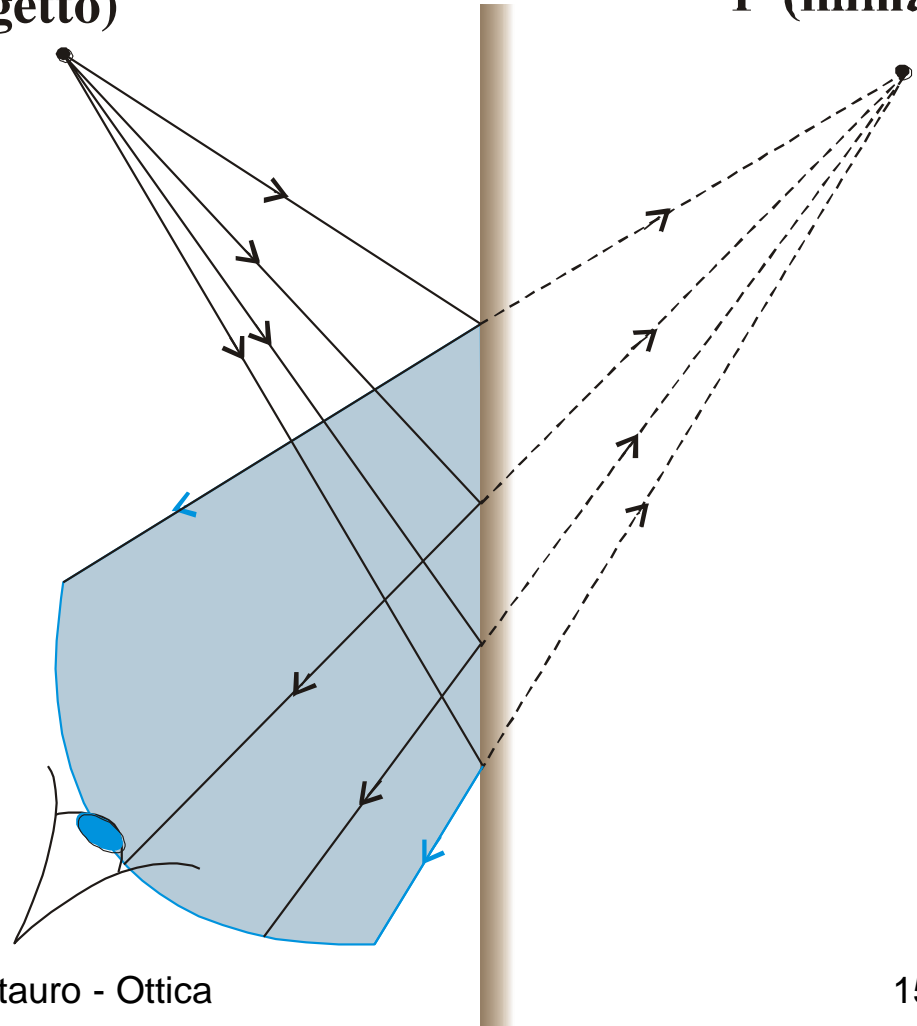
**Il punto P' è detto immagine del punto P**

Quando i raggi entrano **nell'occhio**, **non possono essere distinti dai raggi provenienti da un punto oggetto P'**, senza specchio.

In questo caso si parla di **“immagine virtuale”** perché la luce non proviene realmente dall'immagine ma sembra solo provenire da essa.

**P(oggetto)**

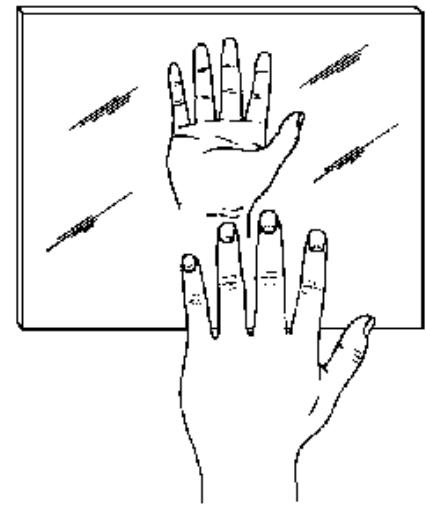
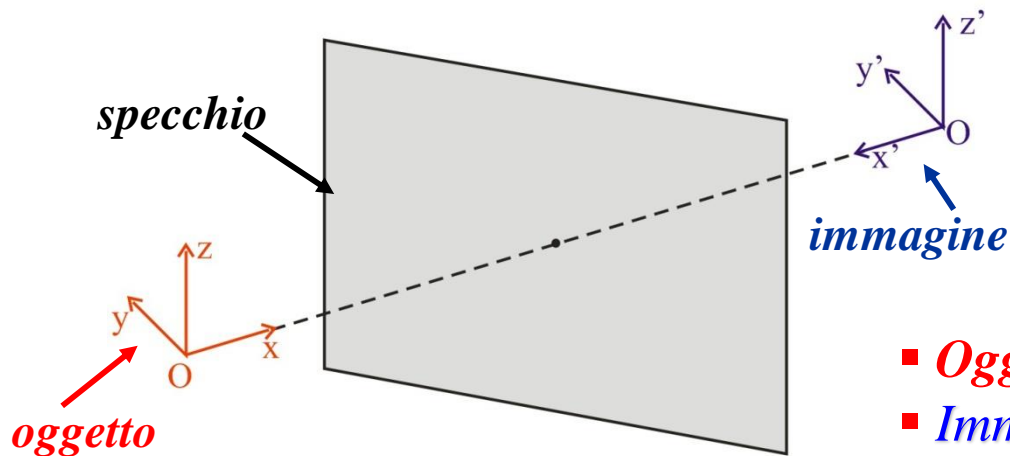
**P'(immagine)**



# Specchi piani

L'immagine virtuale data da uno specchio piano ha la caratteristica di essere *un'immagine ribaltata*: la destra è scambiata con la sinistra

Questa caratteristica è evidente se si osserva la figura sotto:



*L'immagine di una mano destra in uno specchio piano è una mano sinistra!*

- **Oggetto**: terna cartesiana **destrorsa**
- **Immagine**: terna cartesiana **sinistrorsa**

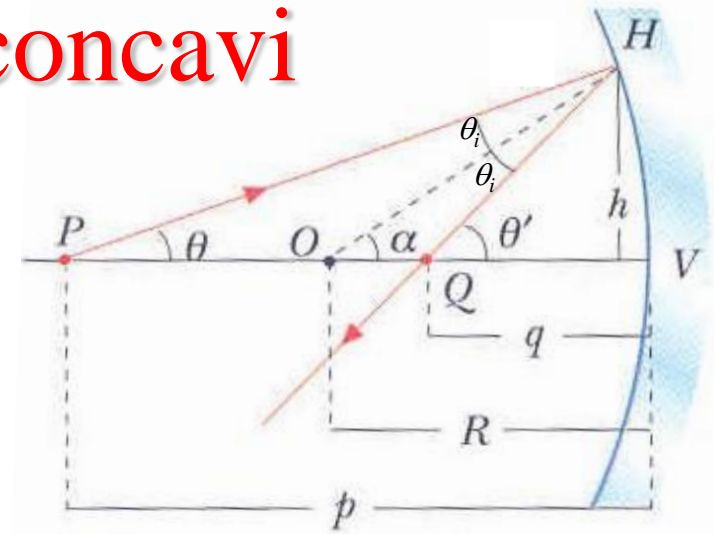
Un osservatore, che si pone con le spalle allo specchio ed osserva l'oggetto, vede l'asse z puntare verso l'alto, l'asse x verso di sé **l'asse y da sinistra a destra**. Quando si gira e guarda l'immagine, l'asse x' è ancora rivolto verso di lui e l'asse z' verso l'alto, ma **l'asse y' va da destra a sinistra**



# Specchi sferici concavi

Basandosi sulla legge della riflessione può essere ricavata *l'equazione dello specchio sferico concavo*

- **P: punto oggetto**
- **Q: immagine di P**
- **O: centro di curvatura dello specchio**
- **p: PV (distanza dell'oggetto)**
- **q: QV (distanza dell'immagine)**
- **R=OV =OH**



In base alla proprietà secondo cui un *angolo esterno di un triangolo è uguale alla somma dei due angoli interni non adiacenti*

Supponendo gli angoli molto piccoli  $\Rightarrow HV \sim h$

$\Downarrow$

$$\begin{cases} h = PV \tan \theta \approx PV \theta = p \theta \\ h = QV \tan \theta' \approx QV \theta' = q \theta' \\ h = OV \tan \alpha \approx OV \alpha = R \alpha \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \theta = \frac{h}{p} \\ \theta' = \frac{h}{q} \\ \alpha = \frac{h}{R} \end{cases} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \theta + \theta_i = \alpha \\ \alpha + \theta_i = \theta' \end{cases}$$

sottraendo,  $\Downarrow$

$$\theta + \theta' = 2\alpha$$

$$\frac{h}{p} + \frac{h}{q} = 2 \frac{h}{R}$$

$\Downarrow$

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

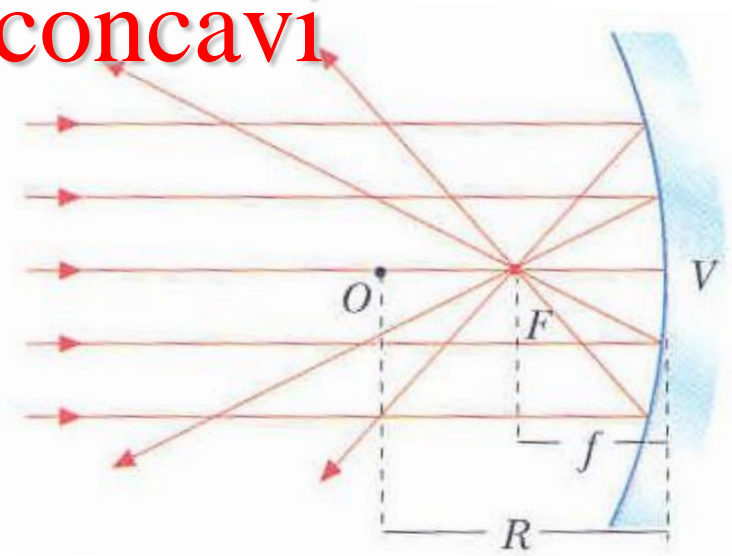
# Specchi sferici concavi

A partire dall'equazione dello specchio sferico concavo, è possibile studiare **dove si forma l'immagine al variare della posizione dell'oggetto**

Se  $p = +\infty$  (cioè i raggi incidenti sono paralleli all'asse dello specchio)

$$\Downarrow$$

dalla:  $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$  risulta  $\frac{1}{\infty} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \Rightarrow 0 + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$   $q = \frac{R}{2} = f$



Se i raggi incidenti sono paralleli all'asse dello specchio, i raggi riflessi si incontrano in un **punto F posto a distanza R/2 dal vertice, a metà strada tra O e V.**

Tale punto si chiama **fuoco dello specchio concavo**.

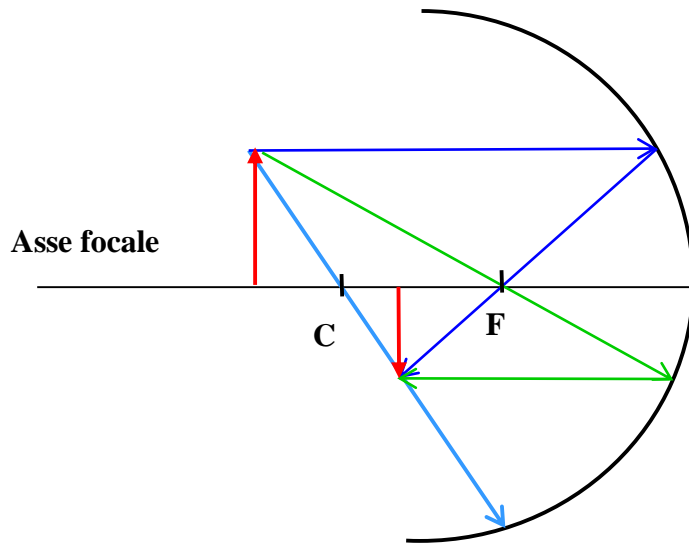
La distanza  $f = FV$  è detta **distanza focale**

Con la definizione di distanza focale, è possibile **riscrivere l'equazione dello specchio sferico:**

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

# Specchi sferici

## La costruzione delle immagini



Nella costruzione delle immagini si usano tre raggi principali che sono i seguenti:

*Il raggio parallelo all'asse:* si riflette passando per il fuoco

*Il raggio passante per il fuoco:* si riflette parallelamente all'asse

*Il raggio passante per il centro di curvatura:* incide perpendicolarmente allo specchio e quindi si riflette nella direzione di incidenza

# Esercizio

Un oggetto si trova a 12 cm da uno specchio concavo con raggio di curvatura di 6 cm. Si trovi la distanza focale dello specchio e la distanza dell'immagine.

Distanza focale:

$$f = \frac{1}{2} R = \frac{1}{2} (6) = 3$$

Dalla formula degli specchi sferici in termini di distanza focale

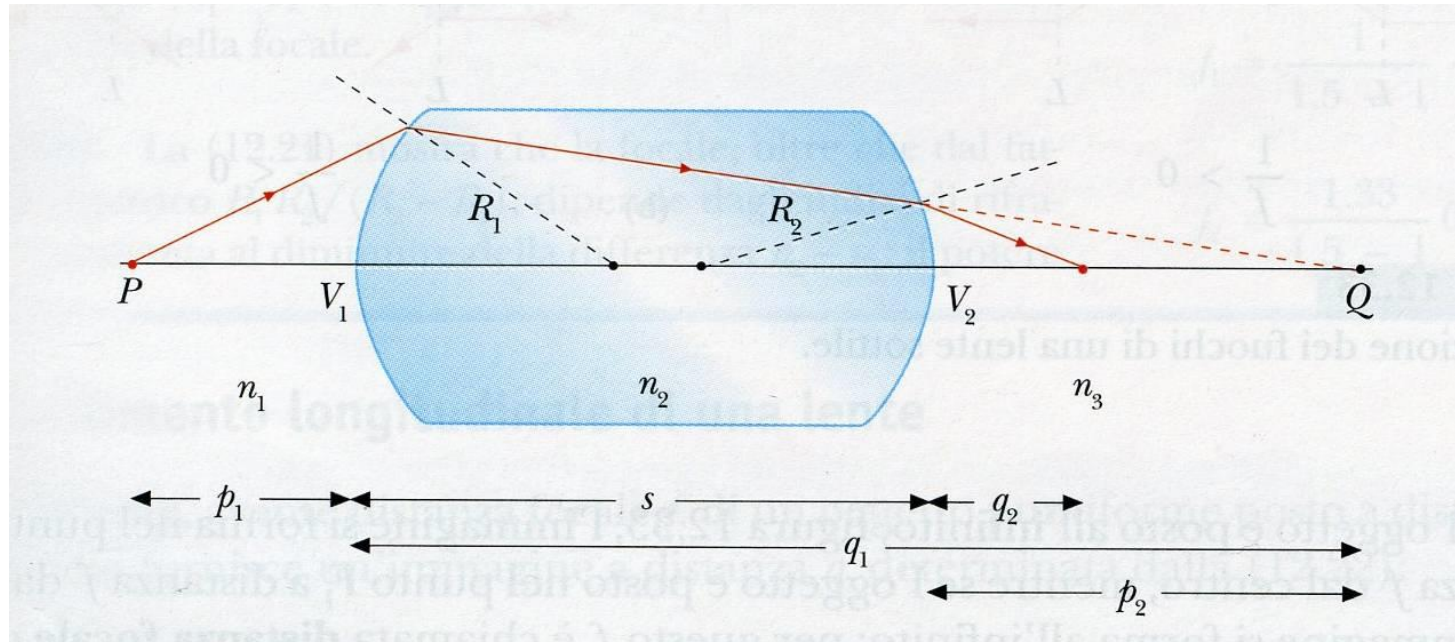
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{12} + \frac{1}{q} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{3} - \frac{1}{12} = \frac{3}{12}$$

$$q = 4 \text{ cm}$$

# Lenti sottili

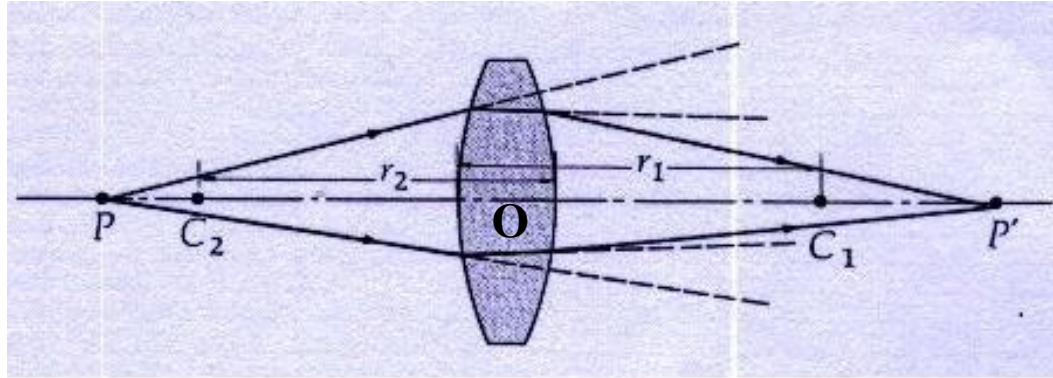


Un **diottro** è una superficie di contatto che separa due mezzi ottici diversamente rifrangenti, trasparenti e con diverso indice di rifrazione

**Due superfici diottriche aventi lo stesso asse** individuano **3 regioni** distinte: la **luce** proviene **da sinistra**, nel primo mezzo avente indice di rifrazione  $n_1$ , **attraversa** il mezzo con indice  $n_2$ , e infine, dopo la trasmissione nel secondo diottro, si **propaga** nel mezzo con indice di rifrazione  $n_3$  (in figura,  $R_1$  e  $R_2$  sono i raggi di curvatura delle due superfici)

# Lenti sottili

Si consideri una lente molto sottile con indice di rifrazione  $n_2=n$ , immersa in aria  $n_1=n_3=1$



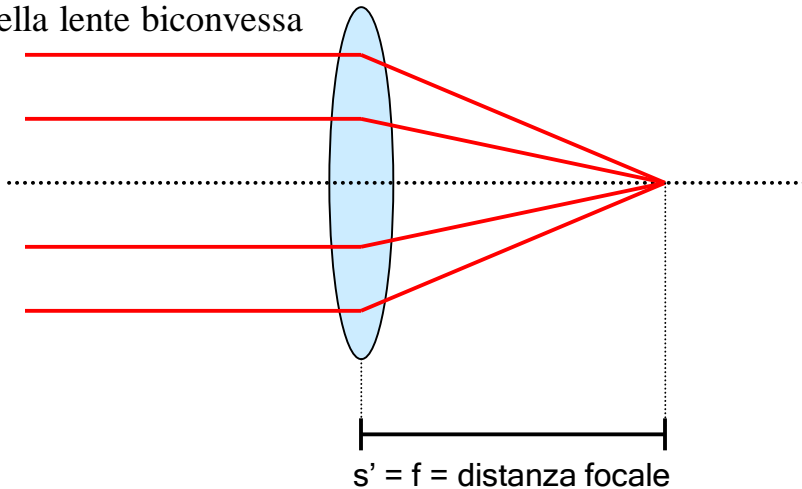
Applicando le leggi di rifrazione separatamente alle due superfici della lente può essere ricavata l'equazione che collega la **distanza dell'immagine (OP=s)** alla **distanza oggetto (OP'=s')**, all'**indice di rifrazione (n)** al **raggio di curvatura** delle superfici della lente ( $r_1$  e  $r_2$ )

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = (n-1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

# Lenti sottili

Come per gli specchi, la **distanza focale** è il punto in cui convergono i raggi che provengono dall'infinito (distanza dell'oggetto,  $s$ , molto elevata). Nel caso della lente sottile si ricava ponendo nell'equazione precedente,  $s = \infty$ . In tal caso i raggi convergono nel fuoco, ovvero  $s' = f$ , che quindi risulta avere il valore:

Caso della lente biconvessa



$$\frac{1}{f} = (n-1) \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

**Formula dei fabbricanti di lenti:**

infatti, fornisce la distanza focale in funzione delle sue proprietà (raggi di curvatura ed indice di rifrazione)

Nota la distanza focale (caso più frequente) caratteristica di una lente, la legge delle lenti sottili diventa:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

**Formula delle lenti sottili**

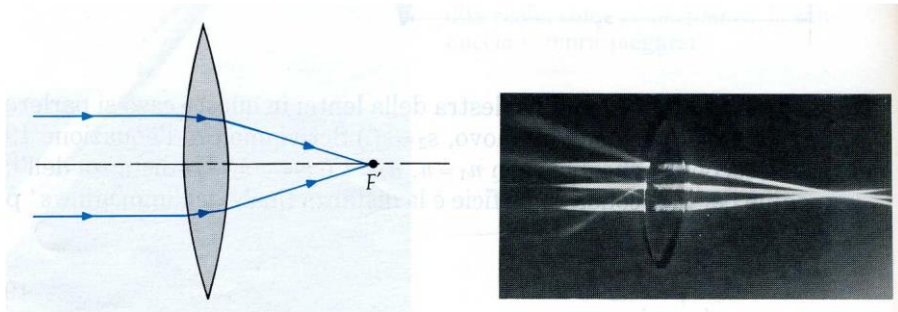
# Lenti sottili

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

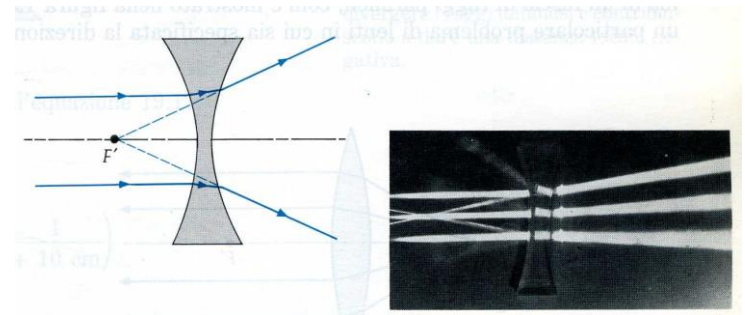
Tale legge è uguale a quella degli specchi **eccetto per le convenzioni sui segni.**

**$s'$  è positiva se l'immagine è dal lato di trasmissione della lente, cioè dal lato opposto a quello d'incidenza della luce.**

Le lenti biconvesse sono convergenti, mentre lenti biconcave sono divergenti.



Lente biconvessa (convergente). I raggi provenienti dall'infinito convergono nel fuoco. Nella fotografia si possono anche vedere i raggi riflessi da ciascuna superficie della lente.



Lente biconcava (divergente). I raggi provenienti dall'infinito divergono come se provenissero dal fuoco. Nella fotografia si possono anche vedere i raggi riflessi da ciascuna superficie della lente.

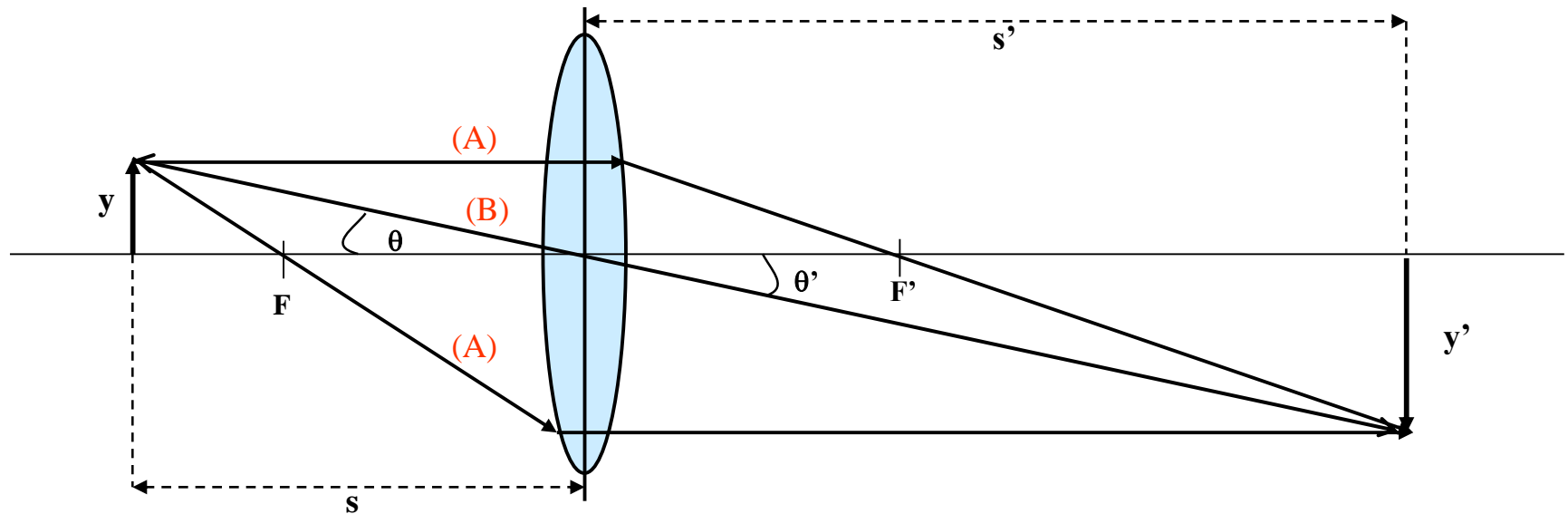


# Lenti sottili (simmetriche)

La costruzione oggetto-immagine ed il relativo ingrandimento lineare trasversale  $G$  sono i seguenti (considerando un oggetto alto  $y'$ ):

Il fascio parallelo all'asse ottico (dall'infinito) converge nel fuoco e viceversa (A)

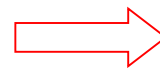
Il fascio che passa nel centro della lente continua senza cambiare direzione (B)



Ingrandimento  $G = \frac{y'}{y}$

$$\theta = \theta'$$

$$\tan\theta = \frac{y}{s} = -\frac{y'}{s'}$$

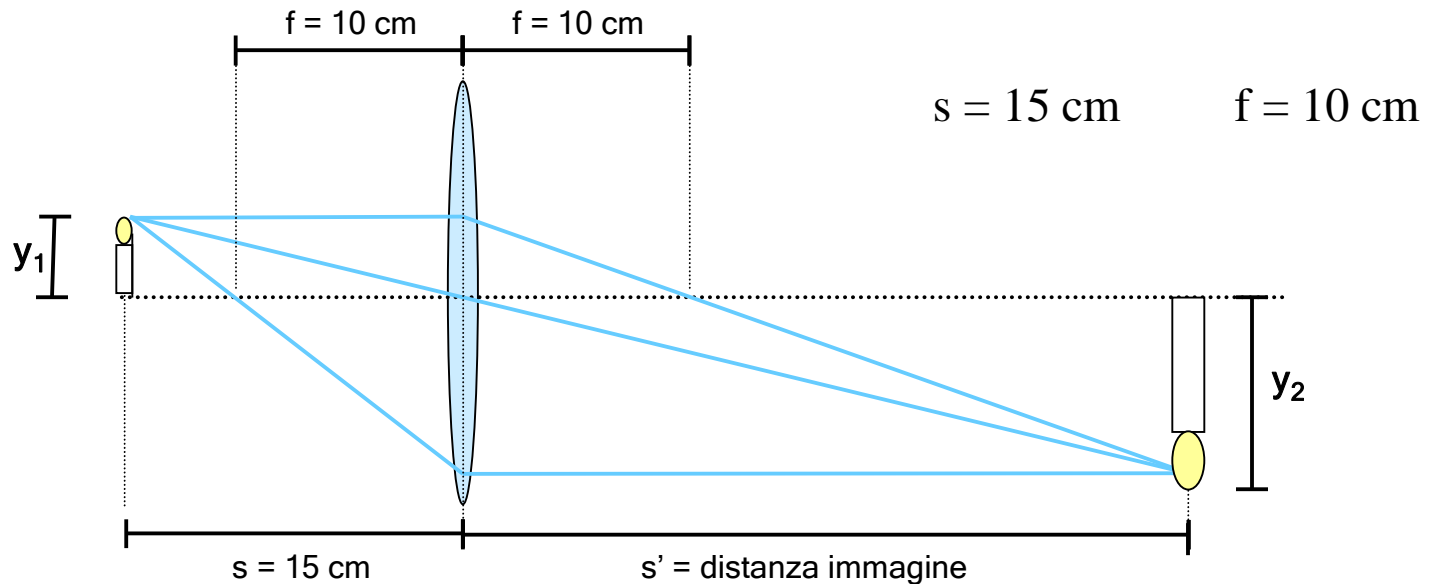


$$G = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

$G < 0$  indica che l'immagine è capovolta

# Lenti sottili

**Esempio:** una candela è posto ad una distanza di 15 cm da una lente biconvessa simmetrica caratterizzata da una distanza focale di 10 cm. A quale distanza si forma l'immagine? E' dritta o capovolta? Qual è l'ingrandimento nel punto immagine?



$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{15} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{10} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{s'} = \frac{1}{10} - \frac{1}{15} = \frac{3-2}{30} = \frac{1}{30} \quad \Rightarrow \quad s' = 30 \text{ cm}$$

Il segno positivo indica che l'immagine viene prodotta dall'altro lato della lente (**immagine reale**)

$$G = -\frac{s'}{s} = -\frac{30}{15} = -2$$

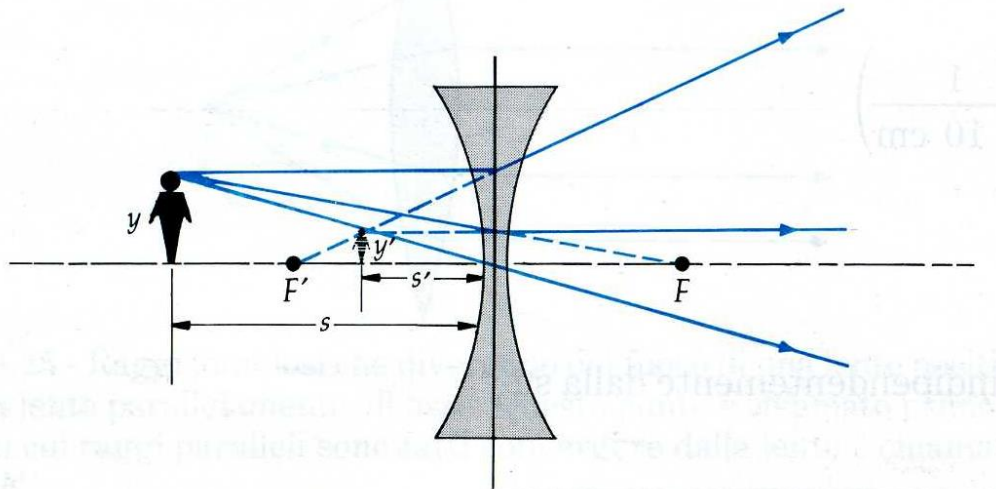
Il segno meno indica che l'immagine è **capovolta**

# Lenti sottili

In modo analogo, nel caso **di lenti biconcave simmetriche (che sono divergenti)** la costruzione oggetto-immagine può essere fatta nel seguente modo.

Il fascio parallelo all'asse ottico diverge in modo che la prosecuzione (tratteggiata in figura) dal lato da cui proviene il fascio, vada a convergere nel fuoco  $F'$

Il fascio che passa nel centro della lente continua senza cambiare direzione il loro punto di incontro è l'immagine.



# Strumenti ottici

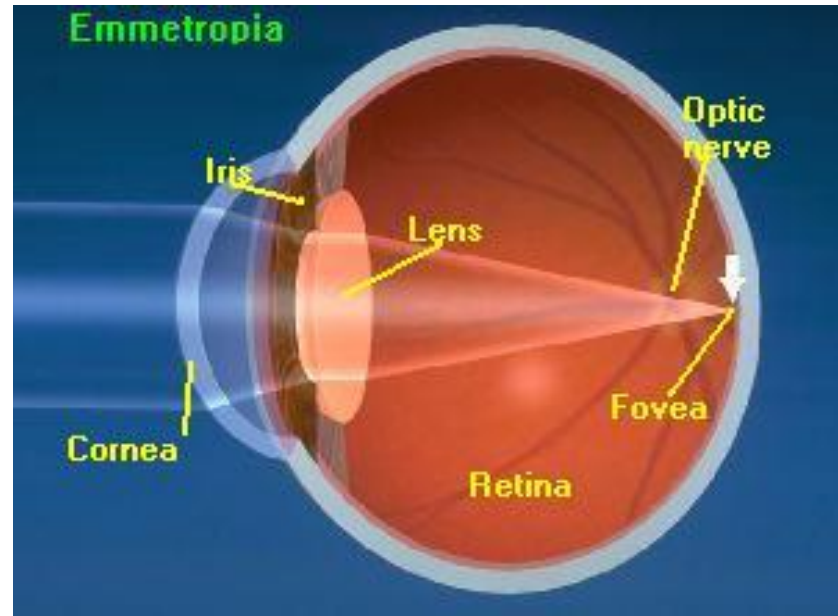
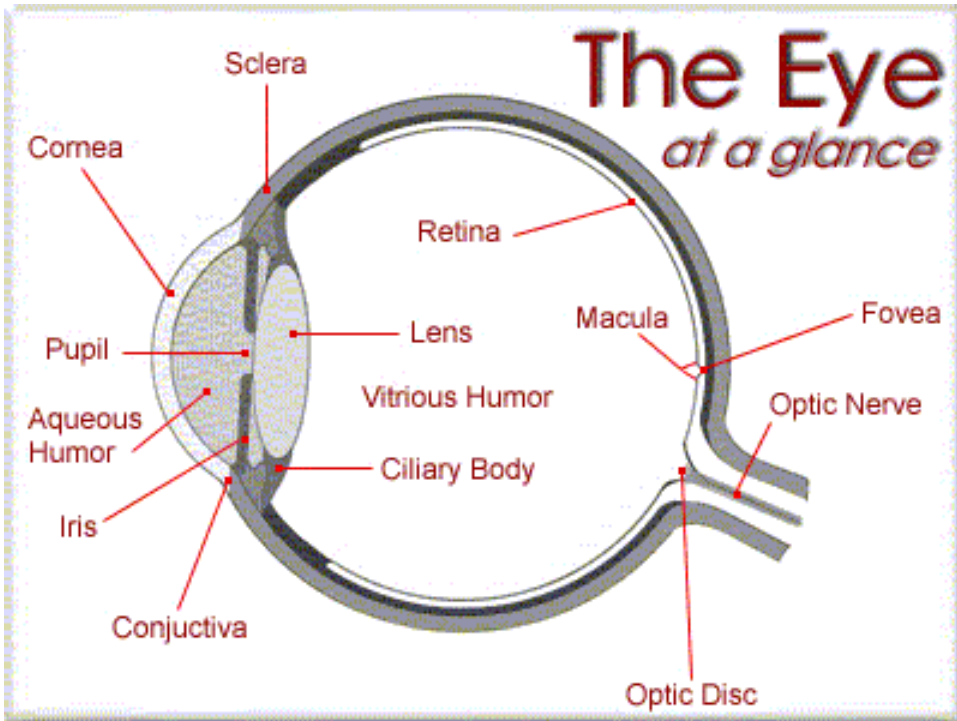
Occhio

Lente d'ingrandimento

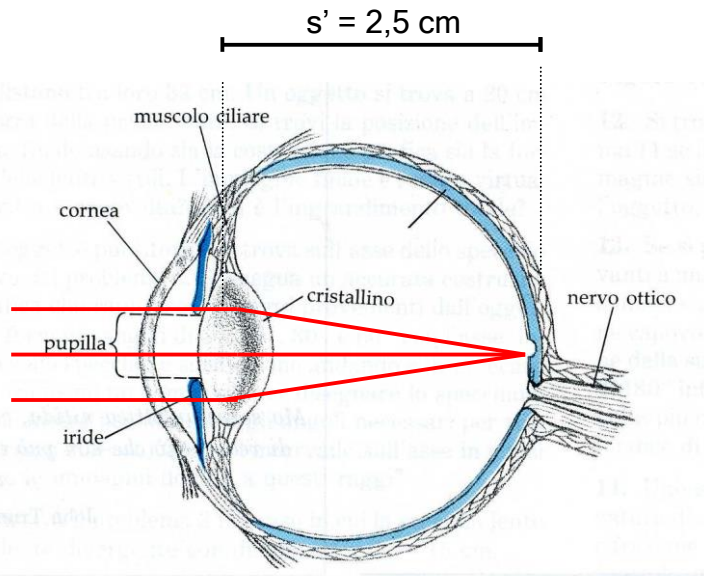
Macchina fotografica

Microscopio

In questo contesto prenderemo in considerazione tali strumenti ottici solo sotto **l'aspetto delle lenti sottili** che li caratterizzano.



# Occhio



Nell'occhio è presente una **lente sottile**, il **cristallino** che ha il compito di focalizzare l'immagine sulla **retina** (strato di cellule nervose che riveste la superficie posteriore del bulbo oculare) che è posta a circa 2,5 cm di distanza.

Il **muscolo ciliare** è in grado di **modificare la forma del cristallino** (cambiandone i **raggi di curvatura**) in modo da modificare la distanza focale (si ricordi la formula dei fabbricanti di lenti).

In **condizioni di riposo**, ovvero quando sulla retina viene **focalizzata** l'immagine che giunge dall'**infinito**, il cristallino ha una distanza **focale di 2,5 cm**.

Se si porta l'oggetto più vicino all'occhio il muscolo ciliare modifica la forma del cristallino in modo da cambiarne la distanza focale (... praticamente applica la formula dei fabbricanti di lenti senza neppure saperlo ...). Il punto più vicino di cui il cristallino riesce a formare un'immagine nitida sulla retina è detto **punto prossimo**. Tale valore varia con l'età, passando da circa 7 cm all'età di 10 anni fino anche a 2 m oltre i 60 anni (perdita di flessibilità del cristallino). **mediamente si considera un valore di 25 cm (detta distanza della visione distinta)**.

# Occhio

**Esempio:** qual è la distanza focale del cristallino quando mette a fuoco un'immagine sulla retina di un oggetto posto a 25 cm? E se l'oggetto si trovasse a 7 cm?

$$s = 25 \text{ cm} \quad s' = 2,5 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{25} + \frac{1}{2,5} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad f = 2,27 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{7} + \frac{1}{2,5} = \frac{1}{f} \quad \Rightarrow \quad f = 1,84 \text{ cm}$$

In ottica si indica con potere diottrico (P) l'inverso della distanza focale di una lente misurata in metri, per cui nel caso del cristallino per i casi dell'esercizio, si ha (D = Diottrie):

Distanza:  $\infty$

$$f = 2,5 \text{ cm}$$

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,025} = 40 \text{ D}$$

Distanza: 25 cm

$$f = 2,27 \text{ cm}$$

$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,0227} = 44 \text{ D}$$

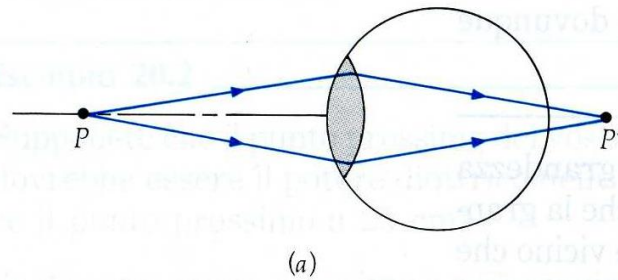
Distanza: 7 cm

$$f = 1,84 \text{ cm}$$

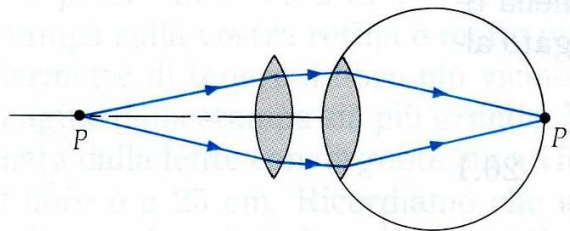
$$P = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,0184} = 54,3 \text{ D}$$

# Occhio

Alcune dei difetti visivi più comuni.

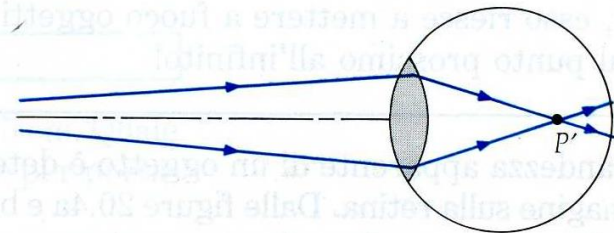


(a)

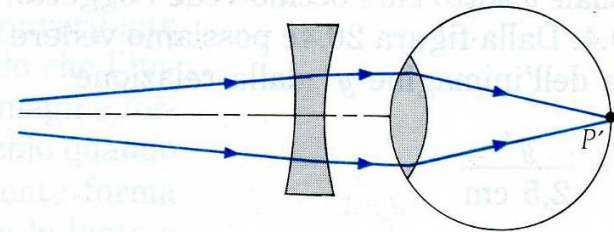


(b)

**Figura 20.2.** Il cristallino di un occhio ipermetrope fa convergere in un punto  $P'$  dietro la retina i raggi provenienti da un oggetto vicino  $P$ . (b) Una lente convergente corregge questo difetto riportando l'immagine sulla retina.



(a)



(b)

**Figura 20.3.** (a) Il cristallino di un occhio miope fa convergere in un punto davanti alla retina i raggi provenienti da un oggetto lontano. (b) Una lente divergente corregge il difetto.



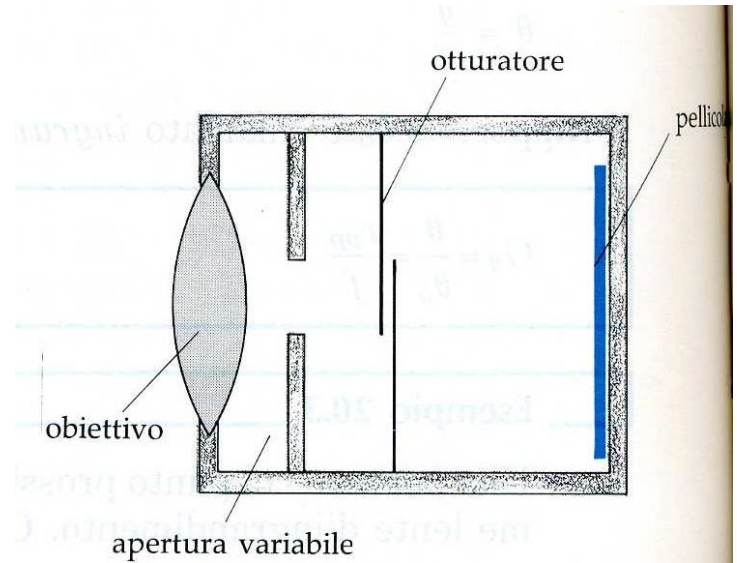
# Macchina fotografica

Una macchina fotografica è costituita da una **lente convergente**, chiamata **obiettivo**, un'apertura variabile detta **diaframma** e un **otturatore** che può venire aperto per un breve intervallo di tempo.

Diversamente dall'occhio umano, che ha una lente di distanza focale variabile, la distanza focale della lente nella macchina fotografica è fissa.

Di solito, la **distanza focale** di una lente normale in una macchina fotografica formato 35 mm è **50 mm** (i 35 mm si riferiscono alla larghezza della pellicola).

La messa a fuoco si ottiene variando la distanza tra la lente e la pellicola, ovvero avvicinando o allontanando l'obiettivo rispetto alla pellicola.



**Esempio:** La distanza focale dell'obiettivo di una macchina fotografica è 50 mm. Di quanto bisogna spostare l'obiettivo per passare dalla formazione dell'immagine nitida di un oggetto molto distante a quella di un oggetto distante 2 m?

$$s = \infty \quad f = 50 \text{ mm}$$

$$s = 2 \text{ m} \quad f = 50 \text{ mm}$$

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{50}$$



$$s' = f = 5 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{2000} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{50}$$

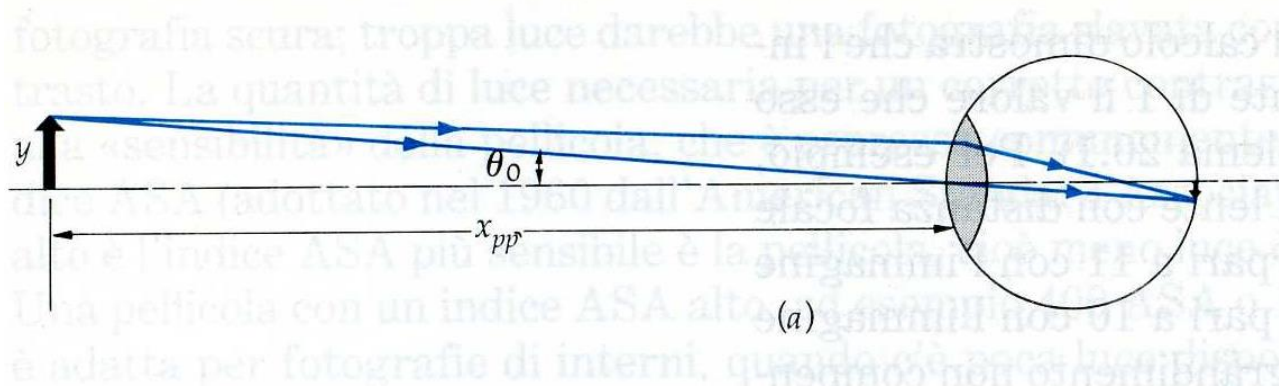


$$s' = 51,3 \text{ mm}$$

# Lente d'ingrandimento

Si è visto che la grandezza apparente di un oggetto può essere aumentata usando una lente convergente, per poter avvicinare l'oggetto all'occhio, aumentando la grandezza dell'immagine sulla retina. Una tale lente convergente è detta **lente d'ingrandimento** o **microscopio semplice**.

Supponiamo di avere un oggetto alto  $y$  nel punto prossimo dell'occhio che indichiamo con  $x_{pp}$ .

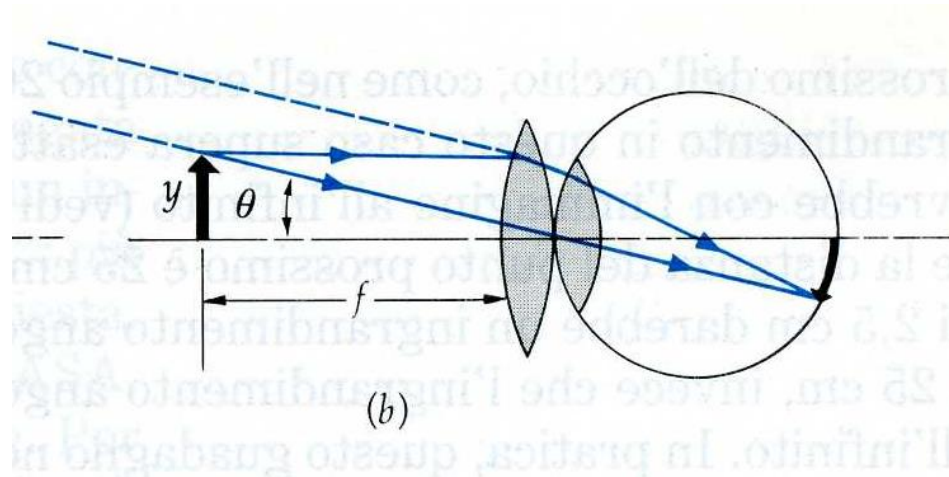


L'altezza dell'immagine sulla retina sarà proporzionale all'angolo  $\theta$ , che considerato le dimensioni angolari in gioco è piccolo, per cui si può scrivere che:

$$\frac{y}{x_{pp}} = \tan \theta_0 \cong \theta_0$$

# Lente d'ingrandimento

Supponiamo ora di frapporre tra l'occhio e l'oggetto una lente con focale  $f$  (minore di  $x_{pp}$ ) in modo che l'oggetto sia ad una distanza dalla lente pari alla distanza focale della stessa.



I raggi paralleli vengono fatti convergere sulla retina dall'occhio rilassato. Supponendo che la lente sia vicina all'occhio, l'angolo visuale dell'oggetto vale ora:

$$\theta \cong \frac{y}{f}$$

Il rapporto, che mi dà l'ingrandimento angolare vale:

$$G = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{x_{pp}}{f}$$

# Lente d'ingrandimento

**Esempio:** una persona con punto prossimo a 25 cm usa una lente di 40 D come lente d'ingrandimento, Che ingrandimento angolare ottiene?

$$f = \frac{1}{P} = \frac{1}{40 D} = 0,025 m = 2,5 cm$$

$$G = \frac{x_{pp}}{f} = \frac{25}{2,5} = 10$$

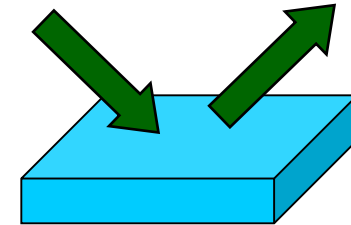
Un oggetto appare 10 volte più grande perché può essere posto alla distanza di 2,5 cm, invece che 25 cm, dall'occhio.

# Microscopia Ottica

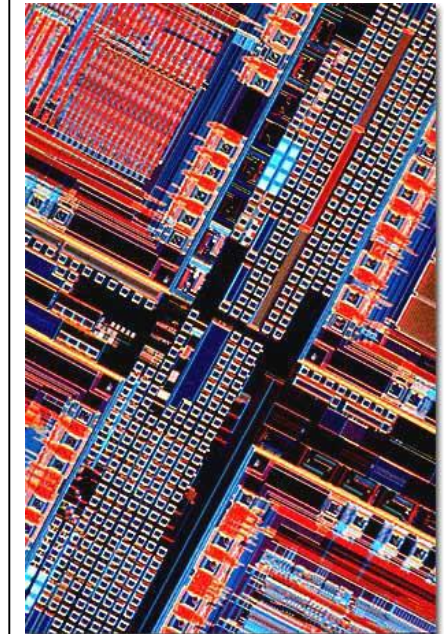
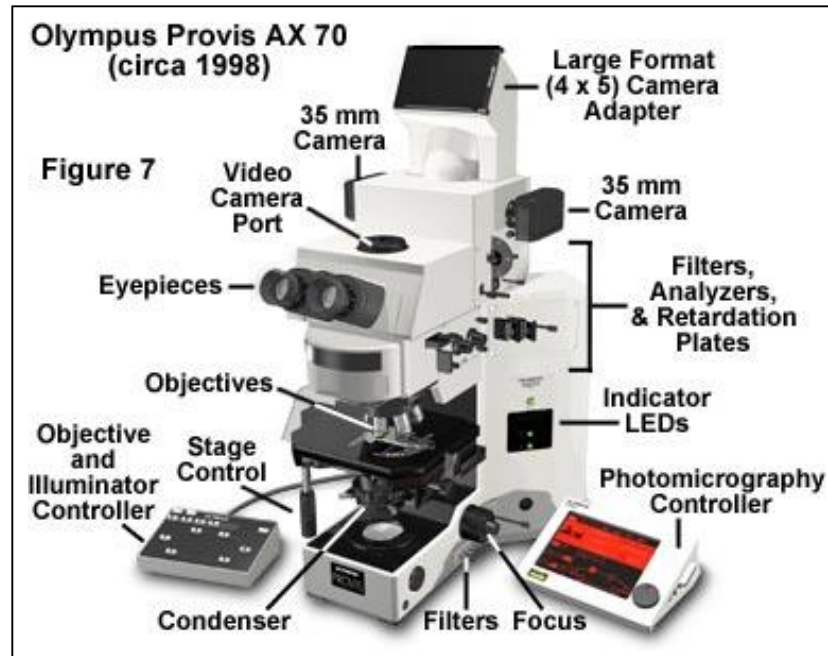
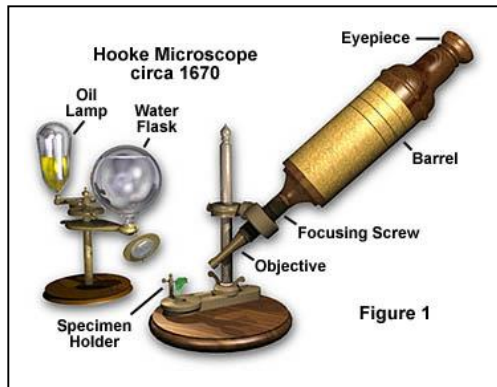
Per quanto antica, la microscopia ottica trova ampi impieghi in quasi tutti i laboratori.

Con alcuni accorgimenti è possibile raggiungere una risoluzione spaziale di circa 250 nm, anche se in tal modo la profondità di campo risulta essere molto bassa.

Fotoni                      Fotoni



Microscopia ottica



# Microscopia Ottica

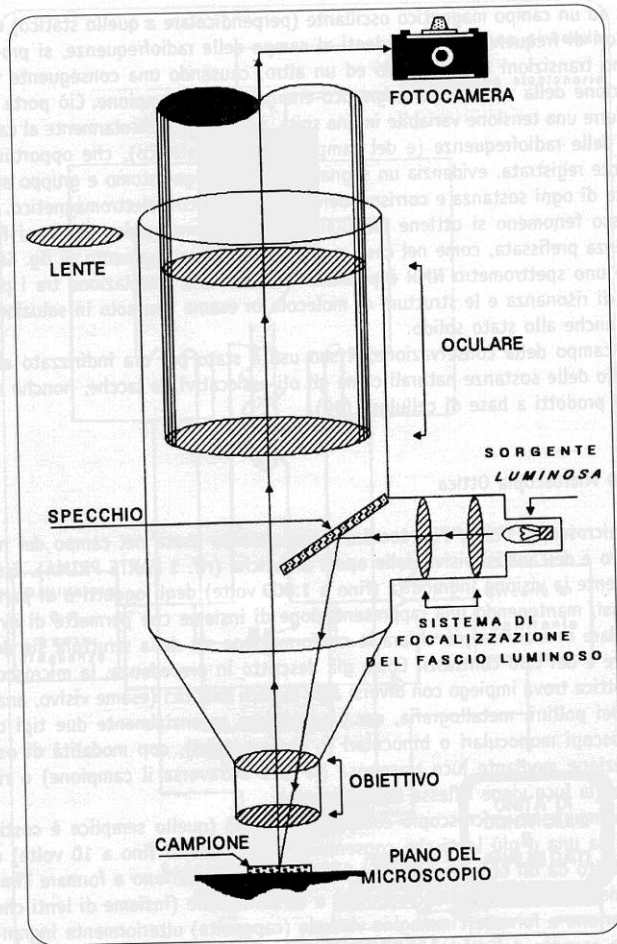


Fig. 47 - Rappresentazione schematica di un microscopio ottico composto con illuminazione laterale

Lo Russo S. e Schippa B., *Le metodologie scientifiche per lo studio dei beni culturali*, Pitagora Editrice Bologna, 2001

La microscopia ottica è molto utilizzata nel campo del restauro e dell'analisi delle opere artistiche.

Essa consente la visione ingrandita (fino a un massimo di circa **1000 volte**) degli oggetti o di parte di essi, mantenendo una rappresentazione d'insieme che permette di evidenziare in maniera più chiara la conformazione sia della struttura sia del colore e dei contrasti.

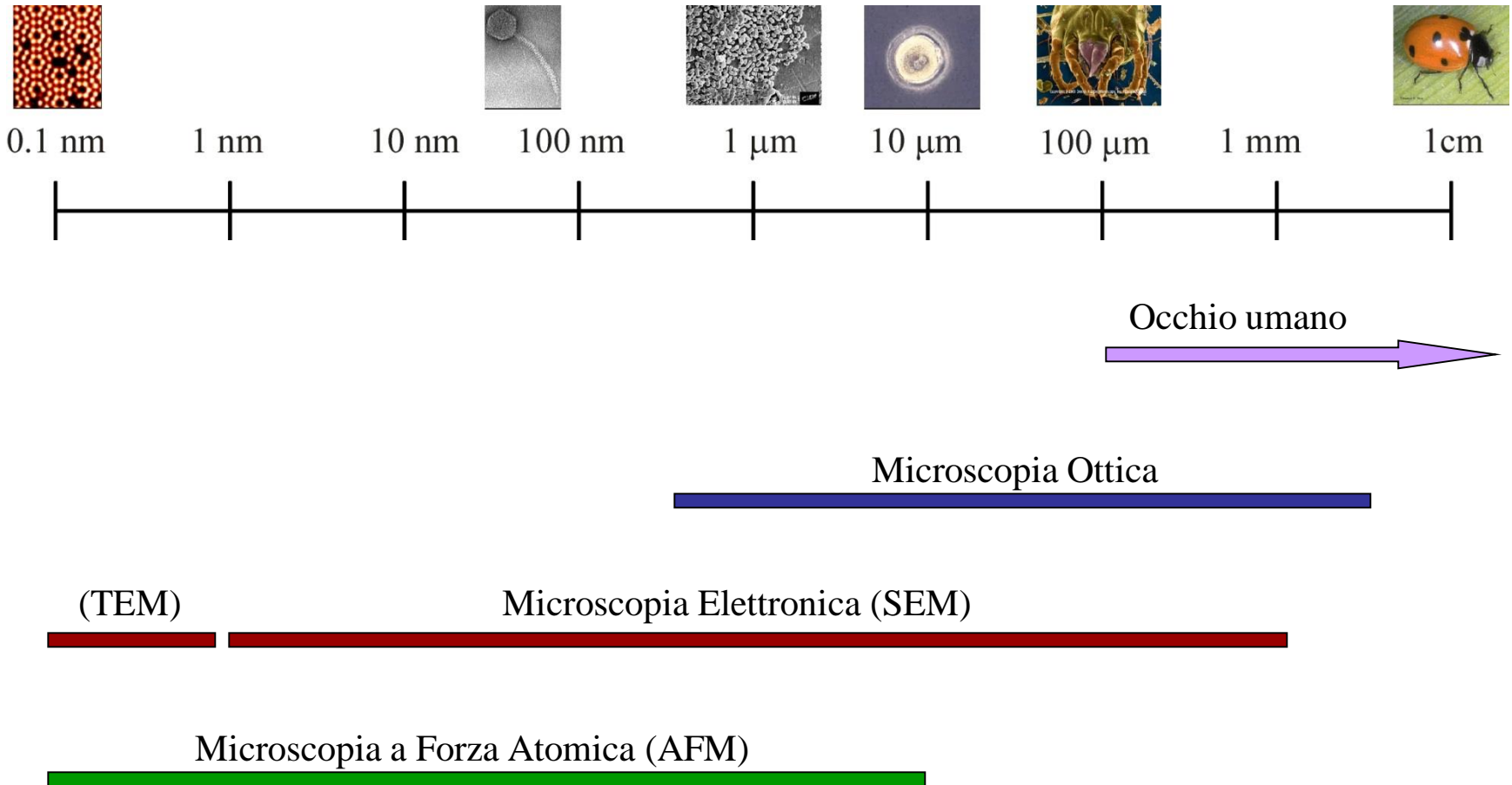
Mentre in un microscopio semplice (lente d'ingrandimento) si può arrivare solo fino a 10 ingrandimenti, in uno composto si arriva fino a 1000 ingrandimenti.

In campo artistico e del restauro vengono solitamente usati ingrandimenti da **40 X (basso) a 500 X (alto)**. Nel caso di bassi ingrandimenti il campione non richiede particolari preparazioni.

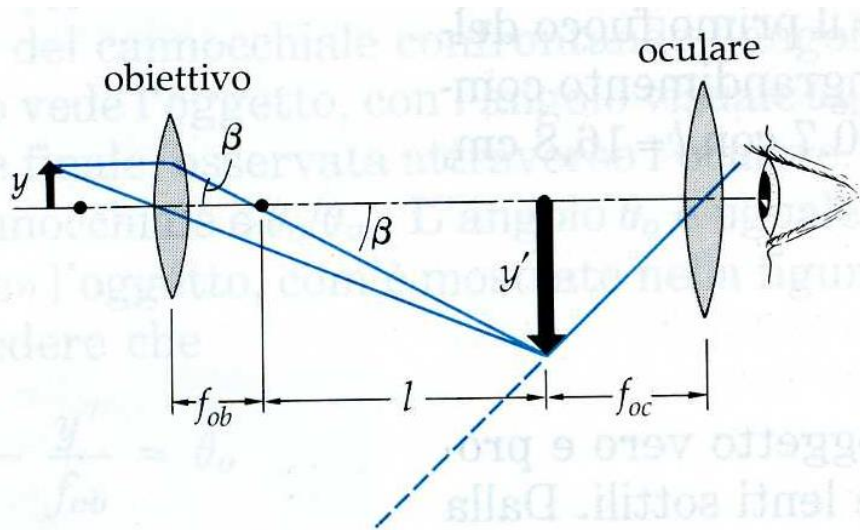
Tra i sistemi di illuminazione del campione più usati è da citare il metodo Kohle rappresentato in figura.

Attualmente i microscopi ottici sono dotati di sistemi fotografici che consentono di raccogliere e catalogare le immagini; inoltre l'impiego di speciali macchine fotografiche sensibili all'**UV (ultravioletto)** e all'**IR (infrarosso)**, di cui parleremo tra poco, rende evidenti particolari invisibili ai nostri occhi.

# Confronto tra le diverse tecniche di microscopia



# Microscopio composto



Il microscopio composto (solitamente impiegato) è formato, nella sua forma più semplice, dalla sequenza di **due lenti sottili**.

L'**ingrandimento totale** per un microscopio composto è dato dal **prodotto** dell'ingrandimento trasversale dell'**obiettivo** e l'ingrandimento angolare dell'**oculare**:

Consideriamo la prima lente (obiettivo). In tal caso si era visto che l'ingrandimento lineare trasversale valeva:

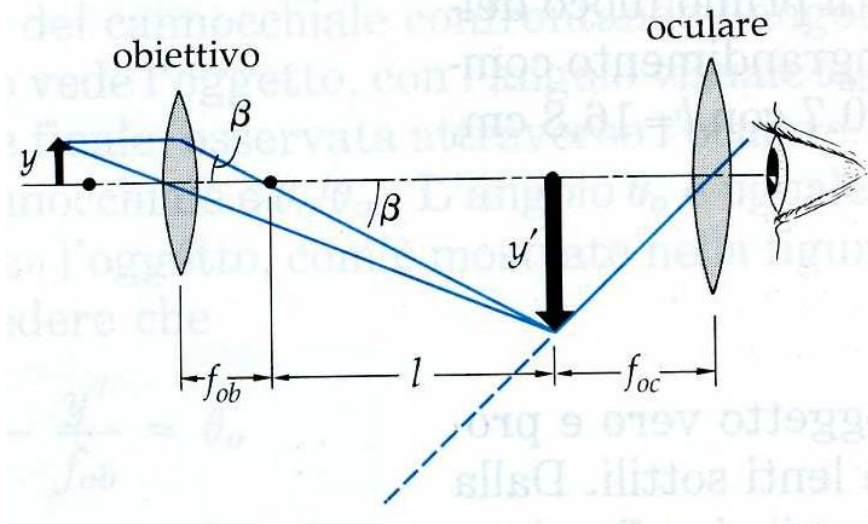
$$G_{ob} = \frac{y'}{y} = -\frac{s'}{s}$$

Volendo esprimere tale ingrandimento in funzione della focale dell'obiettivo,  $f_{ob}$ , (che è quella di solito riportata sullo strumento) basta ricordare la legge delle lenti sottili:

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f_{ob}} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{s} = \frac{1}{f_{ob}} - \frac{1}{s'} = \frac{s' - f_{ob}}{f_{ob} \cdot s'} \quad \Rightarrow \quad G = -\frac{s'}{s} = -\frac{s'}{\frac{s' - f_{ob}}{f_{ob} \cdot s'}} = -\frac{l}{f_{ob}}$$



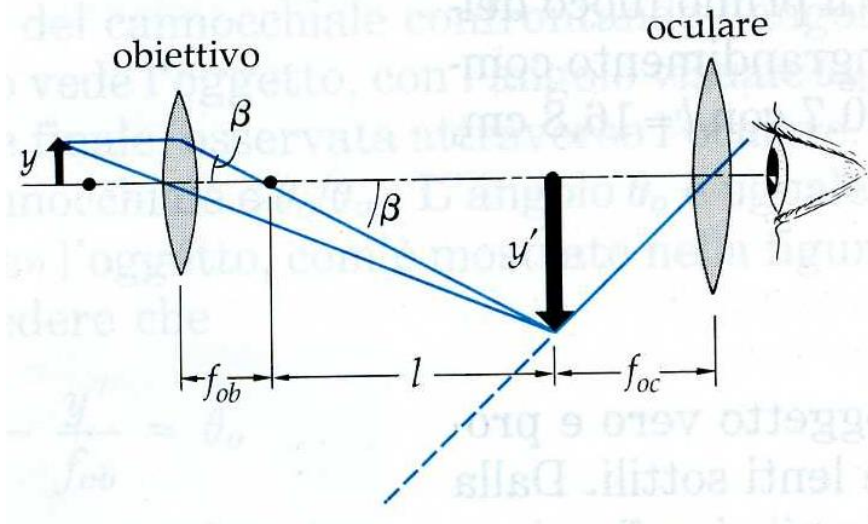
# Microscopio composto



Per quanto riguarda la seconda lente (oculare), è montata nel microscopio in modo che la sua distanza focale  $f_{oc}$  coincida con la posizione in cui si forma l'immagine dall'obiettivo. In questo modo ci si trova nella stessa situazione che era stata incontrata nel caso della lente d'ingrandimento, per cui l'ingrandimento angolare vale:

$$G_{oc} = \frac{x_{pp}}{f_{oc}}$$

# Microscopio composto



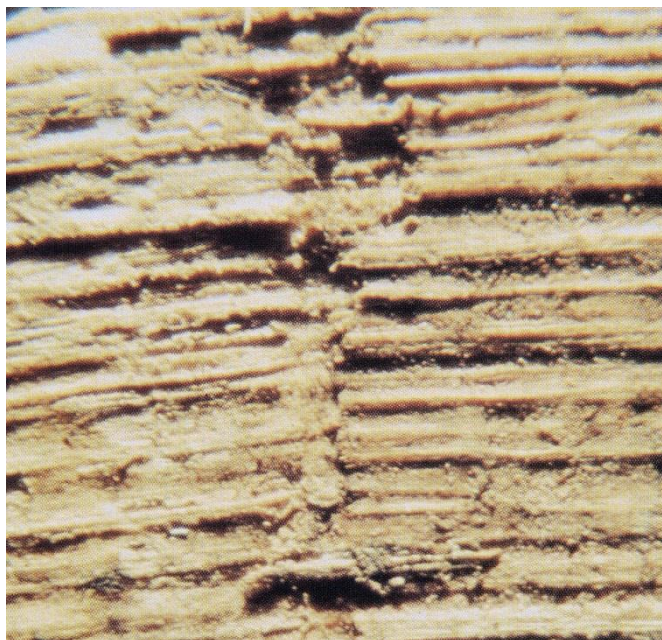
L'ingrandimento totale sarà quindi (il segno meno indica che l'immagine risulterà capovolta):

$$G = G_{ob} \cdot G_{oc} = -\frac{l}{f_{ob}} \cdot \frac{x_{pp}}{f_{oc}}$$

Essendo  $l$  fisso e dipendente dalle dimensioni dello strumento e  $x_{pp}$  legato all'operatore (circa 25 cm), l'ingrandimento del microscopio composto viene a dipendere solo dalla focale di obiettivo ed oculare.

Torneremo nelle prossime lezioni sul microscopio, dopo aver studiato altri fenomeni di tipo ondulatorio che caratterizzano la luce e che influenzano/limitano le prestazioni di questi strumenti.

# Esempi



Particolare di un papiro egizio del sec. II d.C.  
Si nota la kollesis, zona di congiunzione di due  
fogli papiracei per formare il rotolo.

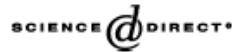


Immagini in sezione di pigmenti e pitture

# Esempi



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)



Journal of Cultural Heritage 5 (2004) 17–25

Journal of  
Cultural Heritage

[www.elsevier.com/locate/culher](http://www.elsevier.com/locate/culher)

Original article

The wall paintings in the former Refectory of the Trinità dei Monti convent in Rome: relating observations from restoration and archaeometric analyses to Andrea Pozzo's own treatise on the art of mural painting

Anna Candida Felici <sup>a</sup>, Gabriele Fronterotta <sup>a</sup>, Mario Piacentini <sup>a,\*</sup>, Chiara Nicolais <sup>a</sup>,  
Sebastiano Sciuti <sup>a</sup>, Margherita Vendittelli <sup>a</sup>, Cristina Vazio <sup>b</sup>

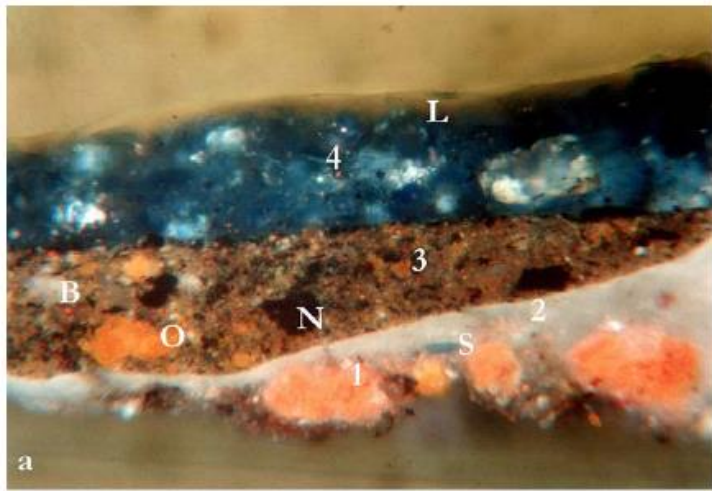


Fig. 1. General view of the Refectory of Trinità dei Monti Convent in Rome.

Secondo cronache del periodo, il ciclo decorativo dell'antico refettorio del convento di Roma di Trinità dei Monti fu dipinto da Padre Andrea Pozzo alla fine del XVII secolo; tuttavia gli esperti d'arte sono sempre stati divisi sull'attribuire l'intero ciclo a Pozzo.

La teoria predominante è quella che vede Pozzo come responsabile del progetto iniziale e realizzatore della sola volta e delle rappresentazioni architettoniche, mentre le figure sui muri sarebbero state dipinte da artisti la cui identità non è certa. I recenti lavori di restauro hanno dato l'opportunità di effettuare nuove analisi sui dipinti per ottenere **informazioni aggiuntive** sugli stessi.

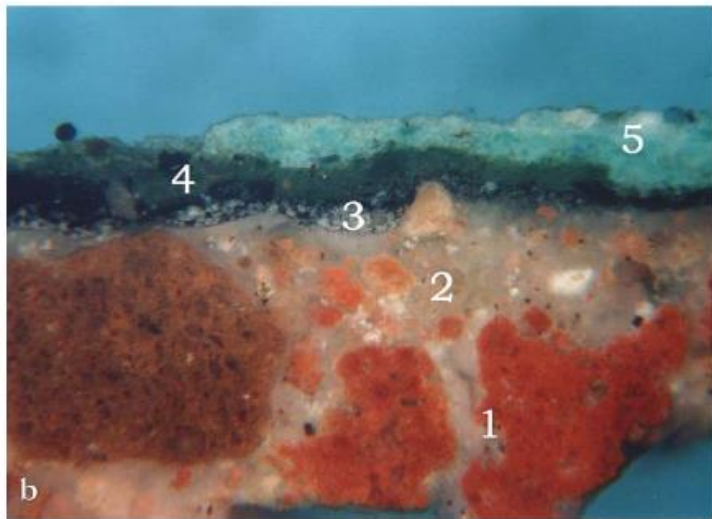
# Esempi



Tra le varie analisi effettuate sono stati anche osservati con il microscopio ottico dei piccoli campioni prelevati dagli affreschi (l'analisi chimica dei pigmenti è stata invece effettuata direttamente sugli affreschi per mezzo di un XRF in aria portatile di cui si parlerà l'anno prossimo).

**Fig. a. Campione da una zona di colore blu. Si osservano:**

- (1) l'intonaco costituito da calce spenta e pozzolana rossa
- (2) un primo strato costituito da calce, gesso e colla
- (3) uno strato di materiali leganti, tra i quali è possibile distinguere il giallo d'ocra (O), un pigmento nero di origine animale (N) e biacca (B)
- (4) lo strato pittorico che utilizza una colla animale come legante (L)



**Fig. b. Campione da una zona di colore verde. Si osservano:**

- (1) l'intonaco costituito da calce spenta e pozzolana rossa
- (2) un primo strato costituito da calce, gesso e colla
- (3) uno strato (grigio e sottile) di materiali leganti costituiti, tra le altre cose, da un pigmento nero di origine animale e biacca
- (4) uno strato pittorico verde che utilizza una colla animale come legante (costituente principale è la terra verde)
- (5) uno strato pittorico di un altro colore (più azzurro) che utilizza una colla animale come legante (costituente principale è la malachite con biacca)

Sezioni al microscopio ottico (luce bianca riflessa a 220 x) di due campioni di affresco in corrispondenza di un pigmento blu (a) e verde (b)

Oltre a conoscere l'esatta composizione dei pigmenti pittorici, le analisi effettuate hanno confermato che le tecniche e i materiali usati per decorare il refettorio sono molto simili a quelli descritti da Pozzo nel suo trattato, in particolare riguardo la preparazione dei muri, le tecniche di trasferimento pittorico e il tipo di pigmenti utilizzati. Le similitudini sono tali da mostrare che Padre Pozzo fu sicuramente responsabile di tutto il progetto (se non anche l'esecutore materiale).