

Fisica per applicazioni di realtà virtuale

Anno Accademico 2022-23

Prof. Matteo Brogi

Dipartimento di Fisica, stanza B3, nuovo edificio

Lezione 21

Strumenti ottici

L'occhio come strumento della visione umana

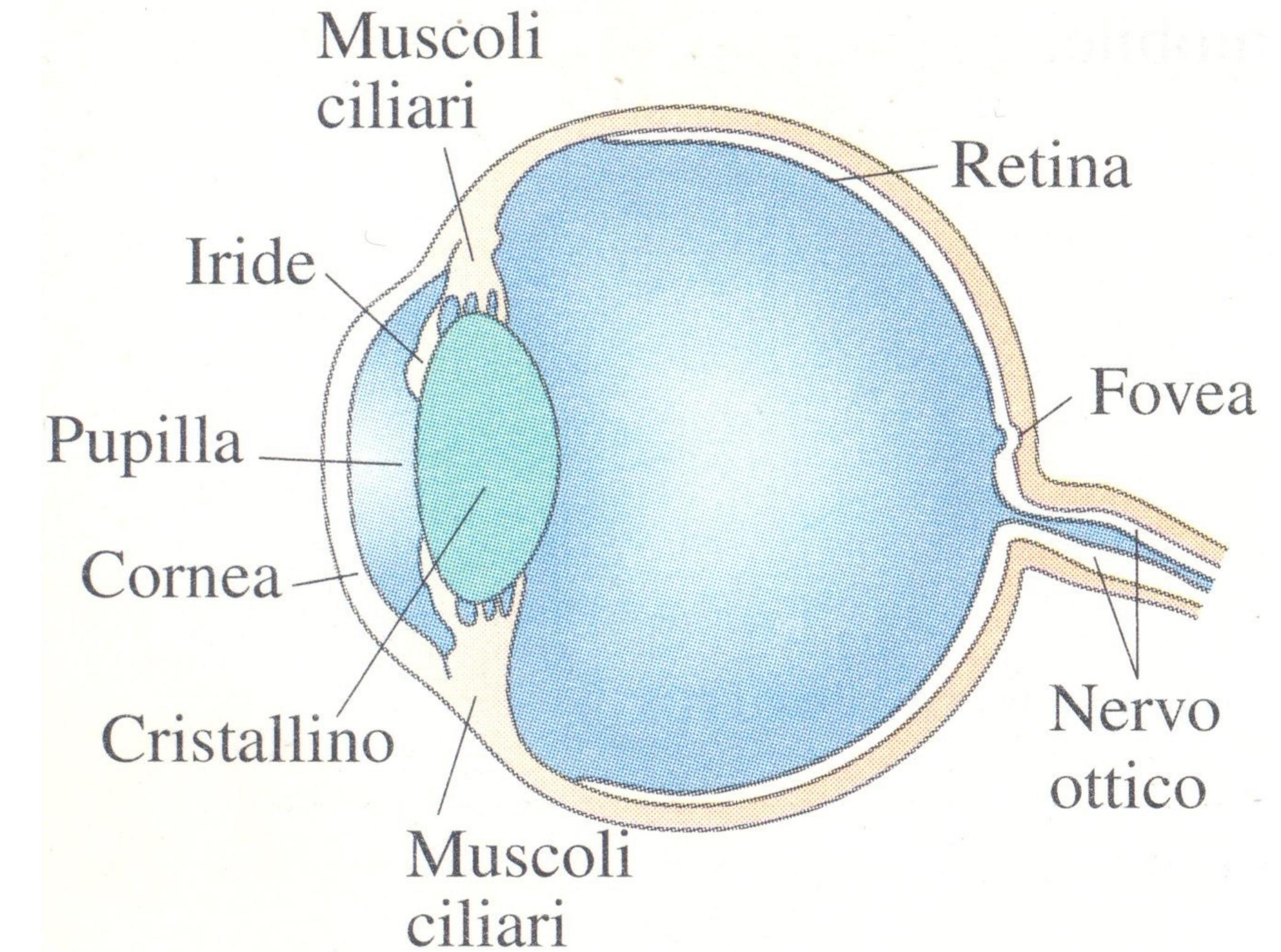
Iride (parte colorata): diaframma - regola la quantità di luce che entra

Pupilla: un foro d'entrata, nera perché la retina ha bassa riflettività

Retina: terminazioni nervose + recettori: coni e bastoncelli
⇒ conversione luce in impulso elettrico

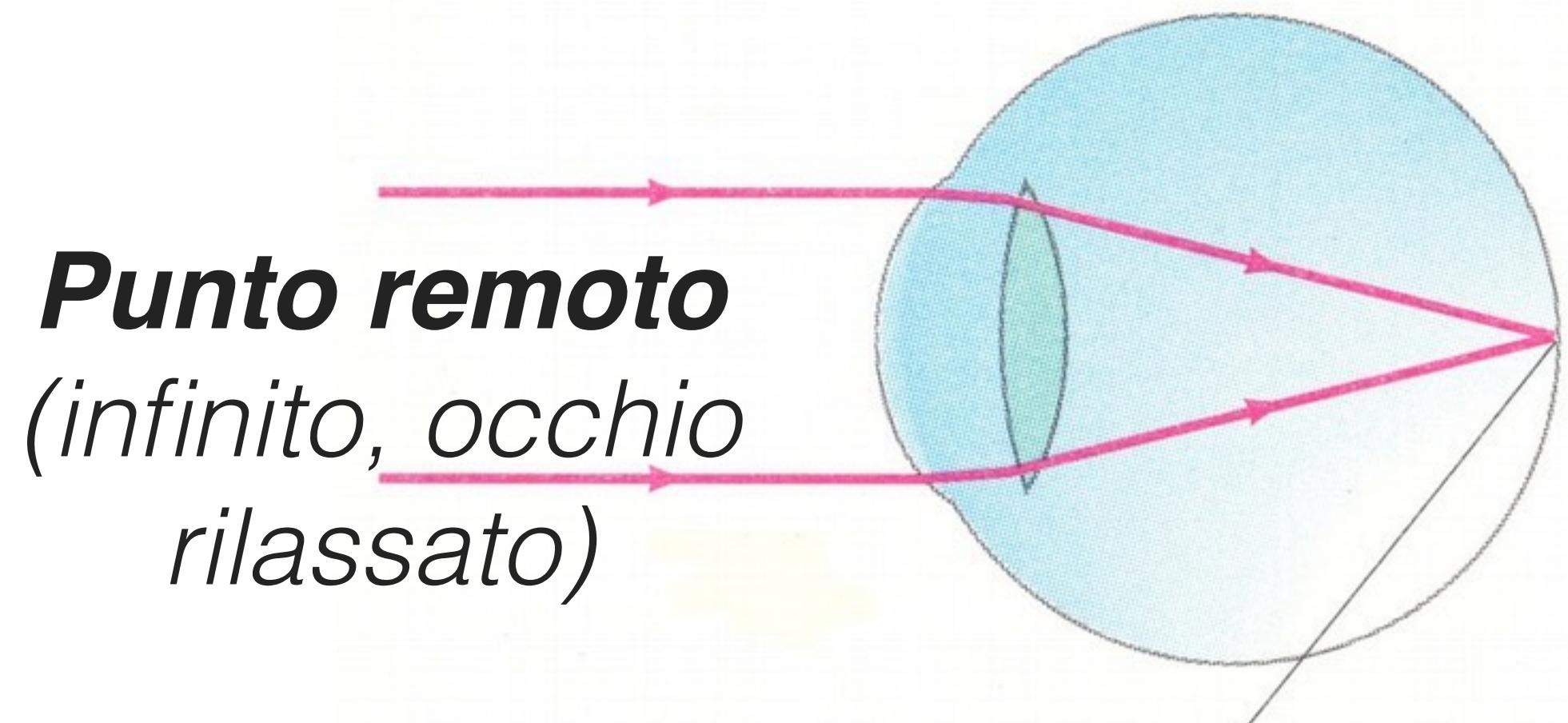
Fovea: zona ad alta risoluzione / alta sensibilità ai colori (centro campo visivo)

Cristallino (regolazione della focale tramite **muscoli ciliari**) e **cornea** (protezione + focalizzazione iniziale a $n=1.376$): sistema ottico vero e proprio.

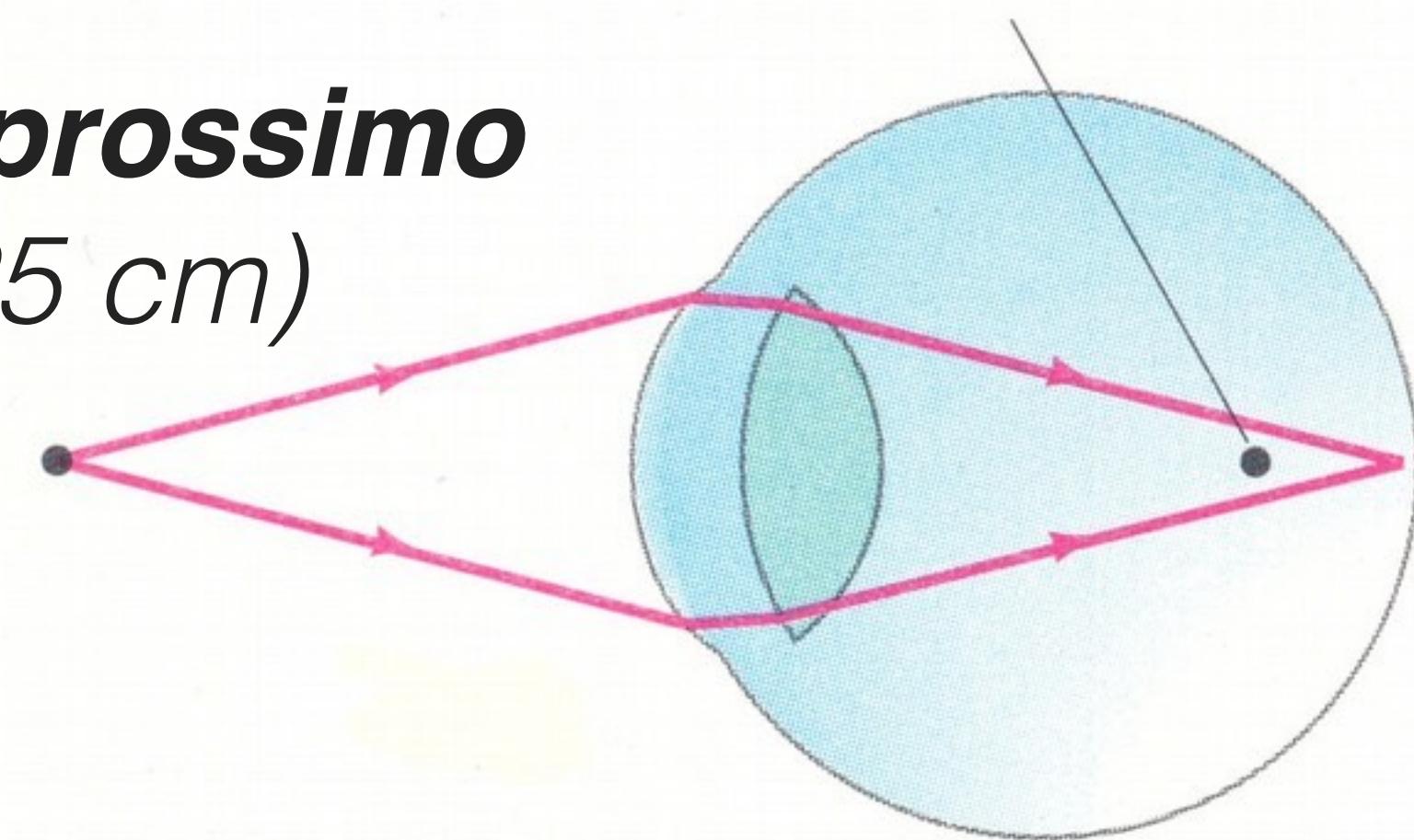


Cenni sui difetti visivi dell'occhio

Il cristallino deve sempre mettere a fuoco sulla retina, rilasciando o contraendo i muscoli ciliari (che controllano spessore e curvatura)



Punto prossimo
(~25 cm)



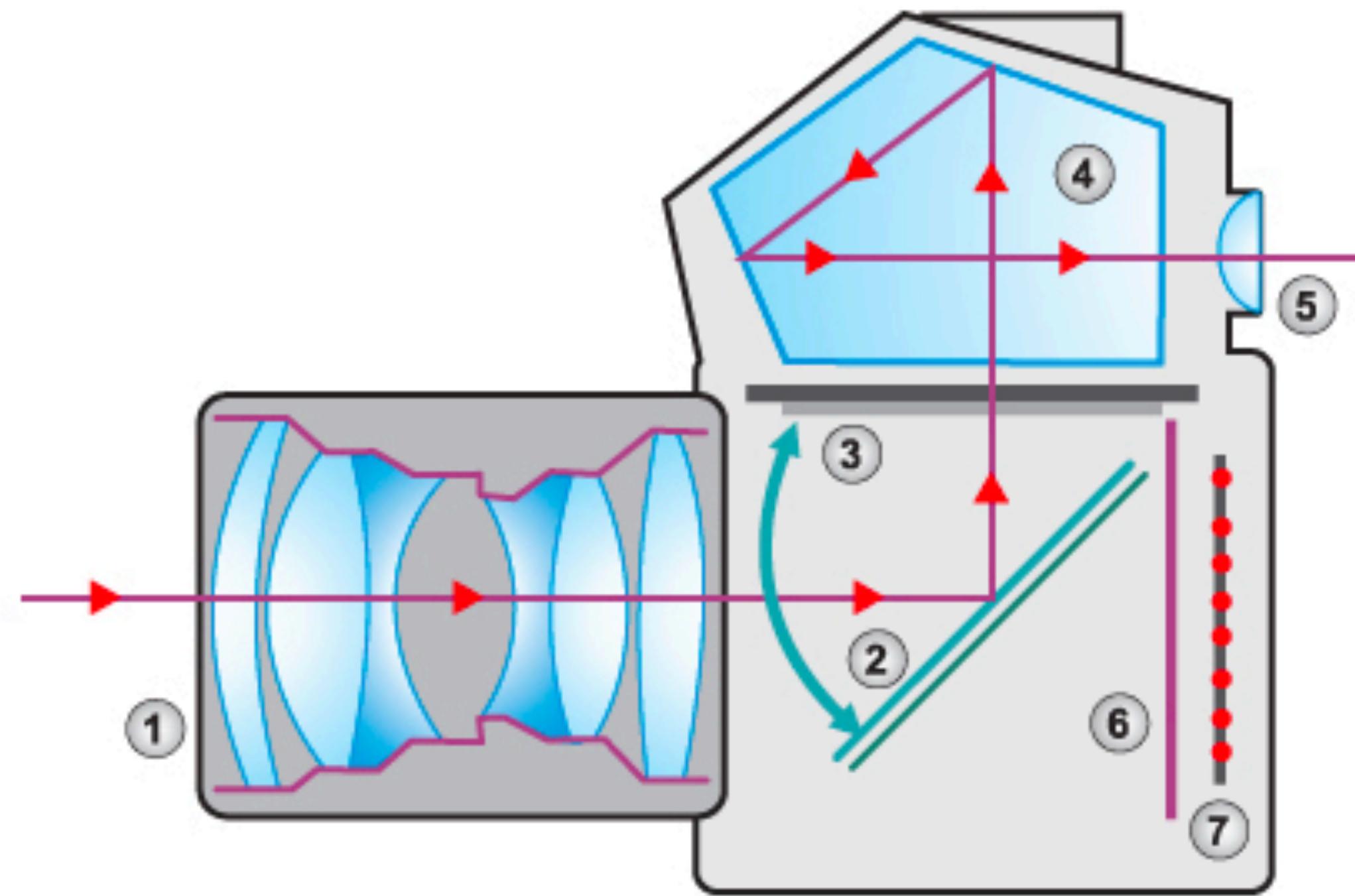
Miopia: punto remoto a distanza finita, oggetti lontani sfuocati. Punto convergenza davanti alla retina: si corregge con lente divergente.

Ipermetropia: punto prossimo superiore al normale. Punto convergenza dietro alla retina: si corregge con lente convergente.

Astigmatismo: generale “distorsione” dell’immagine (un punto diventa una linea): si corregge con lente cilindrica

La macchina fotografica: nomenclatura e funzionamento

Utile nel contesto delle “camere virtuali” - standard in grafica 3D



1: Obiettivo (lens): sistema di lenti che raccoglie e convoglia la luce. Ha un **diaframma** per regolare la quantità di luce entrante (**apertura**)

2: specchio piano: normalmente a 45° convoglia la luce a un prisma pentagonale (4) e poi a un oculare (5) che formano il **mirino**.

6: otturatore (shutter): si apre al momento dello scatto esponendo il **sensore** (7). Tempi di esposizione minimi: 0.5 ms, max a piacere (posa B)

Alcuni dati - obiettivo standard: 50 mm = immagini non ingrandite nel mirino.

$f = 10-50 \text{ mm}$: **grandangoli** (fino a 10 mm), $f > 50 \text{ mm}$: **teleobiettivi** (tipici 80-200 mm).

La focale dell'obiettivo influenza il **campo di vista** (field of view - FOV)

Messa a fuoco: per oggetti all'infinito è alla distanza focale dell'obiettivo. Per oggetti vicini avviene a distanza maggiore secondo l'equazione delle lenti \Rightarrow la distanza sensore-lente va aggiustata

Diaframma, f-stop e depth of field



Diaframma: riduce l'**apertura** della lente.
Per una focale f e apertura di diametro D :
rapporto di apertura

$$f\text{-ratio} = f / D$$

(tipicamente fra f-1.4 e f-32)

Si procede per fattori $\sqrt{2}$ (1.0, 1.4, 2.0, 2.8...)
⇒ dimezzano la luce entrante, detti **f-stop**

Immagini fuori fuoco: cerchio di confusione che cresce con l'apertura.
La regione “a fuoco” è detta **profondità di campo** (depth of field).

f-ratio piccoli (grosse aperture) = piccola profondità di campo:
i cerchi di confusione sono più grandi ⇒ la sfocatura diventa più evidente.

Esercizi sull'occhio e macchina fotografica

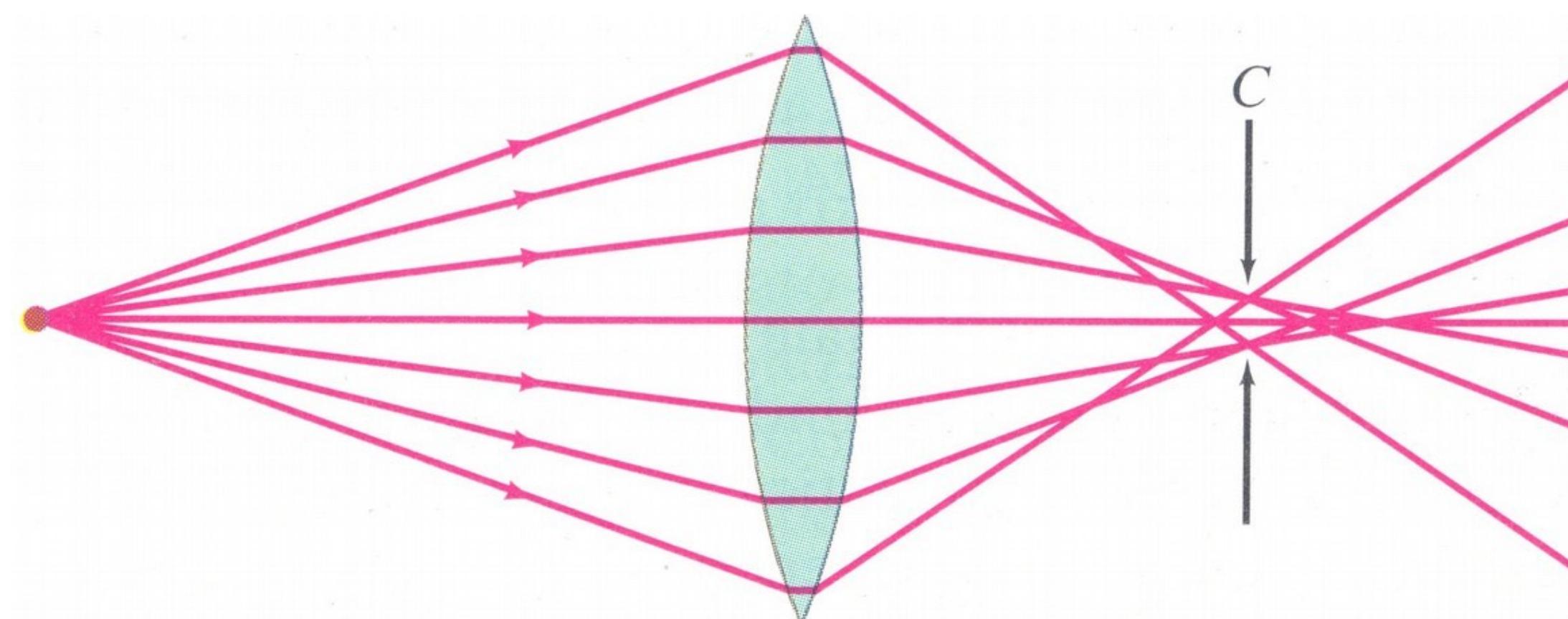
Esercizio 12.01: Una persona fortemente ipermetrope ha il punto prossimo a 100 cm. Quale sarà la potenza delle lenti che gli consentono di leggere un giornale a 25 cm? Si assuma che le lenti sono alla stessa distanza dell'occhio.

Esercizio 12.02: Una persona fortemente miope presenta un punto prossimo e remoto a 12 e 17 cm, rispettivamente. Qual è la potenza della lente necessaria a correggere il punto remoto e come si modifica il punto prossimo? Si consideri una distanza di 2 cm tra lente ed occhio.

Esercizio 12.03: Un obiettivo di 50 mm è inizialmente messo a fuoco all'infinito. Di quanto deve essere spostato per mettere a fuoco un oggetto a 3 m di distanza?

Esercizio 12.04: Per incrementare la profondità di campo, si decide di chiudere l'apertura del diaframma da f-8 a f-16. Di quanto deve cambiare il tempo di esposizione?

Aberrazioni monocromatiche nelle lenti



Già vista: aberrazione **sferica**.
(punti sull'asse focale)

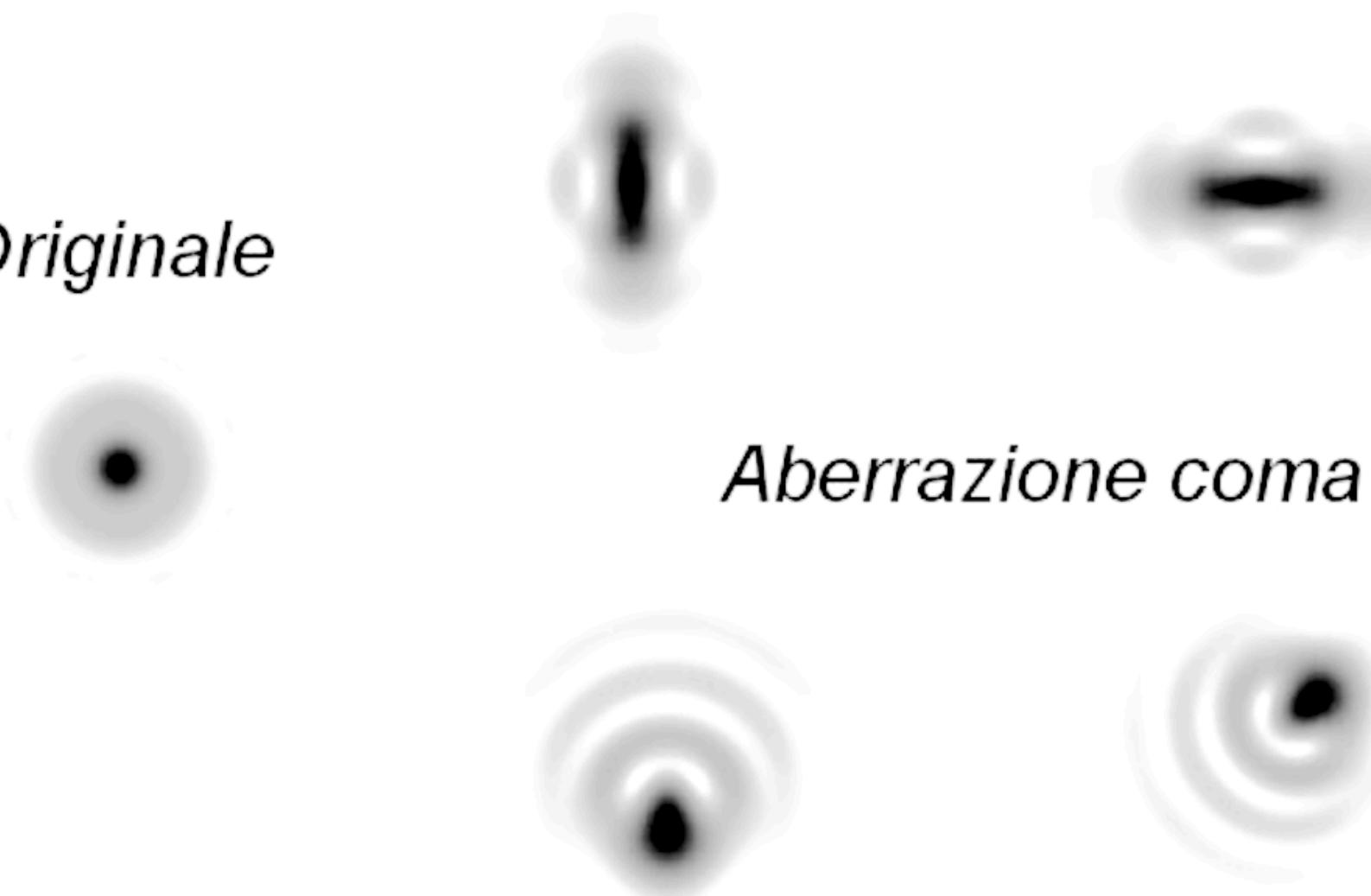
Crea un **cerchio di confusione** la cui estensione minima (al punto C) è detta cerchio di **minima confusione**

Per punti fuori dall'asse focale:



Aberrazione astigmatica

Originale



Aberrazione coma

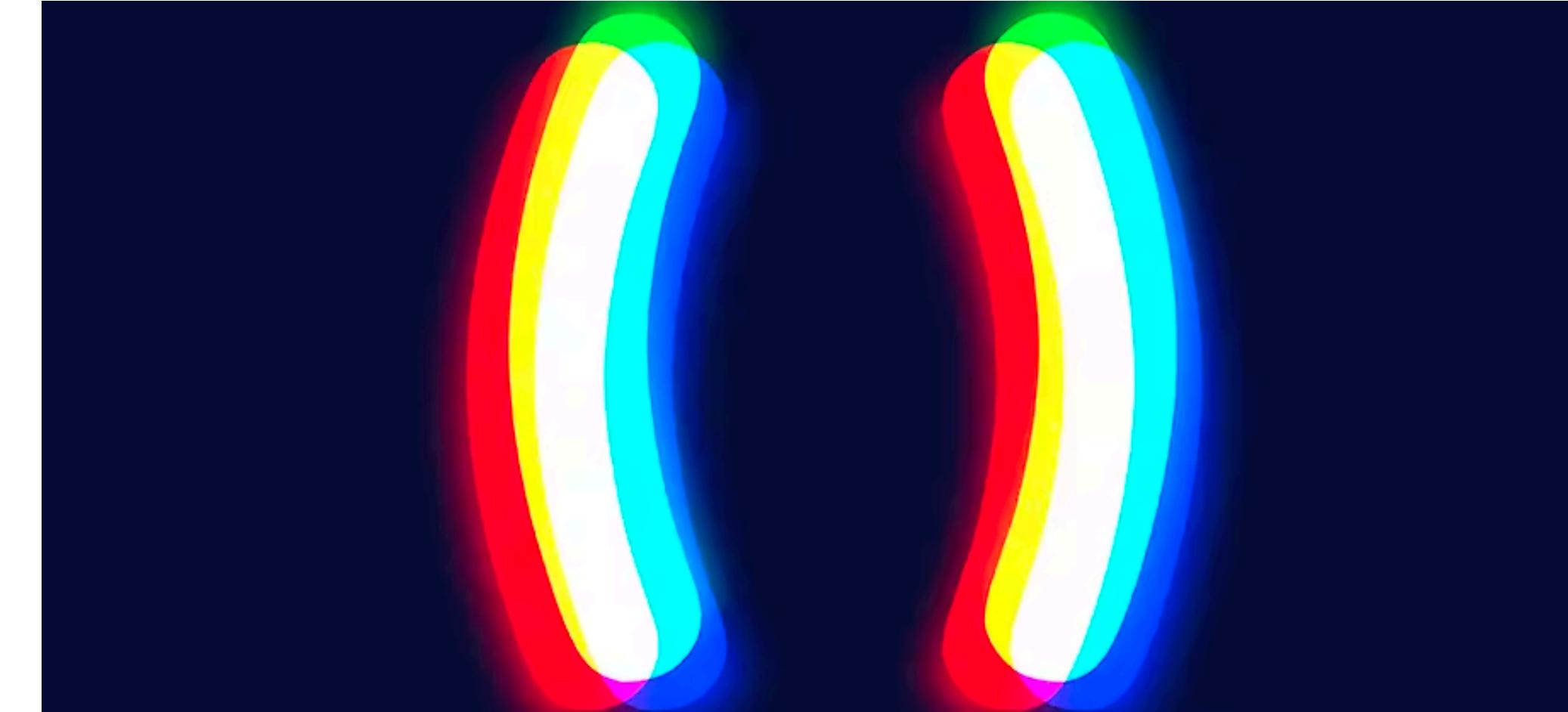
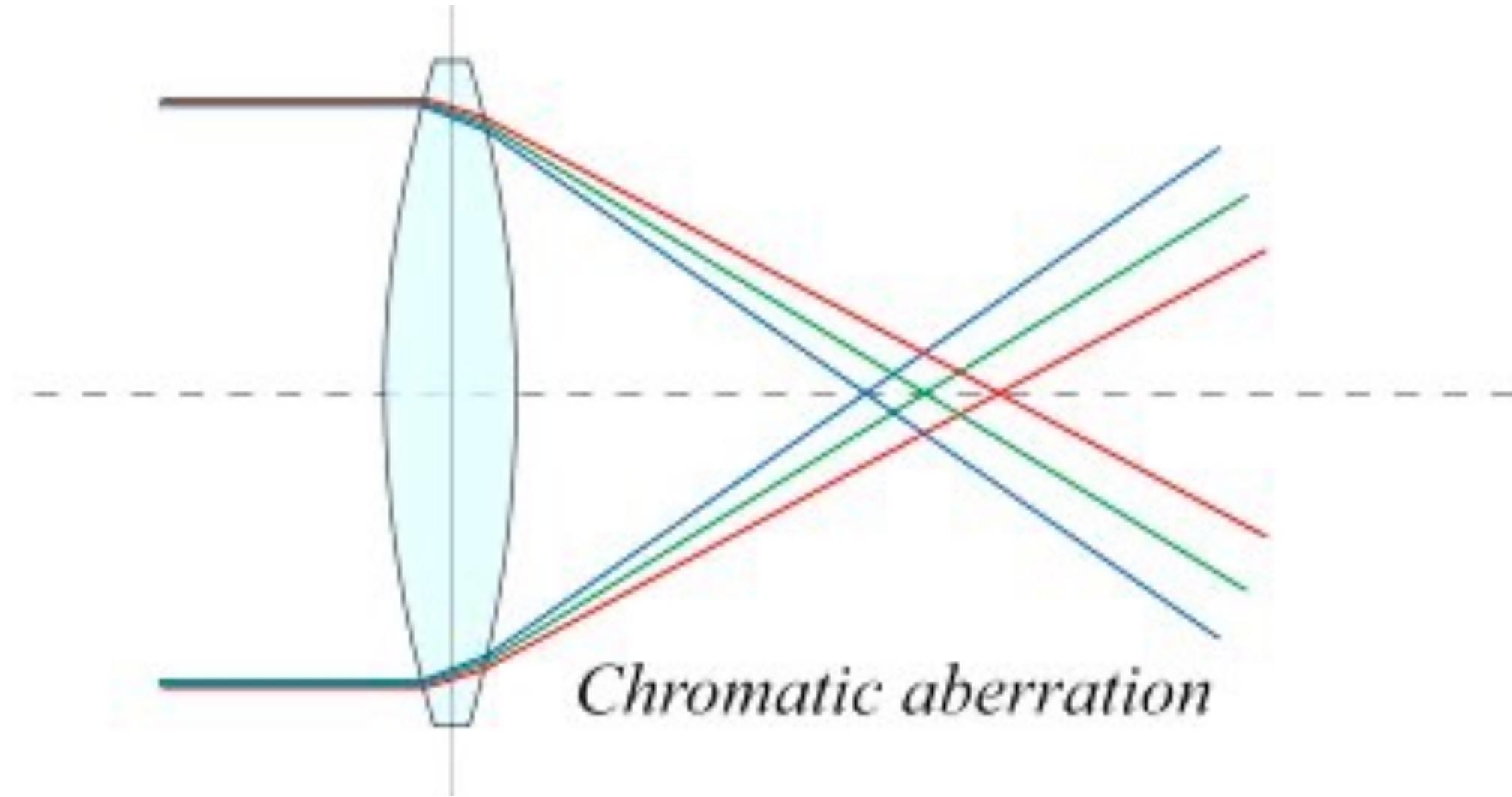
L'aberrazione sferica del telescopio spaziale Hubble

Immagine della galassia M100 appena dopo il lancio (circa 1990) e dopo la prima missione correttiva (dicembre 1993, Wide Field and Planetary Camera 2)



Aberrazione cromatica delle lenti

Raggi di λ diverse convergono in punti diversi (n diverso)

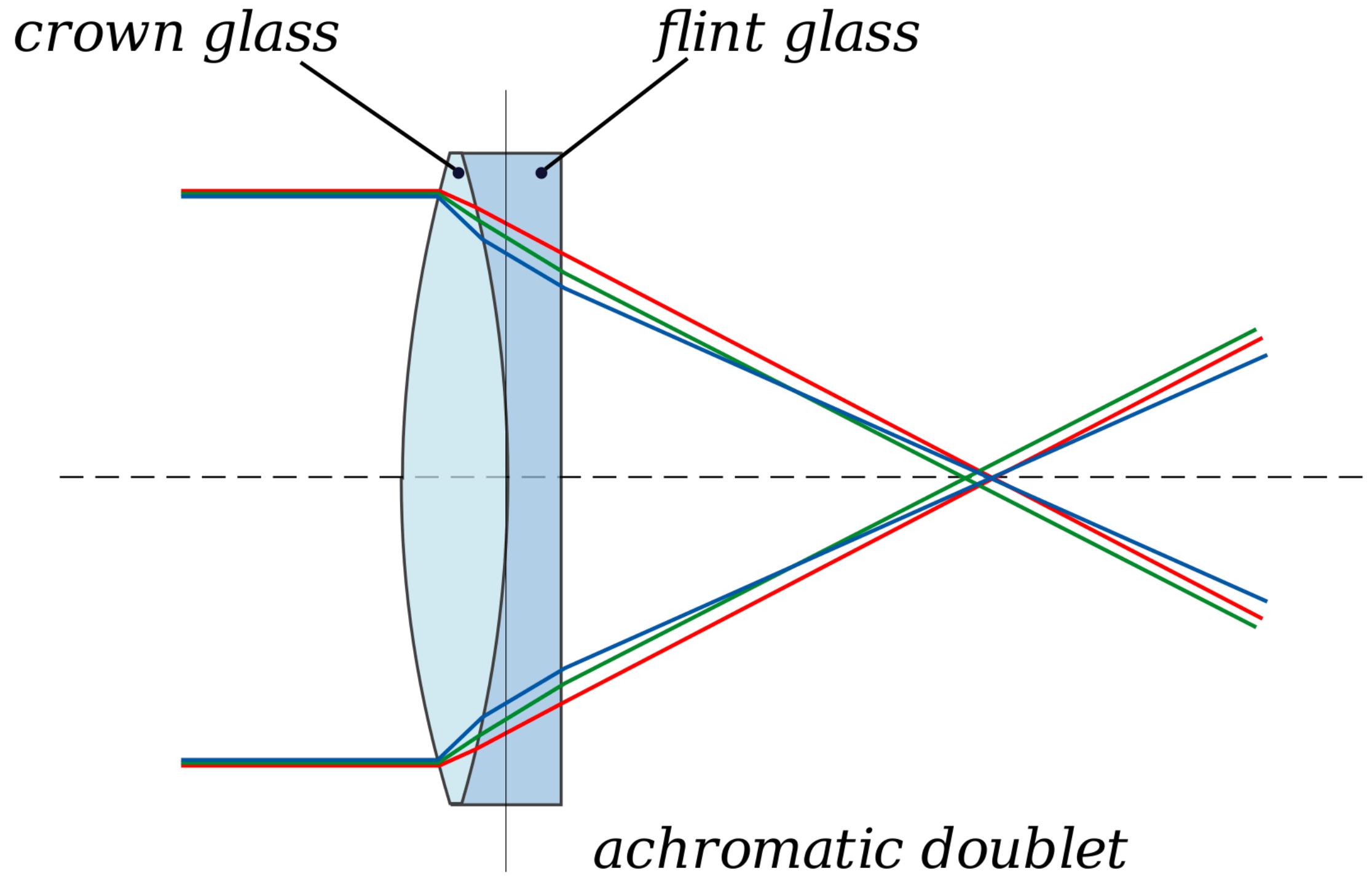


Nella moderna computer grafica l'aberrazione cromatica è talvolta aggiunta come effetto (percezione psicologica: imperfezione = maggiore realismo)

In **fisica** il fatto che la luce venga **dispersa** spazialmente a seconda della frequenza è alla base della spettroscopia



Il “doppietto”: correzione dell’aberrazione cromatica



Accoppiamento di **due vetri** a indice di rifrazione diverso, ma anche **due forme** diverse della lente
(doppio-convessa + piano-concava)

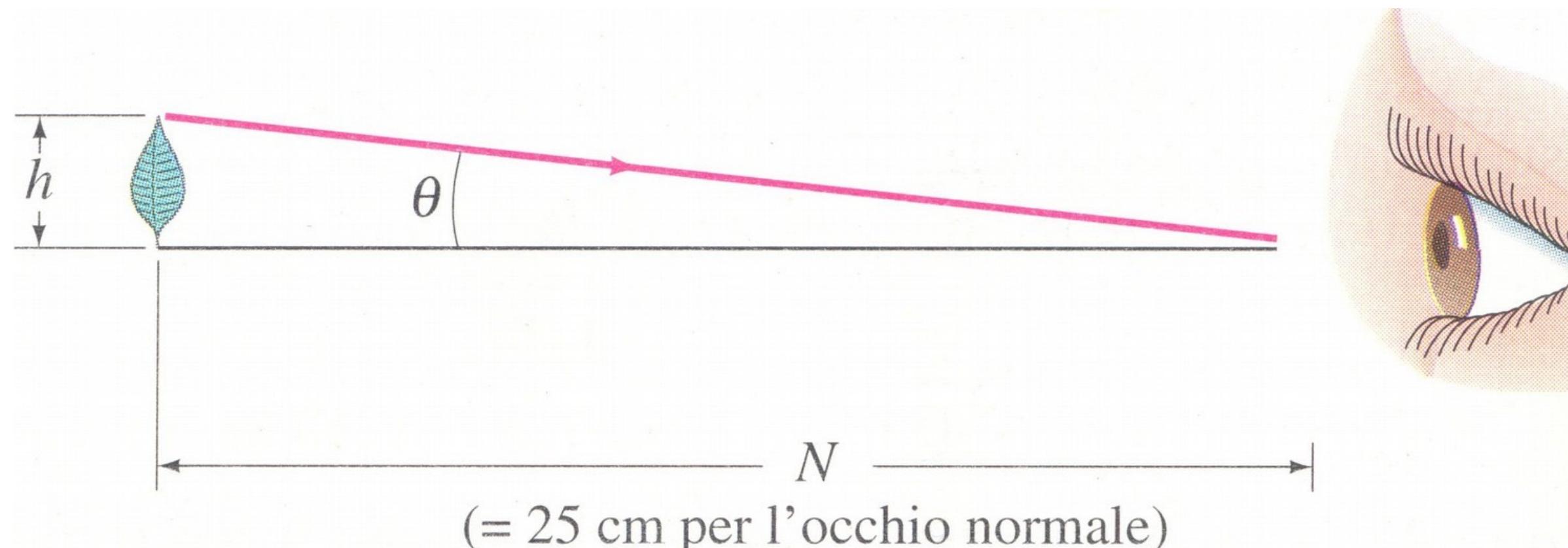
La potenza **positiva** della lente “crown” è leggermente maggiore della potenza **negativa** della lente “flint” \Rightarrow potenza netta > 0 (piccola)

Doppietto **acromatico** (due λ corrette - tipicamente rosso e blu)

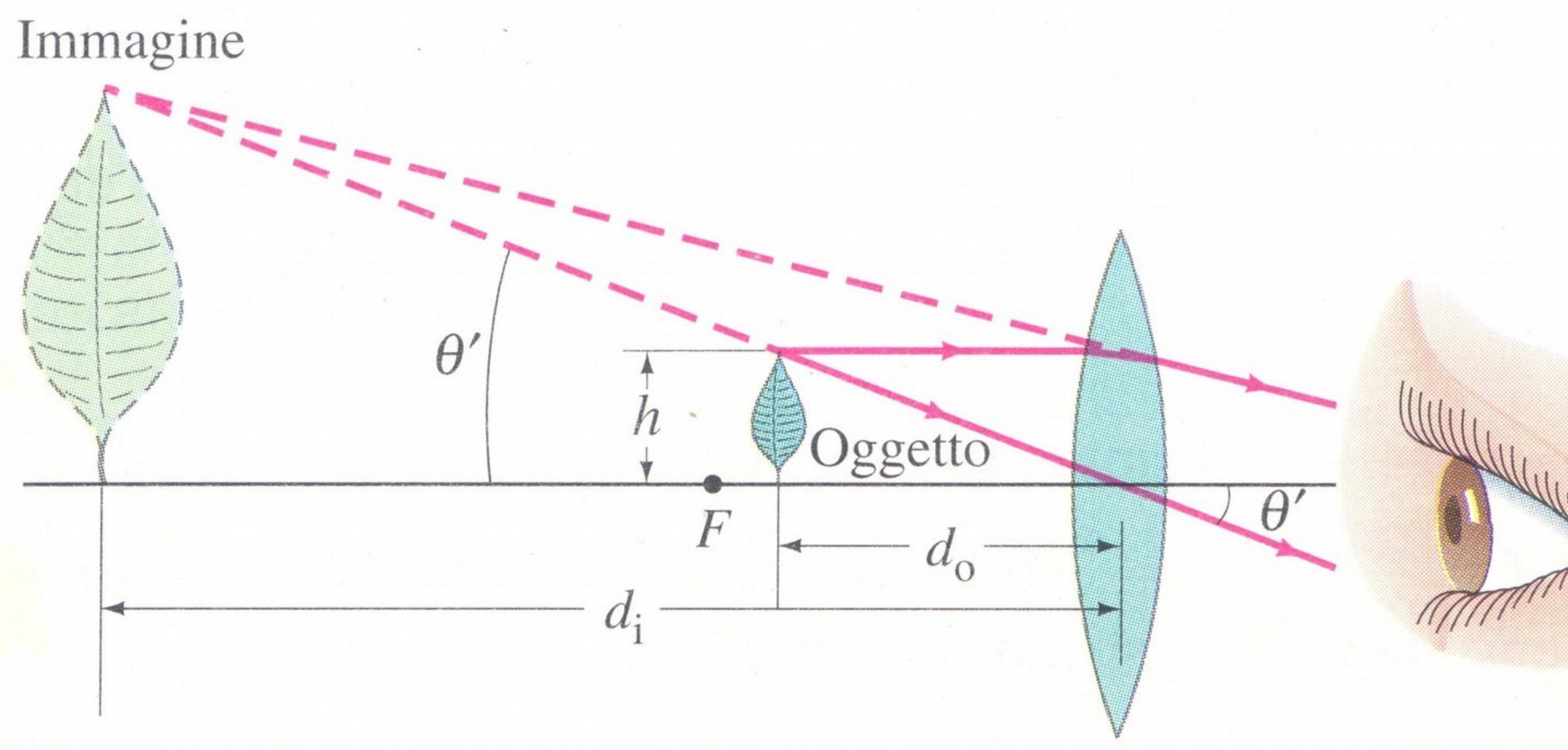
Doppietto **apocromatico** (tre λ corrette)

Il microscopio “semplice”: la lente d’ingrandimento

Per distinguere più particolari di un oggetto lo si avvicina all’occhio (la sua immagine sulla retina cresce): possibile solo fino al *punto prossimo*



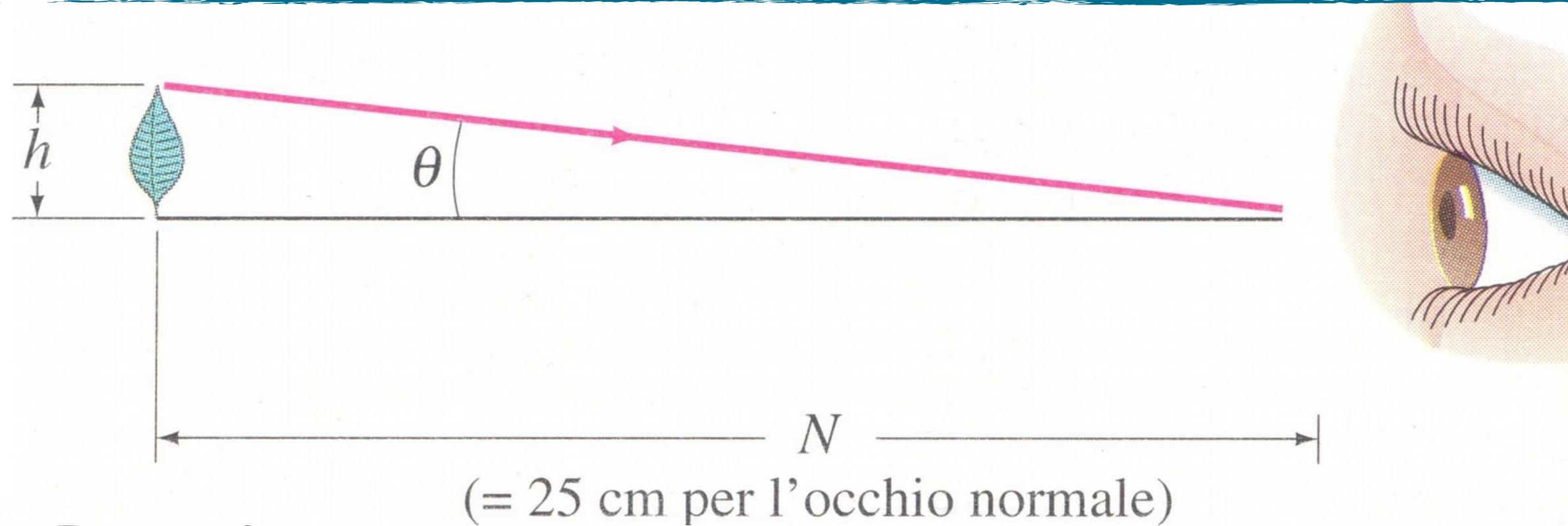
Lente convergente con oggetto tra fuoco e centro: produce immagine virtuale a distanza $d_i \geq$ punto prossimo



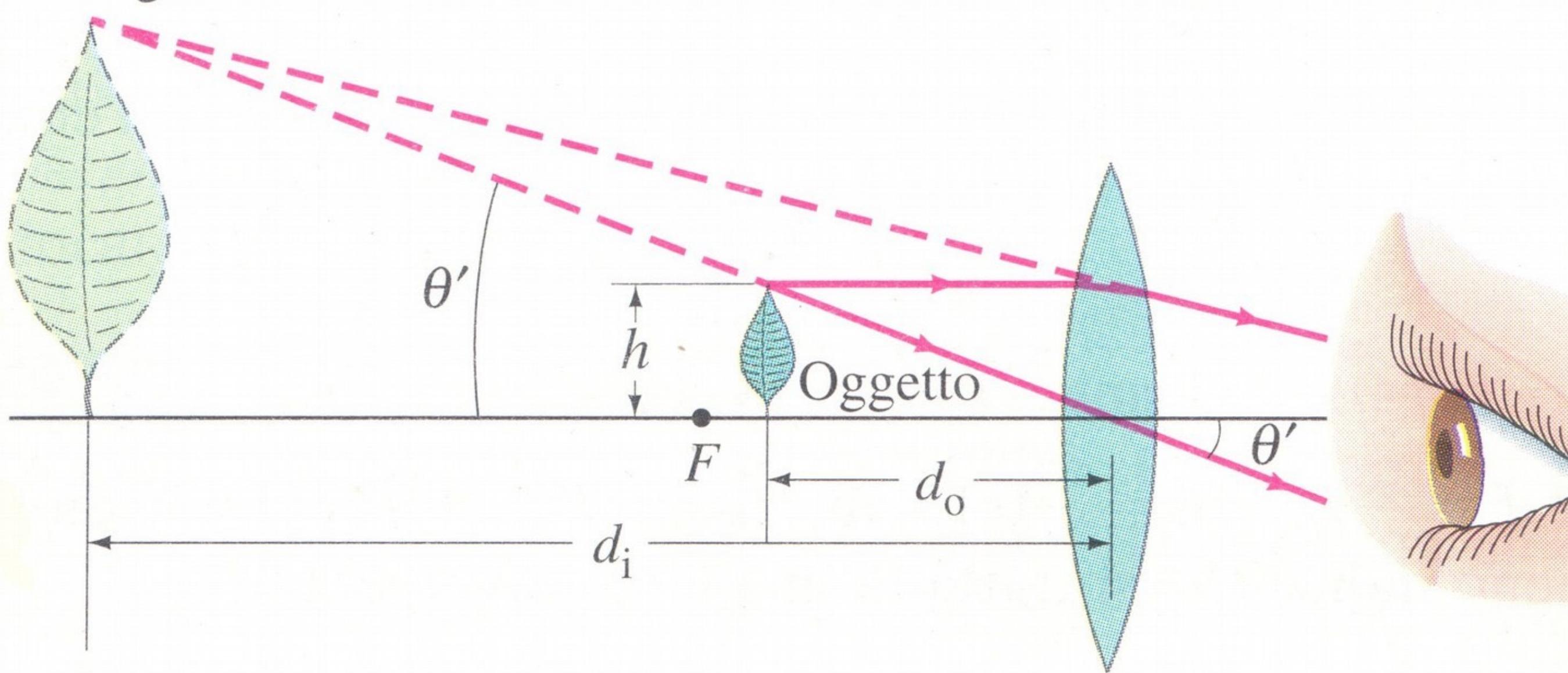
**Ingrandimento angolare
(o visuale)**

$$M = \frac{\tan \theta'}{\tan \theta} \approx \frac{\theta'}{\theta}$$

Calcolo dell'ingrandimento angolare



Immagine



Caso 2: oggetto tra F e lente,
immagine al punto prossimo
 \Rightarrow bisogna usare eq. specchi

Per **angoli piccoli**:

$$\theta = h / N;$$

$$\theta' = h / d_o$$

$$M = N / d_o$$

Caso 1: oggetto nel fuoco
 \Rightarrow immagine con fuoco all'infinito

$$M = \frac{N}{f}$$

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

$$M = \frac{N}{f} + 1$$

Il telescopio rifrattore: cenni

Due lenti convergenti (obiettivo e oculare) montate alle estremità di un tubo.
Possono essere lenti composte per correggere aberrazioni

Obiettivo: raggi dall'infinito
- immagine capovolta e rimpicciolita

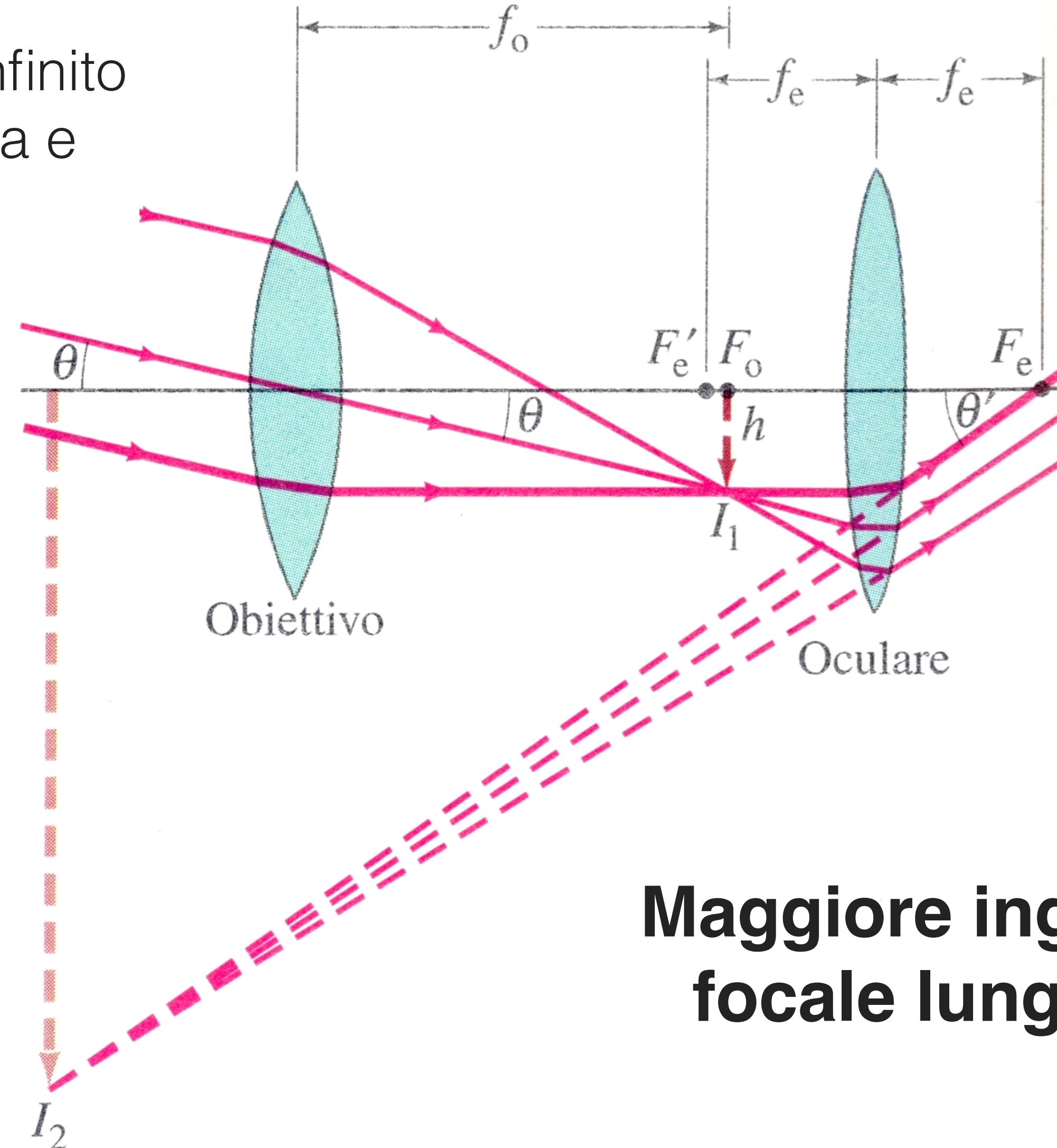


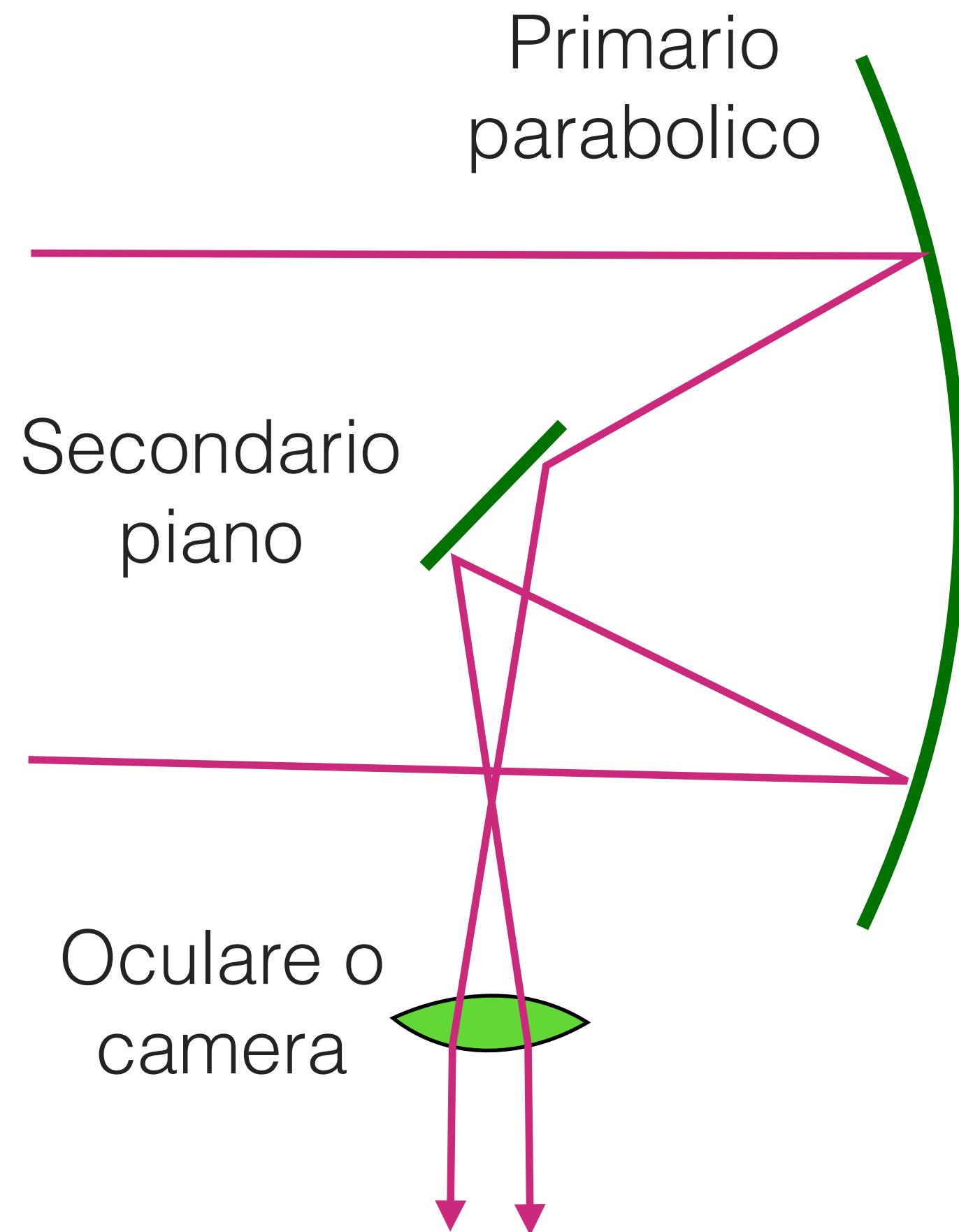
Immagine dell'obiettivo = oggetto
dell'**oculare**: immagine ingrandita,
virtuale (= lente d'ingrandimento).
Visione rilassata: punto I_1 al fuoco f_e .

$$M = \frac{\theta'}{\theta} \simeq -\frac{h/f_e}{h/f_O} = -\frac{f_O}{f_e}$$

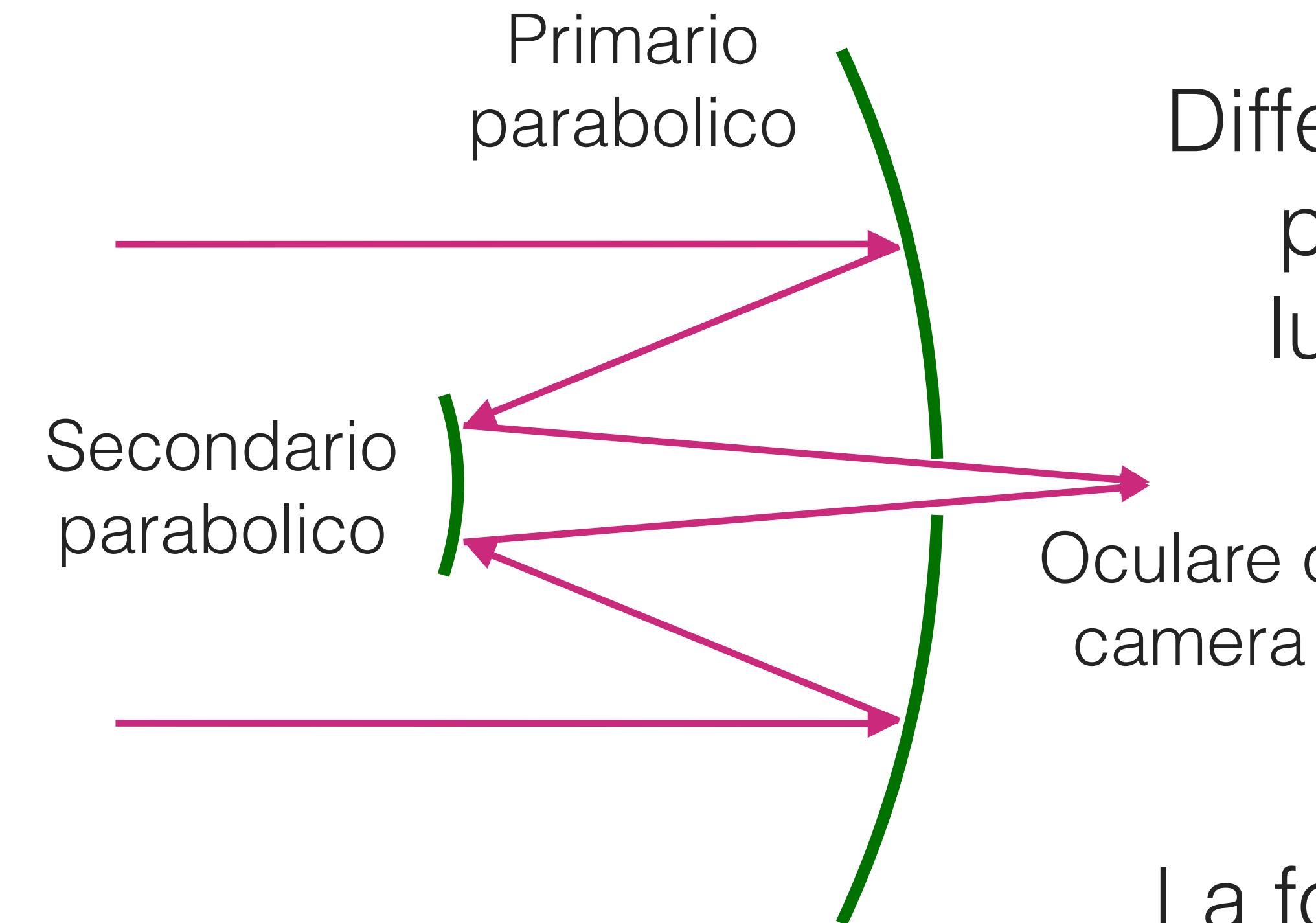
Maggiore ingrandimento per obiettivi di focale lunga e oculari di focale corta

Il telescopio riflettore: cenni

Vantaggi: grande apertura (supporto), no effetti cromatici (riflessione), forma parabolica per correzione aberrazione sferica



Schema di Newton



Schema di Cassegrain

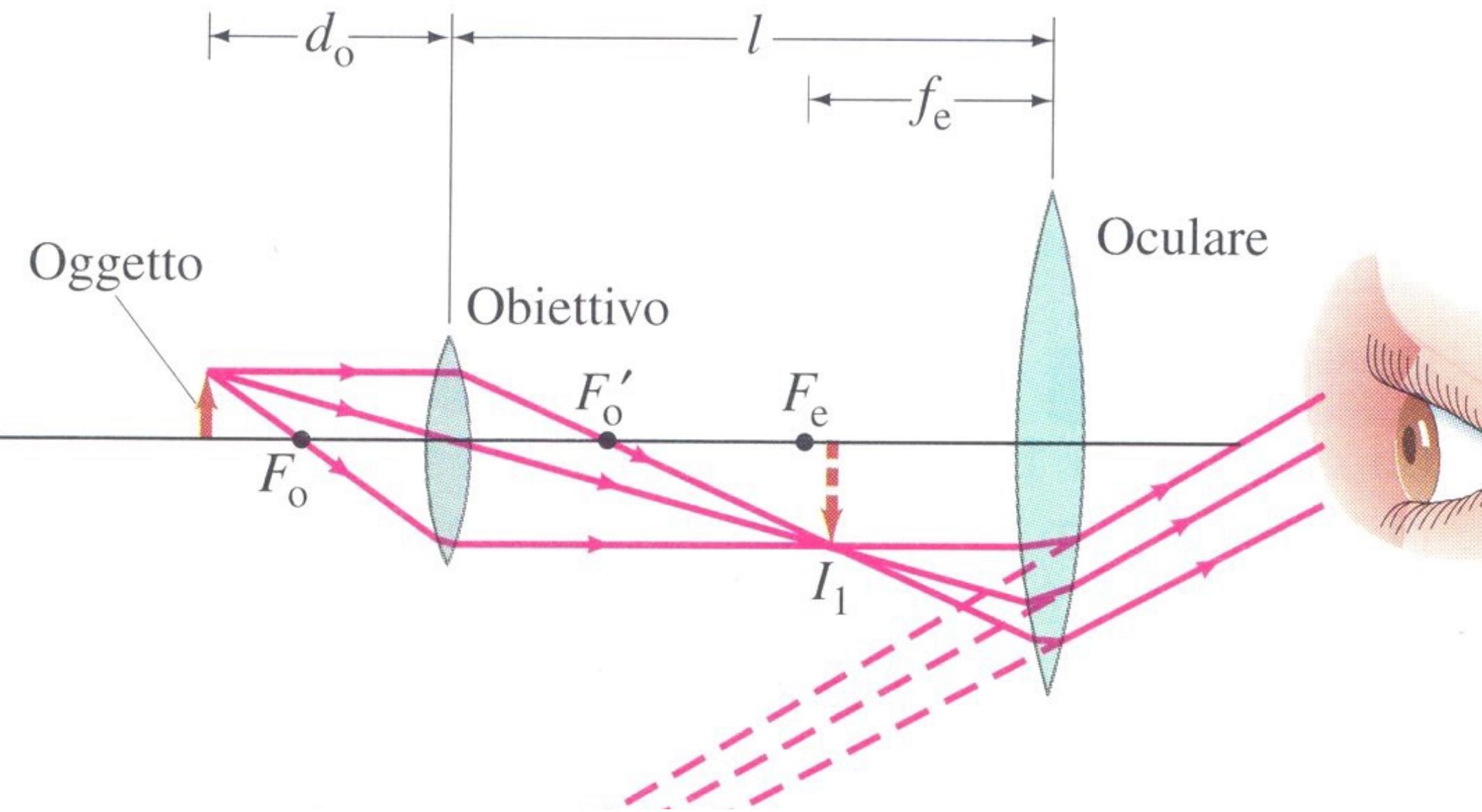
Differenti configurazioni producono tubi di lunghezze diverse

Oculare o camera

La forma dello specchio secondario può essere modificata in tempo reale (ottica adattiva)

Il microscopio “composto”

Due lenti convergenti (come il rifrattore), ma adattate ad oggetti vicini.
Oggetto molto vicino a obiettivo, immagine al fuoco dell'oculare



Oculare: genera immagine virtuale
capovolta e ingrandita

Obiettivo: genera immagine reale
capovolta e ingrandita

$$m_O = -\frac{l - f_e}{d_o}$$

Ingrandimento totale

$$m_e = \frac{N}{f_e}$$

$$M = m_e m_O = -\frac{l - f_e}{d_o} \frac{N}{f_e}$$

Esercizi su telescopi e microscopi

Esercizio 12.05: Il telescopio rifrattore più grande del mondo ha un diametro di 102 cm, una focale dell'oculare di 19 m, e di 10 cm per l'obiettivo. Calcolare **a)** il rapporto d'ingrandimento totale del telescopio; **b)** la lunghezza totale del telescopio.

Esercizio 12.06: Un microscopio è formato da un oculare a 10 ingrandimenti e un obiettivo a 50 ingrandimenti a 17 cm di distanza. Determinare:

- a)** l'ingrandimento totale;
- b)** la lunghezza focale di ciascuna lente;
- c)** la posizione di un oggetto a fuoco quando l'occhio è rilassato.