

Fisica per applicazioni di realtà virtuale

Anno Accademico 2022-23

Prof. Matteo Brogi

Dipartimento di Fisica, stanza B3, nuovo edificio

Lezione 19

Ottica geometrica - parte 1

Introduzione all'ottica

Descrizione della propagazione (e manipolazione) della **luce**

La luce è un'onda **elettromagnetica**:
non ha bisogno di un mezzo per propagarsi

Ottica geometrica

*Considera solo la direzione di
propagazione della luce
(linea retta)*

Ottica ondulatoria

*Descrizione che considera la luce
come un'onda (fronti, interferenza...)*

Ottica geometrica alla base del rendering in tempo reale
Ottica fisica spesso “approssimata” e/o calcolata offline

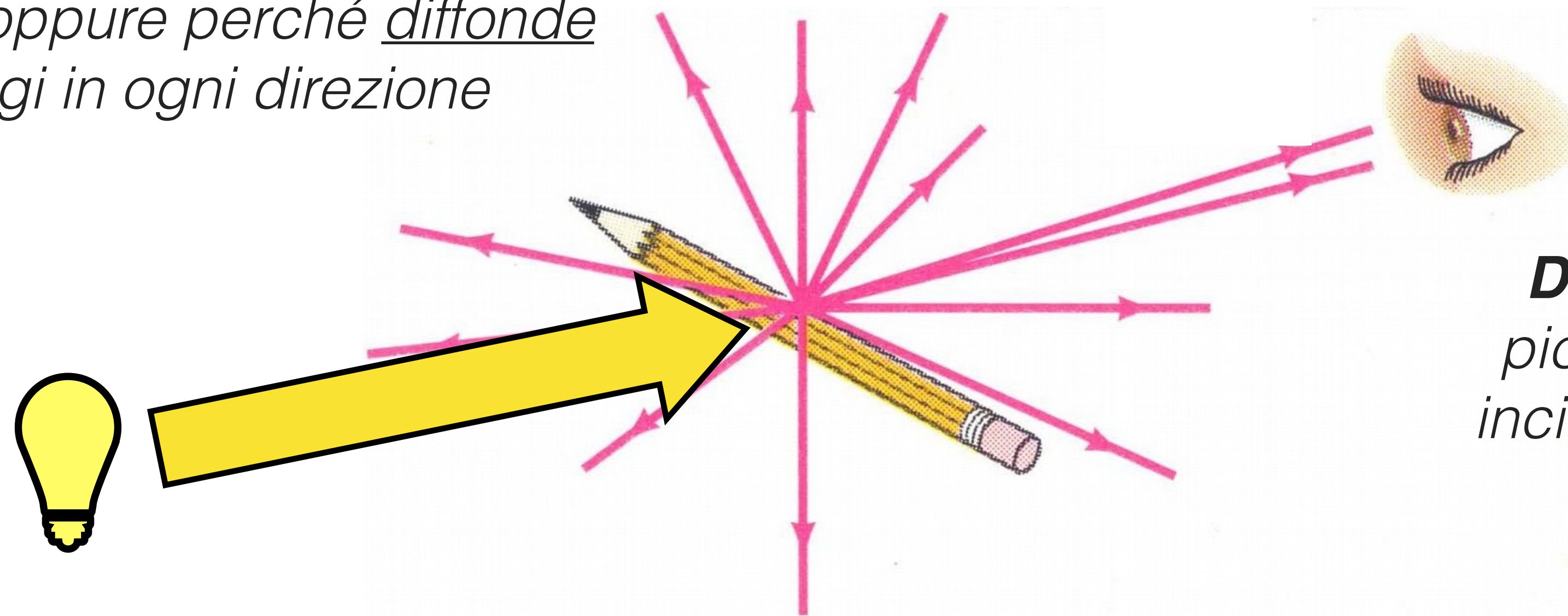
Ottica geometrica: un modello a raggi

Modello **semplificato** - usa solo una caratteristica topologica: il **raggio**

I raggi possono subire **assorbimento, riflessione, o trasmissione**

Oggetto osservabile tramite raggi diretti, oppure perché diffonde raggi in ogni direzione

*Visione contingente
all'esistenza
di una **sorgente***



Diffusione: solo una piccola parte dei raggi incidenti arriva all'occhio



Colore: determinato dalle componenti riflesse

Ottica geometrica e riflessione speculare

Speculare = superficie perfettamente piana = stessa normale ovunque

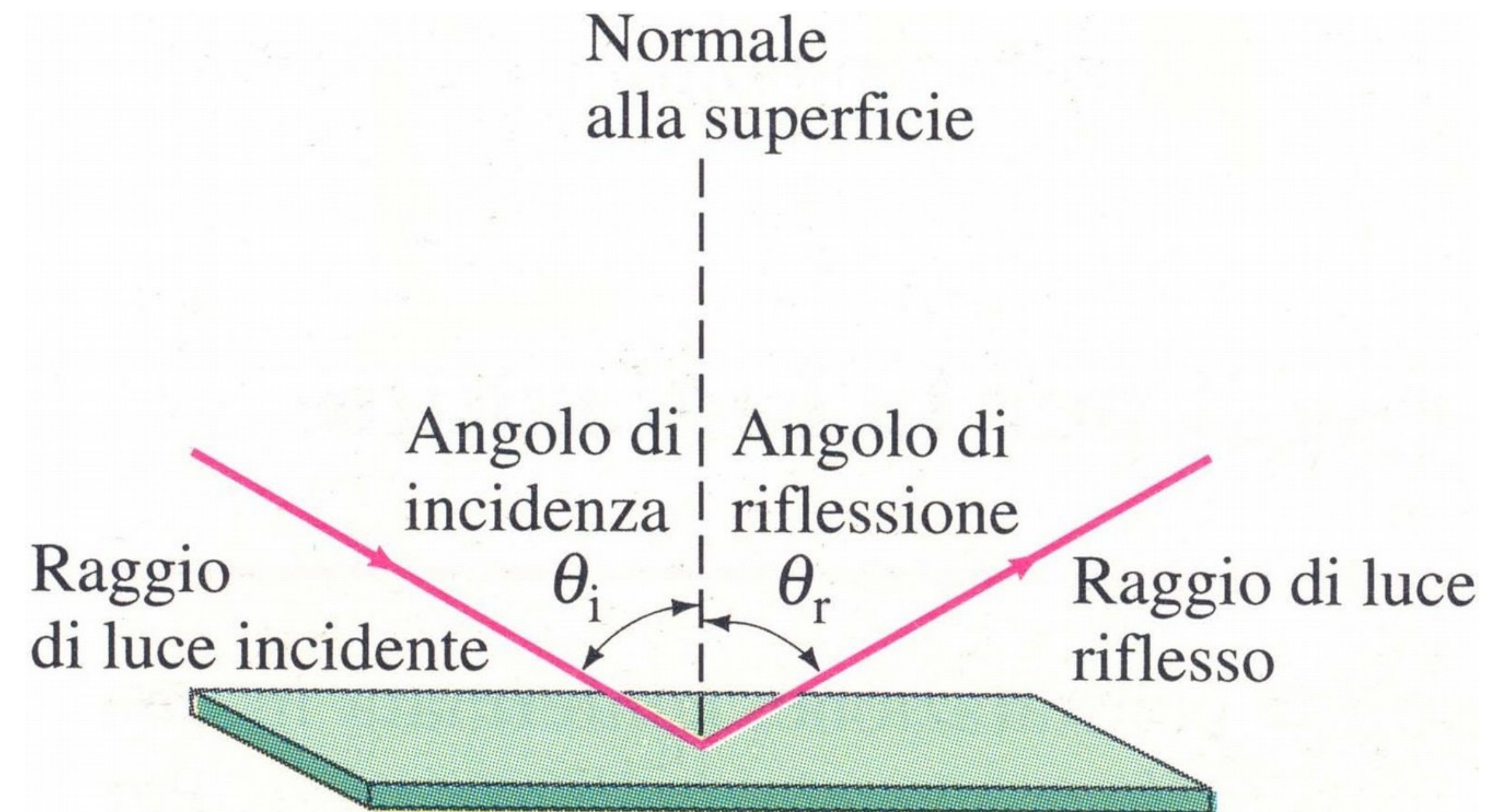
Lezione 16

*Valida per tutte le onde
(meccaniche ed elettromagnetiche)*

*Definita **puntualmente***

$$\theta_i = \theta_r$$

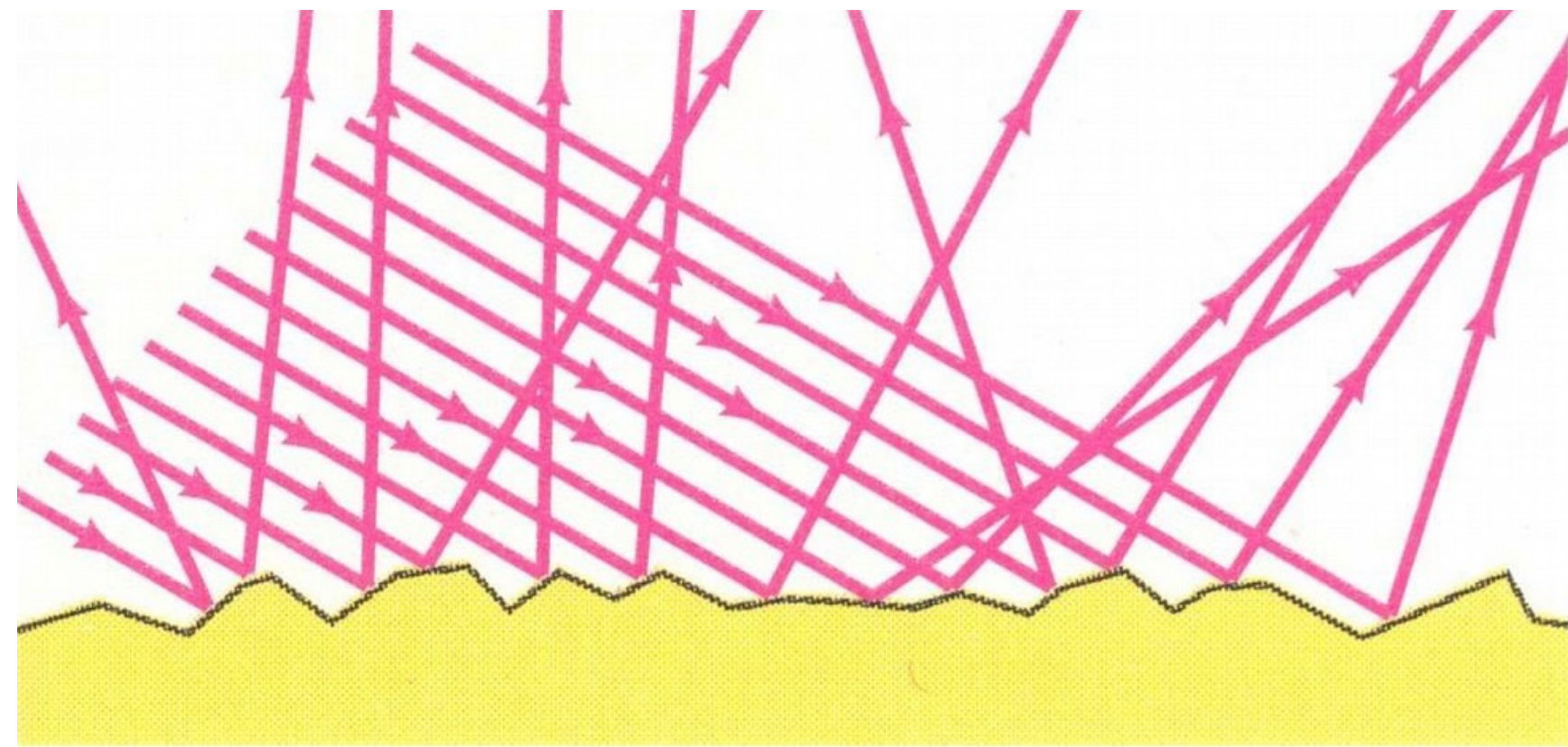
*Raggi incidente, normale e riflesso
individuano un **piano***



Nella **descrizione a raggi** gli angoli di incidenza e riflessione sono calcolati rispetto alla normale al piano

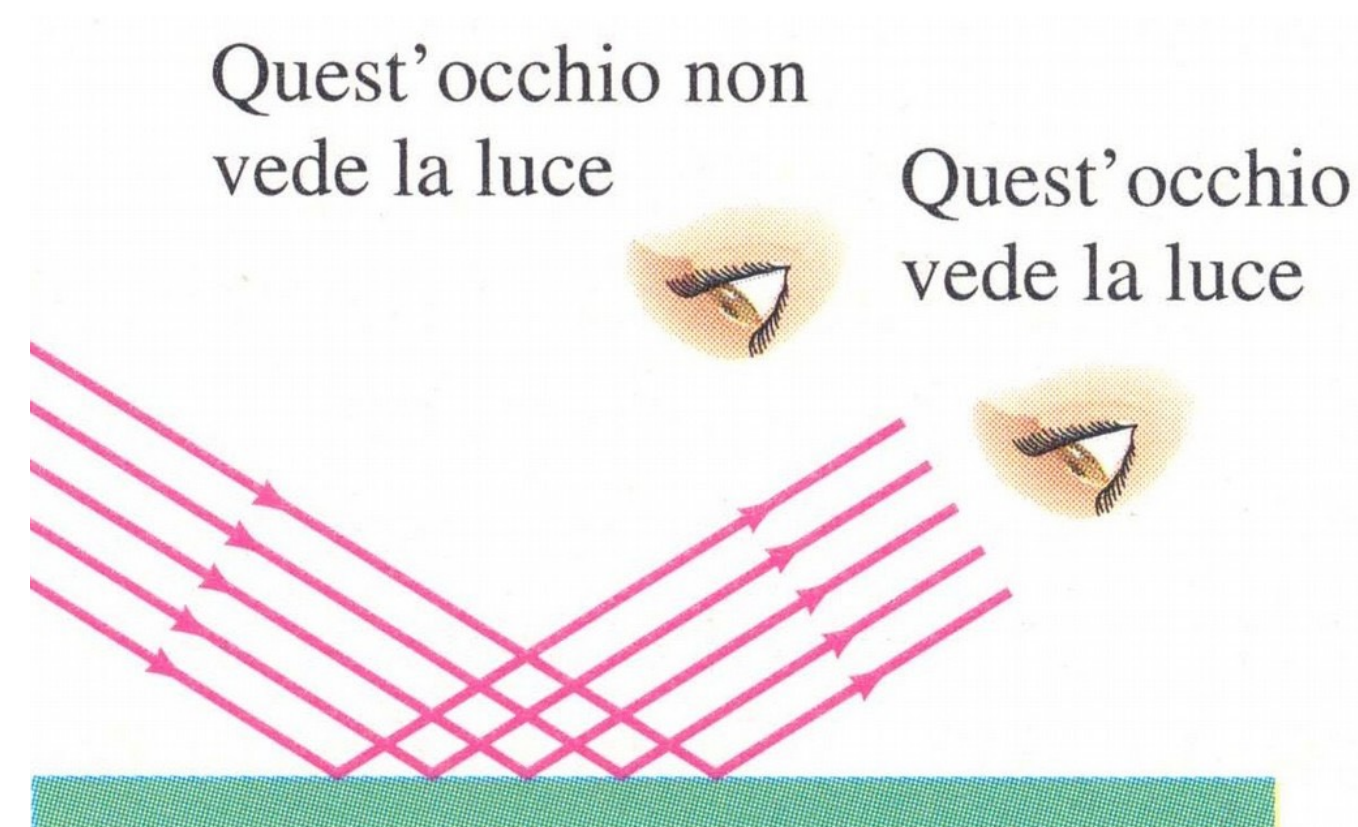
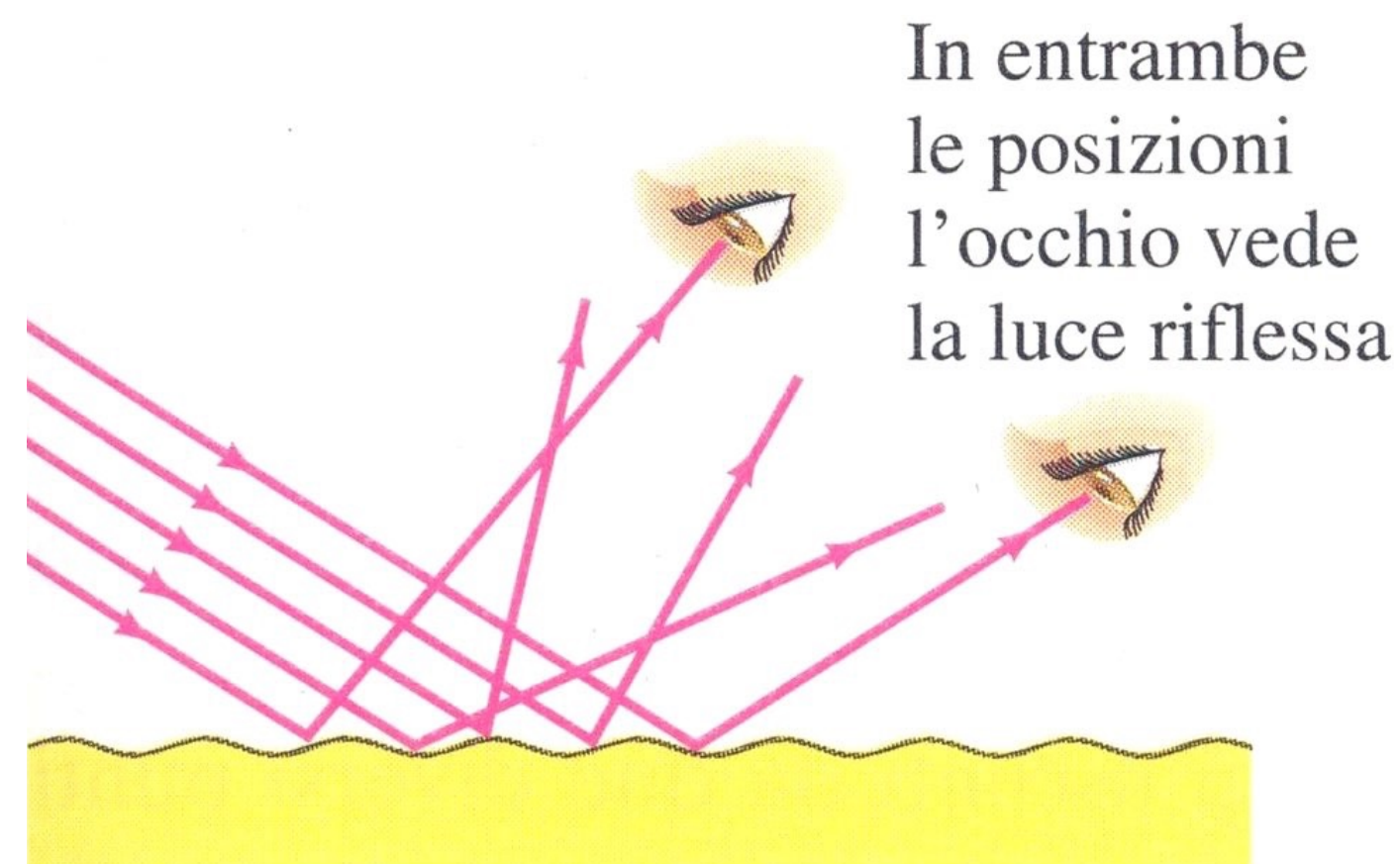
Ottica geometrica e riflessione diffusiva

Avviene in presenza di **scabrosità** della superficie (ogni caso reale)



*La normale **cambia** punto per punto:
raggi paralleli riflessi in ogni direzione,
ma rispettando puntualmente la legge di
riflessione speculare*

La riflessione diffusiva **è alla base della visione**



*Se esistesse soltanto la
riflessione speculare potrei
vedere solo i raggi luminosi
diretti verso di me*

*Trivia: Galileo usò questo
principio per dimostrare che la
Luna era imperfetta*

Formazione delle immagini e specchi

In ottica geometrica esiste il concetto di immagine **virtuale** e **reale**

Immagine reale

*Formata dalla convergenza di raggi reali
(diretti o riflessi)*

Immagine virtuale

*Formata dal prolungamento di raggi, non
c'è un punto d'intersezione fisico*

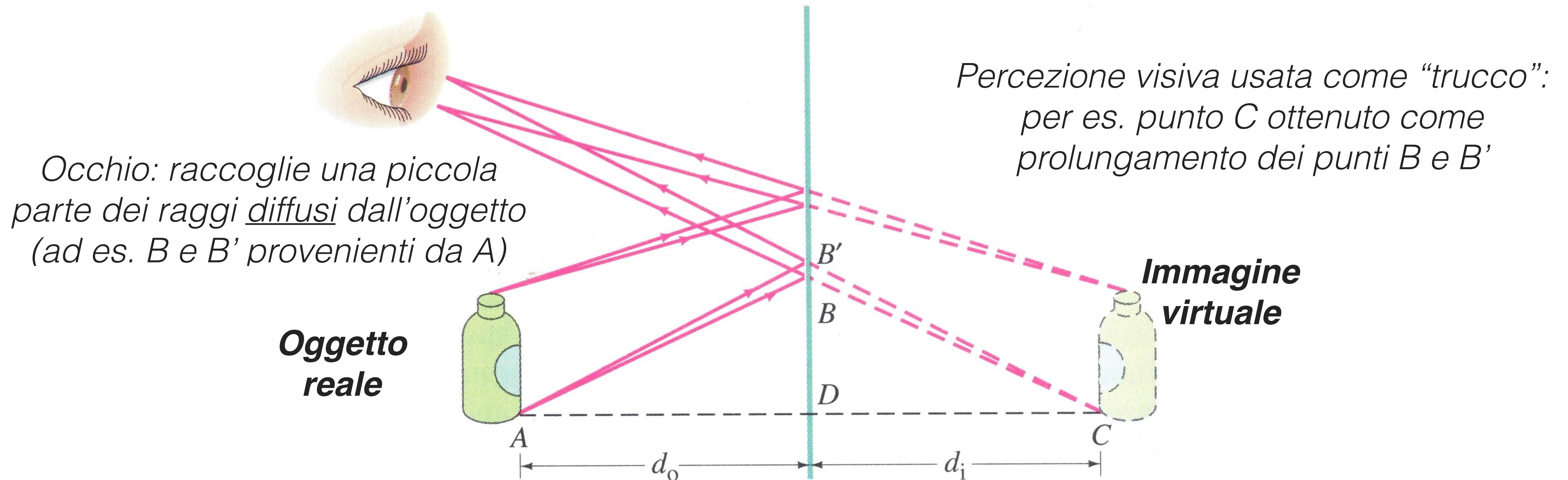
Percezione visiva e funzionamento degli specchi

Il cervello ritiene che ogni raggio luminoso debba percorrere linee rette
⇒ immagini reali o virtuali (prolungamenti dei raggi) sono indistinguibili

Specchi piani

Specchio = uno **strumento ottico**: intercetta e “manipola” i raggi luminosi

Specchio **piano**: ha la stessa normale ovunque



Triangoli ADB-CDB congruenti (stessi angoli)

L'oggetto reale a distanza d_o ha immagine virtuale a distanza $d_i = d_o$

La dimensione dell'immagine è la stessa dell'oggetto

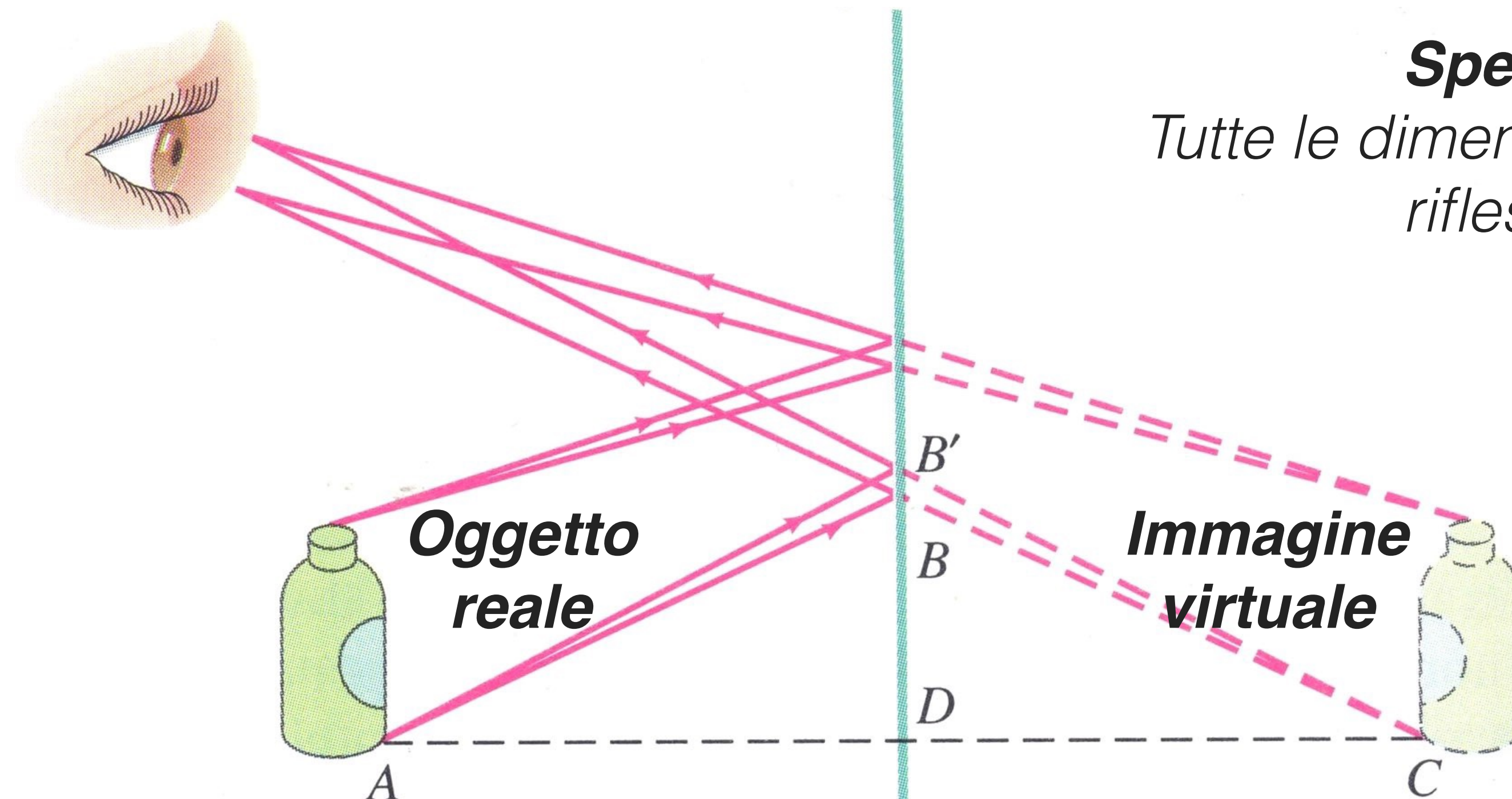
Specchi piani e percezione visiva

Specchi piani non ingrandiscono

Tutte le dimensioni restano le stesse per la legge della riflessione speculare (stessi angoli)

Specchi piani non ribaltano

*Alto-basso e destra-sinistra restano gli stessi tra immagine e oggetto reale
La “simmetria” dx-sx è una conseguenza della nostra “esperienza” percettiva*



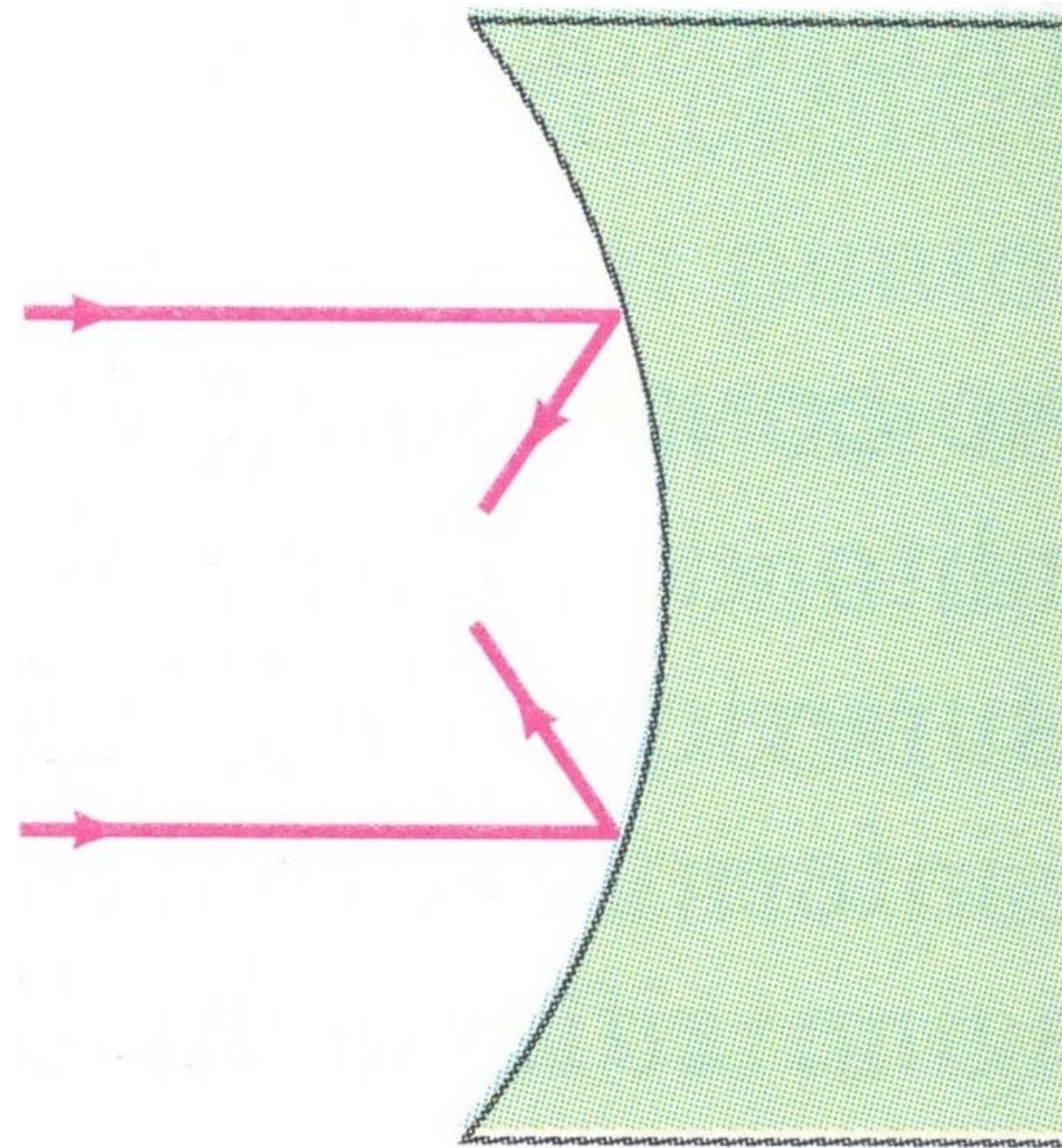
Animali anche evoluti (incluso bambini fino a qualche mese) non si riconoscono allo specchio, occorre un'esperienza “cognitiva” aggiuntiva.

Trivia: indistinguibilità tra oggetto reale e virtuale alla base dei primi effetti con specchi nei videogiochi (modello simmetrico equidistante da “specchio”)

Specchi sferici: introduzione

Strumento ottico più “s sofisticato” per modificare la traiettoria della luce.

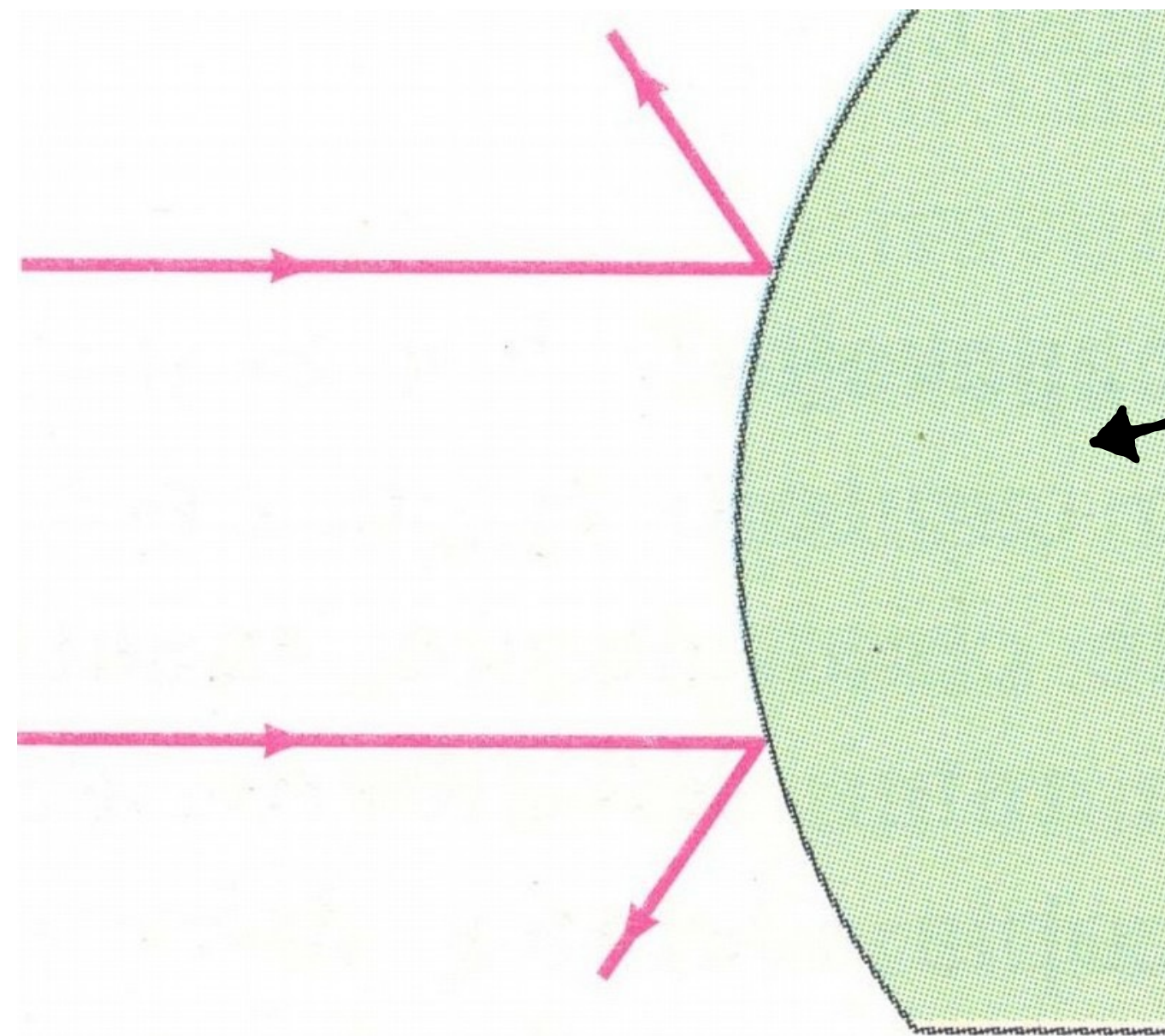
La traiettoria dei raggi è bene identificata usando **raggi incidenti paralleli**



Concavo

Curvatura verso interno

*Riflette verso un solo punto
⇒ **convergente***



Convesso

Curvatura verso esterno

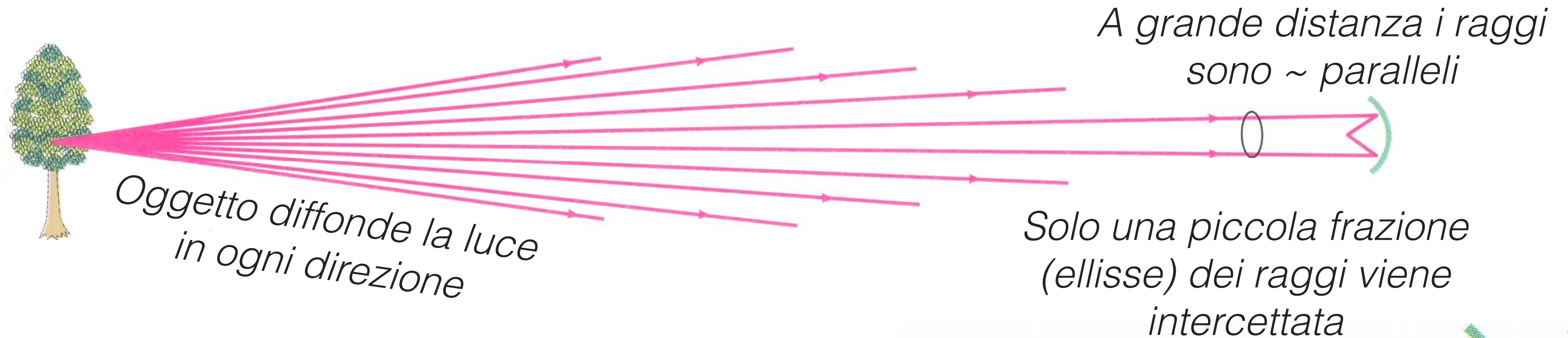
*Riflette verso direzioni
differenti ⇒ **divergente***

Materiale interno

*Anche se semi-trasparente
ai fini della rappresentazione
importa solo la superficie di
riflessione*

Aberrazioni di uno specchio sferico

Uno strumento ottico **ideale** genera un punto immagine per punto oggetto

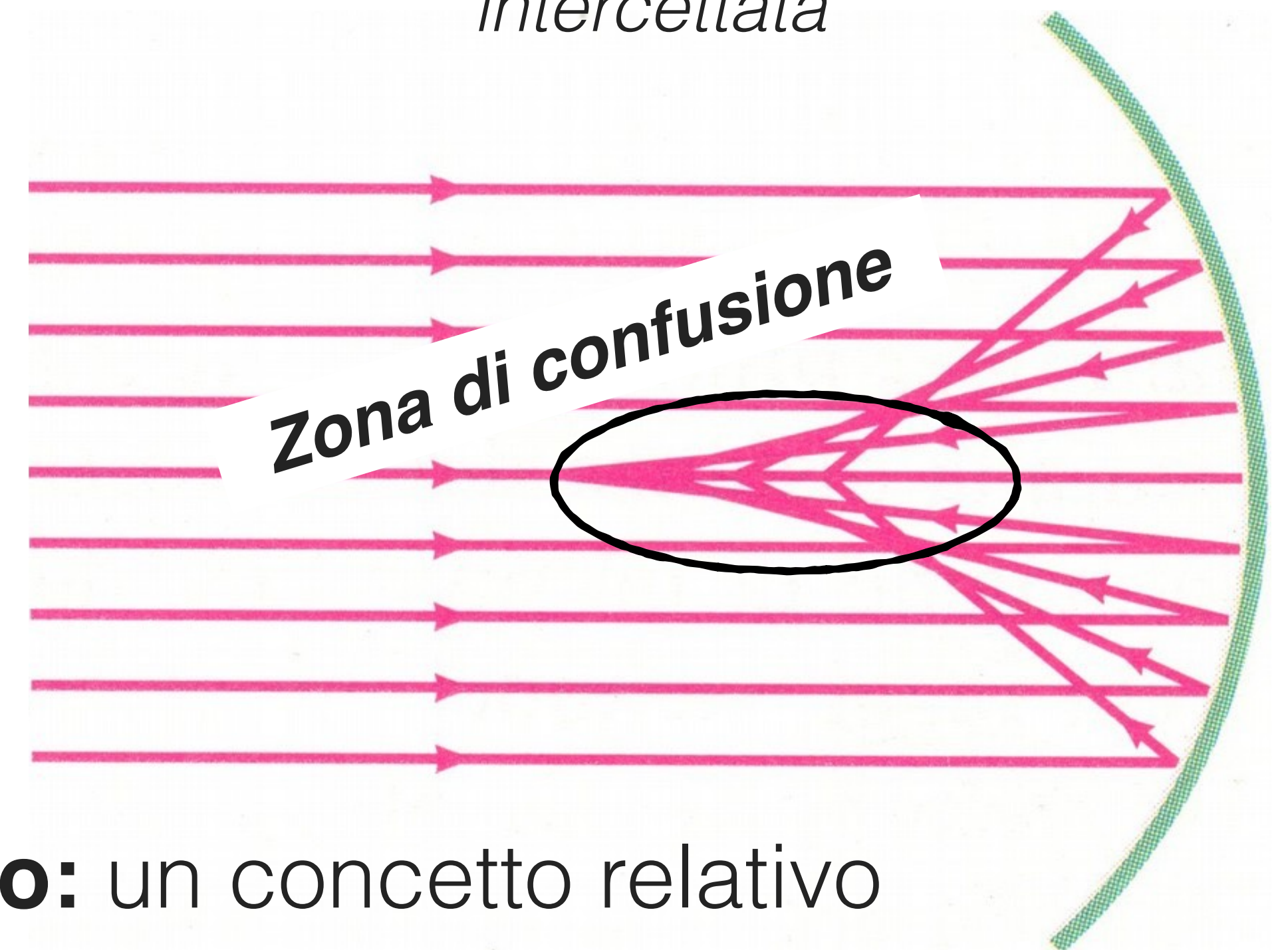


Aberrazione sferica

I raggi si incontrano "a coppie" a seconda della distanza dal centro dello specchio \Rightarrow convergenza in punti diversi

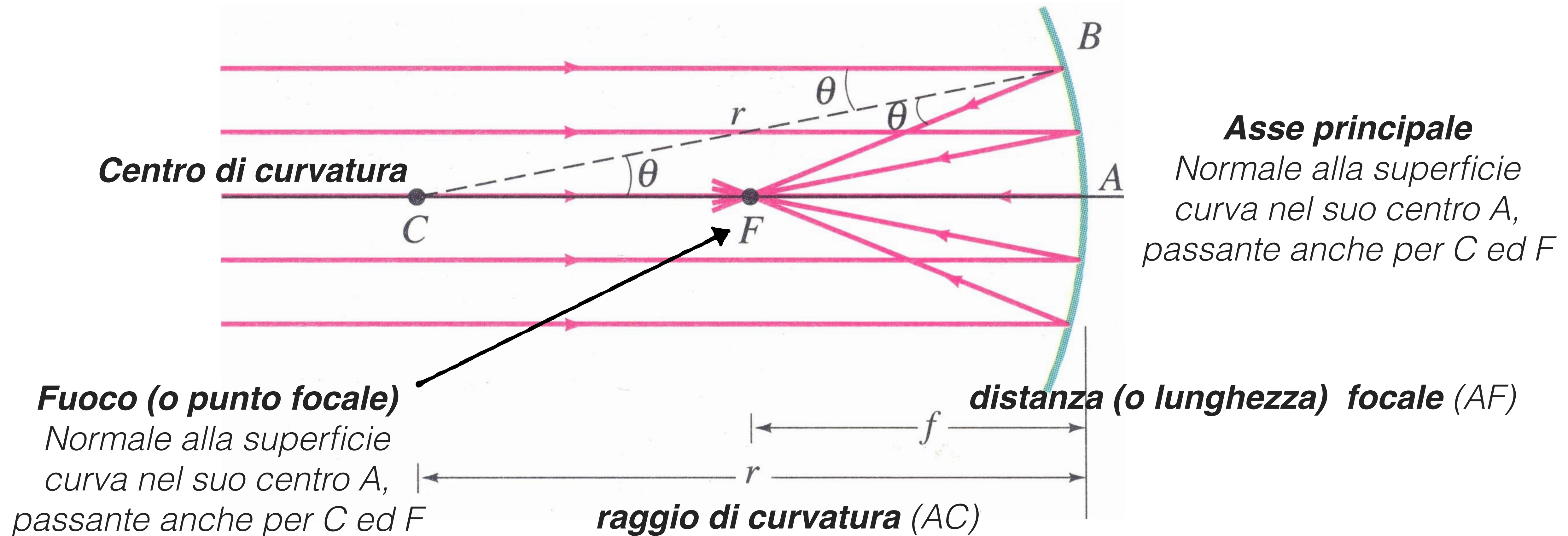
Ottica parassiale (o gaussiana)

*piccola distanza dall'asse = piccoli angoli
 \Rightarrow zona di confusione piccola (rispetto alla risoluzione)*



convergenza puntuale \Rightarrow strumento **stigmatico**: un concetto relativo

Grandezze e nomenclatura degli specchi concavi



Calcolo della **lunghezza focale** (raggio incidente in B):
uso riflessione speculare + piccoli angoli
 $\Rightarrow AF = CF = BF \Rightarrow AC = 2f$

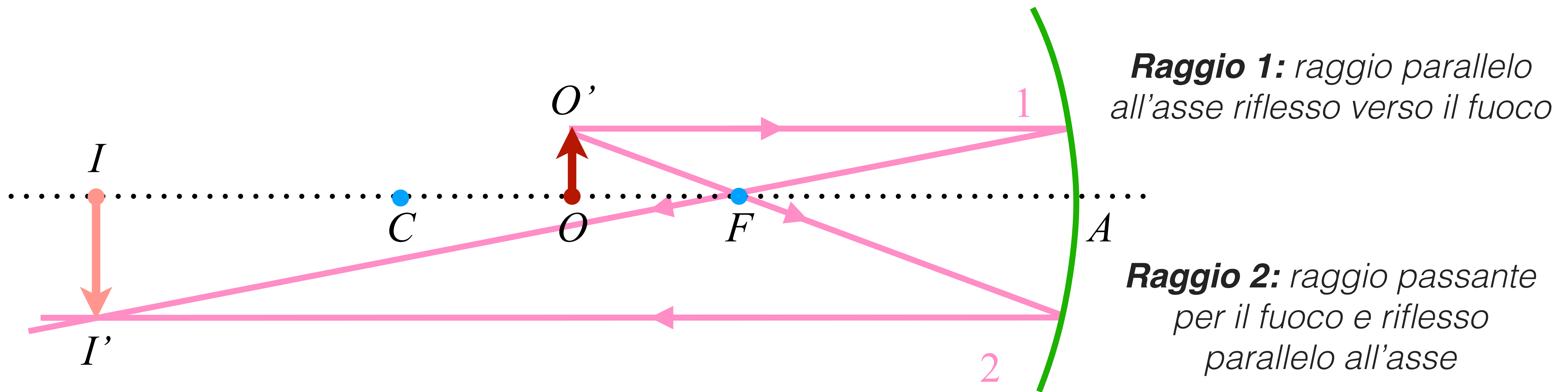
$$f = \frac{r}{2}$$

Specchio concavo: determinazione del punto immagine

Intersezione di 2+ raggi necessaria (tutti i raggi convergono al punto immagine)

Principio di invertibilità (del cammino ottico)

F punto immagine dell'infinito \Rightarrow F punto oggetto di un'immagine all'infinito
(per es. una torcia elettrica con lampadina posta al fuoco)



Uno specchio concavo crea un'immagine **ribaltata** e **ingrandita**

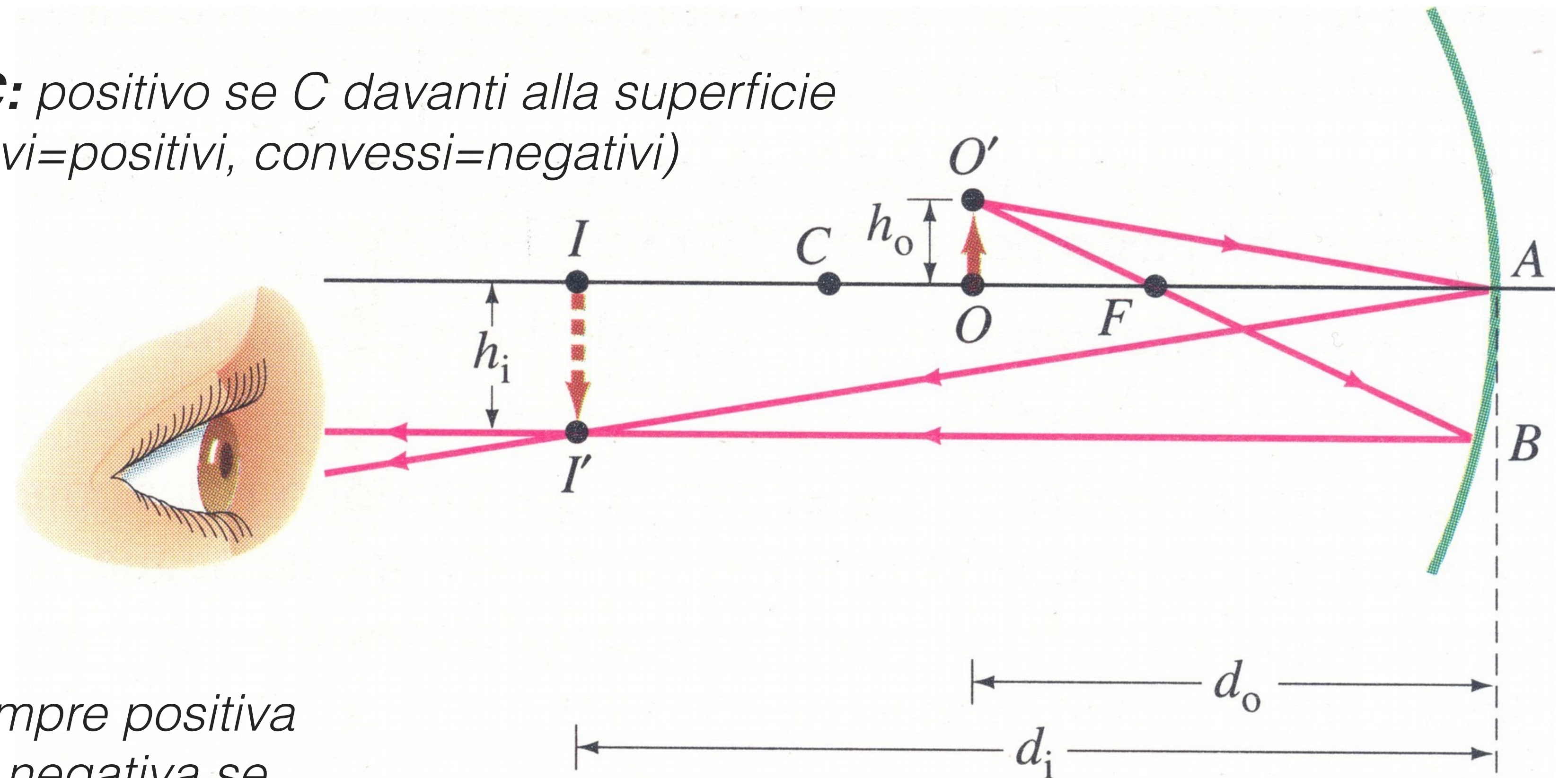
I raggi (e non il prolungamento) si intersecano: immagine **reale**

\Rightarrow posso inserire uno schermo / pellicola / sensore

Convenzione dei segni per specchi concavi/convessi

Specchio lavora in riflessione \Rightarrow oggetto/immagine davanti allo specchio

raggio di curvatura AC : positivo se C davanti alla superficie riflettente (concavi=positivi, convessi=negativi)



altezza oggetto h_o : sempre positiva

altezza immagine h_i : negativa se capovolta, altrimenti positiva

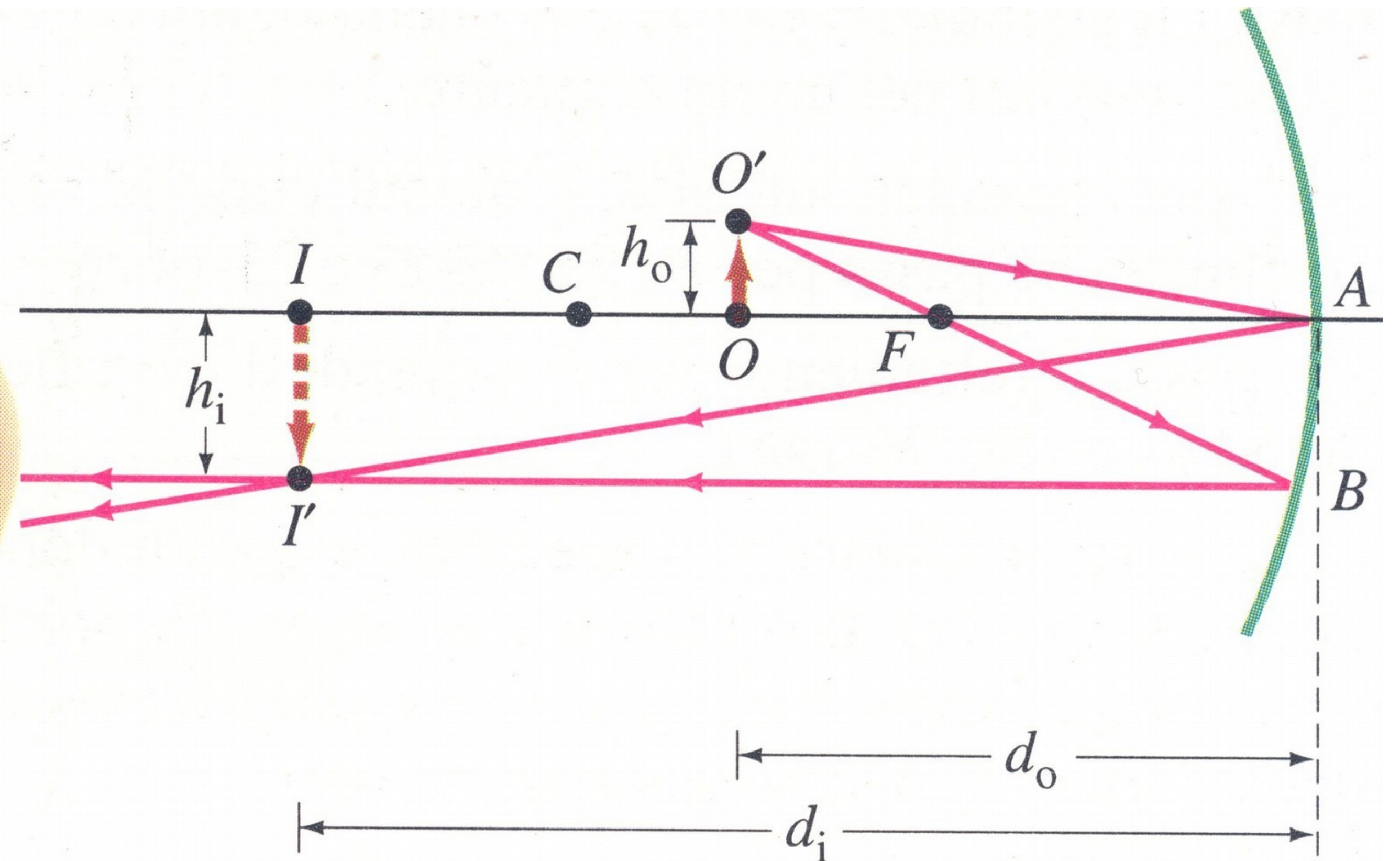
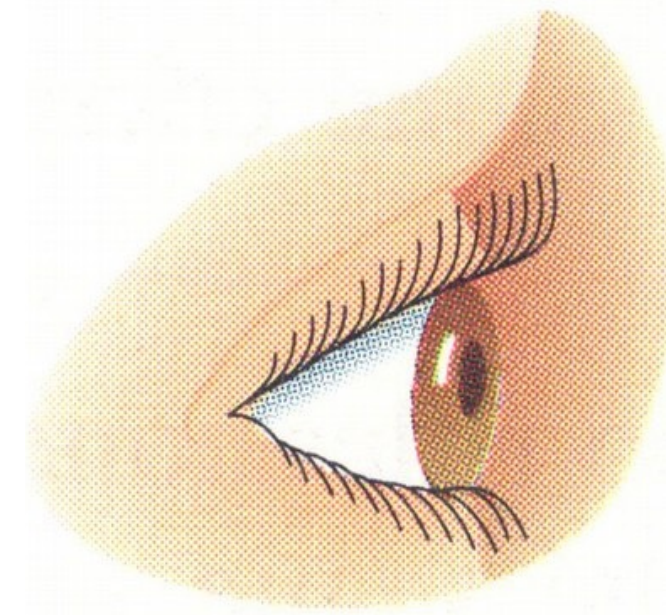
distanza immagine: positiva se davanti alla superficie riflettente (immagine reale), altrimenti negativa (immagine virtuale)

Equazione dello specchio concavo (eq. di Gauss)

due **raggi** considerati: $O'FI'$ e $O'AI'$

angoli $\angle O'AF$ e $\angle FAI'$ **congruenti**
 \Rightarrow triangoli $O'AO$ e FAI' **simili**

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



per specchi piccoli l'arco AB si confonde
con il segmento $\Rightarrow \angle FAB$ **retto**
 \Rightarrow triangoli $O'FO$ e ABF **simili**

$$\frac{h_o}{h_i} = \frac{OF}{AF} = \frac{d_o - f}{f}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{f} = \frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} \quad \text{Equazione degli specchi}$$

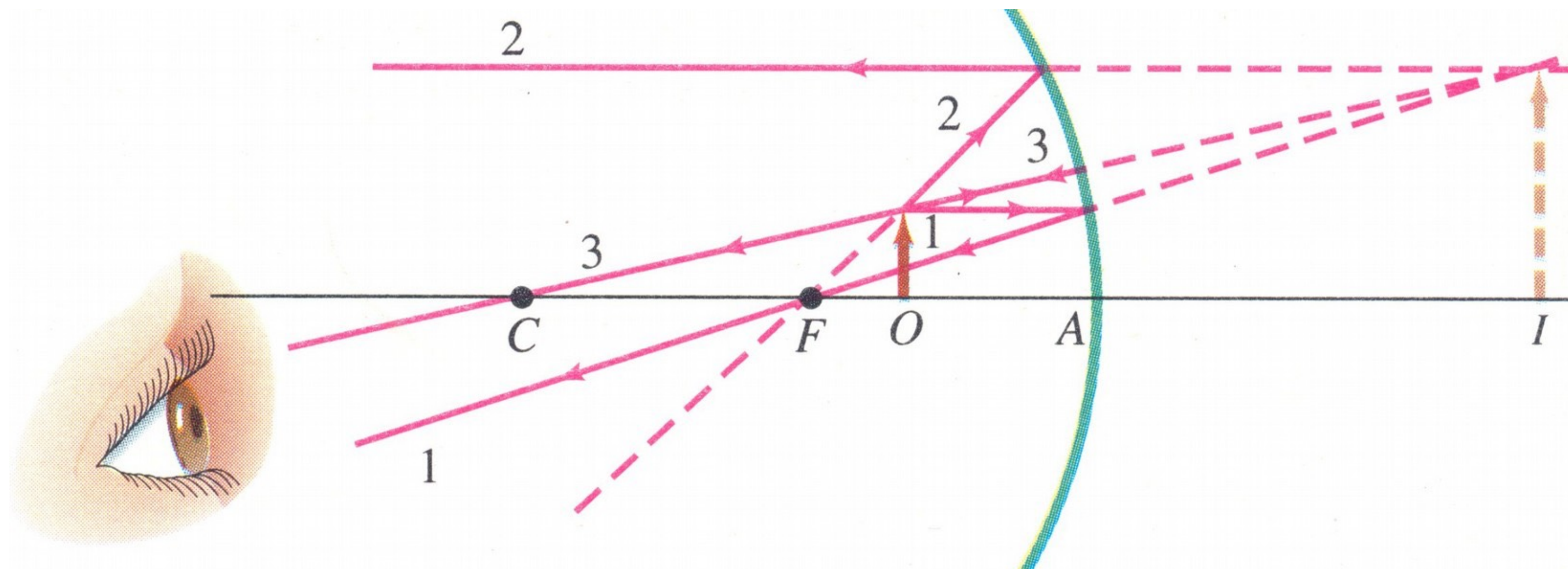
(validità generale, non solo per oggetto fra C and F)

Ingrandimento, reversibilità dei raggi e immagine virtuale

ingrandimento: rapporto fra altezza immagine e altezza oggetto

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

Il **segno** rispecchia la definizione di altezza immagine negativa



Ultima configurazione con
oggetto tra fuoco e specchio

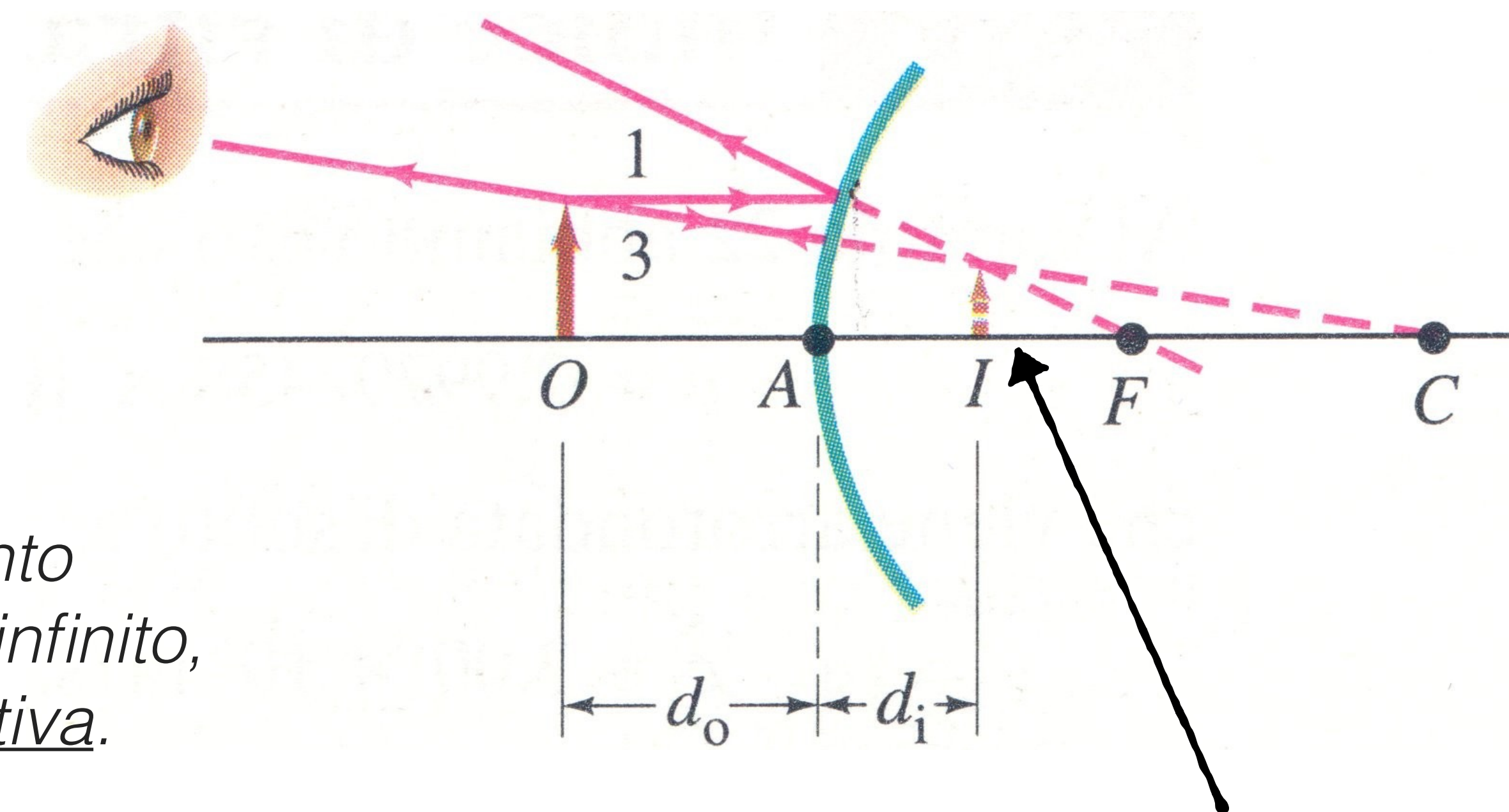
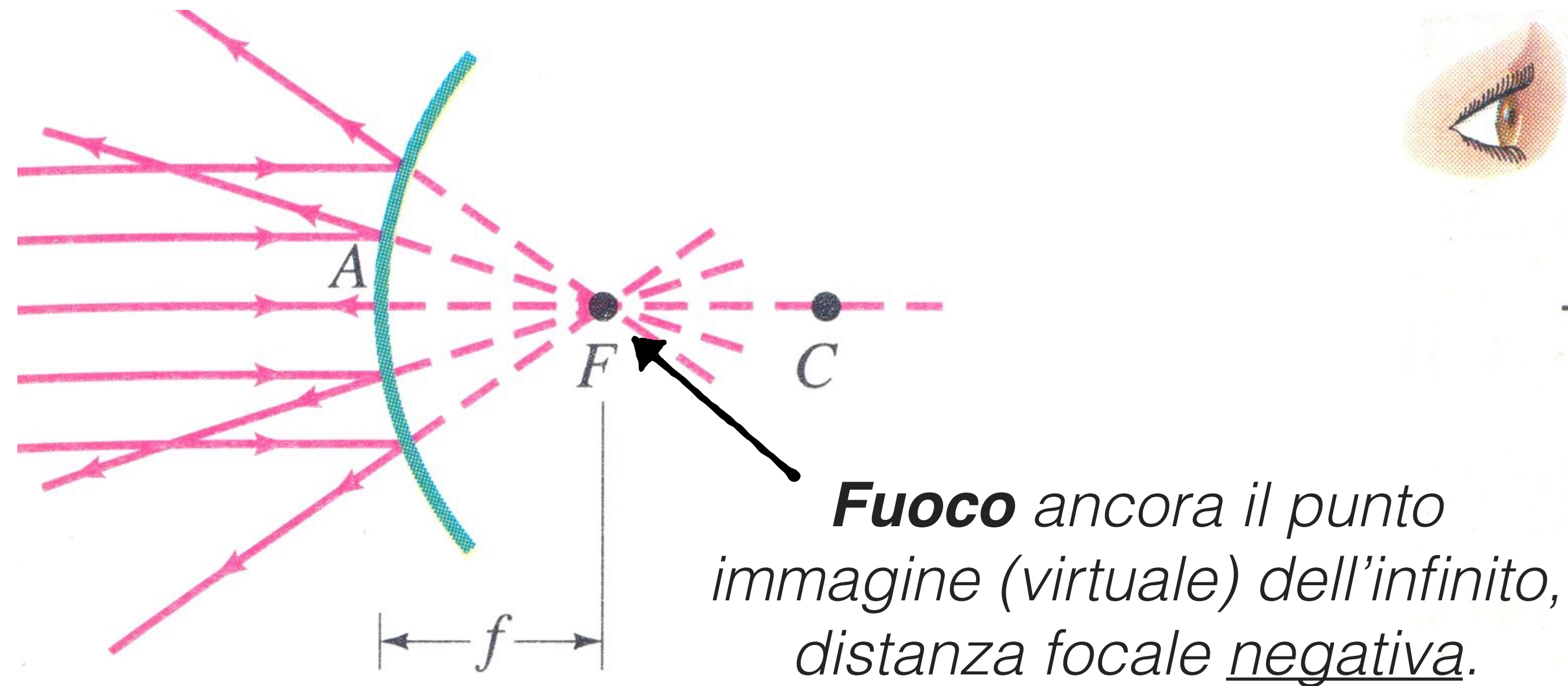
Raggi non convergono davanti
allo specchio, prolungamenti
creano immagine virtuale
dietro allo specchio

Un oggetto tra fuoco e specchio crea un'immagine virtuale ingrandita e non ribaltata
Non c'è incontro di raggi \Rightarrow non si può imprimere uno schermo, pellicola, CCD...

NOTA: lo specchio è ancora convergente, ma non riesce a bilanciare la divergenza iniziale dei raggi diffusi dall'oggetto

Estensione agli specchi convessi

Estensione dei concetti di aberrazione sferica e cerchio di confusione
Ottica parassiale \Rightarrow convergenza (dei **prolungamenti dei raggi**) in un punto



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

Equazione degli specchi
ancora valida con i segni
appropriatamente scelti

Solo **immagine virtuale**
permessa, indipendentemente
dalla distanza OA. L'immagine
è **diritta e rimpicciolita**

NOTA: il principio di invertibilità non è definito: non esiste il punto immagine di un oggetto virtuale

Esercizi sugli specchi

Esercizio 11.01: se una persona alta 1.60 m e con gli occhi posti a 1.50 m si specchia, quale deve essere l'altezza minima dello specchio e a che altezza dal suolo deve trovarsi il bordo inferiore perché sia in grado di riflettere l'intera figura?

Esercizio 11.02: Un oggetto alto 1.5 cm è posto a una distanza di 20 cm davanti a uno specchio concavo con raggio di curvatura 30 cm. Determinare la posizione dell'immagine e le sue dimensioni.

Esercizio 11.03: Un oggetto alto 1 cm è posto a 10 cm dallo stesso specchio dell'esercizio 11.02. Disegnare il diagramma dei raggi e verificare che la predizione qualitativa per la posizione e l'ingrandimento sono verificati dall'equazione degli specchi.

Esercizio 11.04: Uno specchietto retrovisore convesso ha raggio di curvatura 40 cm. Determinare posizione e ingrandimento dell'immagine di un oggetto posto a 10 m dallo specchio.