

# Strumentazione Astronomica

## Informazioni di servizio

Il corso si terrà in forma telematica per i noti motivi.

Sarà visibile registrato sull'e-learning all'indirizzo:

<https://elearning.unimib.it/course/view.php?id=31992>

Come da direttive dell'Ateneo sarà erogato in tempo reale ed useremo la piattaforma webex alla pagina <https://elearning.unimib.it/mod/webexactivity/view.php?id=667708>

L'anno scorso, poiché il corso non era erogato in tempo reale, avevo attivato il forum per ogni lezione, ma l'esperienza non è stata positiva.

Per questo motivo è mia intenzione dedicare una lezione al mese a domande o approfondimenti che con una presenza dal vivo sarebbe stato più spontaneo avere dal vivo.

Non dispero però che mi facciate domande anche durante le lezioni.

# Strumentazione Astronomica

## Modalità d'esame

L'esame è orale e consta di due presentazioni in forma di seminario scientifico.

L'argomento di ciascun seminario è uno strumento scientifico corrente, analizzato in dettaglio, spiegandone i principi fisici di funzionamento, le scelte tecnologiche e le performance che lo caratterizzano.

I due seminari devono durare circa mezz'ora ciascuno (25-30 slides) ed essere possibilmente su due argomenti non simili.

Consiglio fortemente, se si fa una tesi osservativa (analisi dati) di dedicare uno dei due seminari allo strumento con cui sono presi i dati che si analizzano.

Gli argomenti vanno concordati con me, dopo di che mi presentate un draft delle presentazioni e poi le presentazioni in forma semi definitiva, così che si possa arrivare ad assemblare dei veri seminari scientifici per un pubblico di scienziati.

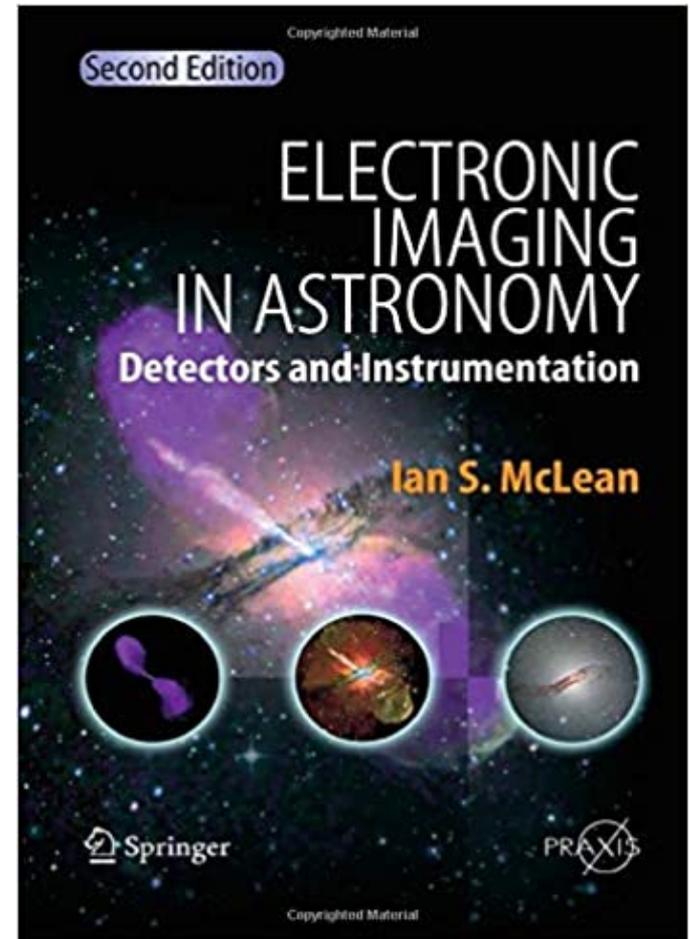
# Strumentazione Astronomica

## Libri di testo

Capite bene che data la vastità del programma un solo libro di testo non può coprire adeguatamente ogni aspetto.

Tuttavia il testo qui a lato è un buon compromesso.

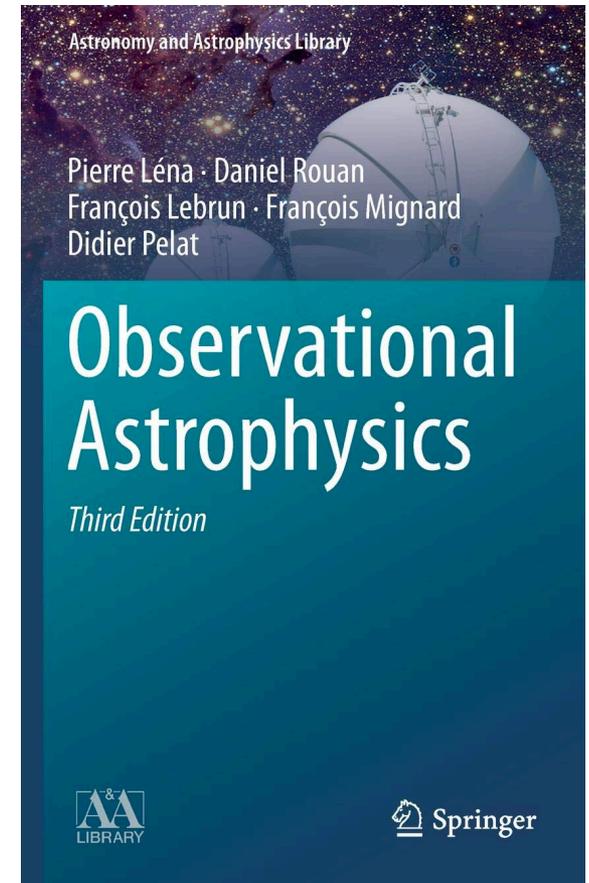
Lo trovate in biblioteca e a volerlo acquistare ha un costo elevato ma non insensato.



# Strumentazione Astronomica

## Libri di testo

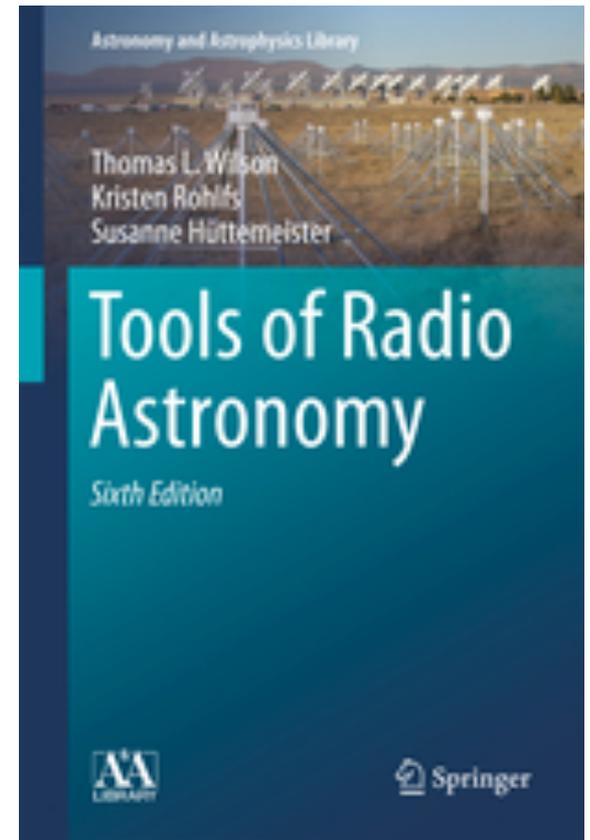
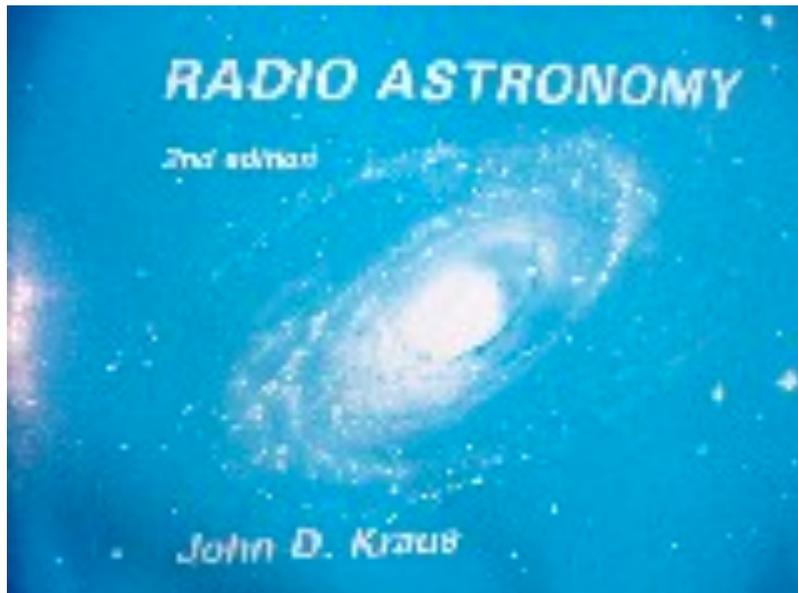
Consiglio inoltre questo testo per le tecniche osservative prevalentemente nel visibile e IR.  
E' un testo complesso e ostico ma è considerato a buon diritto un riferimento.



# Strumentazione Astronomica

## Libri di testo

La parte di radioastronomia occupa diverse lezioni.  
Un testo datato ma insuperabile è il Kraus, che trovate in biblioteca. Io lo uso molto.  
Tuttavia un qualunque testo più moderno può andare.  
Io vi suggerisco Tools of Radio Astronomy.

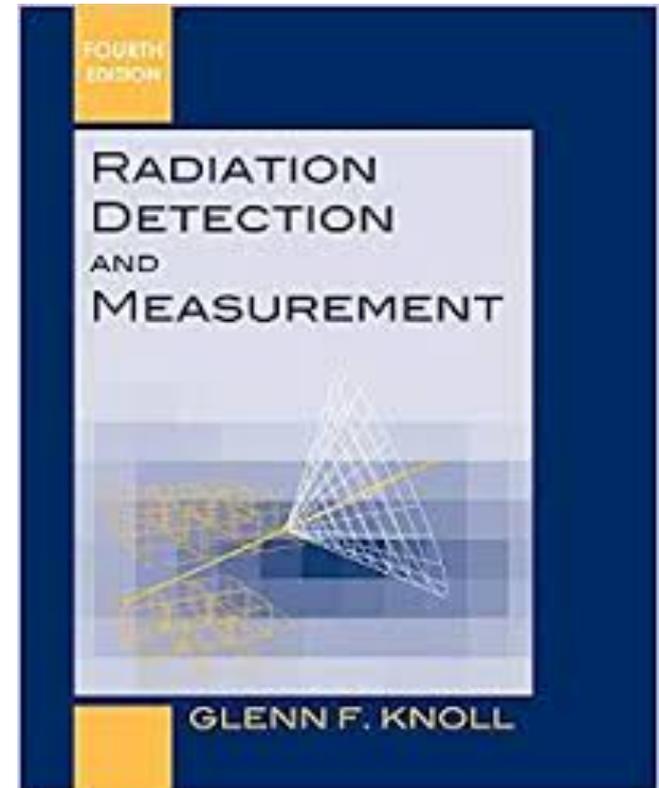


# Strumentazione Astronomica

## Libri di testo

La parte di alte energie (astronomia gamma e raggi cosmici) è sovrabbondantemente coperta dalla Bibbia delle misure nucleari che vedete qui a lato.

E' un libro bellissimo che ogni sperimentale che ha a che fare con la radiazione ionizzante dovrebbe avere. Nelle lezioni io tocco lo 0.01% di quello che è trattato nel libro.



# Strumentazione Astronomica

## Programma del Corso

- Strumenti per Astronomia elettromagnetica
  - Telescopi, strumenti di piano focale
- Strumenti per Astronomia con la materia (raggi cosmici)
  - “Telescopi”, rivelatori di particelle
- Strumenti per Astronomia con le onde gravitazionali
  - Antenne gravitazionali

Cominciamo con qualche richiamo di ottica geometrica

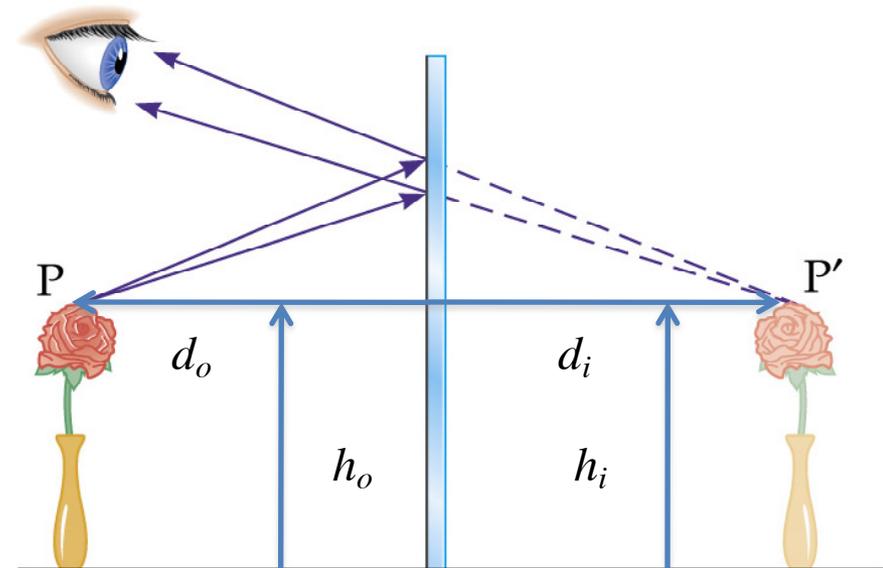
# Strumentazione Astronomica

## Specchi piani

- La distanza dell'immagine (al di là dello specchio) è uguale a quella dell'oggetto
- L'immagine non è ingrandita

$$m = \frac{\text{altezza immagine}}{\text{altezza oggetto}} = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o} \quad \text{magnificazione}$$

- L'immagine è *virtuale*:
  - La distanza dell'immagine è negativa
  - $d_i < 0$
- $m > 0$ , l'immagine non è invertita

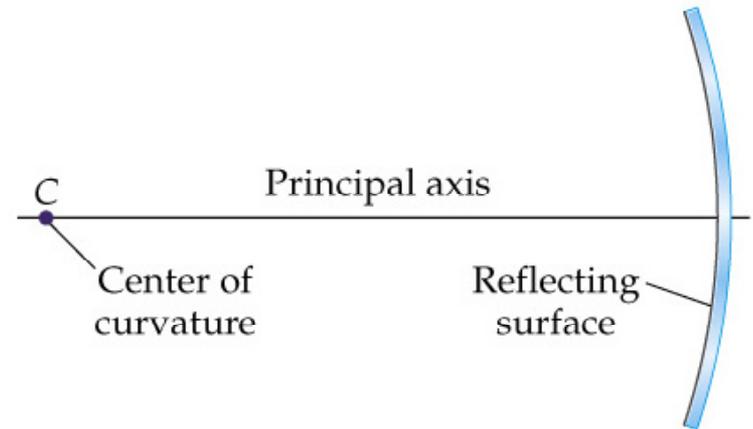


# Strumentazione Astronomica

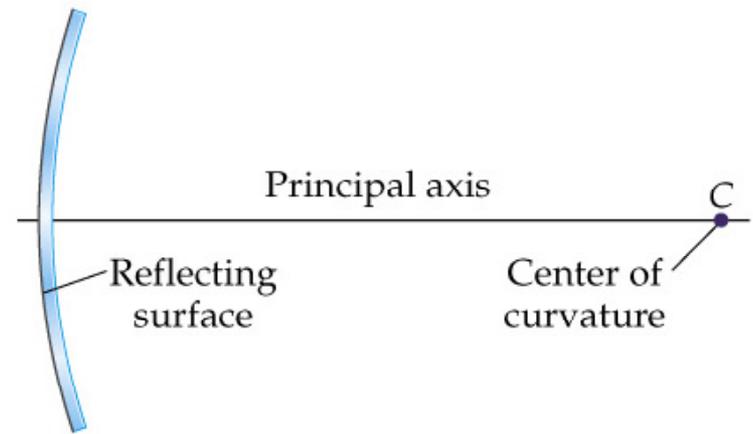
## Specchi sferici

Uno specchio sferico ha una superficie riflettente caratterizzata da un raggio di curvatura  $R$ . Possono essere concavi o convessi.

Di conseguenza il centro di curvatura sarà dalla stessa parte o dalla parte opposta di dove si trova l'oggetto di cui lo specchio forma l'immagine



(a)



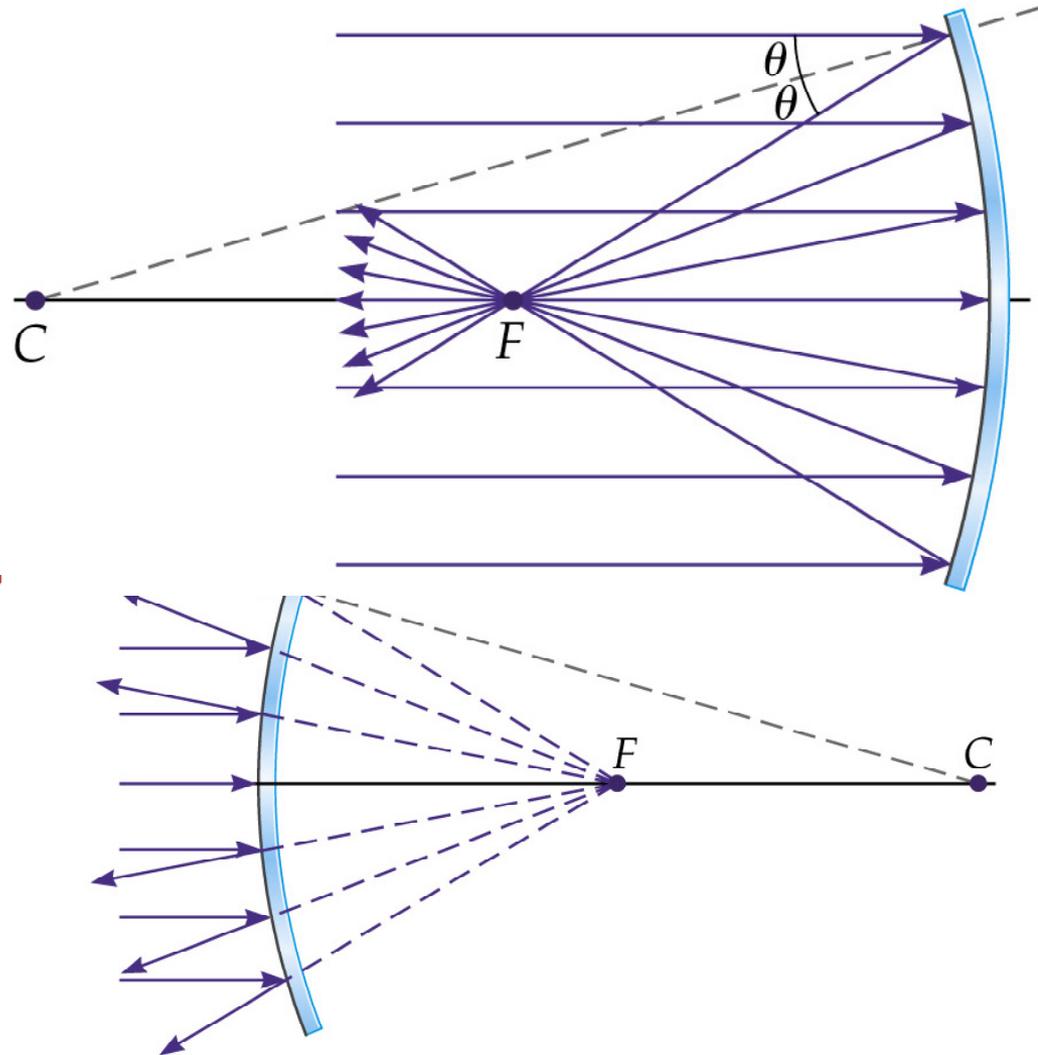
(b)

# Strumentazione Astronomica

Raggi paralleli provenienti da una sorgente all'infinito, che incidono su uno specchio sferico vengono riflessi nel fuoco  $F$ , ad una distanza  $R/2$  dalla superficie dello specchio. Localmente lo specchio è una superficie piana perpendicolare al raggio tracciato da  $C$  centro della sfera. Il raggio di luce incide con un angolo  $\theta$  e viene riflesso con lo stesso angolo, arrivando in  $F$ .

Specchi concavi hanno il punto focale (reale) di fronte alla superficie riflettente.

Specchi convessi ce l'hanno dietro e hanno perciò un fuoco virtuale.



# Strumentazione Astronomica

Lunghezza focale

La **lunghezza focale**  $f$  è la distanza tra la superficie dello specchio e il punto focale  $F$ .

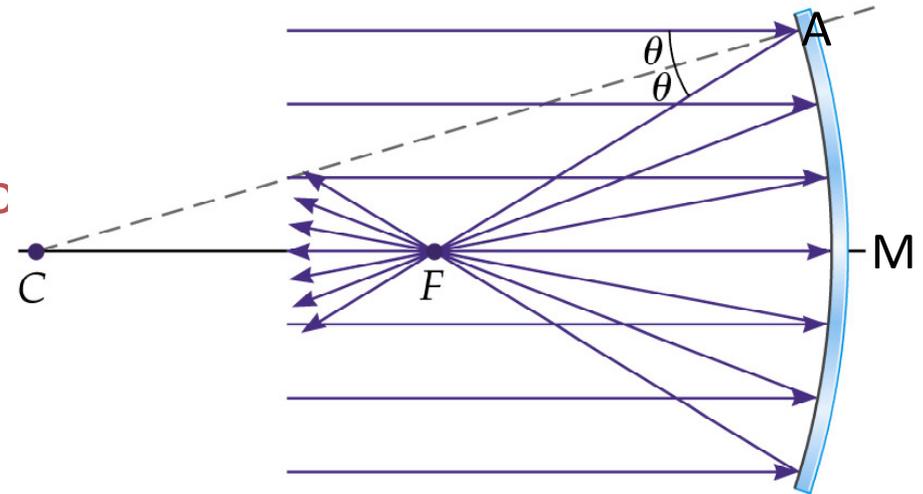
$$CF = FA = r/2 = FM$$

La lunghezza focale  $FM$  è la metà del raggio di curvatura della superficie sferica.

Convenzione dei segni: La lunghezza focale è negativa se il punto focale è dietro allo specchio.

Uno specchio concavo ha  $f = \frac{1}{2}R$

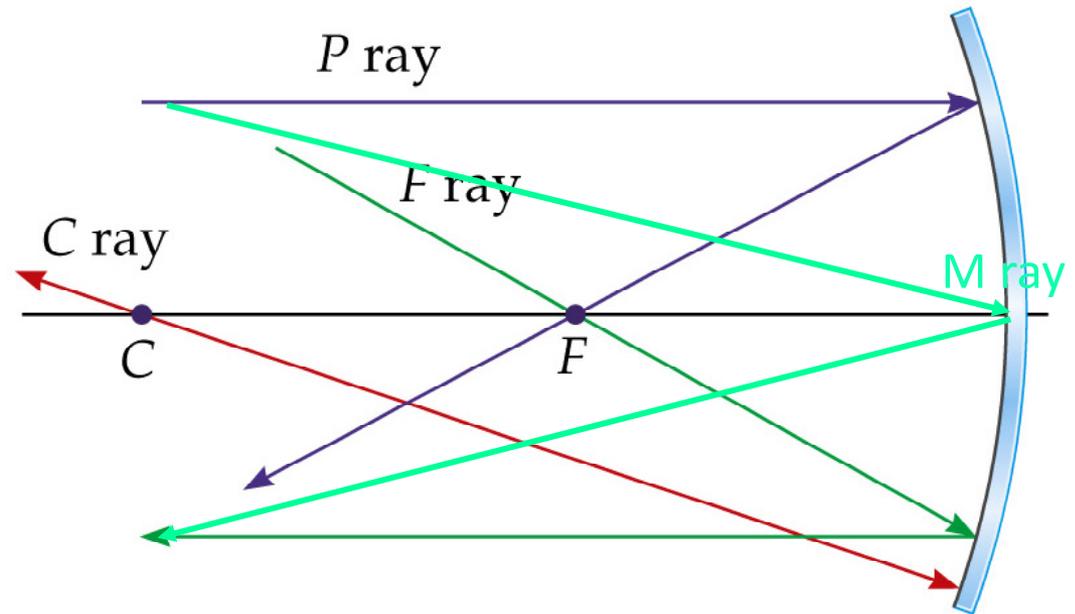
Uno specchio convesso ha  $f = -\frac{1}{2}R$  ( $R$  sempre positivo)



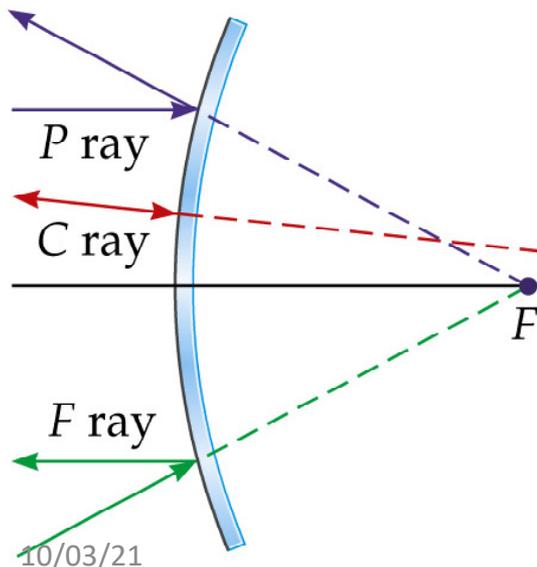
# Strumentazione Astronomica

## Ray Tracing:

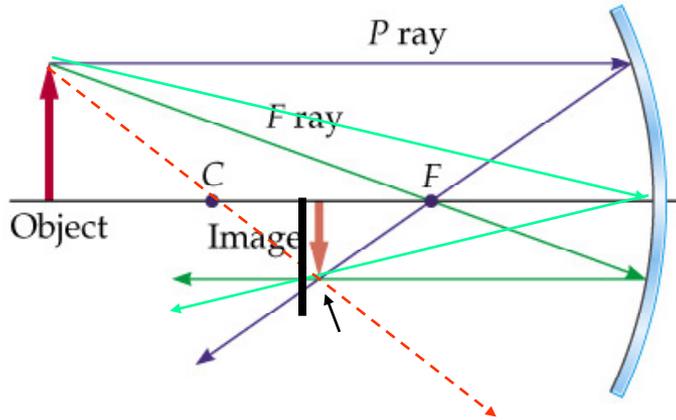
Serve a stabilire dove si forma l'immagine. Si parte con due dei 4 raggi principali (parallelo, focale, centro di curvatura e medio)



Il raggio parallelo (P ray) si riflette attraverso il punto focale. Il raggio focale (F ray) si riflette parallelamente all'asse ottico, il raggio del centro di curvatura (C ray) si riflette indietro lungo il cammino di incidenza. Il raggio medio (M ray) si riflette con lo stesso angolo con cui incide rispetto all'asse ottico.

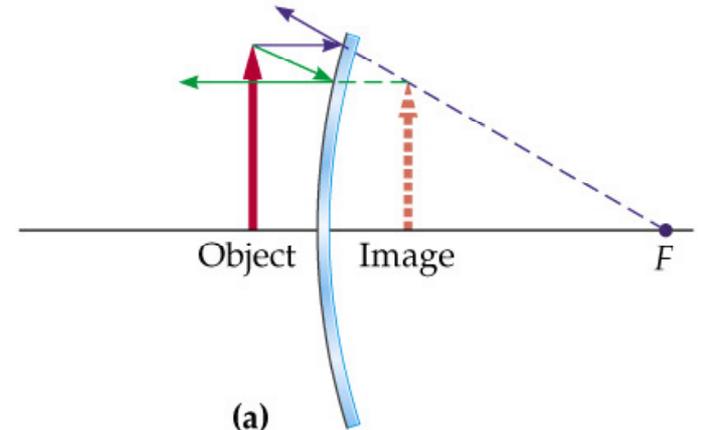


# Strumentazione Astronomica



(a)

concavo



(a)

convesso

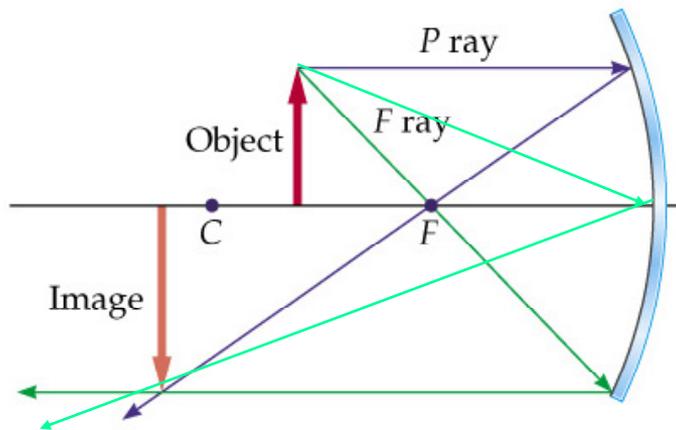
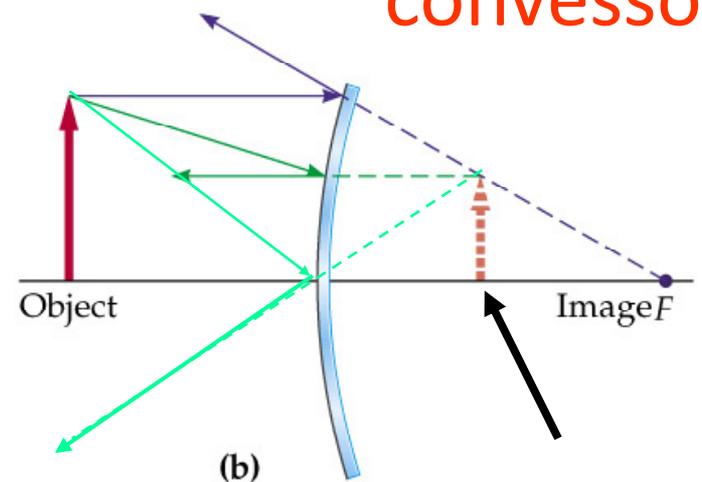


Immagine reale (b)



(b)

Immagine virtuale

# Strumentazione Astronomica

La distanza dell'immagine dallo specchio si trova con l'equazione dello specchio:

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

$d_o$  = distanza dell'oggetto dallo specchio

$d_i$  = distanza dell'immagine dallo specchio

$f$  = lunghezza focale

$m$  = magnificazione  $m = -\frac{d_i}{d_o}$

## Convenzione dei segni:

$d_o$  positivo se l'oggetto è di fronte allo specchio (oggetto reale)

$d_o$  negativo se l'oggetto è dietro allo specchio (oggetto virtuale)

$d_i$  positivo se l'immagine è di fronte allo specchio (immagine reale)

$d_i$  negativo se l'immagine è dietro allo specchio (immagine virtuale)

$f$  positivo per specchi concavi

$f$  negativo per specchi convessi

$m$  positivo per immagini dritte

$m$  negativo per immagini rovesciate

# Strumentazione Astronomica

Esempio: un oggetto è posto a 90 cm davanti a uno specchio concavo sferico di raggio 30 cm. Dove si forma l'immagine? È reale o virtuale? Dritta o rovesciata? Che magnificazione ha?

$$f = +R/2 = +15\text{cm}$$

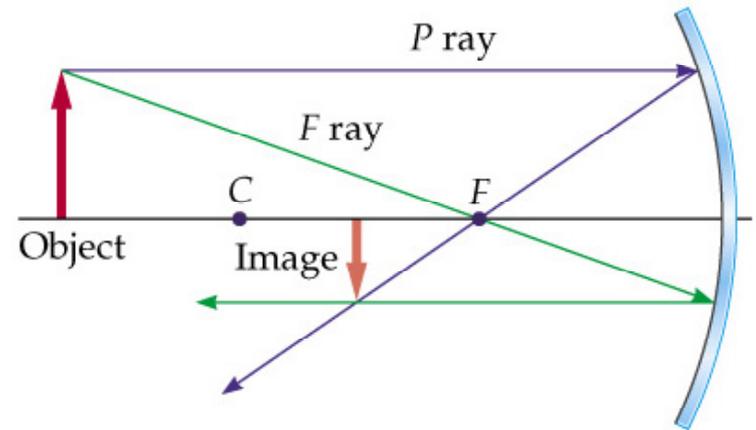
$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

$$d_o = +90\text{cm}$$

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{15\text{cm}} - \frac{1}{90\text{cm}}$$

$$\frac{1}{d_i} = \frac{6}{90\text{cm}} - \frac{1}{90\text{cm}} = \frac{5}{90\text{cm}} = \frac{1}{18\text{cm}}$$

$$d_i = 18\text{cm}$$



$d_i > 0 \rightarrow$  immagine reale rovesciata  
rimpicciolita

$$m = -d_i / d_o = -1/5$$

# Strumentazione Astronomica

Un oggetto si trova a 5 cm di fronte a uno specchio convesso di lunghezza focale 10cm. Dove si forma l'immagine (reale o virtuale?)?

$$f = -R/2 = -10\text{cm}$$

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

$$d_o = +5\text{cm}$$

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{-10\text{cm}} - \frac{1}{5\text{cm}}$$

$$\frac{1}{d_i} = \frac{-1}{10\text{cm}} - \frac{2}{10\text{cm}} = \frac{-3}{10\text{cm}}$$

$$d_i = -3.33\text{cm}$$

$$m = -d_i / d_o = 0.66$$

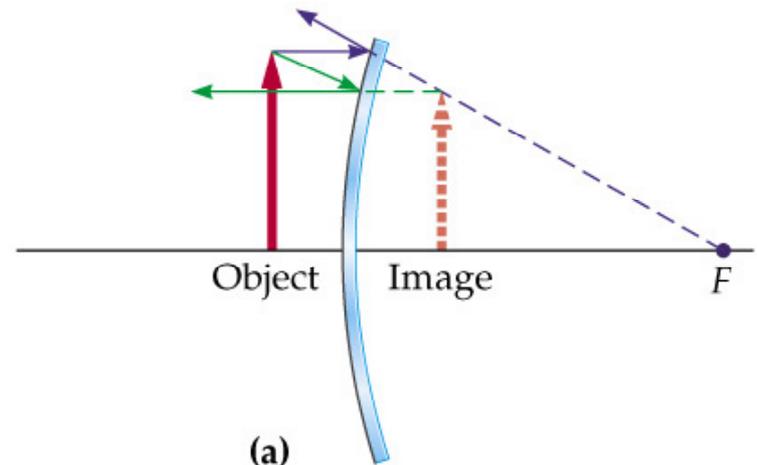


Immagine Virtuale,  $d_i < 0$   
rimpicciolita,  $|m| < 1$ ,  
Non invertita.  $m > 0$

# Strumentazione Astronomica

## Rifrazione

La velocità di propagazione della luce dipende dal materiale.  
Definiamo indice di rifrazione  $n$  di un materiale il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e nel materiale:

$$n = c/v$$

Quando la luce viaggia da un mezzo ad un altro la sua velocità e lunghezza d'onda variano. **Non varia la frequenza.**

Se un mezzo dielettrico ha una costante dielettrica  $\kappa$ , allora

- $v = 1/(\kappa\epsilon_0\mu_0)^{1/2}$
- $n = (\epsilon_r\mu_r)^{1/2}$

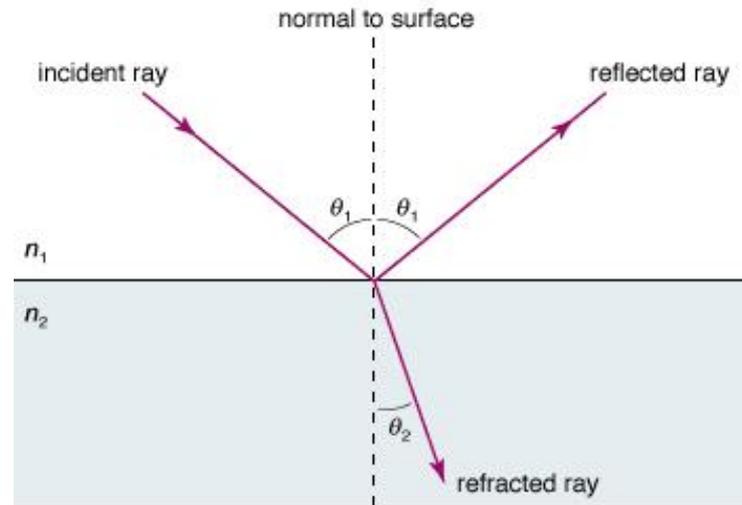
# Strumentazione Astronomica

*Legge di Snell*

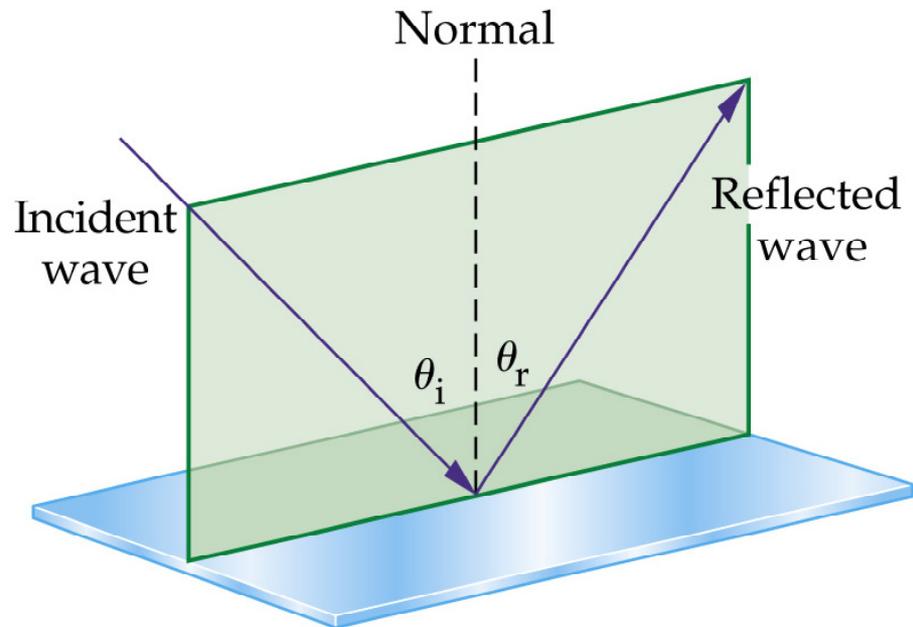
$$n_i \sin \theta_i = n_{\text{refr}} \sin \theta_{\text{refr}}$$

*Legge della riflessione*

$$\theta_i = \theta_r$$



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.



# Strumentazione Astronomica

Esiste un angolo critico, detto di riflessione totale, quando la luce viaggia da un mezzo con  $n_2 > n_1$  (indice del mezzo di arrivo). La luce che incide con questo angolo viene riflessa totalmente. L'angolo critico si presenta quando  $\theta_2 = 90$  gradi

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Riflessione totale se  $\sin \theta_2 > 1$

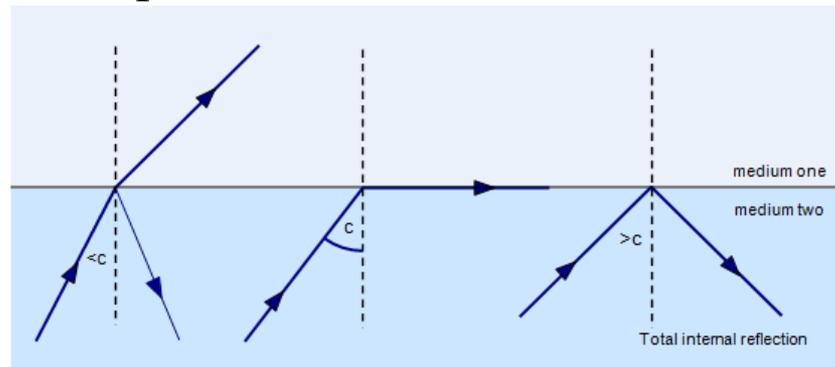
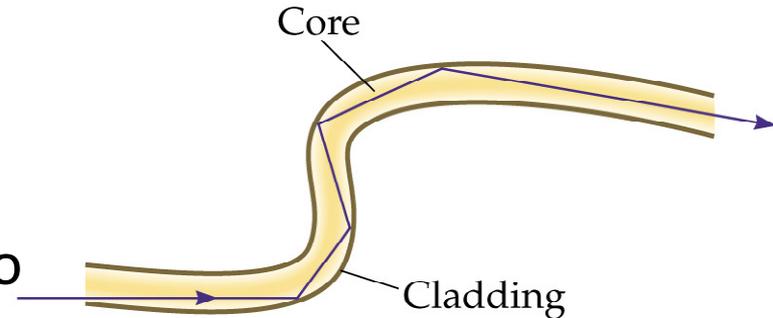


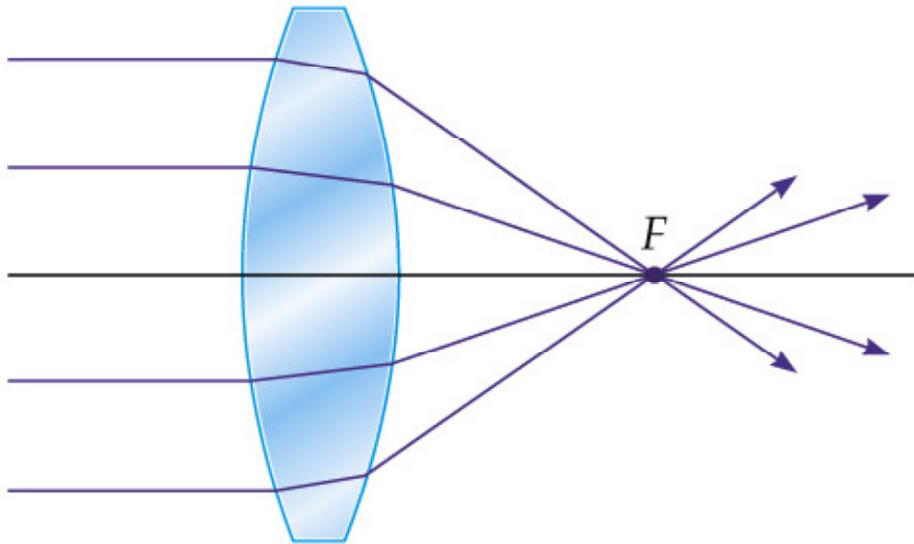
Figure 1

Il raggio incidente è sia riflesso che rifratto.

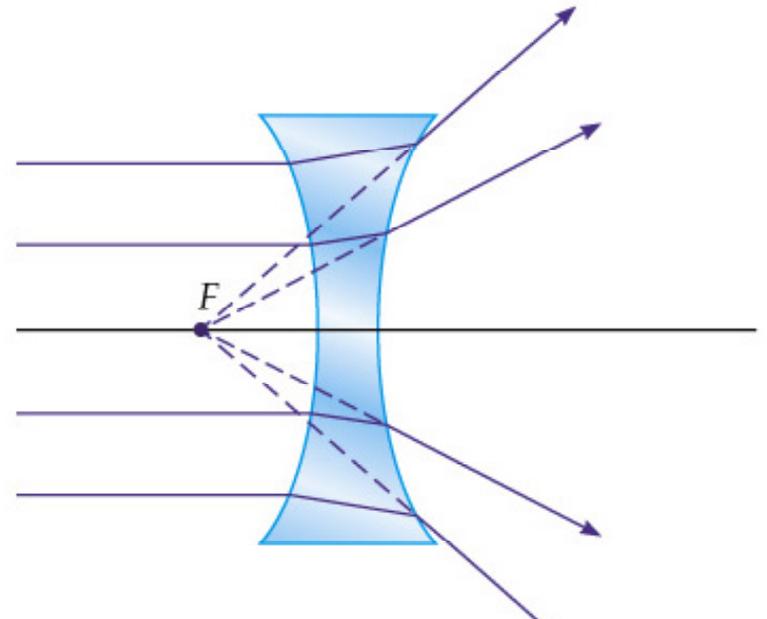
Riflessione totale

# Strumentazione Astronomica

LENTI: le lenti diffrangono. Il punto focale di una lente è il luogo dove i raggi incidenti paralleli vengono fatti convergere



Lente convergente



Lente divergente

# Strumentazione Astronomica

Vale la legge delle lenti:

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

## Convenzioni:

$d_o > 0$  per oggetti reali (da cui la luce diverge)

$d_o < 0$  per oggetti virtuali (verso cui la luce converge)

$d_i > 0$  per immagini reali (che sono cioè sul lato opposto della lente rispetto all'oggetto reale)

$d_i < 0$  per immagini virtuali (che sono dallo stesso lato dell'oggetto)

$f > 0$  per lenti convergenti (convesse)

$f < 0$  per lenti divergenti (concave)

$m > 0$  per immagini dritte

$m < 0$  per immagini invertite

# Strumentazione Astronomica

Esempio: un oggetto si trova a 8 cm di fronte a una lente divergente di lunghezza focale 4 cm. Dov'è l'immagine? È dritta o invertita? Reale o virtuale? Qual'è la magnificazione dell'immagine?

$$f = -4\text{cm (concava)}$$

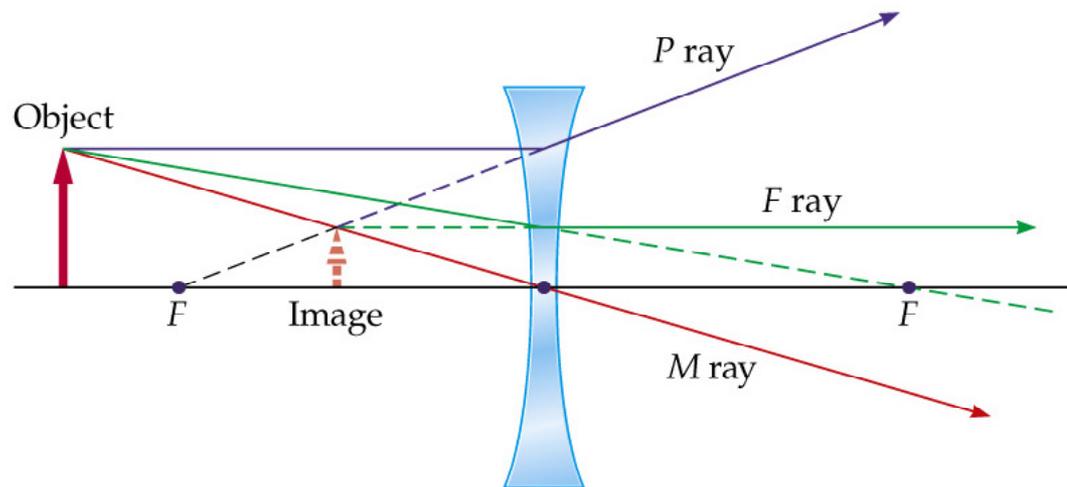
$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

$$d_o = +8\text{cm}$$

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} = \frac{1}{-4\text{cm}} - \frac{1}{8\text{cm}}$$

$$d_i = -8/3\text{cm} < 0$$

$$m = -d_i/d_o = 0.333 > 0$$



# Strumentazione Astronomica

## Due Lenti

### Prima lente

$$f = -7\text{cm (concava)}$$

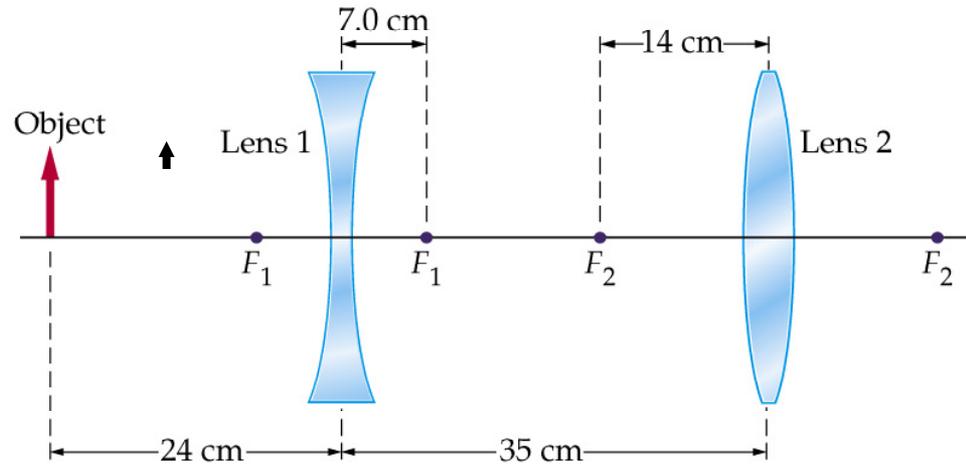
$$\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f}$$

$$d_o = +24\text{cm}$$

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

$$d_i = -5.42\text{cm}$$

$$m = -d_i / d_o = 0.226$$



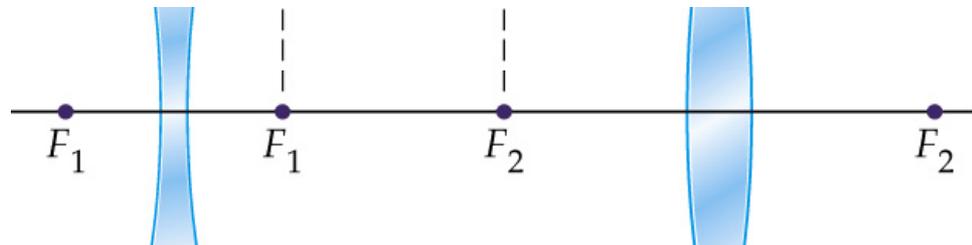
### Seconda lente

$$f = +14\text{cm (convessa)}$$

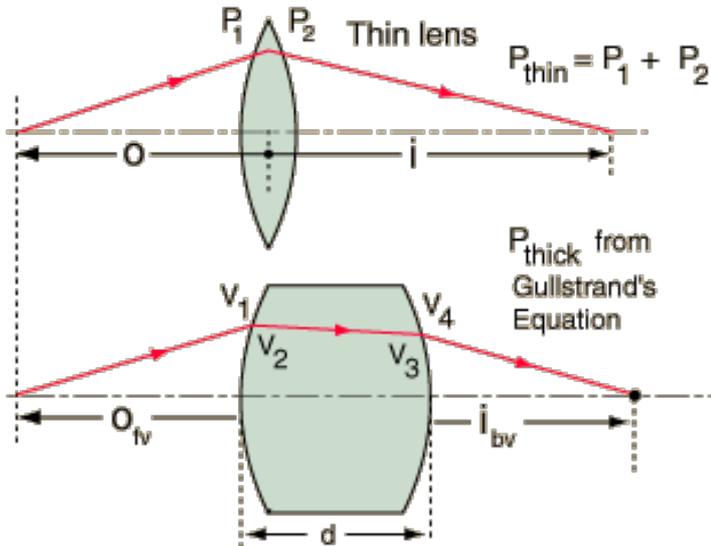
$$d_o = 35.0 + 5.42\text{cm} = 40.42\text{cm}$$

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_o} \quad d_i = +21.42\text{cm}$$

$$m = -d_i / d_o = -0.53$$



# Strumentazione Astronomica



Lenti Sottili

Lenti Spesse

Come si effettua il ray tracing nelle lenti?

Il raggio  $P$  propaga parallelo all'asse principale della lente sino ad incontrare la lente che lo rifrange per farlo passare dal punto focale  $F$  al di là della lente. Il raggio  $F$  passa attraverso il punto focale prima della lente, poi lascia la lente parallelamente all'asse ottico. Il raggio  $M$  passa attraverso il centro della lente senza deflessioni (nel limite delle lenti sottili).

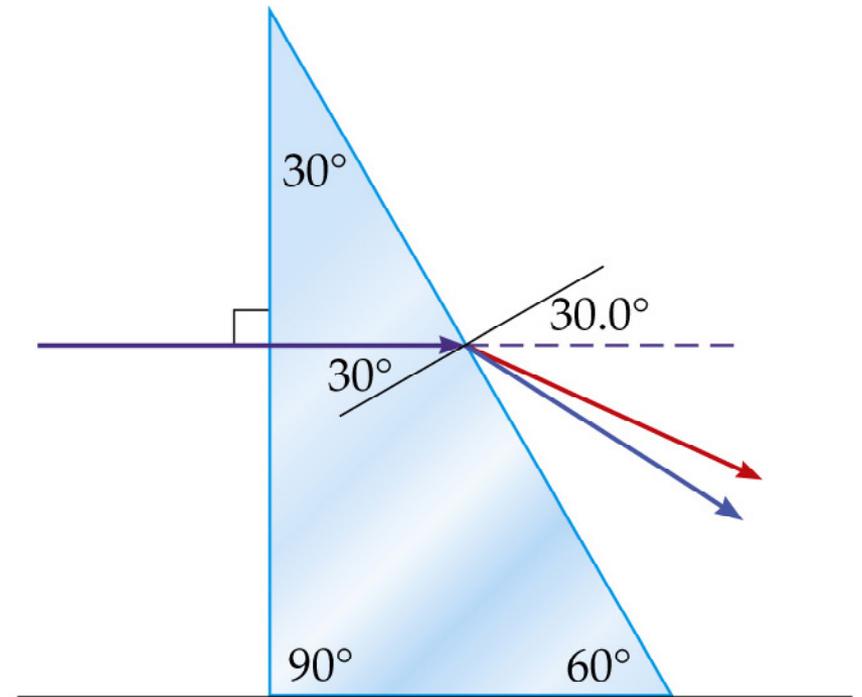
# Strumentazione Astronomica

## Dispersione

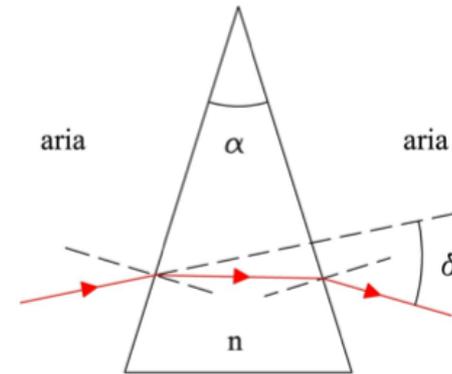
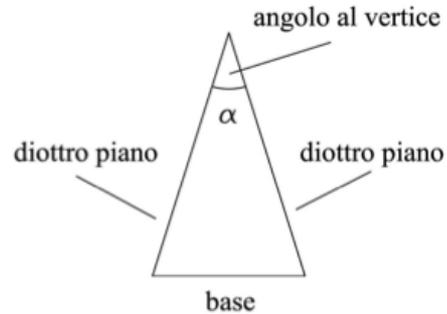
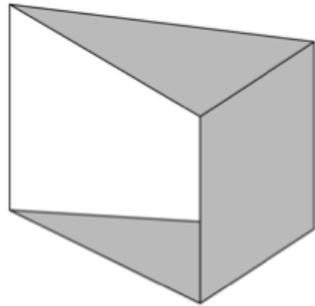
In un materiale la velocità della luce (e quindi l'indice di rifrazione) può dipendere dalla lunghezza d'onda. Il fenomeno prende il nome di dispersione. La luce blu nel vetro e nell'acqua viaggia meno velocemente della luce rossa.

Di conseguenza i diversi colori vengono rifratti diversamente attraversando un mezzo.

Un esempio di utilizzo è il prisma che ci permette di disperdere e quindi osservare le diverse componenti spettrali della luce.



# Strumentazione Astronomica



Nell'approssimazione di  $\alpha$  piccolo

$$|\delta(\lambda)| = [n(\lambda) - 1] \alpha$$

# Strumentazione Astronomica

Polimetilmetacrilato

			Indice di rifrazione				
Sigla	$\lambda$ (nm)	Colore	NSF4	NBK7	PMMA	Acqua	Aria
h	404.7	violetto	1.807	1.530	1.507	1.343	1.0003
g	435.8	violetto	1.792	1.527	1.503	1.340	1.0003
F'	480.0	blu	1.777	1.523	1.498	1.338	1.0003
F	486.1	blu	1.775	1.522	1.498	1.337	1.0003
e	546.1	verde	1.762	1.519	1.494	1.335	1.0003
d	587.6	giallo	1.755	1.517	1.492	1.333	1.0003
D	589.3	giallo	1.755	1.517	1.492	1.333	1.0003
C'	643.8	rosso	1.748	1.515	1.490	1.332	1.0003
C	656.3	rosso	1.747	1.514	1.489	1.331	1.0003
r	706.5	rosso	1.743	1.513	1.488	1.330	1.0003
Densità (gr/cm <sup>3</sup> )			3.15	2.51	1.2	1.00	0.0013

Indice di rifrazione per alcuni tipici materiali.

# Strumentazione Astronomica

Il ray tracing si fa con software specifici come

- ZEMAX Optics Studio <https://www.zemax.com>
- TracePro <https://www.lambdares.com/tracepro/>
- OSLO <https://www.lambdares.com/oslo/>

In casi particolari come nel  
Millimetrico e Sub-Millimetrico si usano  
Software di simulazione di ottica fisica  
come GRASP <https://www.ticra.com>

