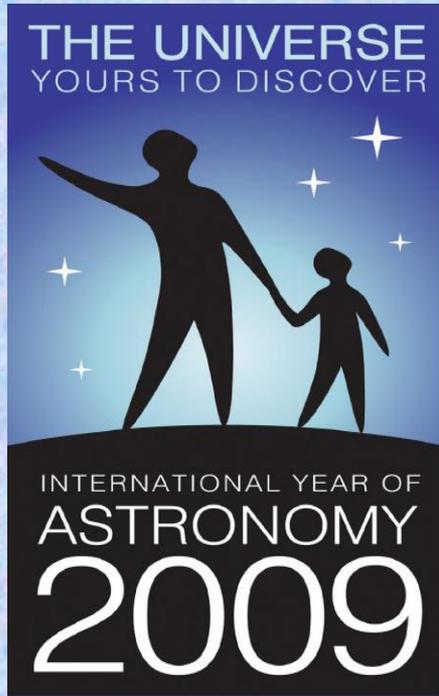


Università degli Studi di Palermo
Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali
Corso di Laurea in Fisica
Progetto Lauree Scientifiche



Laboratorio di
Ottica, Spettroscopia, Astrofisica

Antonio Maggio
Istituto Nazionale di Astrofisica
Osservatorio Astronomico di Palermo

Laboratorio di Ottica, Spettroscopia, Astrofisica

Seconda lezione

Il principio di Fermat e il funzionamento
di lenti e telescopi rifrattori

Antonio Maggio

Istituto Nazionale di Astrofisica
Osservatorio Astronomico di Palermo

con la collaborazione di Salvo Massaro

Riassunto 1^a lezione

- Cos'è la radiazione
- Propagazione della luce e metodo del tracciamento dei raggi (*ray tracing*)
- Sistemi ottici, come e perché
- Esperienze di ottica con un'apertura di grandi dimensioni, con un foro stenopeico, o con una lente, usando l'occhio o uno schermo come "rivelatore"

Sommario 2^a lezione

- Riassunto dei principi di ottica incontrati e soluzione di alcune questioni aperte
- Equazione delle lenti sottili
- Rifrazione
- Esperienze con due lenti
- Telescopi "rifrattori"

Alcuni concetti fondamentali

- Radiazione emessa da una sorgente puntiforme (fronti d'onda, raggi e fotoni)
- Fascio di luce che "passa" al di là di un ostacolo e principio di Huygens
- Radiazione emessa da una sorgente estesa
- "Brillantezza" dell'immagine e legge dell'inverso del quadrato della distanza

Cos'è la radiazione

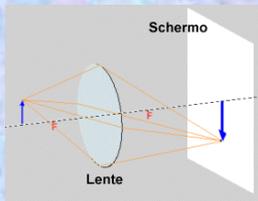
- La **radiazione** (luce) è il mezzo più veloce scelto dalla natura per trasportare **energia** attraverso lo spazio
- Vale il **principio di conservazione dell'energia**: l'energia trasportata dalla radiazione si può diffondere nello spazio, può cambiare forma, ma non può essere distrutta
- L'**ottica ondulatoria** è la teoria che spiega il comportamento della radiazione assumendo che questa sia composta da **onde**.
- L'**ottica geometrica** è una semplificazione dell'ottica ondulatoria in quanto spiega alcuni fenomeni considerando semplicemente due caratteristiche delle onde, la direzione e la velocità di propagazione (**modello a raggi**)

Sequenza degli esperimenti e dei concetti

Esperienze	Interpretazione fisica e metodi d'analisi
<p>1. Un'apertura di grandi dimensioni fa passare molta luce, ma non genera un'immagine</p>	<ul style="list-style-type: none">• Il flusso di energia intercettato da uno schermo è proporzionale all'area dell'apertura e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra l'apertura (sorgente secondaria) e lo schermo• Il metodo del tracciamento dei raggi (<i>ray tracing</i>) mostra che ad ogni punto della sorgente (oggetto) corrispondono diversi punti della regione illuminata
<p>2. Un foro stenopeico genera un'immagine, ma raccoglie poca luce (strumento ottico con <i>bassa sensibilità</i>); più piccolo è il foro migliore è la qualità dell'immagine (<i>migliore risoluzione spaziale</i>)</p>	<ul style="list-style-type: none">• Il foro consente soltanto poche direzioni di propagazione della radiazione; l'immagine può essere spiegata con il <i>modello a raggi (ottica geometrica)</i>• Un sistema ottico "efficiente" deve realizzare una corrispondenza biunivoca tra punti sorgente e punti immagine (<i>focalizzazione</i>)

Sequenza degli esperimenti e dei concetti

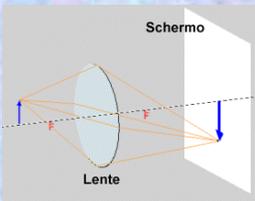
Esperienze	Interpretazione fisica e metodi d'analisi
<p>3. Una <i>lente convessa</i> raccoglie molta luce e genera un'immagine nitida, proiettabile solo in certe condizioni</p>	<ul style="list-style-type: none">• La lente modifica la direzione di propagazione della radiazione. Questo effetto si chiama <i>rifrazione</i>• Immagini reali si possono formare su uno schermo (<i>rivelatore</i>) posto a una distanza dalla lente che dipende dalla distanza della sorgente. La distanza della sorgente dalla lente deve comunque essere maggiore della sua lunghezza focale, altrimenti l'immagine non si ottiene.



Esperienza con misure

- Derivazione sperimentale (tramite misure al banco ottico) della **equazione delle lenti sottili** per una lente convessa

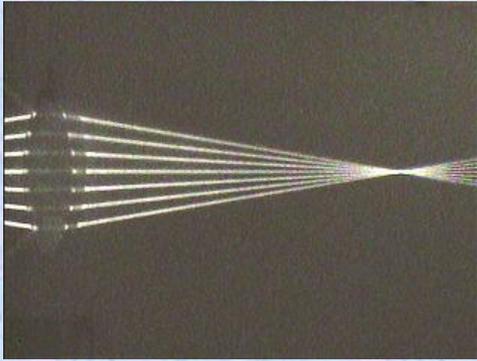
(Esercizio per casa: trovate qual è la relazione tra le quantità $d_o - f$ e $d_i - f$, al variare di d_i , dove d_o è la distanza dell'oggetto dalla lente e d_i la distanza dell'immagine dalla lente)



Equazione delle lenti sottili

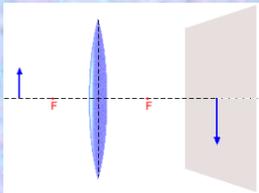
- Per una lente convessa esiste una relazione tra d_o , d_i ed f (dove d_o e d_i sono le distanze dell'oggetto e dell'immagine da una lente di lunghezza focale f)
- Tale relazione si può ricavare anche geometricamente tramite la *tecnica dei raggi principali*
- **Esercizio:** dimostrare che la relazione trovata tramite le misure in laboratorio è equivalente a quella che si può trovare geometricamente
- **Esercizio:** fissata $L = d_o + d_i$, dimostrare che ci sono due posizioni in cui si può piazzare la lente per formare un'immagine

Alcuni risultati e loro significato



- Le lenti con una superficie convessa riescono a focalizzare un'immagine tramite l'effetto di rifrazione
- I punti immagine e oggetto sono in corrispondenza biunivoca, ma solo se l'oggetto è a distanza maggiore di quella focale

- Le lenti hanno una forma tale da garantire che onde emesse da ogni punto della sorgente convergono in un punto corrispondente dell'immagine, dopo due deflessioni (alle due superfici di separazione aria-vetro e vetro-aria della lente)
- La rifrazione è quel fenomeno che si verifica quando la luce attraversa la superficie di separazione tra due mezzi, nei quali essa si propaga a velocità differente (si definisce indice di rifrazione la quantità $n=c/v$)



Interpretazione fisica

• Rifrazione della luce

- Perché la luce viene deflessa (rifratta) quando attraversa un vetro? La stessa cosa accade in un liquido (esperienza della matita nel bicchiere d'acqua che appare piegata).

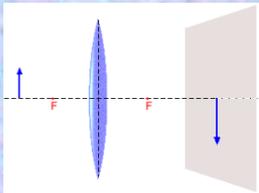
Questo fenomeno è dovuto alla variazione della velocità della luce quando passa da un mezzo ad un altro. Vale il principio di Fermat: il percorso della luce è quello che permette di raggiungere il punto di arrivo nel minor tempo possibile. Da tale principio deriva la legge di Snell-Descartes (vedi avanti)

- **Esercizio:** derivazione della legge di Snell-Descartes come soluzione del problema del bagnino

Formule e definizioni

- **Equazione delle lenti sottili:**
relazione tra d_o , d_i ed f (da trovare per esercizio)
- **Ingrandimento:** $m = - d_i / d_o$ ($h_i = m h_o$)
- **Principio di Fermat:** $t = L / v$ deve essere minimo
- **Legge di Snell-Descartes:** $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$
- **Indice di rifrazione:** $n = c / v$

(d_o e d_i distanze oggetto e immagine dalla lente, f lunghezza focale, m ingrandimento, h dimensione dell'oggetto o dell'immagine, t tempo di percorrenza, L lunghezza percorso, v velocità della luce in un mezzo, θ_1 angolo di ingresso, θ_2 angolo di uscita, c velocità della luce nel vuoto)



Esperienze con una lente

- **Altri esperimenti, altre domande**

- Che succede se l'oggetto (sorgente di luce) è a distanza minore della lunghezza focale? Perché l'occhio vede l'immagine virtuale?

*Ricordiamo che la luce trasporta un segnale: lo vediamo perché evidentemente la lente fa passare la luce e l'occhio (retina) la percepisce; **l'occhio riesce a focalizzare un'immagine che sullo schermo appare completamente sfocata**; l'occhio si comporta come una seconda lente?*

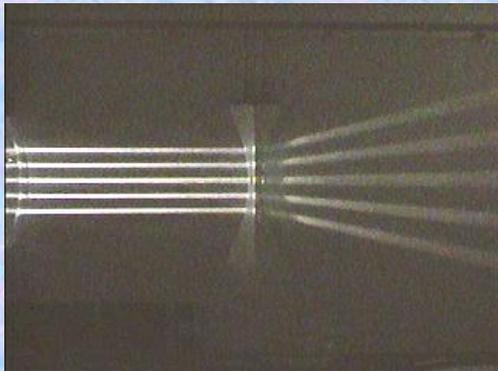
Sequenza degli esperimenti e dei concetti

4. Le immagini reali si formano a una distanza dalla lente che dipende dalla distanza della sorgente

- Per ottenere una *immagine reale*, la sorgente deve essere a distanza maggiore della *lunghezza focale* altrimenti l'immagine è *virtuale* (non proiettabile ma visibile con l'occhio)
- *Equazione delle lenti sottili* (derivabile sperimentalmente o tramite la tecnica dei raggi principali)

Altre lenti

- Come si comporta una lente correttiva (per miopi)? Proviamo a effettuare il tracciamento dei raggi con una penna laser.



- Vi sono lenti (*concave, divergenti*) come quelle correttive per miopia, che non focalizzano mai, ma ancora una volta l'occhio vede un'immagine reale

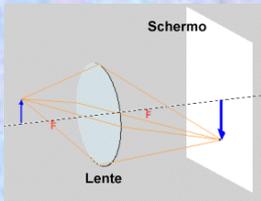
•

Sequenza degli esperimenti e dei concetti

Esperienze	Interpretazione fisica e metodi d'analisi
5. Le lenti correttive per miopia hanno un comportamento diverso da quello delle lenti d'ingrandimento .	<ul style="list-style-type: none">• Le <i>lenti concave</i> proiettano solo immagini virtuali• La capacità di focalizzazione di una lente dipende quindi da caratteristiche fisiche (<i>indice di rifrazione</i>) e da fattori geometrici (<i>curvatura</i>)

Prossimo passo: un sistema di due lenti

Esperienze al banco ottico



- Esperienze con due lenti:
 - Sorgente (oggetto), prima lente concava, seconda lente convessa, schermo
 - Sorgente (oggetto) a $d_o < f$ da una prima lente convessa, seguita da una seconda lente convessa e infine lo schermo

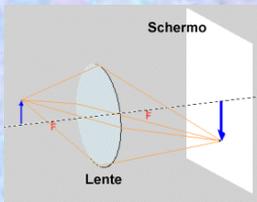
In quali condizioni si forma un'immagine reale sullo schermo?

Sequenza degli esperimenti e dei concetti

6. Un sistema di lenti può "convertire" una immagine virtuale in una reale o viceversa. Le dimensioni dell'immagine dipendono dal sistema.

- Un sistema ottico modifica il *fronte d'onda* della radiazione tramite effetti di rifrazione multipli

Esperienze al banco ottico



- Costruzione di un **telescopio** con due lenti di focale diversa (*l'immagine prodotta da una lente diventa l'oggetto per quella successiva; ciò è vero qualunque sia la combinazione di lenti, poiché - da un punto di vista fisico - le lenti sono elementi rifrangenti della radiazione, la quale viene comunque trasmessa da una parte all'altra*)
- **Previsione:** se l'immagine formata dalla prima lente viene messa nella posizione del fuoco della seconda lente o più vicina ($d \leq f$), cosa ci aspettiamo?

(La seconda funziona come una lente d'ingrandimento, usata in modo classico, si forma un'immagine virtuale ingrandita, visibile solo con i nostri occhi)

Se invece la seconda lente è posta a distanza $d > f$ dall'immagine formata dalla prima?

(Si forma un'immagine reale a una distanza calcolabile con la legge delle lenti sottili)

Sequenza degli esperimenti e dei concetti

Esperienze	Interpretazione fisica e metodi d'analisi
<p>7. Con due lenti (<i>oculare</i> e <i>obiettivo</i>) convesse di focale diversa si può costruire un <i>telescopio rifrattore</i> (kepleriano)</p>	<ul style="list-style-type: none">• L'immagine prodotta è virtuale (visibile con l'occhio), se la 2^a lente è posta a distanza f_1+f_2 dalla 1^a lente. La dimensione dell'immagine dipende dal rapporto f_1/f_2• L'immagine prodotta è reale (proiettabile sullo schermo) se la 2^a lente è posta a distanza maggiore ($> f_1+f_2$)

Un'altra applicazione



• *Il Sunspotter*

- Un telescopio rifrattore con una geometria particolare.
Come funziona? [schema](#)

- Obiettivo acromatico (a due elementi) da 700 mm di lunghezza focale, diametro 61,7 mm. Oculare (a 4 elementi) da 12,5 mm di focale, diametro 10 mm

- **Esercizio:** sapendo che lo schermo è posto a 175 mm di distanza dall'oculare, calcolare la dimensione dell'immagine del Sole (raggio del Sole = 7×10^8 m, distanza del Sole = 1.5×10^{11} m)

Conclusioni basate sull'ottica geometrica

- L'accoppiamento di varie lenti può essere impiegato per ottenere immagini ben focalizzate e ingrandite, sfruttando le proprietà di rifrazione dei vetri
- L'ottica geometrica e il modello a raggi ci consentono di prevedere gli angoli di rifrazione, le posizioni in cui si formano le immagini (equazione delle lenti sottili) e la dimensione (ingrandimento) dell'immagine finale
- Da un punto di vista fisico stiamo solo trovando un modo di raccogliere quanta più radiazione è possibile e trasferirla su un "rivelatore" (occhio, schermo, pellicola) mantenendo l'informazione spaziale sulla struttura della sorgente (*trasformazione lineare tra coordinate dei punti oggetto e coordinate dei punti immagine*)