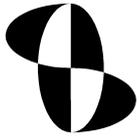


DISPENSE DI

PROGETTAZIONE OTTICA
PROGETTAZIONE DI STRUMENTI OTTICI

Cap.1 - NOZIONI FONDAMENTALI

Ing. Fabrizio Liberati



Cap. 1: NOZIONI FONDAMENTALI

1.1. Introduzione

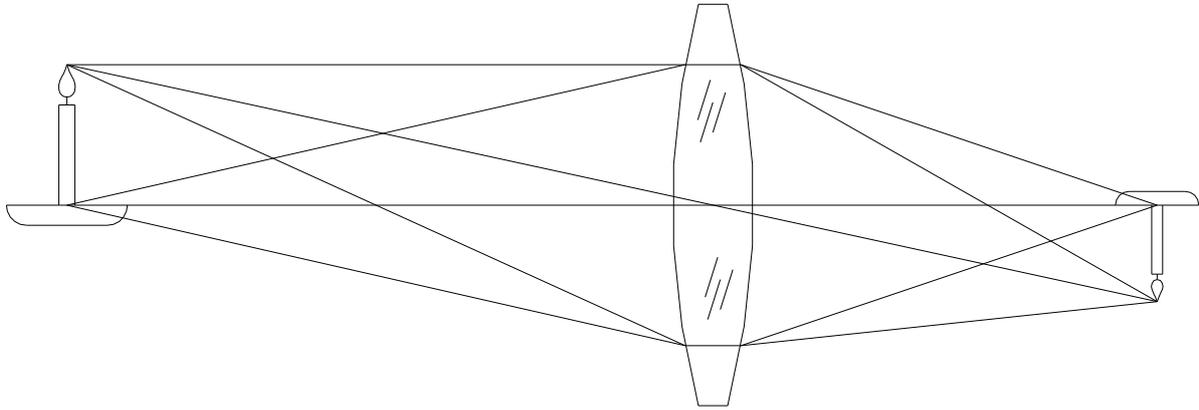


figura 1.1

Chissà quante volte abbiamo visto questa figura in un libro di fisica o di ottica. Ciò che mostra sembra evidente: è la formazione di un'immagine da parte di una lente. In realtà raramente ne viene spiegato in maniera comprensibile il significato fisico o viene detto perché si usa un oggetto luminoso piuttosto che uno illuminato.

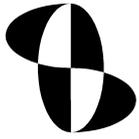
Partendo dalla spiegazione di questa figura cercheremo di percorrere un cammino di conoscenze di ottica soprattutto da un punto di vista pratico. In questo modo speriamo di aiutare il lettore a comprendere il problema che gli si pone, a definirne i vari aspetti e possibilmente a trovarne una soluzione. Si spera inoltre di soddisfare i dubbi del curioso e di aiutare le persone che lavorano in ambito tecnico e che utilizzano sistemi ottici ad affrontare con coraggio i quesiti che questa splendida disciplina può porre loro.

1.2. La formazione delle immagini. Le lenti. L'occhio

Ogni corpo opaco ci è visibile in quanto diffonde parte della luce da cui viene illuminato. Gli oggetti luminosi, viceversa, emettono essi stessi radiazione visibile, a cui cioè è sensibile l'occhio umano, e possono essere visti anche se non sono illuminati. Grazie alla elevata estensione della dinamica dell'occhio, possiamo vedere in maniera distinta sia gli oggetti illuminati, sia le sorgenti che li illuminano; anzi, molto spesso l'intensità di queste ultime è tale che risulta fastidioso guardarle direttamente.

Vediamo ora di comprendere che cosa accade nella figura 1.1.

Un qualsiasi punto della fiamma della candela irradia potenza luminosa propria; un punto dello stelo della candela diffonde, riflettendola, parte della radiazione che lo illumina provenendo dal sole, da una lampada o dalla fiamma stessa. Se il mezzo in cui questi oggetti sono immersi è omogeneo, come nel caso dell'aria, grazie alla simmetria sferica del fenomeno, la luce si propaga secondo direzioni radiali, per



fronti d'onda sferici; il centro di ciascuna sfera è occupato da quello che viene chiamato *punto oggetto*. Anziché i fronti d'onda, spesso si utilizzano delle semirette o segmenti detti *raggi* per rendere più facilmente l'idea del percorso effettuato dalla luce ed individuarne le direzioni di propagazione, immaginando che sia fisicamente possibile isolare un infinitesimo di fronte d'onda per studiarne il cammino ed il comportamento.

Se di fronte alla candela posizioniamo una lente biconvessa, questa sarà investita da una porzione della radiazione emessa dalla candela: quella compresa nell'angolo solido che la lente sottende.

Il materiale di cui è costituita la lente è tale per cui la luce che la attraversa viaggia ad una velocità minore rispetto a quella che aveva nell'aria o che avrebbe avuto nel vuoto. Il rapporto tra la *velocità della luce nel vuoto* c e quella nel materiale v è detto *indice di rifrazione* del materiale, e si indica con n . Nonostante il percorso dei raggi che colpiscono la lente nella zona marginale sia più lungo, questi riescono in un certo senso a "sorpassare" quelli che la colpiscono nella zona centrale, proprio in virtù della diversa velocità nel materiale.

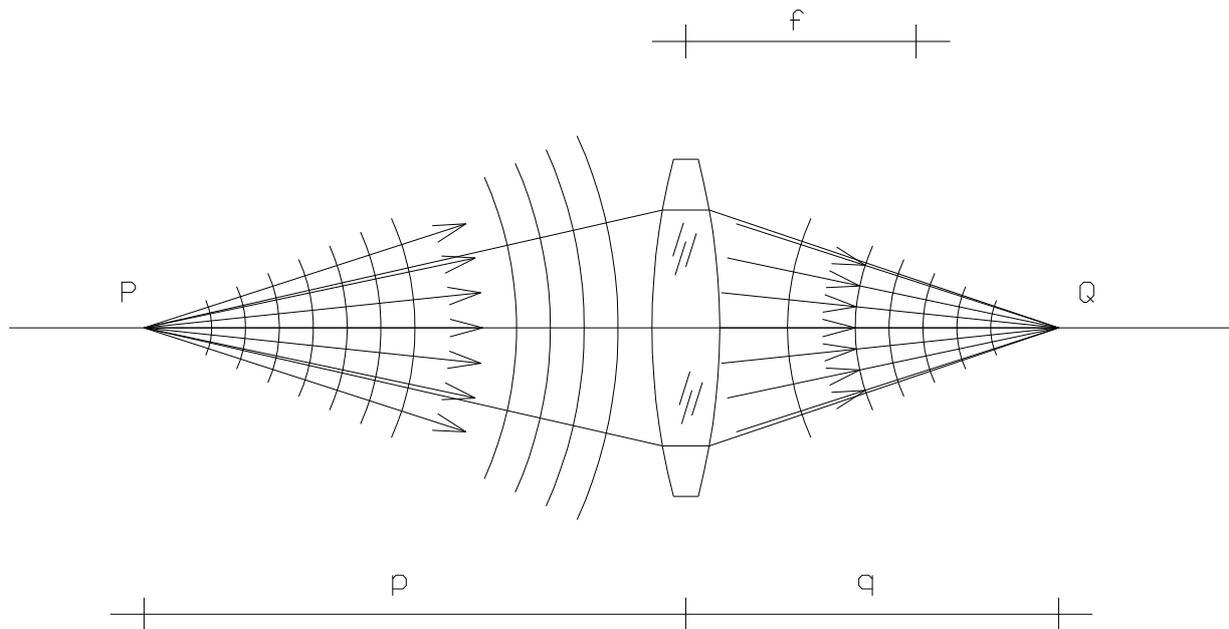


figura 1.2

Pertanto il fronte d'onda sferico convesso divergente che investe la lente, provenendo da un *punto oggetto* P posto ad esempio sull'asse di simmetria, viene trasformato in un fronte d'onda che per il momento supponiamo concavo e anch'esso sferico. Questo, propagandosi, tenderà a convergere, ossia a *focalizzare*, verso un corrispondente *punto immagine* Q (il centro della sfera concava), in cui perciò si concentrerà la parte di energia irradiata dal punto di partenza che ha attraversato la lente (si veda la figura 1.2).

Un fenomeno analogo avviene se il fronte d'onda colpisce uno specchio concavo (si veda la figura 1.3). Vedremo tra breve come entrambi questi fenomeni siano regolati dalle Leggi di Snell.

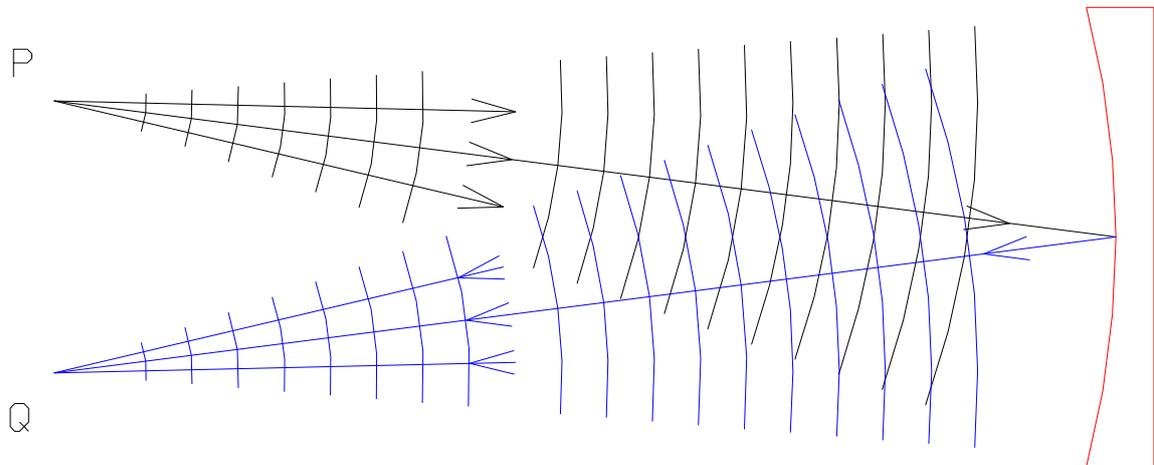
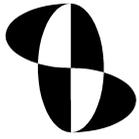


figura 1.3

Sia nel caso della lente biconvessa, sia nel caso dello specchio concavo, se il fronte d'onda di uscita concavo fosse perfettamente sferico convergerebbe in un punto dando luogo ad una immagine anche essa puntiforme. In realtà questo non può accadere per diversi motivi. In primo luogo la diffrazione distorce il bordo del fronte d'onda e la luce che investe le zone periferiche della lente o dello specchio prenderà direzioni diverse non convergenti verso lo stesso punto. In secondo luogo la presenza di aberrazioni, di cui nelle prossime pagine vedremo il significato, fa sì che i fronti d'onda uscenti da quelli che possiamo ormai chiamare *sistemi ottici* siano delle sfere distorte. Come ultimo motivo occorre considerare la presenza di imperfezioni e disomogeneità, sia pur lievissime, sulle superfici e nel materiale delle lenti.

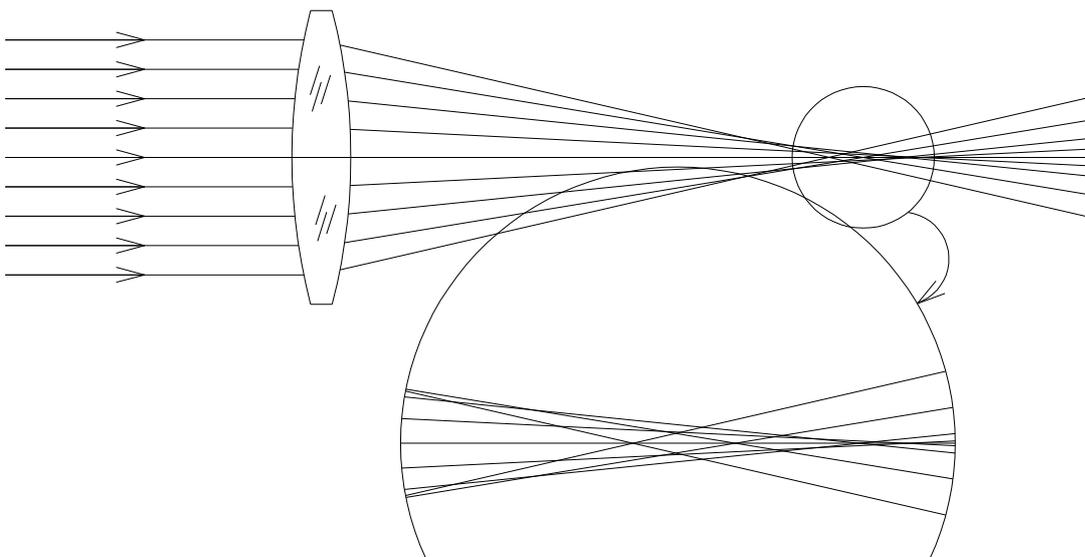
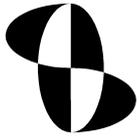


figura 1.4



Pertanto il fronte d'onda di uscita dalla lente o riflesso dallo specchio ha perso la forma sferica e se ne discosta in maniera più o meno accentuata, e quindi l'energia si distribuisce in un volume più o meno piccolo, anziché in un punto matematico: il fronte d'onda non va a fuoco in un punto, ma nella zona del fuoco dà luogo ad una caustica (figura 1.4).

Da un altro punto dello *spazio oggetto* vicino al precedente verrà emesso un fronte d'onda di diversa intensità (in funzione della sua intensità luminosa) che la lente focalizzerà in un altro punto dello *spazio immagine*, in cui perciò sarà concentrata una diversa quantità di energia (figura 1.5). In questo modo si ottiene una modulazione spaziale di intensità di energia luminosa (*immagine*) che ha una relazione geometrica con la sorgente (*oggetto*) da cui ha avuto origine.

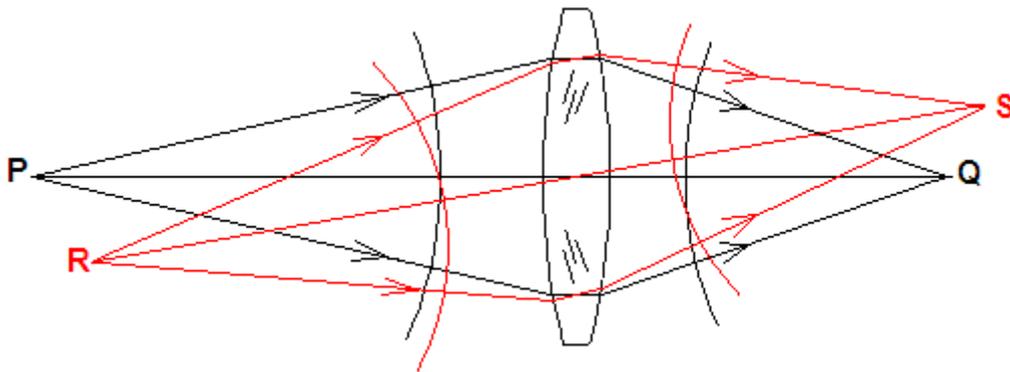


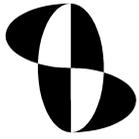
figura 1.5

Ma che cosa significa questo e come si fa a raccogliere l'immagine? E' sospesa? Dove dobbiamo metterci per vederla? I fronti d'onda si riallargano subito dopo così come sono collassati?

Un primo sistema per vedere correttamente l'immagine consiste nel mettere uno schermo chiaro diffondente ove questa si forma; se lo schermo è opaco, come ad esempio un cartoncino, la visione è consentita solo dalla parte da cui arrivano i fronti d'onda; se è traslucido, come un foglio di carta sottile, si riesce a vedere più comodamente dalla parte opposta. Questo accade perché ciascun punto dello schermo illuminato dall'immagine che vi si sta formando diffonde la luce che lo colpisce dando modo ai nostri occhi di vederlo in modo appropriato.

Strumenti come la macchina fotografica o la telecamera sono concepiti in questo semplice modo: al posto dello schermo viene posto un elemento fotosensibile come una pellicola o una CCD.

Un occhio umano sano vede correttamente oggetti posti ad una distanza che varia dall'infinito a pochi decimetri; al di sotto di questo valore l'accomodamento visivo operato dai tessuti sollecitati del muscolo ciliare normalmente non ci consente di vedere a fuoco. L'occhio si può assimilare perciò ad un sistema ottico in grado di focalizzare sulla retina (il suo schermo fotosensibile) fronti d'onda che abbiano un raggio di curvatura convesso minimo di circa duecento millimetri.



Questa è una prima condizione per la corretta visione di un'immagine. Un secondo punto che può sembrare banale, ma che spesso condiziona fortemente il progetto di un sistema ottico, consiste nel fatto che almeno una parte del fronte d'onda, o se si preferisce dei raggi, proveniente da tutti i punti dell'immagine deve effettivamente passare attraverso l'occhio, affinché questo la possa vedere tutta intera. Proprio per questo motivo, per il fatto cioè che tracciando fisicamente i raggi questi non intercettano la pupilla, se cercassimo di posizionare l'occhio lungo il percorso dei raggi, a distanza tale da consentirci una messa a fuoco adeguata, probabilmente riusciremmo a vedere solo una parte dell'immagine alla volta. Nel caso di strumenti a visione diretta (telescopi, cannocchiali, microscopi, binocoli) questo problema si risolve mediante un appropriato posizionamento di quelle che verranno chiamate le *pupille*, come vedremo in seguito.

L'occhio umano, di cui nella figura 1.6 è riportato una vista in sezione, è uno strumento ottico in grado di focalizzare sulla retina i raggi paralleli che entrano attraverso la pupilla. In esso sono presenti diversi elementi in grado di deviare i raggi di luce, cioè dotati di *potenza ottica*.

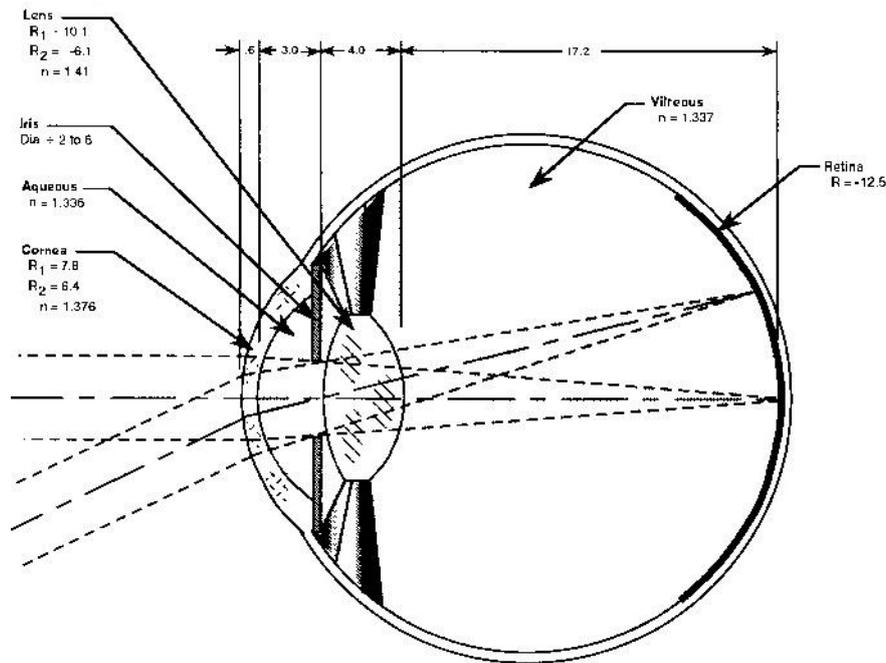


figura 1.6

Avvicinando l'oggetto alla lente, l'immagine se ne allontanerà e risulterà più grande. La conoscenza delle nozioni di ottica consente di prevedere il comportamento dei sistemi ottici, quindi di progettare quello che ha le caratteristiche più adatte all'impiego in base ai requisiti che, solo per citarne alcuni, possono riguardare le dimensioni dell'immagine, la sua posizione, la luminosità, la qualità, le caratteristiche ambientali che dovrà sopportare, il numero di esemplari in cui sarà prodotto, il costo.

Volendo prevedere con sufficiente precisione il comportamento di un sistema ottico, per quanto semplice possa essere, occorre considerare alcune grandezze ed accordarsi sulle loro definizioni. Alcune di queste definizioni risultano più immediate se si fa ricorso a delle semplificazioni ed approssimazioni che ricorreranno frequentemente e che consentono una più semplice intesa.

In alcuni casi, specialmente quando si considera un sistema in una prima approssimazione, converrà ad esempio trascurare lo spessore delle lenti (*lenti sottili*) ottenendo delle notevoli semplificazioni su alcune grandezze caratteristiche.

1.3. Leggi di Snell

Quando un fascio di luce colpisce la superficie di interfaccia tra due mezzi omogenei a diverso indice di rifrazione, parte della radiazione è riflessa verso il primo mezzo, parte si propaga nel secondo. Se consideriamo la normale al punto di intersezione di un raggio rispetto alla superficie di interfaccia, il raggio incidente e quello riflesso apparterranno allo stesso semispazio limitato dalla superficie di interfaccia, saranno complanari con la normale e formeranno con questa due angoli uguali e simmetrici (*prima legge di Snell* o della *riflessione*). Il raggio che attraversa la superficie di interfaccia risulta deviato, ovvero rifratto: è complanare con gli altri raggi, appartiene all'altro semispazio e forma con normale un angolo r che sta all'angolo di incidenza i nella seguente relazione (*seconda legge di Snell* o della *rifrazione*):

$$n_1 \cdot \sin i = n_2 \cdot \sin r \quad (1.1)$$

ove n_1 ed n_2 sono gli indici di rifrazione dei due mezzi, ossia, come detto, i rapporti tra la velocità della luce nel vuoto e nel mezzo cui si riferiscono. In figura 1.7 è mostrato il piano di incidenza, cioè quello definito dal raggio incidente e dalla normale alla superficie e a cui appartengono anche il raggio riflesso e quello rifratto.

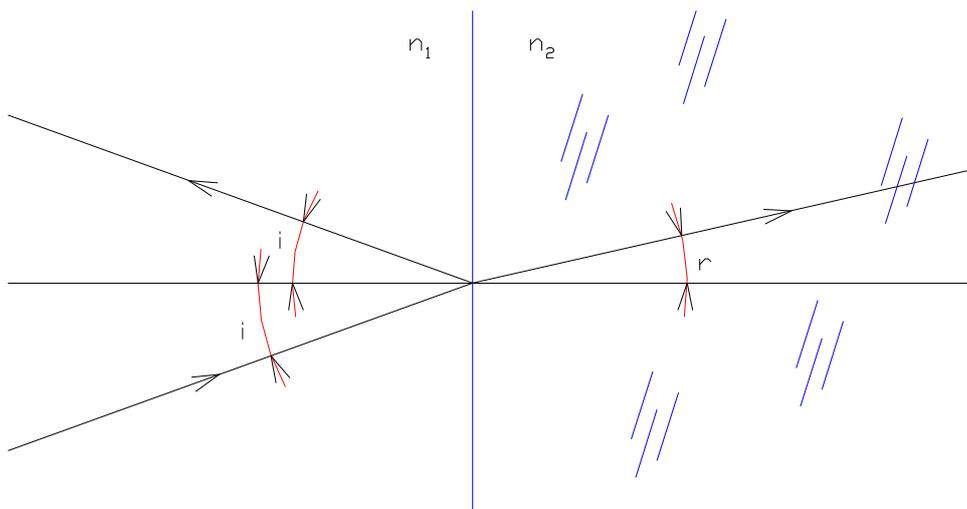
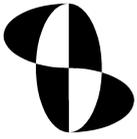


figura 1.7

Gli indici di rifrazione sono una caratteristica del mezzo, ma dipendono anche dalla lunghezza d'onda della radiazione. Pertanto una radiazione policromatica rifratta



subirà deviazioni diverse a seconda della lunghezza d'onda e verrà scomposta nelle sue componenti spettrali.

Questo fenomeno, che prende il nome di *dispersione*, si utilizzava in spettrometria prima dell'avvento dei reticoli di diffrazione, che danno deviazioni maggiormente differenziate, facendo passare la radiazione attraverso un prisma per ottenere lo spettro di radiazione e stabilire, ad esempio, i gas costituenti una stella. Nel caso dei sistemi ottici invece è molto dannoso in quanto può costituire uno dei difetti principali e compito della progettazione ottica è quello di limitare il fenomeno della dispersione mediante compensazione.

La dispersione di un materiale generalmente si considera come *indice di dispersione* v , definito come:

$$v = (n_D - 1) / (n_F - n_C) \quad (1.2)$$

ove D, F e C indicano le lunghezze d'onda corrispondenti ad alcune righe di emissione di gas: la linea D del sodio (589.3nm) e le righe F e C dell'idrogeno (486.1nm e 656.3nm) ed n_D , n_F ed n_C i relativi indici di rifrazione. Occorre notare che in base a questa definizione una maggiore variazione dell'indice di rifrazione con la lunghezza d'onda corrisponde ad un valore minore dell'indice v . Per i vetri *crown*, quelli cioè a bassa dispersione, v vale grosso modo da 65 a 50, per i *flint*, a dispersione più alta, da 40 a 25.

1.4. Sistemi ottici approssimati. Lenti sottili. Calcolo Parassiale

Le lenti sono costituite da un mezzo ad indice di rifrazione maggiore di 1 e da due superfici attive in cui avviene la rifrazione. Le superfici delle lenti e degli specchi che costituiscono i sistemi ottici sono quasi esclusivamente di forma sferica o piana. Ciò è motivato dal fatto che queste superfici geometriche si possono generare con ottima precisione e maniera relativamente economica. Solo negli ultimi anni si sono iniziati a diffondere componenti le cui superfici hanno forma diversa, asferica; questi fino a pochi anni fa venivano utilizzati solo per applicazioni particolari e costose.

Nella quasi totalità dei casi il materiale costituente la lente è isotropo e la trasformazione dei fronti d'onda, ovvero la deviazione dei raggi, è dovuta alla forma delle due superfici su cui avvengono le rifrazioni. Esistono tuttavia altri principi fisici di cui si parlerà più avanti in base ai quali si possono trasformare fronti d'onda. Le lenti a gradiente di indice di rifrazione, ad esempio, sono costituite da due superfici piane che separano un mezzo reso otticamente anisotropo, in cui in particolare varia spazialmente l'indice di rifrazione, allo scopo di deformare il fronte d'onda che lo attraversa; negli elementi ottici olografici la trasformazione avviene per diffrazione.

Tratteremo per ora le lenti sferiche utilizzando l'*approssimazione delle lenti sottili*, il cui spessore cioè è trascurabile rispetto alle altre dimensioni e per questo verrà posto pari a zero. Questa semplificazione è molto comoda in quanto permette di calcolare in una prima approssimazione ingrandimenti, distanze focali e posizioni di immagini senza dover ricorrere a operazioni complesse, ma potendo semplificare alcuni calcoli. Ad esempio un raggio che incide al centro di una lente sottile non viene deviato, e quindi il tracciamento dei raggi attraverso il centro della lente si può effettuare senza dover calcolare due rifrazioni.



Una diversa approssimazione che si usa spesso è quella di utilizzare il *calcolo parassiale* detto anche *gaussiano* o al *primo ordine*. Per tracciare esattamente il percorso dei singoli raggi attraverso un sistema ottico, occorre calcolare l'angolo di incidenza, applicare la seconda legge di Snell considerando per ogni raggio i seni per trovare l'angolo di rifrazione e quindi tracciare un segmento sino all'intersezione con la successiva superficie di separazione tra due mezzi. Il calcolo parassiale consente di semplificare e velocizzare notevolmente questa sequenza, considerando il seno dell'angolo pari all'angolo stesso. Infatti se si sviluppa in serie di Taylor la funzione seno, si trova:

$$\sin x = x - x^3/3! + x^5/5! - x^7/7! + x^9/9! - \dots \quad (1.3)$$

Per piccoli angoli, questa espressione può essere approssimata da $\sin x = x$. Ad esempio nel caso di 5° l'errore è di circa 0.1%.

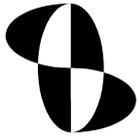
Il motivo per cui è possibile applicare queste semplificazioni è che se considerassimo il nostro sistema ottico con apertura infinitesima (si pensi ad un obiettivo fotografico col diaframma ridotto al minimo), tale approssimazione sarebbe consentita in quanto gli angoli sarebbero effettivamente piccoli e si potrebbero effettuare i tracciamenti con questa semplificazione senza incorrere in errori significativi. L'accresciuta apertura del sistema reale comporta l'utilizzo di un angolo solido più ampio ed un maggiore apporto energetico all'immagine che risulterà più intensa. Lo scostamento sull'immagine tra i raggi vicini all'asse ottico e quelli relativi ai nuovi contributi energetici produce una macchia anziché un punto e dà luogo alle aberrazioni, che pertanto si possono considerare come errori generati dalla presenza dei termini successivi dello sviluppo di Taylor.

Una approssimazione sicuramente più accurata è quella del *terzo ordine* che prevede di comprendere nei calcoli il termine $x^3/3!$, troncando termini successivi. Il miglioramento della precisione è notevole in quanto i singoli addendi dello sviluppo di Taylor del seno decrescono molto velocemente. Questa teoria è stata adottata nell'era pre-informatica in quanto rappresentava un adeguato compromesso tra accuratezza e velocità di calcolo. Le aberrazioni, così come ancora oggi sono intese dalla comunità dei progettisti ottici, fanno riferimento a questa approssimazione.

1.5 Definizioni fondamentali. Formule fondamentali

Definiamo *asse ottico* di una lente la retta che congiunge i centri di curvatura delle due sfere a cui appartengono le superfici rifrattive. Abbiamo detto che se l'oggetto si avvicina alla lente, l'immagine se ne allontana e si ingrandisce e viceversa. Il punto in cui si forma l'immagine di un oggetto puntiforme posto sull'asse ottico a distanza infinita è detto *fuoco* della lente e il piano normale all'asse ottico passante per il fuoco è il *piano focale*. La distanza tra la lente sottile ed il suo fuoco è detta *distanza focale*.

Per una lente sottile i cui raggi di curvatura delle superfici sono r_1 ed r_2 , ovvero le cui curvature sono $c_1=1/r_1$ e $c_2=1/r_2$, costituita di un materiali il cui indice di rifrazione ad una data lunghezza d'onda vale n , la distanza focale f è:



$$1/f = (n-1)(c_1 + c_2) = (n-1)(1/r_1 + 1/r_2) = \Phi \quad (1.5)$$

i raggi di curvatura si intendono positivi se danno luogo a superfici convesse; se risulta $f > 0$ la lente è *positiva* o *convergente*, in quanto tende a far convergere un fascio di luce, se è $f < 0$ la lente è *negativa* o *divergente*. Le lenti possono anche avere una superficie concava ed una convessa (*menischi*): in tal caso sono positive se lo spessore al centro è maggiore che al bordo e viceversa. Dalla definizione si vede come la distanza focale non dipende dalla direzione di propagazione della luce, ed è la stessa se si rovescia la lente.

Il reciproco della distanza focale Φ è detta *potenza della lente*; se la distanza focale viene espressa in metri, la potenza si misura in m^{-1} o *diottrie*.

Anche per lenti spesse o per sistemi ottici complessi si definisce una distanza focale. In generale questa non è pari ad alcuna distanza fisica, ma equivale alla distanza focale della lente sottile che darebbe la stessa convergenza. La distanza focale di un sistema complesso si può ottenere trovando i punti di intersezione dei raggi non deflessi provenienti da un oggetto sull'asse ottico a distanza infinita con i prolungamenti degli stessi raggi dopo che hanno subito tutte le rifrazioni e le eventuali riflessioni all'interno del sistema ottico (figura 1.8). Infatti il sistema ottico, considerato come una scatola nera, equivale ad una lente sottile il cui effetto è quello di far convergere i raggi con la stessa potenza. Il luogo delle intersezioni tra i raggi non deflessi e quelli lasciano il sistema ottico si dice *piano principale* e la distanza tra questo piano ed il piano focale è pari alla distanza focale.

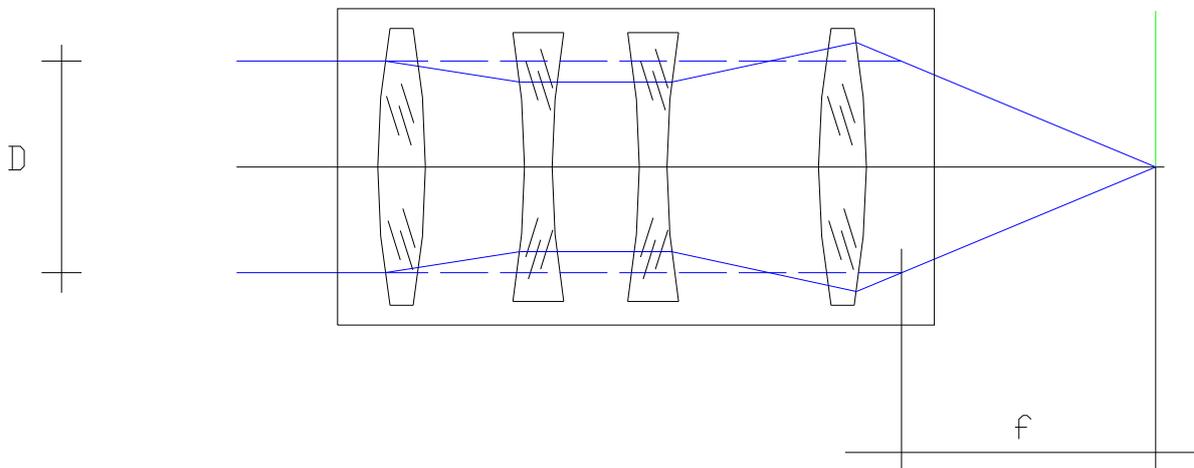
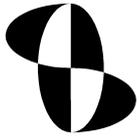


figura 1.8

Cambiando il verso del cammino della luce, se lo spazio oggetto e lo spazio immagine sono immersi nello stesso mezzo (ad esempio aria) si ottiene la stessa distanza focale. I due piani principali si diranno *anteriore* e *posteriore*. Per una lente sottile tra la distanza p tra un oggetto posto sull'asse ottico e lente e la distanza q tra la sua immagine e la lente vale la relazione:



$$1/f = 1/p + 1/q \quad (1.6)$$

I punti P e Q si dicono *coniugati*: se P è l'oggetto Q ne è l'immagine. Se Q fosse l'oggetto, effettuando il tracciamento in senso inverso si troverebbe che P ne sarebbe l'immagine. Il semispazio che precede il sistema ottico è detto *spazio oggetto*, quello che succede al sistema ottico è detto *spazio immagine*.

Dalla 1.6 si osserva che quando p tende all'infinito, cioè se l'oggetto si allontana, q tende ad assumere il valore di f e la sua immagine a formarsi sul fuoco.

L'immagine di un punto a distanza infinita che si trova al di fuori dell'asse ottico di un angolo α si forma sul piano focale ad una distanza h (si veda la figura 1.9) data da:

$$h = f \cdot \tan \alpha \quad (1.7)$$

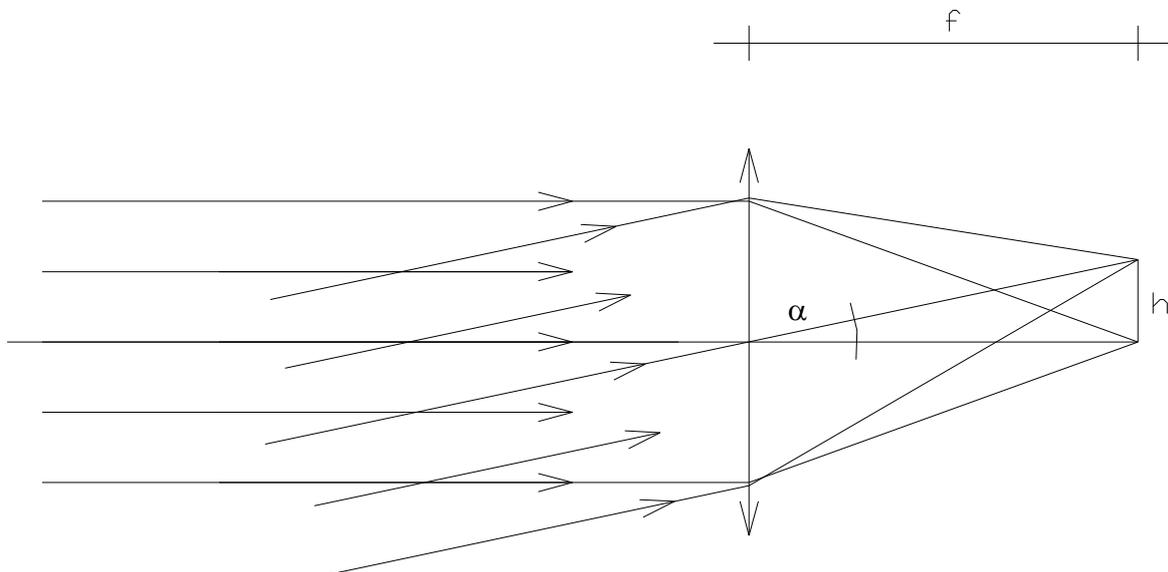
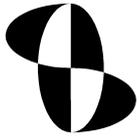


figura 1.9

L'immagine di un punto sull'asse ottico distante p dalla lente di focale f e h_o dall'asse ottico si forma alla distanza q calcolata sopra lungo l'asse ottico e ad una distanza h_i dall'asse ottico. Questa si può trovare graficamente, nelle approssimazioni fatte, tracciando dal punto oggetto alcuni raggi. Ad esempio il raggio parallelo all'asse ottico passa per il fuoco posteriore del sistema ottico; oppure il raggio che attraversa il centro della lente non viene deviato; quello che passa per il fuoco anteriore emerge parallelo all'asse ottico.

Si definisce *ingrandimento trasversale* o *laterale* M il rapporto tra le dimensioni di h_i e h_o . Dalla similitudine dei triangoli di figura 1.10 si vede immediatamente che l'ingrandimento trasversale è pari anche al rapporto tra distanze q e p:

$$M = h_i / h_o = q / p \quad (1.8)$$



OPTO SERVICE srl

Dalla 1.6 e dalla 1.8 deriva che l'ingrandimento unitario per una lente sottile ($M=1$) si ottiene nella condizione:

$$p = q = 2 \cdot f \quad (1.9)$$

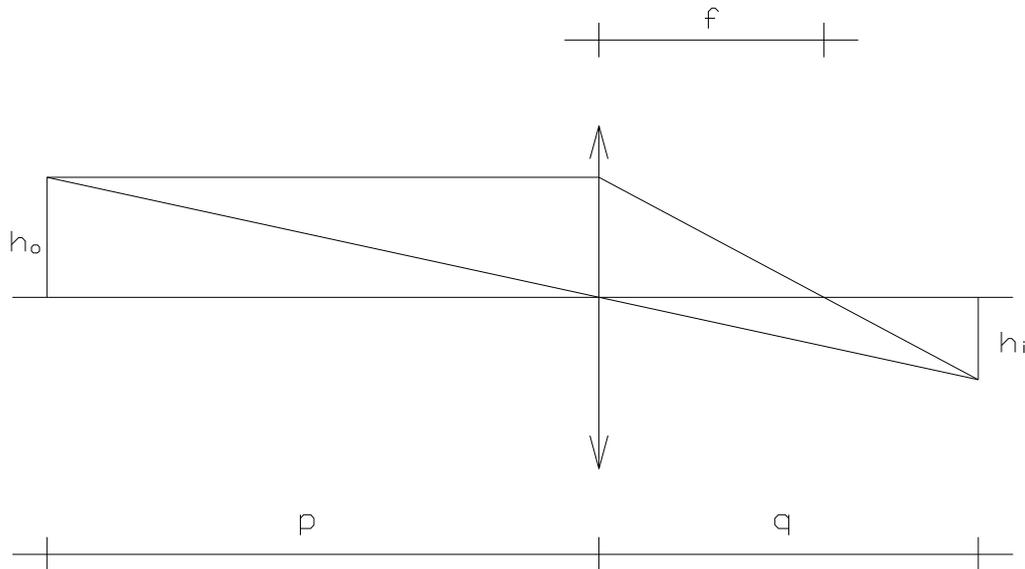


figura 1.10

Nelle precedenti definizioni non abbiamo tenuto in alcun conto le dimensioni della lente, mentre nei primi paragrafi si era detto come il processo di formazione di immagine fosse una forma di trasferimento di energia. La luce proveniente da un oggetto e utilizzabile per la formazione della sua immagine attraverso un sistema ottico ha in realtà due elementi di limitazione.

Il primo è detto il *diaframma di apertura* o *apertura* e costituisce un limite quantitativo energetico alla porzione di fronte d'onda utilizzato. Si pensi ad esempio alla luce che ci arriva da un oggetto a grande distanza come una stella: l'apertura di un telescopio seleziona la parte del fronte d'onda che il telescopio sfrutta per formare l'immagine della stella. In ogni sistema ottico c'è un elemento che limita la porzione di energia utilizzata.

Il secondo elemento di limitazione è il *diaframma di campo* e costituisce un limite al campo angolare (detto *campo di vista*) di cui il sistema ottico forma l'immagine. In una macchina fotografica, ad esempio, il diaframma di apertura è l'iride, mentre il diaframma di campo è costituita dalla cornice che limita la zona di pellicola esposta.

Si dice *pupilla di ingresso* di un sistema ottico l'immagine che la parte di sistema ottico che precede il diaframma di apertura fa del diaframma stesso. Se il diaframma di apertura è esterno alla prima lente o se coincide con essa, il diaframma di apertura è anche la pupilla di ingresso del sistema. Analogamente la *pupilla di uscita* di un sistema ottico è l'immagine del diaframma di apertura fatta dai componenti che seguono il diaframma di apertura se questo precede qualche componente, o altrimenti coincide con esso.

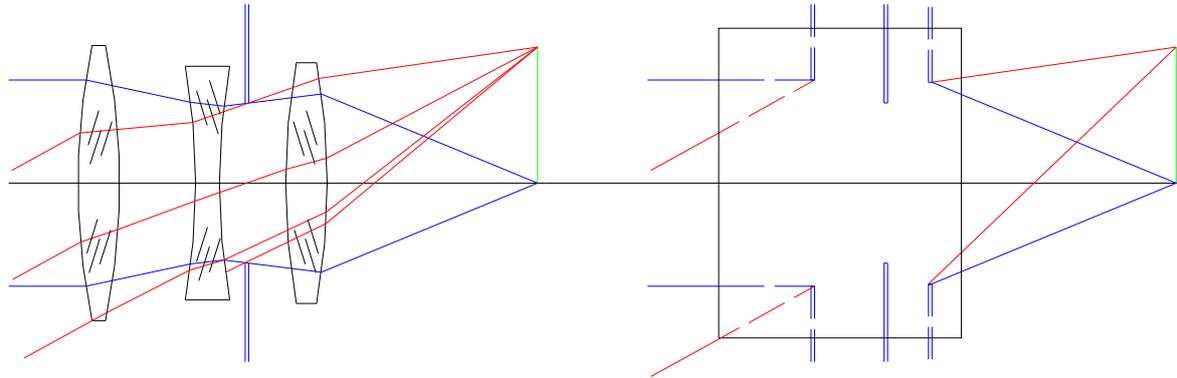
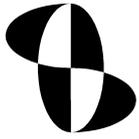


figura 1.11

La figura 1.11 mostra a sinistra un tracciamento attraverso un sistema ottico e a destra l'effetto dello stesso sistema visto come una scatola nera.

In questo modo si osservano solo gli effetti del sistema ottico, cioè le trasformazioni dei fronti d'onda, ovvero le rifrazioni dei raggi, e le posizioni e le dimensioni delle pupille di ingresso e di uscita. In questo caso particolare, nella figura di sinistra si vede anche come parte della luce esterna sia "vignettata" dalla limitata estensione della prima lente.

Per ogni direzione nello spazio oggetto, si definisce *raggio principale* quello che passa al centro della pupilla di ingresso; dato che questa è il coniugato del diaframma di apertura e della pupilla di uscita, il raggio principale passerà anche attraverso il centro di questi. Se un sistema ottico è dotato di un *diaframma ad iride*, cioè ad apertura variabile, il raggio principale concorre alla formazione dell'immagine anche se l'iride è alla minima apertura e costituisce un importante riferimento nella definizione delle aberrazioni dei sistemi ottici.

I *raggi marginali* sono quelli che passano ai margini della pupilla di ingresso, e quindi anche del diaframma di apertura e della pupilla di uscita.

Per un sistema ottico si definisce *f#* (*effe-numero* o *f number*) il rapporto tra la focale e l'apertura.

$$f\# = f / D \quad (1.10)$$

In qualche caso si preferisce parlare di apertura numerica (NA), definita come rapporto tra la semiapertura e la focale.

$$NA = (D/2)/f = D/2 * f = 1/(2 * f\#) \quad (1.11)$$