



# ABERRAZIONI OTTICHE

## Sommario

Prestazioni ottiche .....	2
Diffrazione .....	2
Natura delle aberrazioni delle lenti .....	2
Aberrazione sferica .....	5
Astigmatismo .....	10
Coma .....	12
Curvatura di campo .....	13
Distorsione .....	15
Aberrazione cromatica .....	18
Doppietti acromatici .....	25

## Prestazioni ottiche

---

Le prestazioni dei sistemi ottici reali sono limitate da vari fattori, comprese le aberrazioni ottiche e la diffrazione. L'entità di questi effetti è calcolabile con relativa facilità.

Numerosi altri fattori, quali le tolleranze di lavorazione delle lenti e di allineamento dei componenti, influenzano le prestazioni dei sistemi ottici. Sebbene questi fattori non siano presi esplicitamente in considerazione nella trattazione che segue, occorre comunque rammentarsi che un sistema di lenti, teoricamente in grado di raggiungere i criteri prestazionali desiderati, potrebbe risentirne negativamente gli effetti. Nelle applicazioni critiche, è preferibile selezionare lenti con prestazioni teoriche significativamente superiori a quelle necessarie.

## Diffrazione

---

La diffrazione, una proprietà intrinseca della luce derivante dalla sua natura ondulatoria, rappresenta un limite fondamentale di qualsiasi sistema ottico. Pur essendo sempre presente, i suoi effetti possono venire mascherati dalle aberrazioni presenti in misura non trascurabile. Un sistema ottico praticamente esente da aberrazioni è caratterizzato da prestazioni penalizzate esclusivamente dalla diffrazione ed è indicato come **limitato dalla diffrazione**.

Per il calcolo della diffrazione, è sufficiente conoscere le lunghezze focali ed i diametri, tralasciando così altri fattori come la forma o l'indice di rifrazione delle lenti.

Poiché al chiudersi del diaframma la diffrazione aumenta mentre le aberrazioni diminuiscono, le prestazioni ottimali del sistema sono sovente vincolate dalla determinazione della combinazione di questi fattori che presenta il minimo effetto.

## Natura delle aberrazioni delle lenti

---

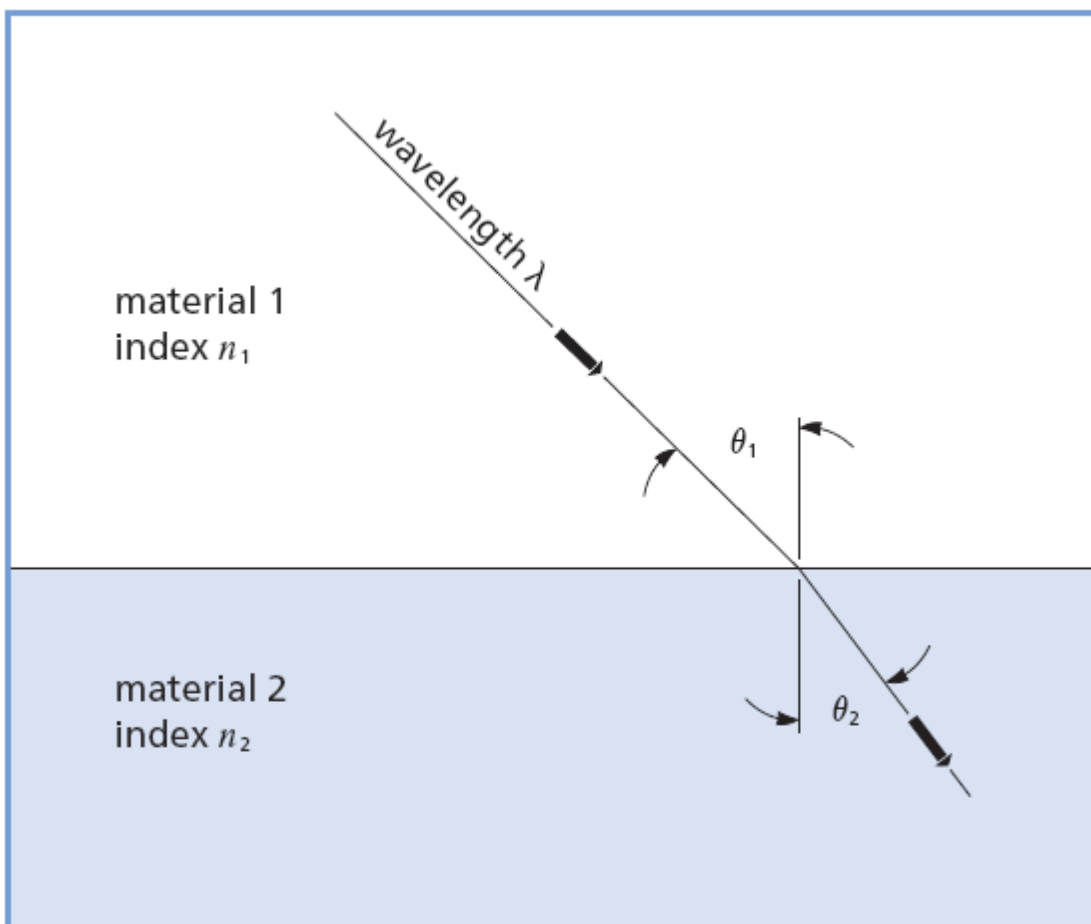
Per determinare con precisione le prestazioni di un sistema di lenti, si può tracciare il percorso dei raggi luminosi che lo attraversano, servendosi della legge di Snell per individuare la nuova direzione impartita da ciascuna

superficie di rifrazione. Questa elaborazione, denominata **ray-tracing (tracciamento dei raggi)**, è affidata ai computer. Al termine del processo, si riscontra tipicamente che non tutti i raggi passano per i punti o le posizioni previsti dalla teoria parassiale. **Le deviazioni dall'immagine ideale costituiscono le aberrazioni delle lenti.**

La direzione di un raggio luminoso dopo la rifrazione all'interfaccia tra due mezzi omogenei ed isotropi ma con diverso indice di rifrazione è data dalla **legge di Snell**:

$$n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$$

dove:  $\theta_1$  = angolo di incidenza, rispetto alla normale alla superficie;  
 $\theta_2$  = angolo di rifrazione, rispetto alla normale alla superficie.



Sebbene siano disponibili strumenti di semplice uso ed elevata precisione per l'analisi dei sistemi ottici, è ancora utile servirsi di metodi per la rapida valutazione delle prestazioni delle lenti. Risulta così possibile non solo risparmiare tempo nelle fasi iniziali di definizione delle caratteristiche del

sistema ottico, ma anche avere un punto di partenza idoneo per la successiva ottimizzazione al computer.

Il primo passo consiste nello sviluppo delle funzioni "seno" presenti nella legge di Snell in una serie infinita di Taylor:

$$\sin \theta_1 = \theta_1 - \frac{\theta_1^3}{3!} + \frac{\theta_1^5}{5!} - \frac{\theta_1^7}{7!} + \frac{\theta_1^9}{9!} - \dots$$

In prima approssimazione, si possono sostituire tutte le funzioni "seno" con i loro argomenti (cioè sostituire  $\sin \theta_1$  con  $\theta_1$  e così via): è la cosiddetta **teoria del primo ordine o parassiale**, in quanto si usano solo i primi termini delle espansioni del seno. Il progetto dei sistemi ottici inizia da questa approssimazione servendosi delle formule parassiali.

L'assunzione che  $\sin \theta = \theta$  è ragionevolmente valida per  $\theta$  prossimo a zero (cioè per lenti con  $f/N$  alto). All'aumentare della curvatura delle superfici di rifrazione (e della marginalità dei raggi) la teoria parassiale comporta deviazioni crescenti dal comportamento reale essendo  $\sin \theta \neq \theta$ . Queste deviazioni non sono altro che le aberrazioni. Poiché un sistema ottico perfetto (privo di aberrazioni) formerebbe un'immagine con posizione e dimensioni conformi a quelle calcolate con la teoria parassiale, le aberrazioni rappresentano realmente una misura dello scostamento dell'immagine dalla previsione parassiale.

Come già detto, il ray tracing è l'unico modo rigoroso di analizzare le superfici delle lenti reali, ma i suoi calcoli risultano complessi, ripetitivi e noiosi se svolti manualmente (come nelle epoche precedenti l'avvento dei computer). Ludwig von Seidel risolse questo problema sviluppando un metodo di calcolo delle aberrazioni servendosi del termine  $\theta_1^3/3!$ . Le aberrazioni del terzo ordine sono quindi note come **aberrazioni di Seidel**.

Per semplificare questi calcoli, Seidel suddivise in categorie le aberrazioni dei sistemi ottici. In luce monocromatica, vi sono l'aberrazione sferica, l'astigmatismo, la curvatura di campo, la coma e la distorsione. In luce policromatica, si aggiungono l'aberrazione cromatica assiale ed extrassiale (colore laterale). Seidel mise a punto metodi di approssimazione per ciascuna aberrazione che limitavano il numero di raggi da tracciare usando tutti termini dello sviluppo del seno.

Per molti sistemi ottici, il termine di terzo ordine è tutto ciò che serve a quantificare le aberrazioni. Tuttavia, nei sistemi altamente corretti ed in quelli con ampia apertura o grande angolo di ripresa, la teoria del terzo

ordine è inadeguata. In questi casi, è imprescindibile tracciare l'esatto percorso dei raggi.

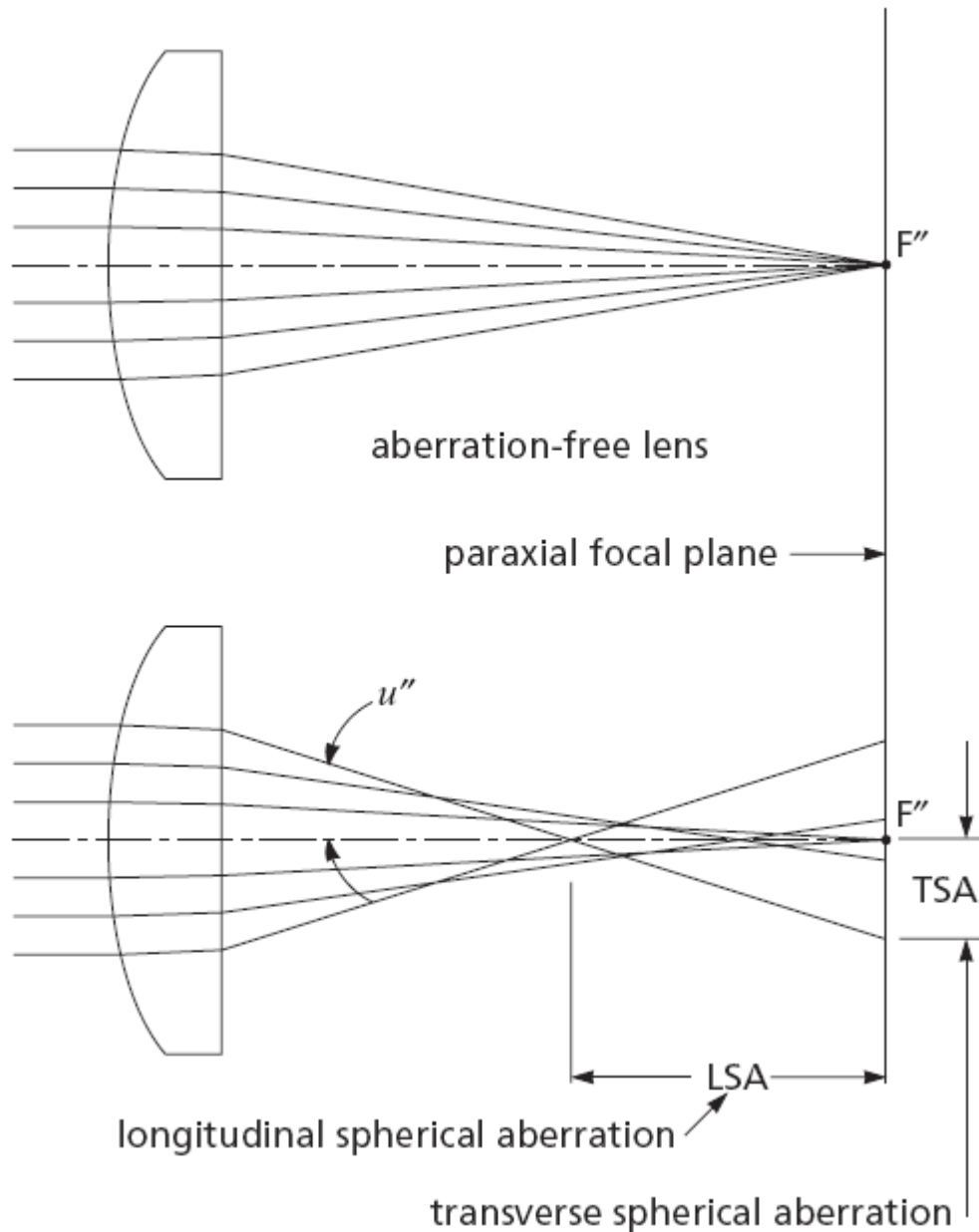
Nella realtà, le aberrazioni si manifestano in combinazioni piuttosto che singolarmente. Questo sistema di classificazione, che semplifica notevolmente l'analisi, fornisce una descrizione soddisfacente della qualità dell'immagine del sistema ottico. Di fatto, la formula di Seidel per l'aberrazione sferica è ancora ampiamente utilizzata nonostante siano ormai disponibili potenti software di ray-tracing.

## Aberrazione sferica

---

La prima figura illustra come una lente esente da aberrazioni focalizza la luce collimata in arrivo. Tutti i raggi si incrociano nel fuoco  $F''$ .

La seconda figura mostra la situazione tipica che si incontra con le lenti singole reali. All'aumentare della loro distanza dall'asse ottico, i raggi incidenti vengono focalizzati (incrociano l'asse ottico) sempre più vicino alla lente. L'intervallo lungo l'asse ottico tra il fuoco dei raggi più vicini all'asse ottico (raggi parassiali) e quello dei raggi più lontani (raggi marginali) rappresenta l'**aberrazione sferica longitudinale (Longitudinal Spherical Aberration, LSA)**. L'intervallo tra l'asse ottico ed il punto di intercettamento dei raggi marginali sul piano focale parassiale costituisce l'**aberrazione sferica trasversale (Transverse Spherical Aberration, TSA)**.



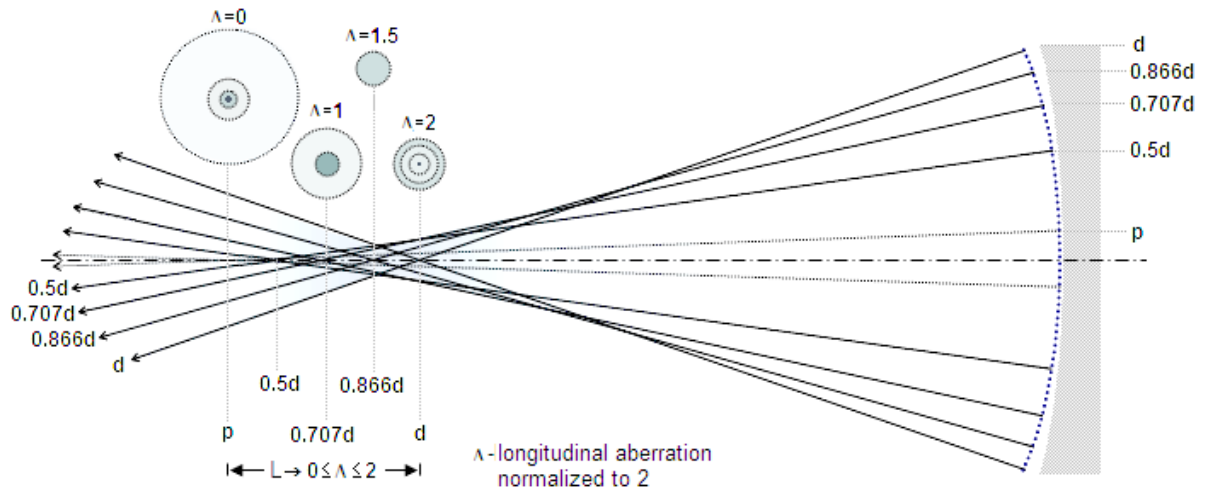
La correlazione tra queste quantità è la seguente:

$$TSA = LSA \cdot \tan u''$$

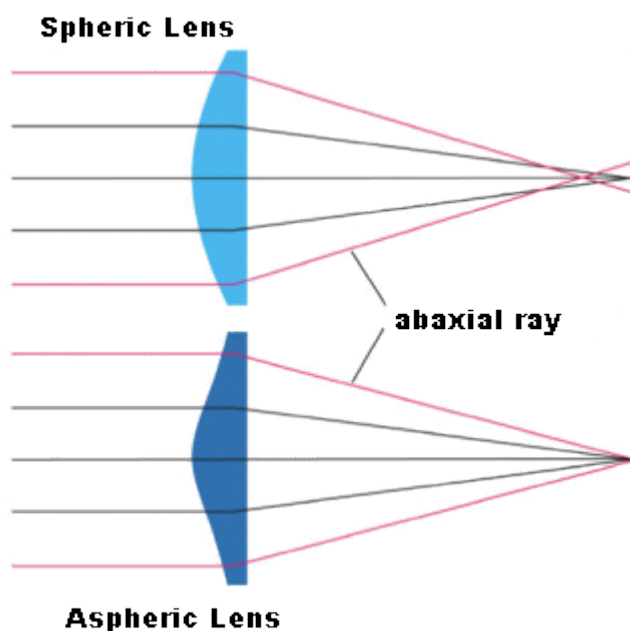
L'aberrazione sferica dipende dalla forma, dall'orientamento e dall'indice di rifrazione della lente e dal rapporto delle distanze coniugate. L'aberrazione sferica monocromatica del terzo ordine di una lente piano-convessa messa a fuoco all'infinito può essere calcolata mediante la seguente espressione:

$$D_{\text{punto}} = \frac{0,067f}{(f/N)^3}$$

L'aberrazione sferica non è tipica solo delle lenti sferiche, ma riguarda anche tutte le superfici sferiche che riflettono specularmente la luce, come evidenziato nella figura che segue.



Teoricamente, il modo più radicale per eliminare o comunque ridurre l'aberrazione sferica è di modellare le superfici della lente con raggi di curvatura variabili (**superfici asferiche**) al fine di compensare  $\sin \theta \neq \theta$  per gli angoli di incidenza più alti.



Nella pratica, la maggior parte delle lenti di alta precisione è lavorata mediante tecniche di molatura e levigatura che generano naturalmente superfici sferiche o cilindriche. La realizzazione di superfici asferiche è più complessa ed è difficile modellare lenti con un grado di accuratezza superficiale tale da eliminare completamente l'aberrazione sferica. Fortunatamente, è possibile eliminare di fatto questa aberrazione, per un dato insieme di condizioni, combinando gli effetti di due o più superfici sferiche (o cilindriche).

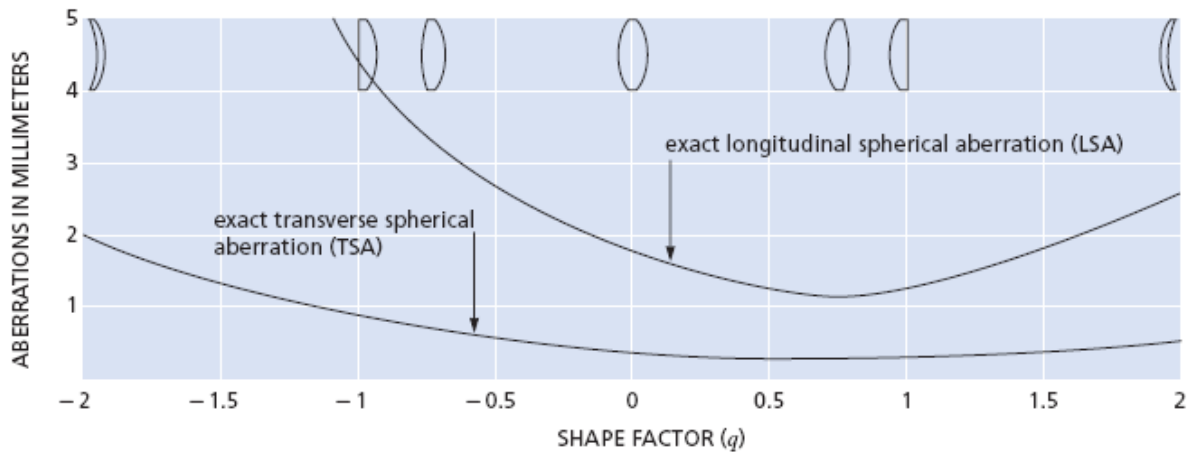
Per lenti semplici, la forma che minimizza l'aberrazione sferica per un dato rapporto delle distanze coniugate è la cosiddetta **forma migliore**. Il criterio per la scelta della forma migliore è che i raggi marginali siano egualmente rifratti su ambedue le superfici della lente, riducendo così al minimo l'effetto di  $\sin \theta \neq \theta$ . Questo criterio porta anche a minimizzare le perdite per riflessione sulle suddette superfici e la coma.

Per analizzare più approfonditamente la dipendenza delle aberrazioni dalla forma della lente, è utile servirsi del **fattore di forma  $q$** , così definito:

$$q = \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}$$

Il grafico seguente evidenzia l'andamento delle aberrazioni sferiche trasversale e longitudinale di una lente semplice in funzione del fattore di forma. Nell'esempio specifico, la lente ha una lunghezza focale di 100 mm, un'apertura relativa  $f/5$ , un indice di rifrazione di 1,518722 ed è messa a fuoco all'infinito. La forma migliore è quella asimmetrica corrispondente ad un valore di  $q$  pari a circa 0,7426. È importante notare che la forma migliore dipende dall'indice di rifrazione. Infatti, con materiali ad alto indice di rifrazione, la forma migliore diventa quella a menisco.





Nel caso di messa a fuoco all'infinito, la forma piano-convessa ( $q = 1$ ), con la superficie convessa rivolta verso la luce incidente, presenta una correzione quasi pari a quella della forma migliore. La lente piano-convessa ha il doppio vantaggio di un costo di produzione decisamente inferiore a quello della lente biconvessa asimmetrica di pari caratteristiche e di una coma quasi nulla.

In generale, l'aberrazione sferica presente nelle lenti semplici positive è sottocorretta, mentre quella delle lenti semplici negative è sovracorretta. Abbinando una lente positiva con vetro a basso indice di rifrazione ad una lente negativa con vetro ad alto indice di rifrazione, è possibile ottenere una combinazione dove le aberrazioni sferiche si annullano vicendevolmente.

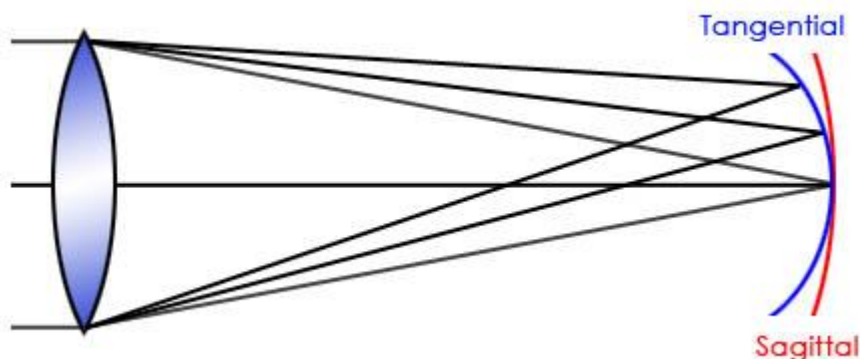
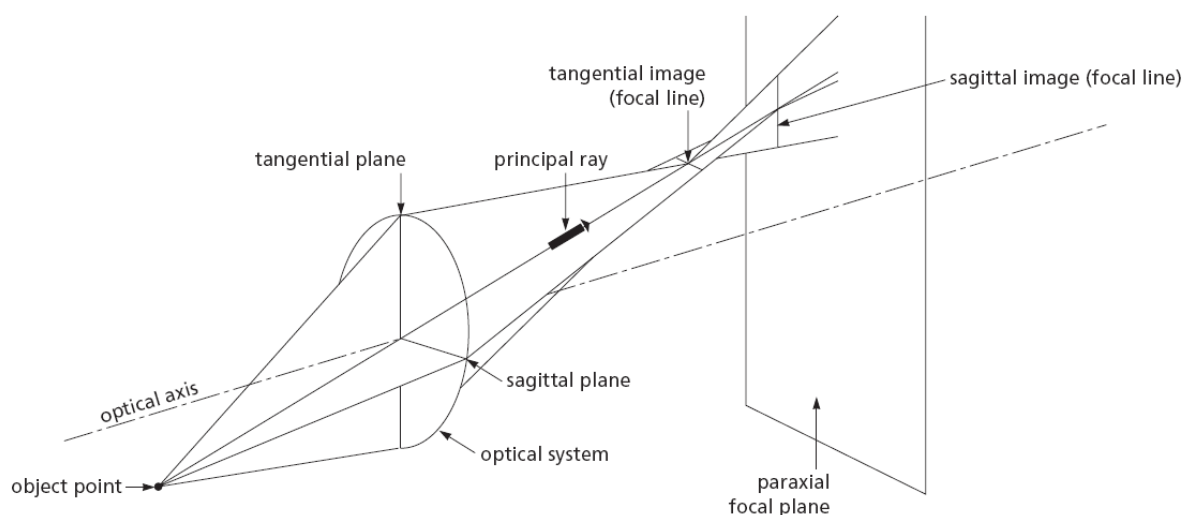
Infine, una tecnica relativamente semplice per contenere l'aberrazione sferica è quella di ridurre l'apertura relativa della lente (o dell'obiettivo) mediante diaframma, intercettando così i raggi marginali.



# Astigmatismo

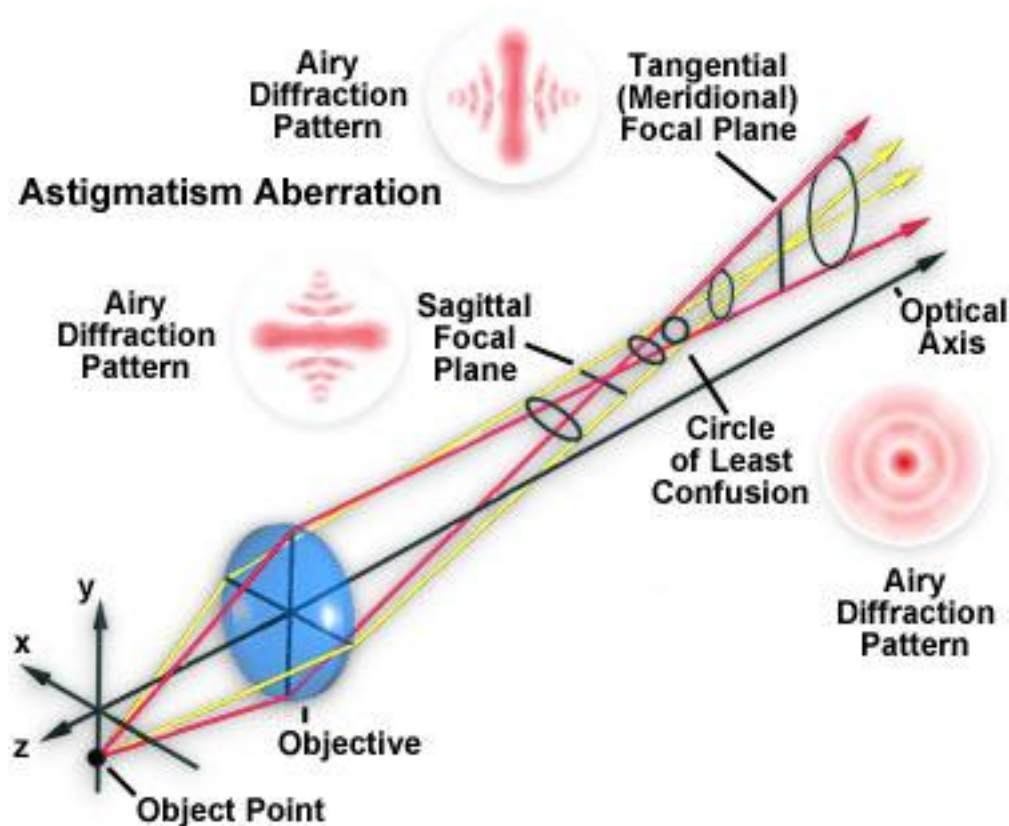
Quando un soggetto fuori asse viene messo a fuoco da una lente sferica, l'asimmetria della situazione porta all'astigmatismo. Il sistema sembra avere due diverse lunghezze focali.

Nella figura sottostante, il piano contenente l'asse ottico ed il punto oggetto è il **piano tangenziale**. I raggi giacenti in questo piano sono denominati **raggi tangenziali o raggi meridiani**. I raggi non giacenti in questo piano sono denominati **raggi obliqui**. Il **raggio principale** è quello diretto verso il centro della lente. Il piano perpendicolare al piano tangenziale contenente il raggio principale è il **piano sagittale o piano radiale**.



Le figure evidenziano che i raggi tangenziali vengono focalizzati più vicino alla lente rispetto ai raggi del piano sagittale. Quando si valuta l'immagine alla distanza coniugata tangenziale, si osserva una linea in direzione

sagittale. Alla distanza coniugata sagittale si nota viceversa una linea in direzione tangenziale. Procedendo dalla distanza coniugata più vicina a quella più lontana, l'immagine muta progressivamente la sua forma da una linea sagittale, ad un'ellisse sagittale, ad un disco (immagine migliore, nota anche come **cerchio di minima confusione**), ad un'ellisse tangenziale ed infine ad una linea tangenziale.



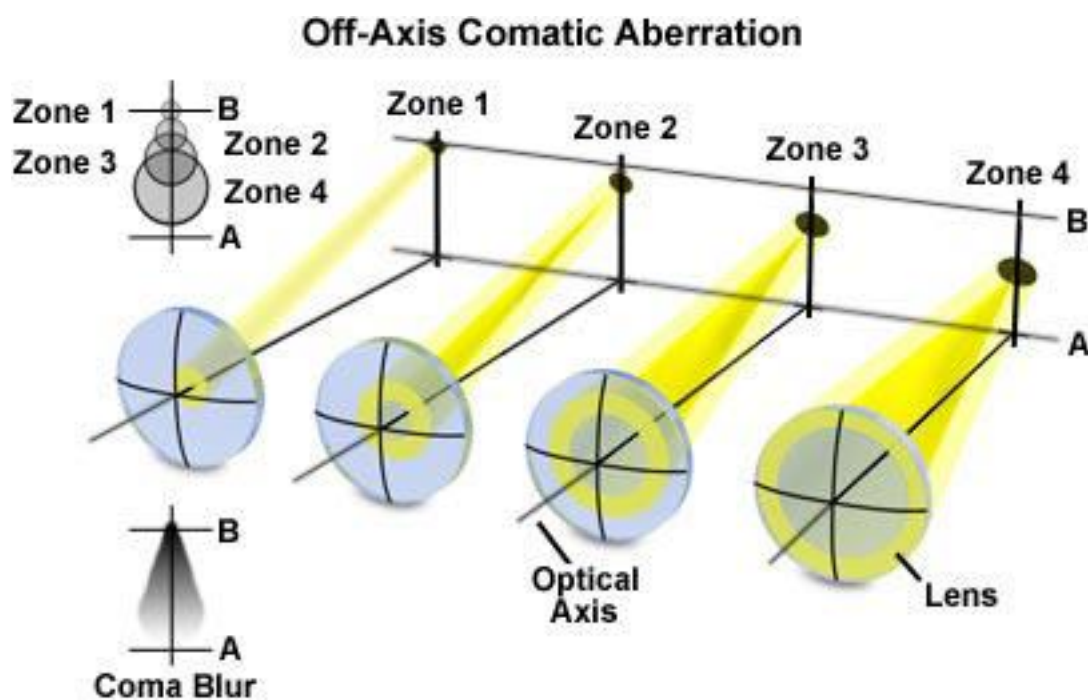
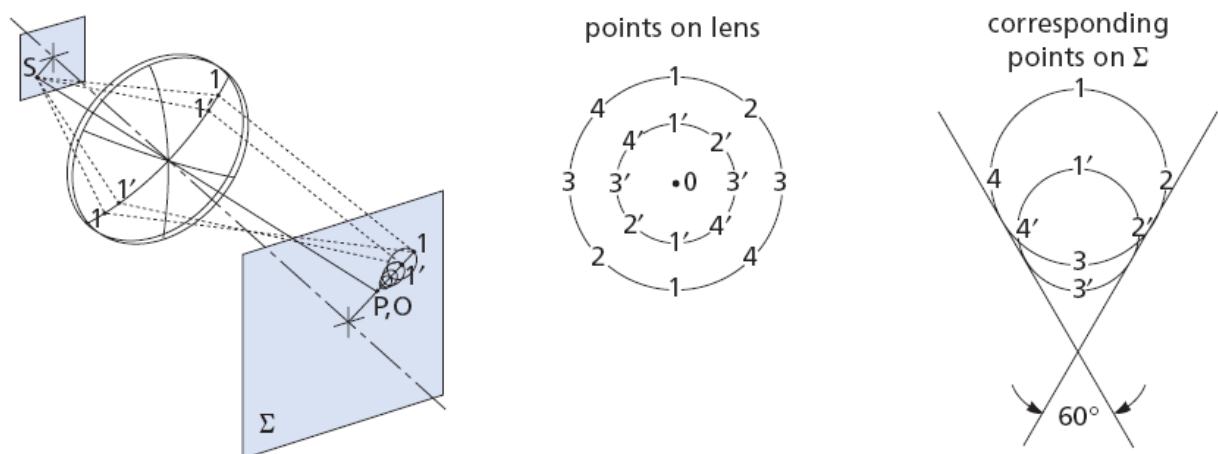
***L'astigmatismo è definito dall'intervallo tra le due immagini lineari.***

Il valore dell'astigmatismo dipende dalla forma della lente solo se è presente un diaframma non direttamente a contatto con l'elemento ottico (in tutti i sistemi ottici è presente un diaframma, sebbene in molti casi sia semplicemente l'apertura libera della lente). L'astigmatismo è strettamente correlato al rapporto delle distanze coniugate.

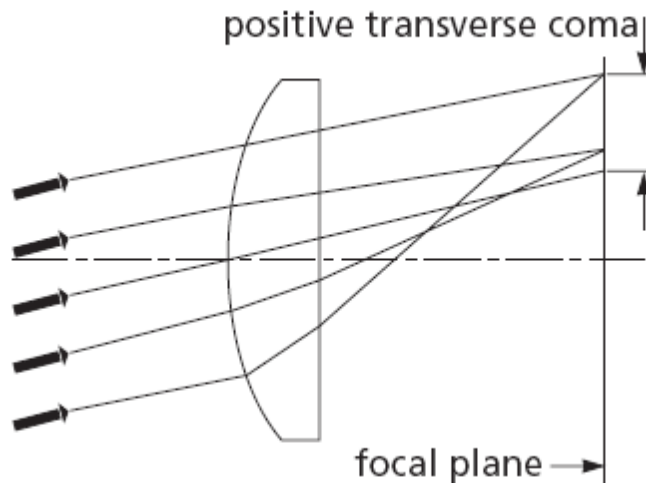
La limitazione dell'apertura relativa della lente (o dell'obiettivo) mediante diaframmazione consente di attenuare il grado di astigmatismo, in quanto vengono intercettati i raggi marginali e ridotti conseguentemente il cerchio di minima confusione e le immagini sagittali e tangenziali.

# Coma

Nelle lenti sferiche, le diverse zone concentriche delle superfici forniscono ingrandimenti differenziati, dando origine a coma. Come evidenziato nella prima figura, ciascuna zona concentrica della lente forma un'immagine anulare, denominata **circolo cromatico**, che causa la sfocatura dei punti oggetto fuori asse. L'immagine di un punto oggetto fuori asse non è nitida, ma presenta una caratteristica forma a cometa.



**La coma è definita dalla lunghezza dell'immagine a cometa.**



Una lente, anche se corretta dall'aberrazione sferica e capace di focalizzare i raggi incidenti in un unico punto sull'asse ottico, può ancora essere affetta da coma per i punti fuori asse.

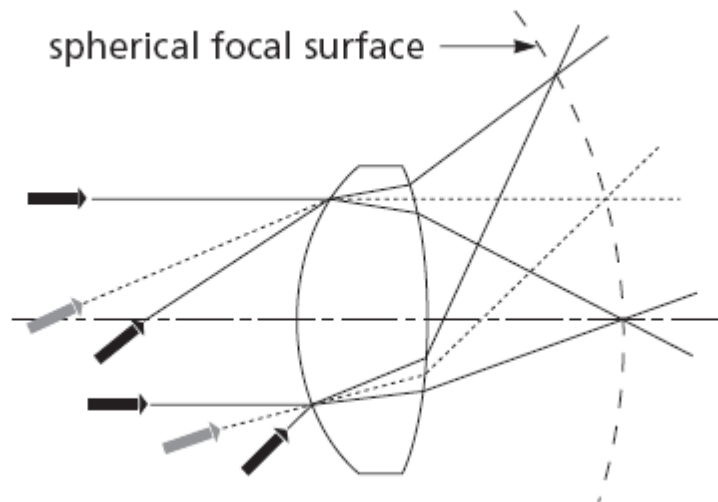
Analogamente all'aberrazione sferica, la coma può essere corretta utilizzando superfici multiple. In alternativa, è possibile ottenere un'immagine più definita dotando opportunamente il sistema ottico di un diaframma per eliminare i raggi marginali.

Infine, occorre sottolineare che il fattore di forma ottimale per minimizzare l'aberrazione sferica è anche in grado di assicurare una significativa riduzione della coma.

## Curvatura di campo

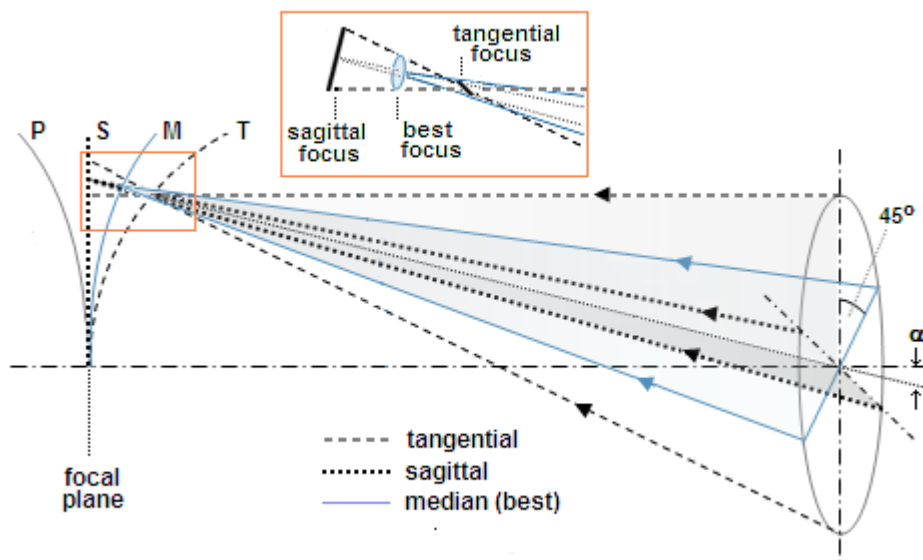
---

Anche in assenza di astigmatismo, i sistemi ottici hanno la tendenza a formare **immagini corrette su superficie curva (superficie di Petzval)** piuttosto che piana, un effetto generalizzato noto come **curvatura di campo**.



In presenza di astigmatismo, questo problema è peggiorato dalla formazione di due distinte superfici focali astigmatiche, corrispondenti alle distanze coniugate tangenziale e sagittale.

La figura che segue illustra le superfici delle immagini generate dall'astigmatismo e dalla curvatura di campo di uno specchio concavo: superficie tangenziale (T), superficie mediana (M), superficie sagittale (S) a superficie di Petzval (P).



La superficie dell'**immagine migliore o immagine mediana** è quella relativa all'immagine discoidale, cioè il cerchio di minima confusione, di un punto-oggetto.

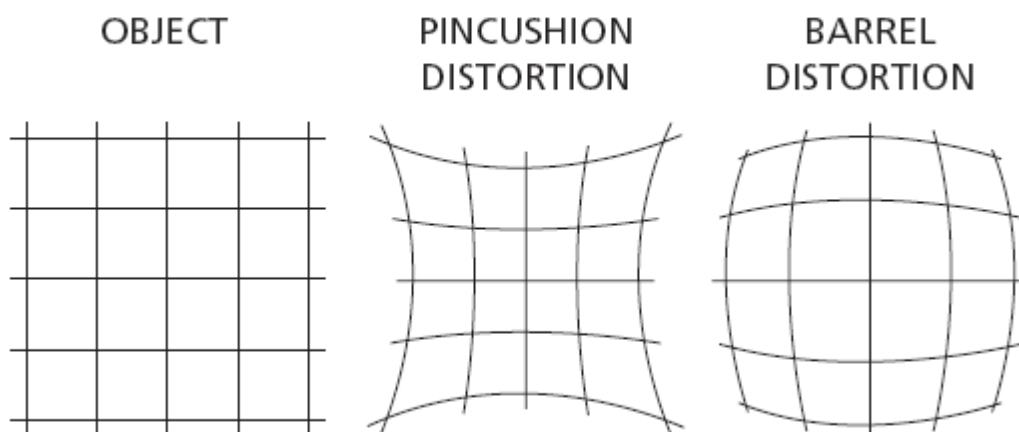
La curvatura di campo varia con il quadrato dell'angolo di campo, ovvero dell'altezza dell'immagine. Ad esempio, dimezzando l'angolo di campo, è possibile ridurre la sfocatura derivante dalla curvatura di campo ad un quarto del valore di partenza. È quindi opportuno l'impiego di un diaframma opportunamente posizionato davanti alla lente per limitarne il funzionamento alla sola parte centrale.

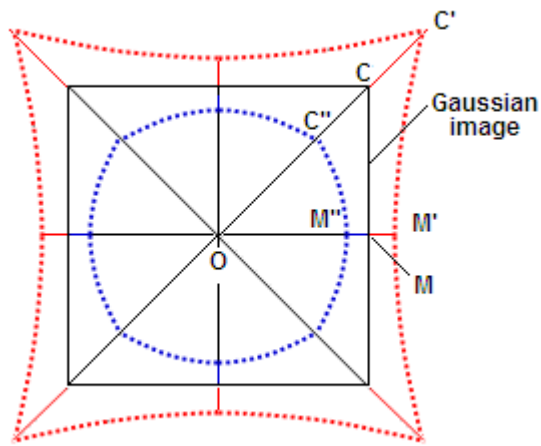
In generale, la curvatura di campo delle lenti positive è concava, mentre quella delle lenti negative è convessa. È così possibile correggere almeno parzialmente questa aberrazione combinando lenti positive e negative.

## Distorsione

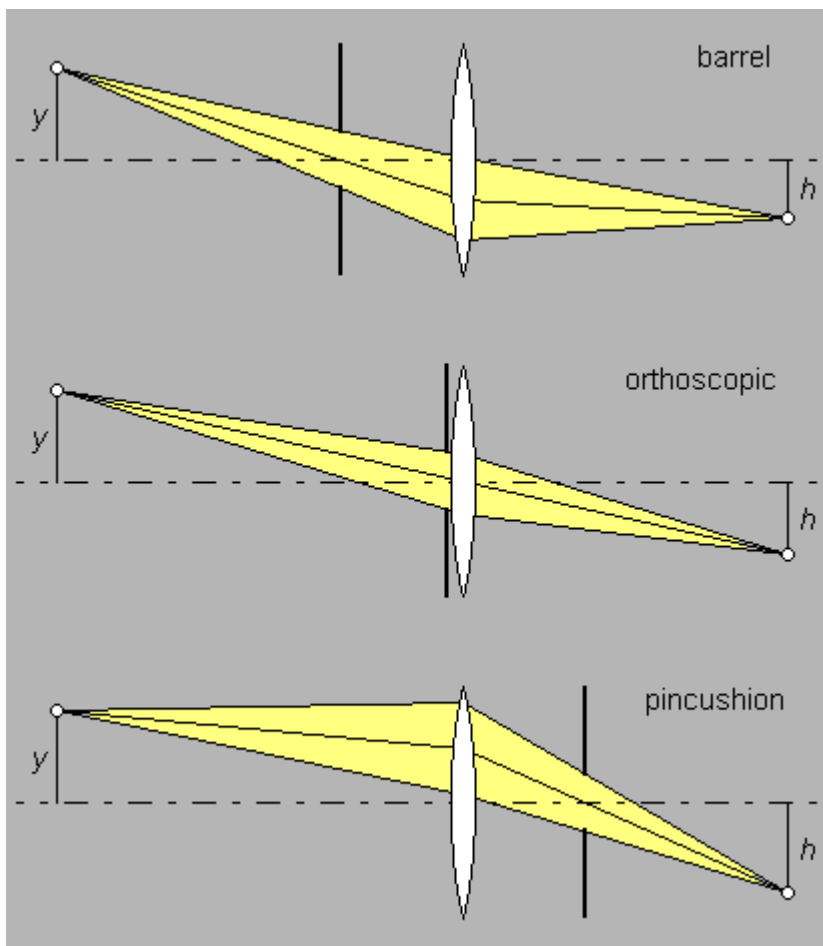
---

Il campo dell'immagine può essere non solo curvo, ma anche distorto. In altri termini, l'immagine di un punto fuori asse può formarsi sulla superficie focale in una posizione diversa da quella prevista dalle equazioni parassiali. Questa distorsione è differente dalla coma (dove i raggi provenienti da un punto fuori asse non si incrociano in un unico punto del piano dell'immagine). Il termine distorsione sta ad indicare che, anche qualora si formi un'immagine perfetta del punto fuori asse, la sua posizione sul piano dell'immagine è errata. Inoltre, ***l'effetto distorcente aumenta con l'altezza dell'immagine*** e può essere di due differenti tipi: distorsione a cuscino e distorsione a barile.





La tipica causa di distorsione è costituita dalla presenza di un diaframma nel sistema ottico, introdotto ad esempio per ridurre l'aberrazione sferica o l'astigmatismo. La posizione del diaframma determina l'entità ed il segno della distorsione, come evidenziato nel sottostante schema a lente convergente semplice.





La posizione del punto-immagine dipende dal percorso seguito dal raggio rifratto che passa per il centro del diaframma.

Se il diaframma è a ridosso della lente, il raggio passa anche per il centro della lente senza mutare direzione. Il sistema non distorce l'immagine ed è definito **ortoscopico**.

Se il diaframma è posto davanti o dietro la lente e distanziato da essa, il raggio subisce una deviazione. Il rapporto delle distanze del soggetto e dell'immagine, misurate lungo questo raggio, e la distanza  $y$  del soggetto dall'asse determinano il valore dell'ingrandimento  $h/y$ , minore di quello ortoscopico se il diaframma è collocato anteriormente (distorsione a barile) e maggiore di quello ortoscopico se il diaframma è collocato posteriormente (distorsione a cuscino). Inoltre, la distorsione dipende dalla distanza di messa a fuoco: lo stesso obiettivo, regolato sull'infinito o su distanze ravvicinate, presenta differenti livelli di aberrazione.

**La distorsione è lo scostamento del punto immagine reale dalla posizione parassiale prevista sul piano dell'immagine** e può essere espresso sia in valore assoluto sia come percentuale dell'altezza dell'immagine parassiale.

Il valore di apertura del diaframma non ha effetto sulla distorsione, poiché il raggio che passa per il suo centro non cambia direzione al variare dell'apertura relativa.

Uno schema ottico complesso quale quello di un grandangolare retrofocus è tendenzialmente affetto da distorsione a barile, in quanto il gruppo anteriore di lenti si comporta come un diaframma nei confronti del gruppo posteriore. I teleobiettivi hanno un gruppo posteriore di tipo negativo ed evidenziano quindi una distorsione a cuscino. La correzione della distorsione negli zoom risulta problematica, in quanto questi obiettivi presentano una distorsione a barile alle focali più corte ed una distorsione a cuscino a quelle più lunghe.

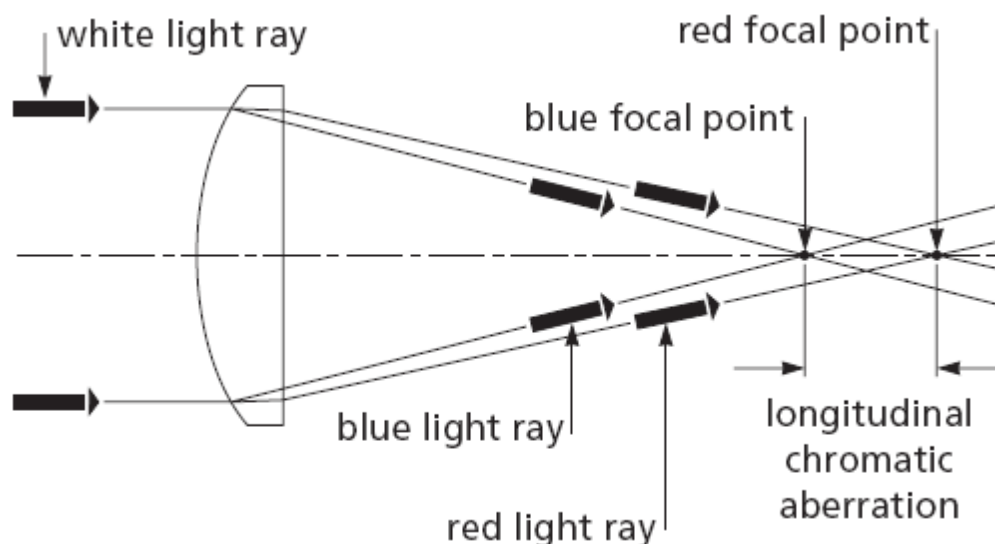
È evidente che una lente o un sistema di lenti presentano tipi opposti di distorsioni, in funzione del loro orientamento in fase di utilizzo. Questo significa che se un obiettivo è impiegato per eseguire una fotografia e successivamente è capovolto per proiettarla, l'immagine finale sullo schermo non presenterà distorsioni. Inoltre, i sistemi ottici perfettamente simmetrici non sono affetti da coma o distorsione per rapporti di ingrandimento pari a 1:1.

La distorsione non riduce la risoluzione del sistema ottico, limitandosi a deformare l'immagine in modo che la sua forma non corrisponda esattamente a quella del soggetto.

## Aberrazione cromatica

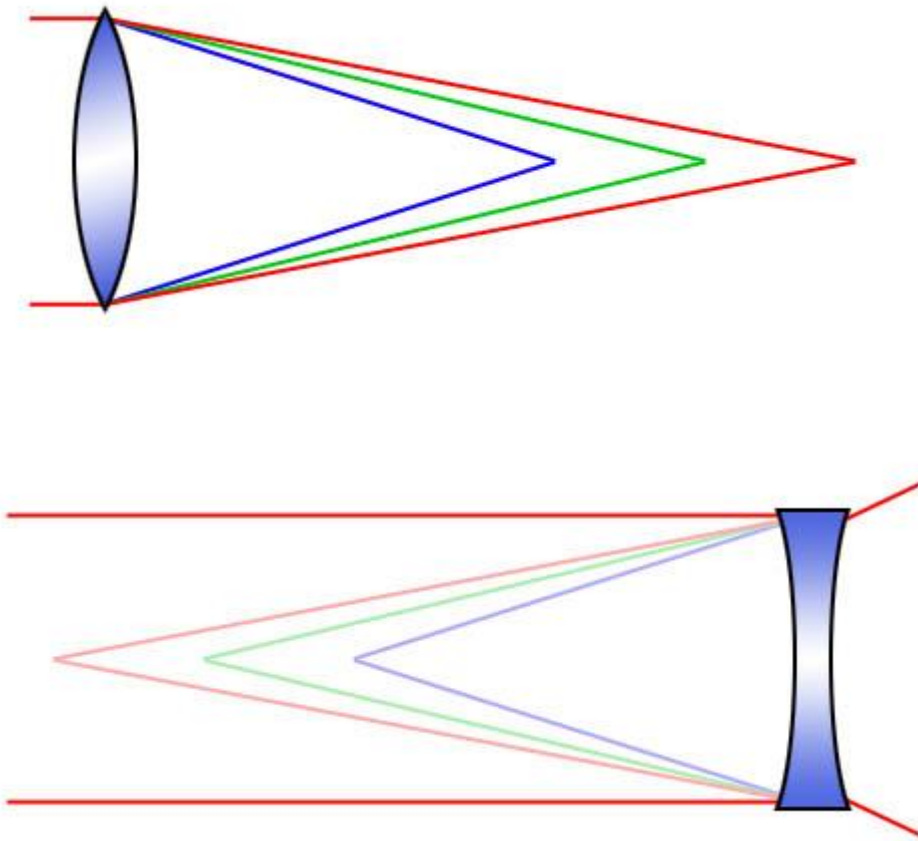
Le aberrazioni descritte in precedenza dipendono semplicemente dalla forma delle superfici delle lenti ed è possibile osservarne gli effetti in luce monocromatica. Altre aberrazioni si manifestano invece quando si impiegano le lenti per manipolare fasci luminosi policromatici. L'indice di rifrazione di un materiale è funzione della lunghezza d'onda e la sua variabilità può dare luogo a **dispersione**. In base alla legge di Snell, si può notare che raggi luminosi con differenti lunghezze d'onda vengono rifratti con differenti angoli in quanto l'indice di rifrazione non è costante.

La figura seguente illustra il risultato che si ottiene quando un fascio collimato policromatico incide su una lente positiva. Poiché l'indice di rifrazione aumenta con la lunghezza d'onda, le onde con  $\lambda$  minore vengono focalizzate più vicino alla lente rispetto a quelle con  $\lambda$  maggiore. **L'aberrazione cromatica longitudinale (o aberrazione cromatica assiale) è definita dall'intervallo assiale tra i due fuochi estremi.**



All'interno dell'intervallo di aberrazione cromatica longitudinale, esiste un punto dove il fascio disperso è più ristretto, in corrispondenza del cerchio di minima confusione.

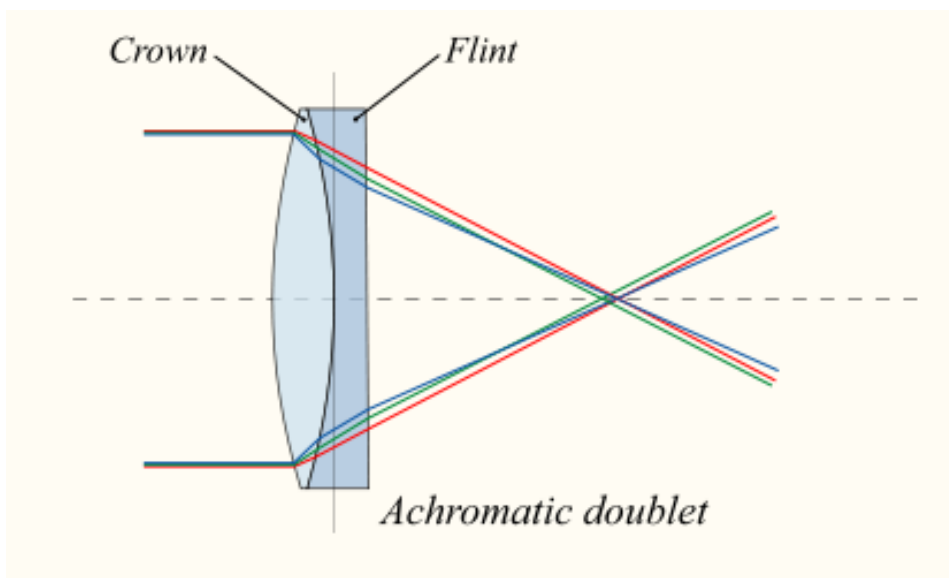
Analogamente all'aberrazione sferica, l'aberrazione cromatica presenta segni opposti nelle lenti positive e negative.



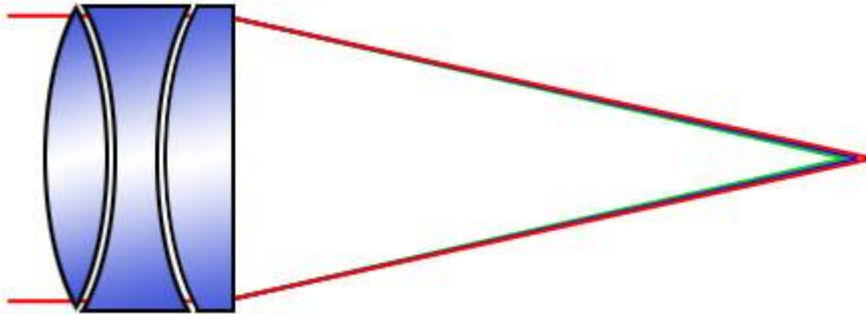
Qui di seguito, vengono messe a confronto due immagini fotografiche dello stesso soggetto, riprese rispettivamente con un obiettivo corretto ed uno non corretto da aberrazione cromatica.



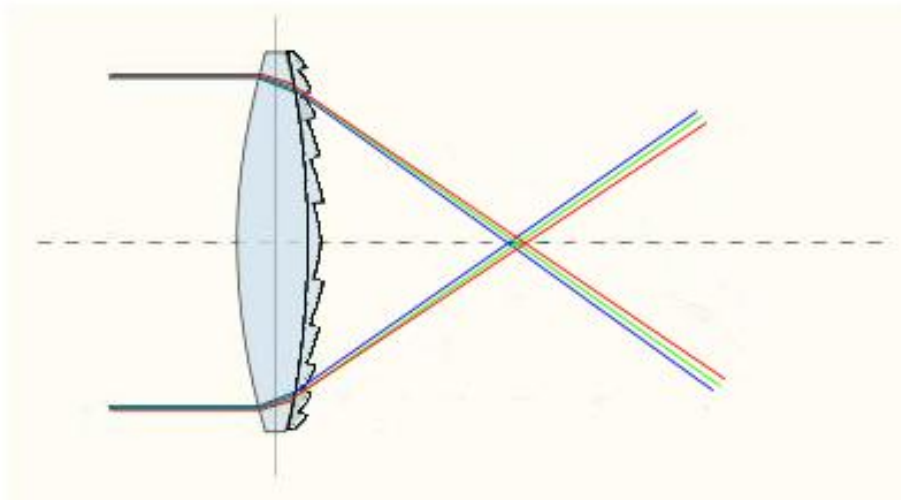
È possibile ridurre l'aberrazione cromatica utilizzando un **doppietto acromatico**, costituito da due vetri con differenti caratteristiche di dispersione, in modo che l'elemento più debole, quello negativo, possa bilanciare l'aberrazione dell'elemento più forte, quello positivo. Il tipico doppietto acromatico prevede l'impiego di due lenti realizzate rispettivamente con vetro crown e vetro flint. Il doppietto acromatico riduce l'entità dell'aberrazione cromatica entro una determinata banda di lunghezze d'onda, ma non è in grado di assicurare una correzione perfetta.



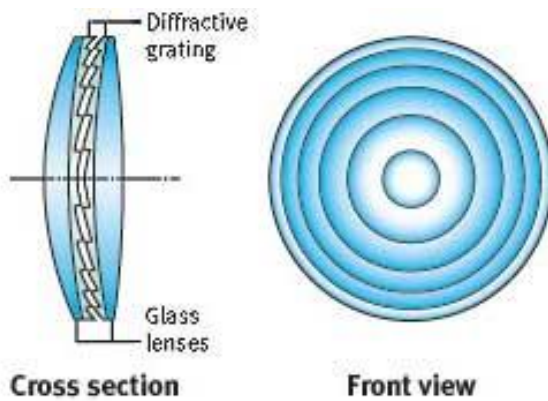
Combinando più di due lenti di differente forma e composizione, si può spingere all'estremo il grado di correzione dell'aberrazione cromatica. Con tre lenti, si ottiene il classico **tripletto apocromatico**.



Un'alternativa è costituita dall'utilizzo di elementi ad ottica diffrattiva, aventi caratteristiche di dispersione complementari (cioè opposte) a quelle dei vetri ottici e con un numero di Abbe pari a -3,5.



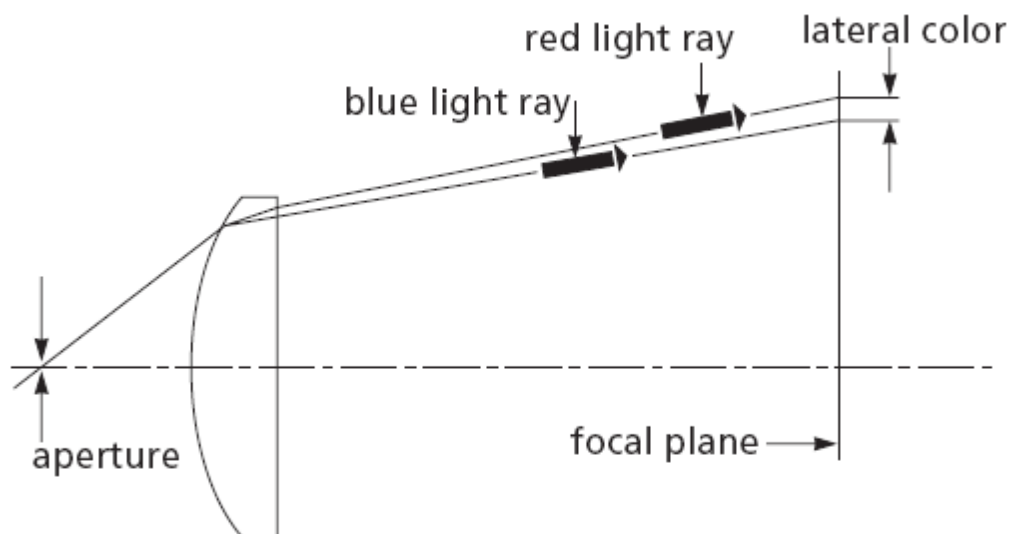
Le lenti multistrato ad ottica diffrattiva sono costruite in modo da alterare il percorso della luce all'interno di esse e non disperdere parte di quella luce come nelle lenti normali: qui tutta la luce viene forzata a formare l'immagine. Inoltre, le lenti di questo tipo correggono l'aberrazione cromatica in misura anche superiore alle costose lenti in fluorite, mentre, calibrando la spaziatura del gruppo diffrattivo, è possibile contrastare l'aberrazione sferica, rendendo inutile il ricorso alle altrettanto costose lenti asferiche. Un primo esempio dell'applicazione di questa tecnologia è costituito dal teleobiettivo EF 400mm Do di Canon, che contiene un elemento ottico diffrattivo:

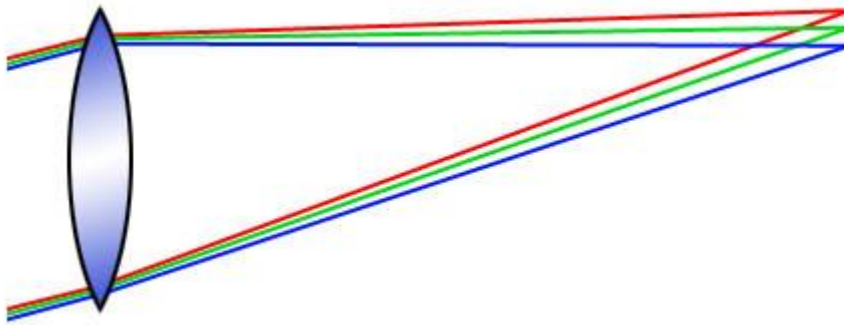


**Multi-Layer Diffractive Optical Element Construction**

### **Colore laterale**

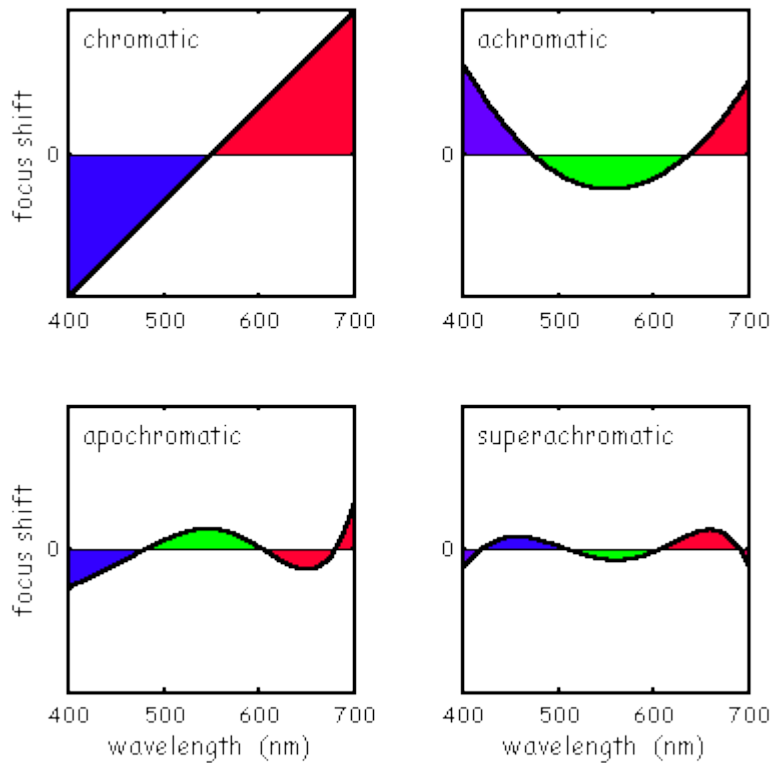
**Il colore laterale (o aberrazione cromatica extrassiale) è la differenza di altezza delle immagini blu e rossa.** La figura seguente evidenzia il percorso dei raggi blu e rossi rifratti da un sistema ottico costituito da una lente semplice positiva e da un diaframma. A causa della variabilità dell'indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda, la luce blu è rifratta in misura superiore a quella rossa, il che spiega perché i raggi intercettino il piano dell'immagine a differenti altezze. Semplicemente, l'ingrandimento dipende dal colore ed il colore laterale dipende strettamente dalla posizione del diaframma.





### **Spettro secondario**

L'aberrazione cromatica trasversale assume rilevanza soprattutto nei grandangolari retrofocus e nei teleobiettivi, caratterizzati da schemi ottici marcatamente asimmetrici, mentre l'aberrazione cromatica longitudinale diventa importante negli obiettivi ad elevata apertura. Se un obiettivo affetto da aberrazione cromatica viene messo a fuoco per i verdi (in considerazione della maggiore sensibilità dell'occhio umano in questa banda dello spettro visibile), i blu ed i rossi risulteranno fuori fuoco. L'impiego dei doppietti acromatici permette di ridurre significativamente l'aberrazione cromatica. La correzione acromatica permette di fare coincidere le lunghezze focali di due lunghezze d'onda nelle bande del blu e del rosso, come evidenziato nello schema seguente. Lo scostamento dei fuochi delle altre lunghezze d'onda rispetto alle due di riferimento è noto come **spettro secondario**.



La messa a punto dei cosiddetti **vetri esotici, caratterizzati da dispersione bassa o anomala**, ha portato a progressi significativi nella correzione cromatica. Un obiettivo in grado di riunire i fuochi di tre colori è definito **obiettivo apocromatico**, mentre uno capace di raggruppare i fuochi di quattro o più lunghezze d'onda, eliminando virtualmente questo tipo di aberrazione, è denominato **obiettivo superacromatico**. È importante sottolineare che non è il numero di fuochi coincidenti che determina la qualità dell'immagine, bensì l'intervallo comprendente tutti i fuochi, cioè lo spettro secondario. La designazione APO viene utilizzata da molti fabbricanti di obiettivi ad indicare la riduzione dello spettro secondario, ma i veri schemi apocromatici sono abbastanza rari. Di norma, le ordinate delle curve di correzione riportano sulle ordinate lo scostamento dei fuochi (come nel caso della figura), riferendosi alla correzione del colore assiale. Talvolta, possono però riportare le lunghezze focali, riferendosi così alla correzione del colore laterale. Il termine "spettro secondario" è utilizzato principalmente per indicare l'aberrazione cromatica longitudinale, ma alcuni lo utilizzano per quella trasversale.



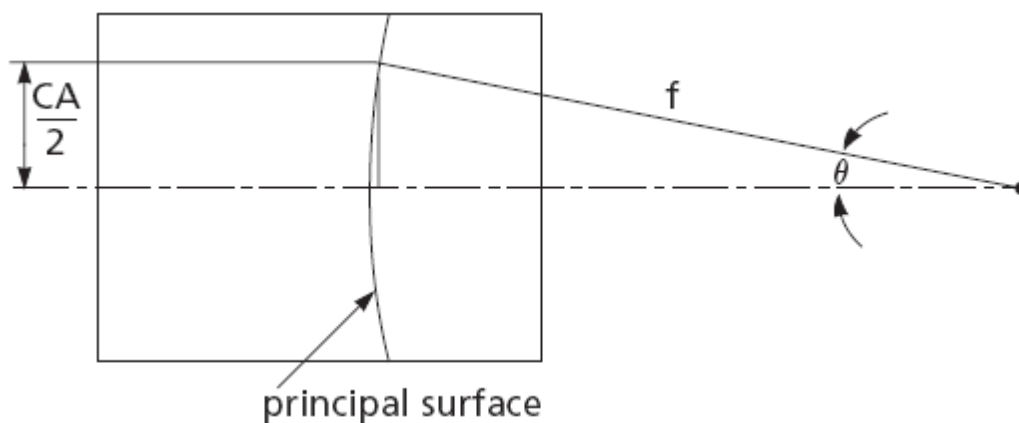
## Doppietti acromatici

Poiché i doppietti acromatici permettono di correggere sia l'aberrazione sferica sia quella cromatica, sono sovente migliori delle lenti semplici per focalizzare fasci luminosi collimati o per collimare luce di sorgenti puntiformi, anche in caso di luce monocromatica.

Sebbene non sia disponibile una formula semplificata per valutare le dimensioni dei punti messi a fuoco da un doppietto, la tabella seguente offre una panoramica delle variabili da cui dipendono fondamentalmente le prestazioni dei doppietti acromatici.

### Variations of Aberrations with Aperture, Field Angle, and Image Height

Aberration	Aperture ( $\phi$ )	Field Angle ( $\theta$ )	Image Height ( $y$ )
Lateral Spherical	$\phi^3$	—	—
Longitudinal Spherical	$\phi^2$	—	—
Coma	$\phi^2$	$\theta$	$y$
Astigmatism	$\phi$	$\theta^2$	$y^2$
Field Curvature	$\phi$	$\theta^2$	$y^2$
Distortion	—	$\theta^3$	$y^3$
Chromatic	—	—	—



L'apertura relativa è determinabile con qualsiasi raggio qualora si conoscano la sua distanza coniugata e il diametro dove interseca la superficie principale del sistema ottico.

Nel caso più generale di una lente con le sue due superfici a contatto con due diversi fluidi, l'equazione dell'apertura relativa viene sdoppiata:

$$N = f/CA$$

$$N'' = f''/CA$$

dove: CA = diametro dell'apertura libera della lente

così come quella dell'apertura numerica

$$NA = n \cdot \sin \theta$$

dove:  $\theta = \arcsin\left(\frac{CA}{2s}\right)$

$$NA = n'' \cdot \sin \theta''$$

dove:  $\theta'' = \arcsin\left(\frac{CA}{2s''}\right)$