

Come funzionano gli strumenti ottici

di Daniele Gasparri

In prima approssimazione possiamo suddividere tutti gli strumenti ottici, occhio umano compreso, in due grandi famiglie: quelli formati da lenti e quelli da specchi, o entrambi. In tutti i casi, si usano delle lenti e degli specchi dalla forma speciale, in grado di raccogliere la luce e di concentrarla in un punto, chiamato fuoco.

Prendiamo una normale lente d'ingrandimento, in una stanza illuminata da un lampadario o una qualsiasi lampada; facciamo passare la luce della lampada attraverso la lente e poniamo dall'altra parte uno schermo, che può essere costituito da un tavolo o da un semplice foglio di carta. Avviciniamo e allontaniamo la lente dallo schermo, con delicatezza; ad un certo punto, ad una distanza ben determinata, noterete che sullo schermo la lente proietta l'immagine della lampada, capovolta e più piccola. La distanza tra la lente e lo schermo, sul quale vedete l'immagine a fuoco, è chiamata distanza focale; il punto sul foglio è chiamato fuoco, perché in esso si concentrano i raggi di luce raccolti dalla lente.

Una tale lente ha una forma sferica (in realtà è solo una parte di superficie sferica), ed ogni lente sferica ha questo comportamento particolare.

Per gli specchi le cose sono le stesse, con la differenza che essi riflettono la luce invece di rifrangerla, come accade per le lenti; per uno specchio sferico quindi, l'immagine si forma nella direzione in cui la luce incide; la distanza tra la superficie dello specchio e il punto di messa a fuoco è chiamata distanza focale; il punto è detto fuoco.

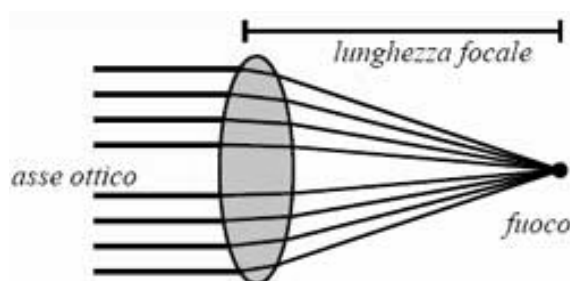
Perché lenti e specchi hanno questo strano comportamento?

Una risposta profonda non si può dare: tutto infatti dipende dalle leggi della natura, in particolare dalle leggi della rifrazione e della riflessione.

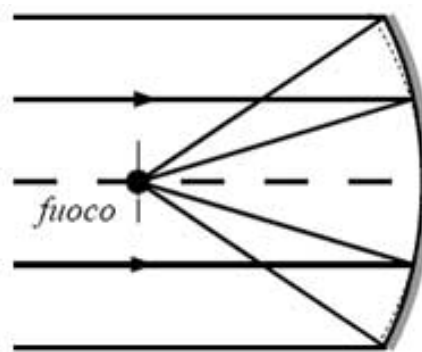
Possiamo però studiare il fenomeno e cercare di spiegarlo dal punto di vista fisico, individuando cioè le leggi che lo regolano (sebbene non possiamo certo dire perché la Natura abbia scelto tale regola!).

Qualsiasi raggio di luce che attraversa una superficie di materiale diverso rispetto al vuoto o all'aria, con una certa inclinazione rispetto alla perpendicolare alla superficie da attraversare, viene deviato di un certo angolo che dipende dal materiale attraversato e dall'inclinazione del raggio sulla superficie. Questo effetto è chiamato rifrazione e può essere visto in situazioni comuni: un esempio molto facile da vedere è il fenomeno del cucchiaio spezzato, che si presenta

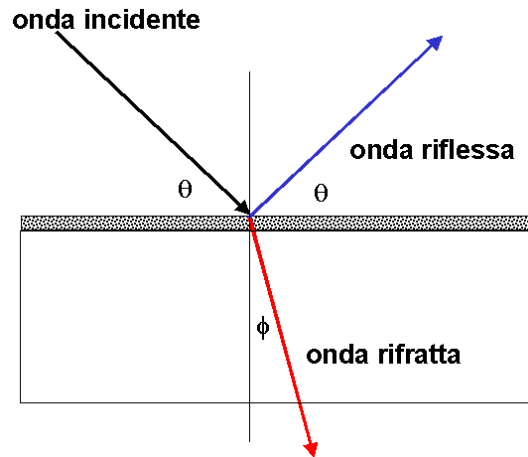
quando riempiate per 3/4 un bicchiere d'acqua e vi immergete un cucchiaino. Il manico del cucchiaino vi apparirà spezzato in corrispondenza del passaggio tra acqua e aria: questa è una delle esperienze più semplici per mettere in luce il fenomeno della rifrazione.



Formazione dell'immagine da parte di una lente sferica. La luce di una sorgente puntiforme (a sinistra) viene convogliata e concentrata nel fuoco.



Formazione dell'immagine per uno specchio concavo. Il punto focale si trova nella stessa direzione del fascio luminoso entrante.



Un tipico esempio di rifrazione (a sinistra) e lo schema geometrico che si presenta (a destra)

Studiando bene tale fenomeno e le leggi matematiche che lo governano, siamo in grado di poter costruire una superficie la cui forma consenta ai raggi di luce incidenti di poter essere concentrati, o focalizzati, in un punto.

La legge della rifrazione, per essere capita fino in fondo occorre conoscere il comportamento ondulatorio della luce, formata da campi elettrici e magnetici variabili nel tempo e nello spazio.

Noi ci accontenteremo di enunciarla utilizzando il modello corpuscolare della luce, quello adatto per analizzare le leggi dell'ottica. Questa è naturalmente un'approssimazione, che ad esempio non è in grado di spiegare fenomeni tipicamente ondulatori come l'interferenza e la diffrazione, ma fornisce ottimi risultati nell'analisi delle ottiche.

La legge della rifrazione in questo caso è quindi di natura prettamente empirica: si osserva il fenomeno, magari con diversi materiali, e poi si cerca una relazione matematica in grado di spiegarlo in pieno, anche in situazioni e con materiali non utilizzati durante gli esperimenti. Anche questo è un tipico caso del lavoro di uno scienziato.

Quando la luce attraversa due mezzi con proprietà diverse (composizione chimica, densità, temperatura) essa subisce sempre il fenomeno della rifrazione. Se l'inclinazione del raggio è perpendicolare alla superficie, non si ha alcuna diffrazione. L'angolo di deviazione del raggio luminoso aumenta con l'aumentare dell'inclinazione.

La legge matematica che descrive questo fenomeno è: $\frac{\sin \vartheta}{\sin \phi} = \frac{n_2}{n_1}$ dove n_2 ed n_1 sono chiamati

indici di rifrazione, rispettivamente del mezzo che ha prodotto la rifrazione e del mezzo dal quale proviene il raggio di luce; ϑ è l'angolo di incidenza, ϕ quello rifratto. Questa relazione sperimentale è nota come legge di Snell e trova una giustificazione fisica solo con l'analisi approfondita dei campi elettromagnetici che si propagano nella materia. A titolo qualitativo, possiamo affermare che il fenomeno si verifica in quanto la luce in un mezzo si muove a velocità diverse rispetto al vuoto, e l'indice di rifrazione sta ad identificare proprio quanto più lentamente la

luce viaggia nei due mezzi rispetto al vuoto. In effetti $n = \frac{c}{v}$, dove v = velocità della luce nel

mezzo. Se consideriamo i soliti due mezzi diversi, si ha: $\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$. La rifrazione è causata quindi dal

fatto che la luce viaggia a velocità diverse a seconda del mezzo che attraversa.

Tenendo presenti queste due leggi, possiamo, come accennato, costruire delle superfici in grado di focalizzare la luce in un punto, chiamato punto focale, appartenente al piano focale. Nel piano focale si forma un'immagine reale e rimpicciolita di una sorgente i cui raggi luminosi attraversano la lente o lo specchio.

La forma che consente questo è, in prima approssimazione, quella sferica: lenti sferiche concentrano i raggi in un punto.

Per gli specchi il discorso cambia ma non il risultato: in questo caso non abbiamo il fenomeno della rifrazione, perché la luce non attraversa lo specchio, ma ne viene da esso riflessa; dobbiamo quindi studiare a fondo il fenomeno della riflessione.

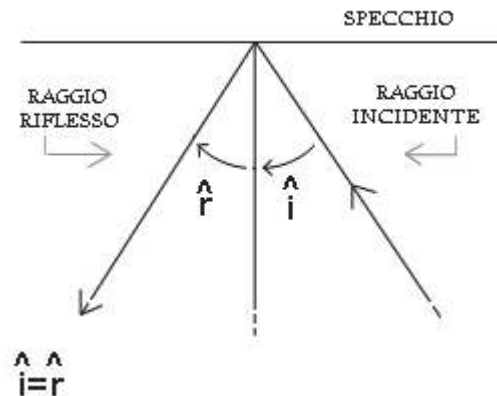
La Natura ha deciso una legge molto semplice per tutti i fenomeni di riflessione: l'angolo di incidenza di un raggio di luce, misurato a partire dalla retta perpendicolare alla superficie dello specchio (normale alla superficie), è uguale all'angolo per il quale lo stesso raggio verrà riflesso (di riflessione).

Tenendo presente questa fondamentale proprietà, siamo in grado di costruire una superficie che permetta ai raggi riflessi di confluire in un punto, chiamato fuoco, la cui distanza dallo specchio è detta distanza focale.

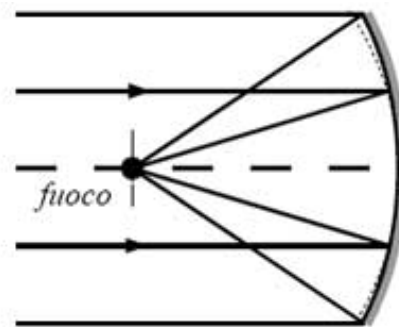
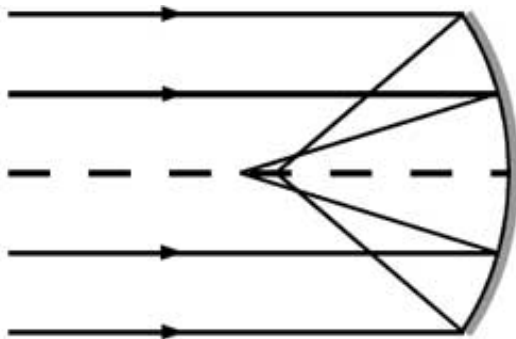
Come per le lenti, una tale superficie è costituita da una calotta di forma sferica.

In realtà, la forma sferica per le lenti e gli specchi non è perfetta e non consente di focalizzare tutti i raggi incidenti nel fuoco.

La forma perfetta è una parabola, che solamente per piccoli diametri (e grandi focali) può essere assimilata ad una circonferenza.

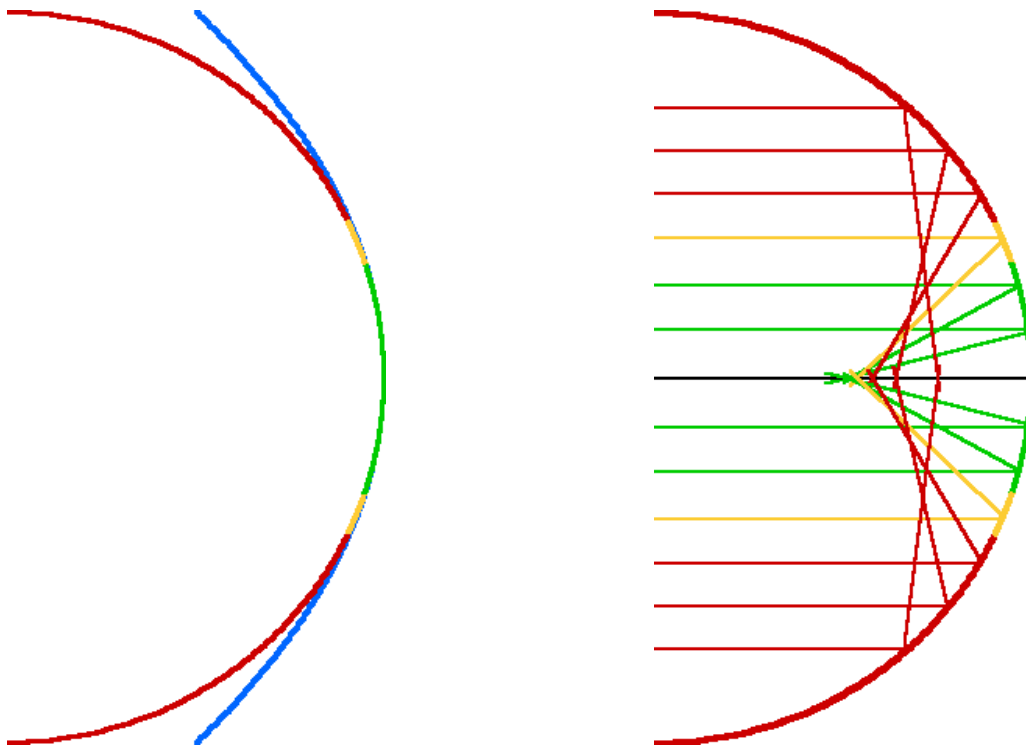


La riflessione. L'angolo di incidenza è sempre uguale a quello riflesso.



Differenze tra uno specchio sferico (a sinistra) ed uno parabolico (a destra). Uno specchio sferico non concentra tutti i raggi nel punto di fuoco.

Qualche cenno alle aberrazioni ottiche



Comportamento e forma di specchi sferici e parabolici (a rigore si dovrebbe dire sferoidali e paraboloidali; essi sono infatti solidi di rotazione, non semplici curve piane)

Come possiamo vedere dalla figura, uno strumento fatto a specchi dal piccolo diametro (e/o lunga focale) può essere assimilato molto bene ad una parabola e i raggi confluiscono effettivamente in un punto chiamato fuoco. Per uno specchio sferico dal diametro grande e lunghezza focale corta, questo non è più vero. I raggi non confluiscono più in un punto, e ciò che si ha sul piano focale è un'immagine sfocata, priva di dettagli fini; questo difetto ottico, proprio delle forme sferiche e non paraboloidi, è chiamato aberrazione sferica, e dipende dal fatto che in realtà una superficie sferica non riesce a convogliare nel fuoco tutti i raggi di luce.

L'aberrazione sferica è sicuramente il difetto ottico maggiore tra gli strumenti amatoriali. Intatti, lavorare una superficie sferica, sia essa costituita da lenti o specchi, è molto più facile che lavorare una superficie paraboloidale, con conseguente abbattimento dei costi.

Il risultato è che spesso, per piccoli diametri e lunghe focali, si preferisce costruire strumenti a specchi sferici, mentre per strumenti a lenti si accostano due lenti la cui aberrazione sferica è uguale ma di segno opposto, per ottenere un risultato finale esente (o quasi) da questo difetto ottico. In generale, per contenere i costi di produzione e aumentare la precisione, è più conveniente correggere l'aberrazione sferica proveniente da ottiche sferiche, piuttosto che lavorare superfici a forma di parabola, veramente difficili da ottenere. Questo stratagemma è usato in tutti gli strumenti catadiottrici, che usano cioè combinazioni di lenti e specchi, e in tutti i sistemi a lenti. Solamente le strumentazioni ottiche costituite esclusivamente da specchi devono per forza utilizzare superfici a forma di parabola (o più particolari).

Un altro difetto ottico, proprio esclusivamente delle lenti, è la cosiddetta aberrazione cromatica. Questa è purtroppo una proprietà fisica della luce e di tutte le superfici rifrangenti e non può essere eliminata aumentando la precisione di lavorazione, ma può solo essere corretta introducendo, come per l'aberrazione sferica, elementi correttivi.

Chiunque sa come funziona un prisma, oggetto in grado di scomporre una fonte di luce nelle sue componenti principali.

Analizzando il funzionamento di un tale oggetto, e tenendo conto che qualsiasi raggio di luce che attraversa una superficie la cui densità sia diversa da quella dell'aria, con una certa inclinazione, verrà sicuramente rifratto, cioè deviato, siamo in grado di spiegare facilmente il fenomeno dell'aberrazione cromatica.

Nel prisma infatti, accade che la luce, che supponiamo sia quella solare, venga rifratta in modo diverso a seconda della sua lunghezza d'onda. Un raggio di luce solare contiene in se uno spettro continuo di lunghezze d'onda, le quali, passando all'interno del prisma, vengono deviate, cioè rifratte, in maniera diversa a seconda della loro lunghezza d'onda; ne consegue ad esempio che la luce rossa viene deviata meno della luce blu (formalmente cambia l'indice di rifrazione), con la conseguenza che si ha una dispersione di colori e la visione dello spettro solare.

Nelle lenti dei telescopi succede la stessa cosa, anche se fortunatamente in modo molto meno evidente rispetto ai prismi. La luce, che viene convogliata nel punto focale attraverso il fenomeno della rifrazione, in realtà lo raggiunge solamente per una certa lunghezza d'onda; altre lunghezze d'onda, il cui indice di rifrazione è diverso e quindi vengono deviate in maniera diversa, confluiscono per formare un'immagine in un punto diverso: il punto di fuoco dipende dalla lunghezza d'onda.

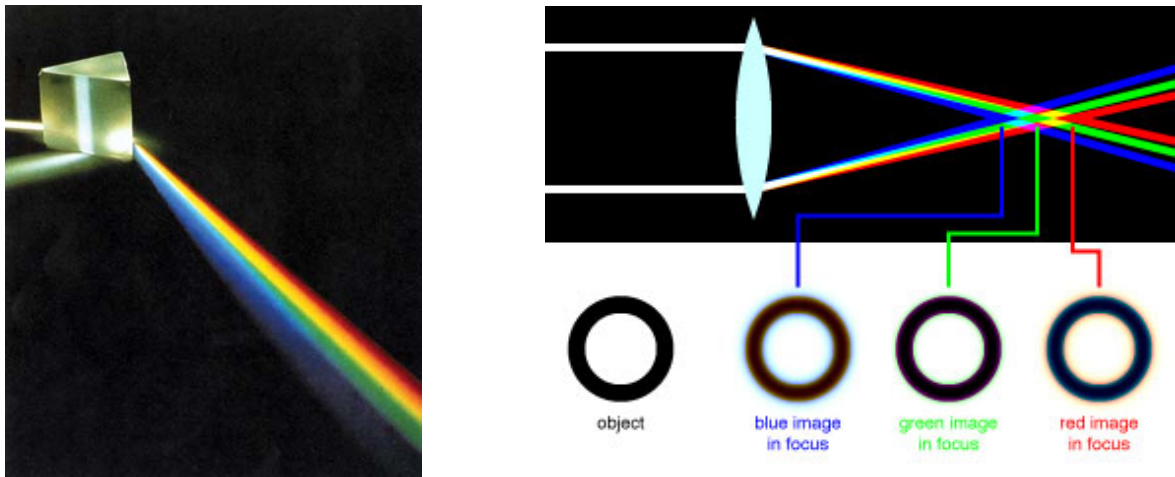


Fig.6.3.6: La dispersione delle lenti

L'aberrazione cromatica affligge inesorabilmente tutti gli strumenti composti da lenti e visualmente si manifesta con il fatto che le immagini di stelle e oggetti brillanti mostrano strani aloni colorati, sintomo che si sono messe a fuoco certe lunghezze d'onda mentre altre sono completamente fuori fuoco. Questo difetto ottico è molto fastidioso e nocivo, soprattutto per le osservazioni in alta risoluzione. Fortunatamente esso si risolve introducendo un filtro che lasci passare solamente una certa lunghezza d'onda (ad esempio il rosso o il giallo), eliminando le altre e riuscendo così ad avere una visione nettamente migliore.

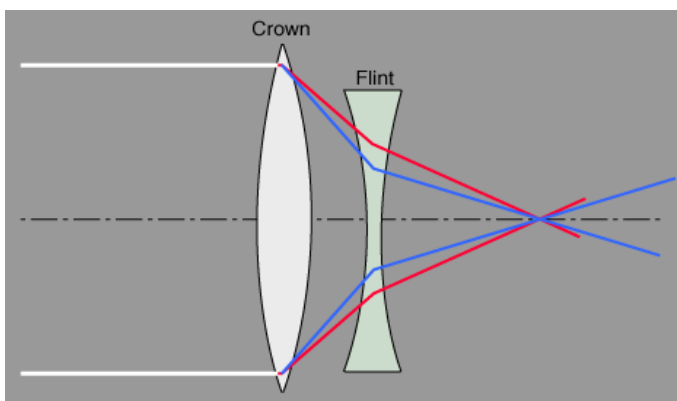
L'aberrazione cromatica, come già detto, non può essere eliminata; essa è un normale risultato delle leggi della natura, e quindi può solamente essere corretta, aumentando prima di tutto la focale dell'obiettivo; essa è infatti proporzionale alla focale dello strumento.

Minore è la rifrazione della lente e minore sarà la differenza di percorso dei raggi di luce con diversa lunghezza d'onda; il caso limite è dato dalla rifrazione nulla, quando i raggi sono perpendicolari alla superficie, caso in cui la dispersione dei colori è zero.



Fig.6.3.7: L'aberrazione cromatica si manifesta come un bordo colorato sulle immagini brillanti

Producendo quindi obiettivi con superfici di grande raggio (ovvero, usare lenti poco pronunciate, con lunga focale), otteniamo una piccola rifrazione, che si manifesta con una conseguente minore dispersione e con un brusco calo dell'aberrazione cromatica. Si possono anche introdurre gruppi di lenti che producono aberrazione cromatica uguale e contraria, o vetri speciali che possiedono un basso livello di dispersione (la dispersione è la differenza di rifrazione tra le lunghezze d'onda). I moderni strumenti commerciali a lenti, di fascia economica, sono costituiti da due lenti accoppiate, una positiva (cioè che ingrandisce) e una negativa (cioè che produce immagini più piccole), che sono in grado di portare sul fuoco 2 lunghezze d'onda diverse (rosso e violetto) (oltre ad eliminare l'aberrazione sferica; le lenti degli strumenti amatoriali sono sempre sferiche). Questi strumenti sono detti (impropriamente) acromatici (cioè privi di cromatismo, ovvero aberrazione cromatica). In realtà, non basta portare sul fuoco due diverse lunghezze d'onda, come si può vedere dalle immagini date da un rifrattore acromatico commerciale, in quanto le altre lunghezze d'onda vanno a fuoco su un piano diverso.



Correzione dell'aberrazione cromatica; il doppietto acromatico porta sul fuoco due distanti lunghezze d'onda ma non tutte, con un residuo di cromatismo detto spettro secondario

Esiste allora una fascia di strumenti che utilizzano vetri a bassa dispersione e gruppi di almeno 3 lenti, chiamati apocromatici e che finalmente forniscono immagini veramente prive di aberrazione cromatica. Questi strumenti sono i migliori in assoluto, ma il loro prezzo è proibitivo: uno strumento acromatico da 13 cm di diametro, può costare anche meno di 1000 euro, compreso di montatura, mentre solo l'ottica di un apocromatico da 13 cm può costarne oltre 5000!

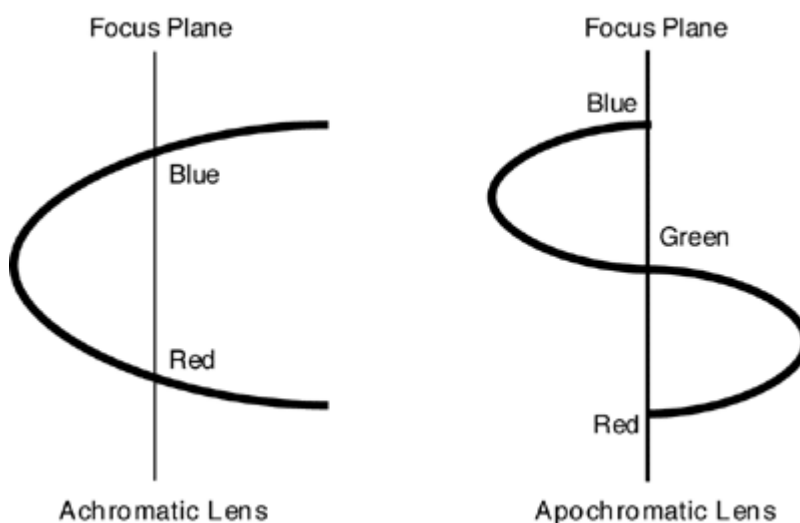


Fig.6.3.9: Posizione del fuoco in un acromatico e apocromatico (lo spostamento rispetto al piano focale è stato accentuato ed è solo indicativo)

Per gli specchi invece l'aberrazione cromatica non è un problema, perchè essa semplicemente non esiste: tutti i sistemi a specchi sono esenti da questa fastidiosa aberrazione.

Ci sono comunque altri difetti ottici, comuni a lenti e specchi, che non possono essere evitati perché risultato delle leggi dell'ottica.

Tali aberrazioni si presentano solamente fuori dall'asse ottico e tra le più comuni citiamo l'astigmatismo e la coma, particolarmente evidenti in strumenti dalla corta focale. Uno strumento lavorato alla perfezione non deve possedere queste aberrazioni sull'asse ottico; cioè al centro del campo inquadrato dall'oculare, non ci devono essere aberrazioni, ammissibili solamente in prossimità delle zone periferiche.

Parleremo in un altro articolo di queste aberrazioni e di come evidenziarle effettuando quello che si chiama star-test.