

corso di
Fisica della Visione
 (Fulvio Peruggi)

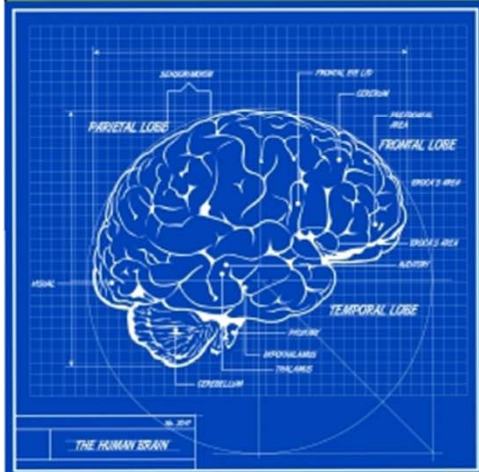
$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

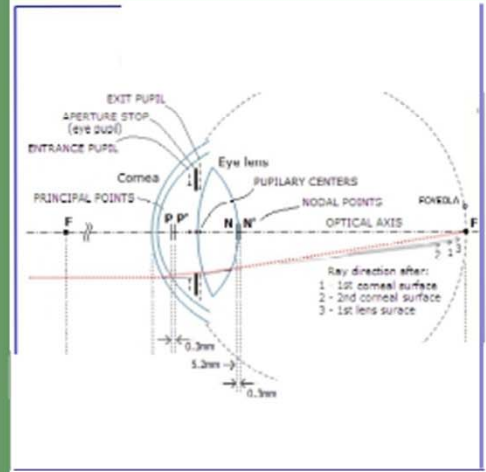


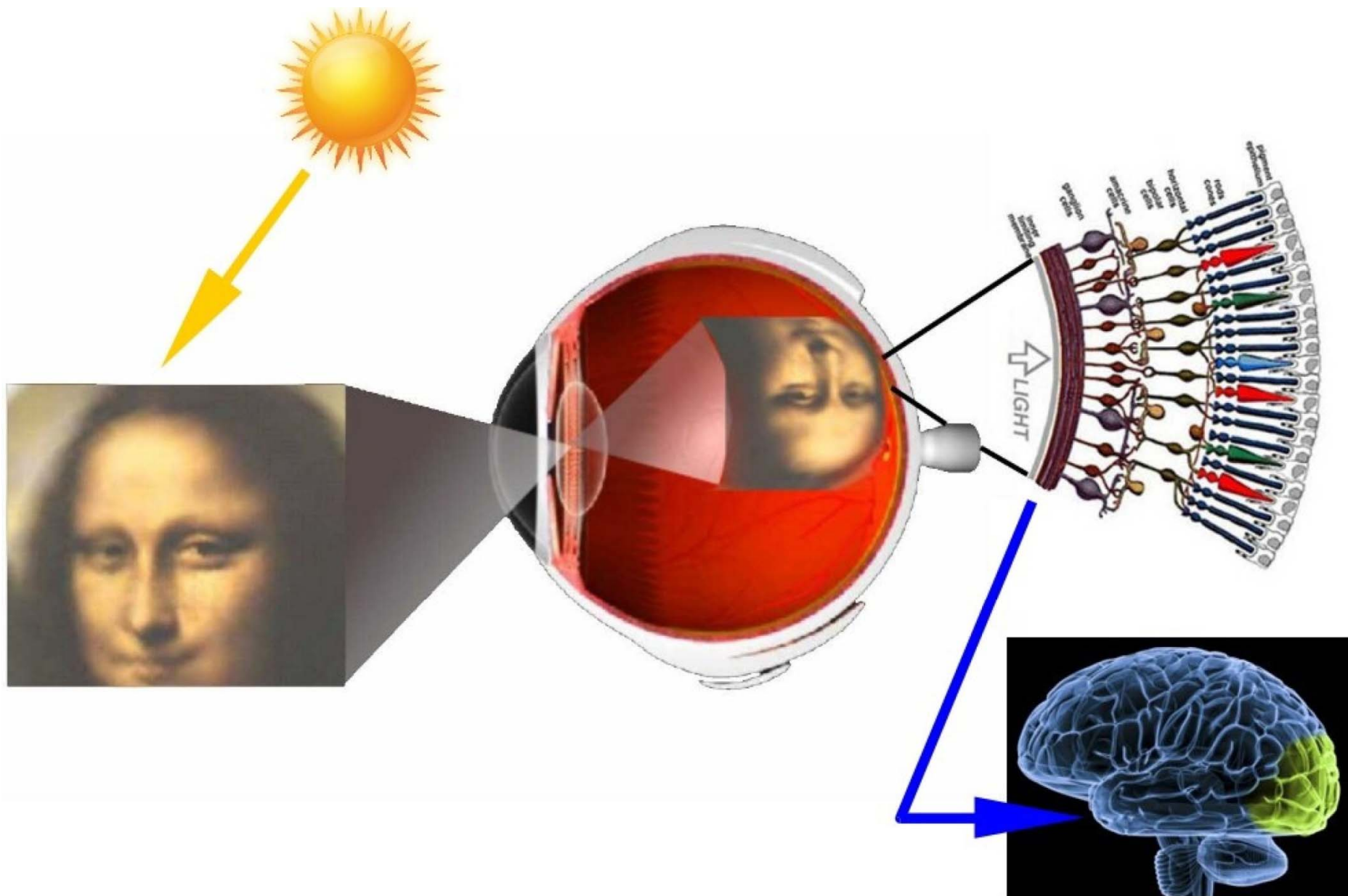
$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$



$$\frac{1}{r} \frac{\partial^2}{\partial r^2} (ru) + \frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial u}{\partial \vartheta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \vartheta} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} - \frac{1}{v_f^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$







Fisica della Visione

2



Introduzione

Lezione 22

Sistemi ottici:

s.o. stigmatici, s.o. non stigmatici, aberrazioni

- Sistemi ottici stigmatici.
- Sistemi ottici ideali e reali.
- Aberrazioni.
- Classificazione delle aberrazioni.
- Aberrazioni monocromatiche.



Fisica della Visione

3



Sistemi ottici stigmatici

Nel seguito, con la denominazione sistema ottico indicheremo indifferentemente componenti elementari come una lente o uno specchio, o un sistema ottico a molte componenti dedito alla produzione di immagini (un cannocchiale, un telescopio, un microscopio, un occhio, un obiettivo fotografico, etc.).

Tutti i discorsi di ottica geometrica riassunti in questa e nella precedente lezione sono basati su due approssimazioni principali concernenti i sistemi ottici:

- i raggi sono considerati **parassiali** (affinché, se paralleli, possano formare un unico punto immagine);
- l'indice di rifrazione è considerato lo stesso per tutti i raggi.

Se queste approssimazioni sono valide, la luce che proviene da un oggetto piano posto ortogonalmente all'asse ottico, cioè giacente nel *piano oggetto*, passa attraverso il sistema ottico e genera un'immagine con particolari caratteristiche:

- a ciascun punto dell'oggetto corrisponde un unico punto dell'immagine;
- l'immagine giace su un *piano immagine* ortogonale all'asse ottico;
- c'è lo stesso ingrandimento in ogni parte dell'immagine.



Fisica della Visione

4



Sistemi ottici ideali e reali

In ottica geometrica, si parla di **sistema ottico stigmatico** per specificare esplicitamente che esso soddisfa la prima delle precedenti proprietà. In altri termini con l'aggettivo **stigmatico** ci si riferisce alla proprietà di formazione dell'immagine che caratterizza un sistema ottico in grado di mettere a fuoco una singola sorgente puntiforme nello spazio oggetto in un singolo punto dello spazio immagine. Due punti di questo tipo vengono detti coppia stigmatica del sistema ottico. (Molti sistemi ottici reali, anche quelli che esibiscono aberrazioni ottiche fra cui l'astigmatismo, sono caratterizzati da almeno una coppia stigmatica.)

Nella realtà, le approssimazioni precedentemente menzionate assai spesso non sono valide. In pratica lenti e specchi reali non focalizzano la luce esattamente in un singolo punto, neanche quando sono realizzati perfettamente. Ciò è dovuto all'inapplicabilità dell'approssimazione parassiale ai raggi non parassiali, e all'indice di rifrazione che cambia a seconda della lunghezza d'onda (ovviamente questo secondo caso non interessa gli specchi). Inoltre, il concetto di stigmatismo è significativo solo nell'ambito dell'approssimazione dell'ottica geometrica, perché nell'ottica ondulatoria la formazione dell'immagine (anche nel caso più favorevole) è limitata dalla diffrazione, per cui le immagini puntiformi non sono possibili.



Fisica della Visione

5



Aberrazioni

I sistemi ottici reali non sono mai perfettamente stigmatici.

Le deviazioni dei sistemi ottici dalle prestazioni stigmatiche ideali vengono dette aberrazioni.

Un'**aberrazione** è una proprietà di un sistema ottico che provoca la dispersione della luce in una regione piuttosto che la sua focalizzazione in un punto. In altri termini c'è un'**aberrazione** quando, dopo la trasmissione attraverso il sistema ottico, la luce proveniente da un punto dell'oggetto non converge in (o non diverge da) un singolo punto dell'immagine.

Le **aberrazioni** provocano la sfocatura o la distorsione delle immagini formate da un sistema ottico. La natura e le caratteristiche della difformità dipendono dai tipi di aberrazione, che possono essere classificati come segue.



Fisica della Visione

5



Classificazione delle aberrazioni

- **Aberrazioni monocromatiche**

- Aberrazioni di tipo assiale
 - *Aberrazione sferica (o di sfericità)*
- Aberrazioni di tipo extra-assiale
 - *Coma*
 - *Astigmatismo*
 - *Distorsione*
 - *Curvatura di campo*

- **Aberrazioni cromatiche**



Fisica della Visione

7



Classificazione delle aberrazioni

Le **aberrazioni monocromatiche** dipendono dalla geometria del sistema ottico. Esse sono causate dalla forma geometrica di una lente o di uno specchio, e quindi si presentano sia quando la luce viene rifratta che quando viene riflessa. La loro denominazione dipende dal fatto che sono presenti anche quando si usa luce monocromatica.

Le **aberrazioni cromatiche** dipendono dalla dispersione del sistema ottico. Esse sono causate dai cambiamenti dell'indice di rifrazione dei materiali che costituiscono le lenti al variare della lunghezza d'onda. A causa della dispersione la luce di lunghezze d'onda differenti si focalizza in punti diversi. L'aberrazione cromatica non concerne gli specchi, e nelle lenti non si presenta quando si usa luce monocromatica.

Le **aberrazioni di tipo assiale**, ovvero le **aberrazioni di sfericità**, si presentano quando certi raggi di luce incidenti sul sistema ottico sono troppo distanti dall'asse ottico e risentono della forma sferica di lenti e specchi, in condizioni in cui non è valida l'approssimazione parassiale.

Le **aberrazioni di tipo extra-assiale** si manifestano con luce proveniente da oggetti estesi (cioè tutti gli oggetti non puntiformi) e da oggetti non disposti sull'asse ottico.

Le **aberrazioni da curvatura di campo** si presentano quando l'immagine di un oggetto piano non è anch'essa piana ma si forma invece su una superficie curva.



Fisica della Visione

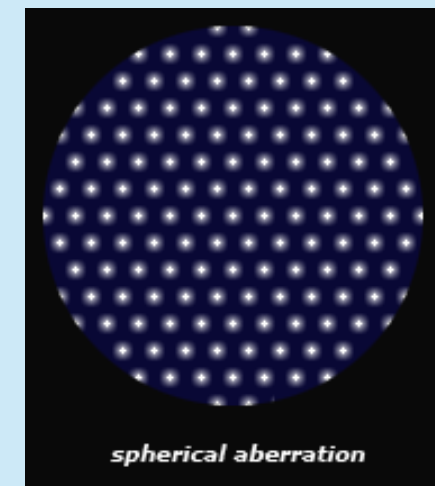
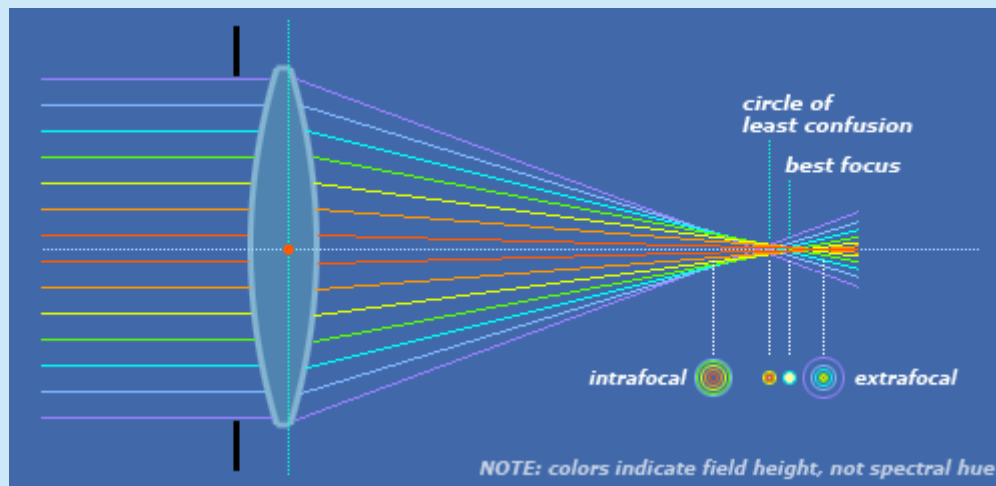
8



Aberrazioni monocromatiche

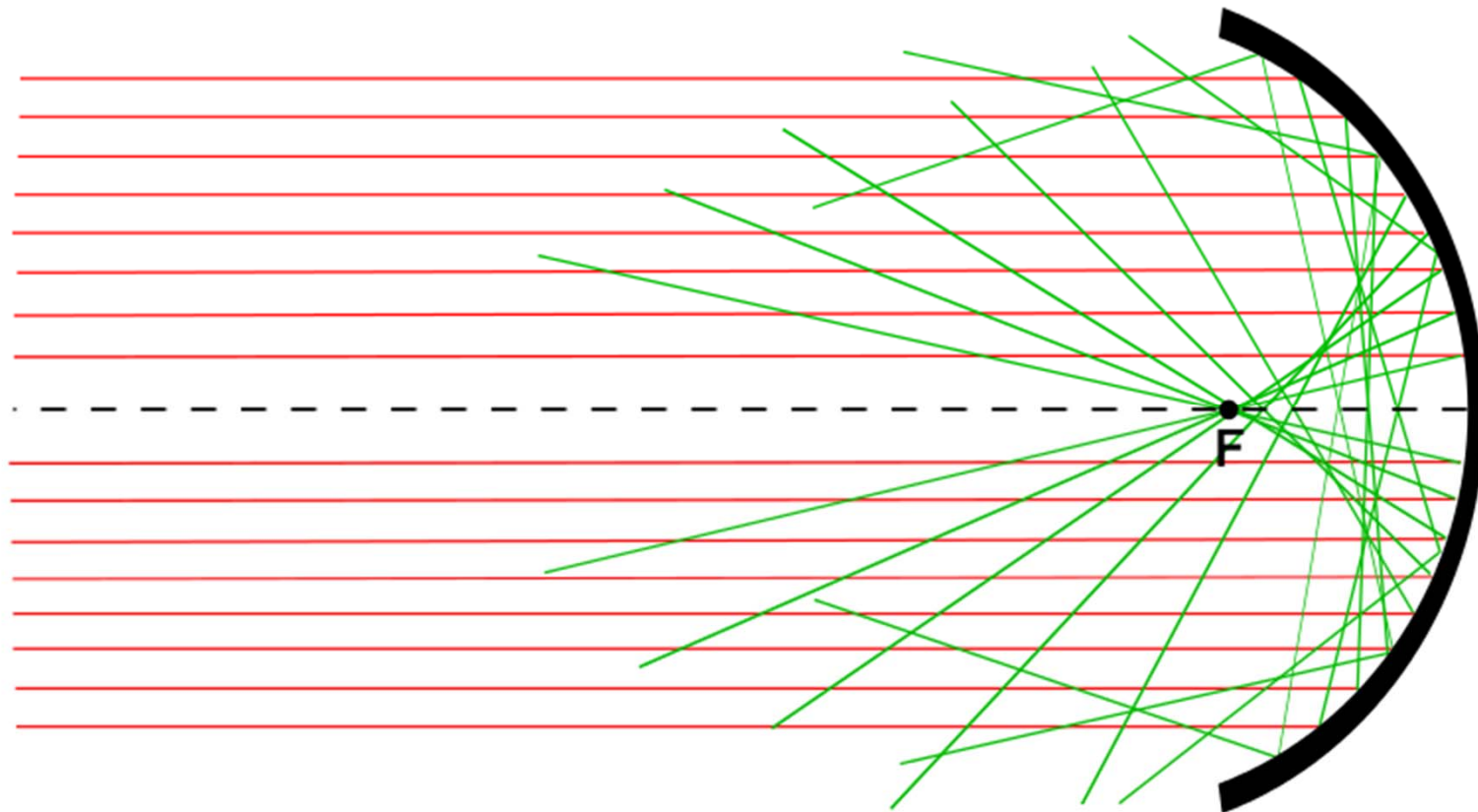
Aberrazione sferica

Più che essere dovute a difetti dei sistemi ottici, spesso le aberrazioni di tipo assiale si verificano perché la semplice teoria parassiale non è un modello sufficientemente preciso dell'effetto di un sistema ottico sulla luce. In particolare l'aberrazione sferica può essere definita come l'allontanamento delle prestazioni di un sistema ottico dalle previsioni dell'ottica parassiale.



NOTA: i colori riportati nell'immagine a fianco rappresentano la posizione di un raggio, da centrale (rosso) a periferica (violetto), e non sono tinte spettrali.

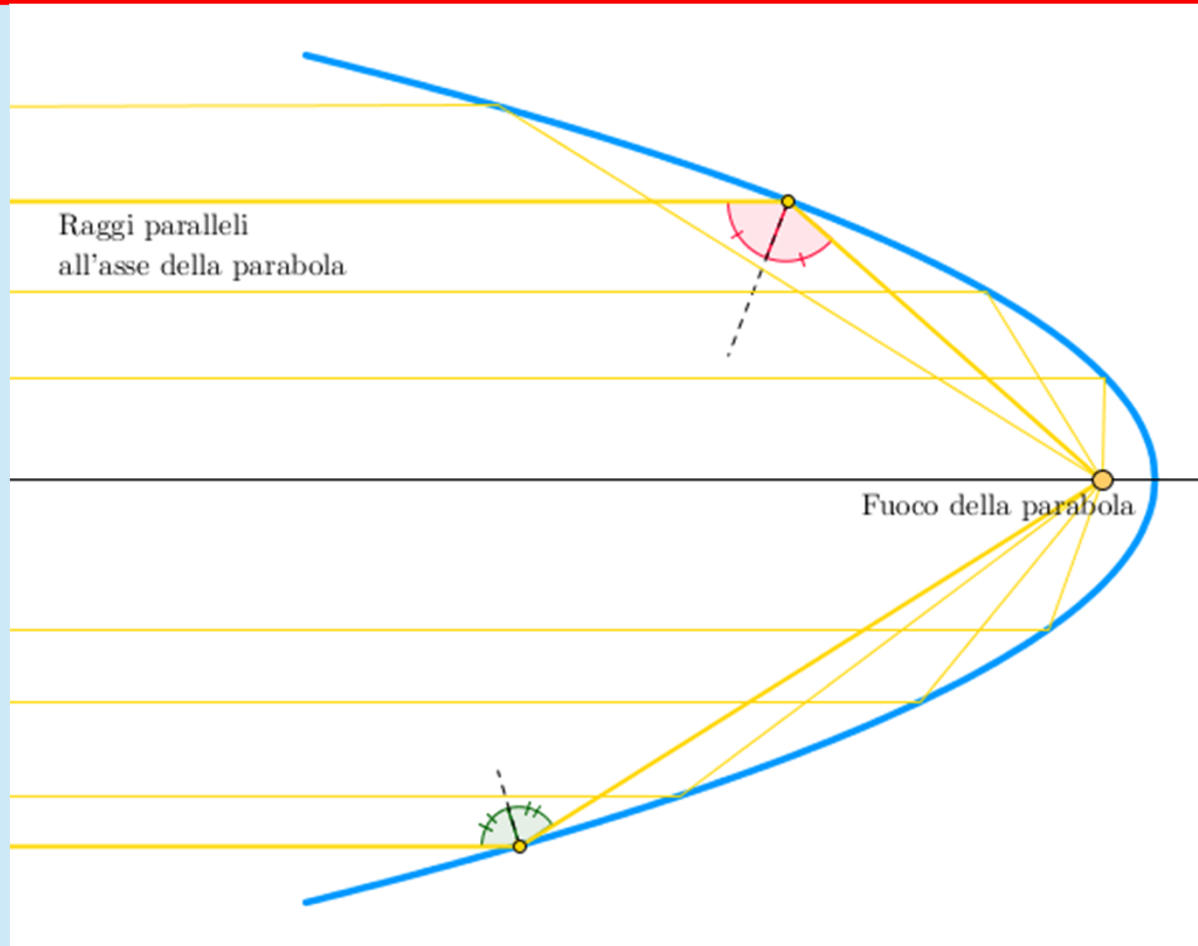
Aberrazioni monocromatiche



Riflessione di un fascio di raggi paralleli in uno specchio sferico

I raggi incidenti (in rosso) lontani dall'asse ottico dello specchio producono raggi riflessi (in verde) che non passano per il fuoco. Questo effetto è causato dall'*aberrazione sferica*.

Aberrazioni monocromatiche



Riflessione di un fascio di raggi paralleli in uno specchio parabolico

Tutti i raggi incidenti paralleli all'asse ottico producono raggi riflessi che passano per il fuoco. In questo componente ottico *l'aberrazione è assente*.



Fisica della Visione

11

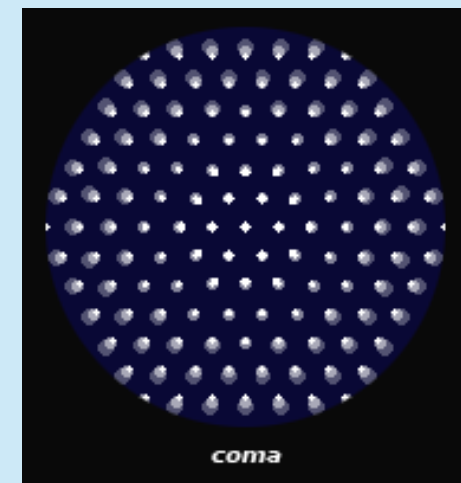
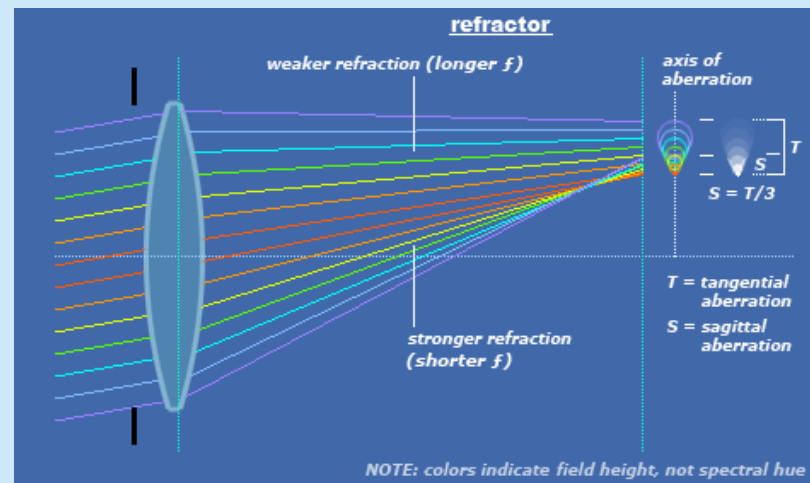


Aberrazioni monocromatiche

Aberrazione da coma

L'aberrazione da coma è denominata così a causa del caratteristico aspetto *a cometa* delle immagini create dai sistemi ottici con tale difetto. La *coma* può apparire quando i raggi paralleli provenienti da un oggetto lontano formano un angolo ϑ rispetto all'asse di una lente. I raggi che passano per il centro della lente sono focalizzati sul piano focale a una certa distanza dall'asse, i raggi che passano in periferia sono focalizzati invece a distanze diverse dall'asse, più lontano in caso di coma positiva e più vicino in caso di coma negativa. In generale, un fascio di raggi passanti per la lente a una certa distanza dal centro è focalizzato in una forma ad anello sul piano focale. La sovrapposizione di questi diversi anelli di grandezza crescente origina una forma a V, simile alla chioma di una cometa (in latino *coma* = chioma), la cui punta è rivolta verso l'asse del sistema ottico.

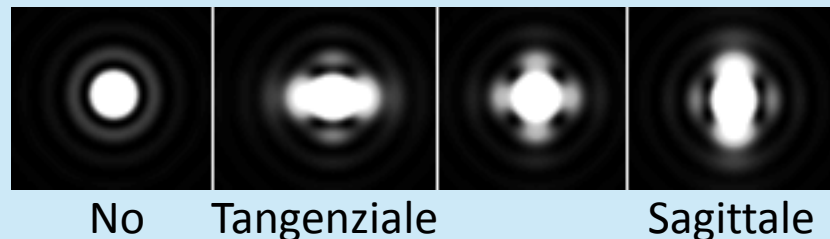
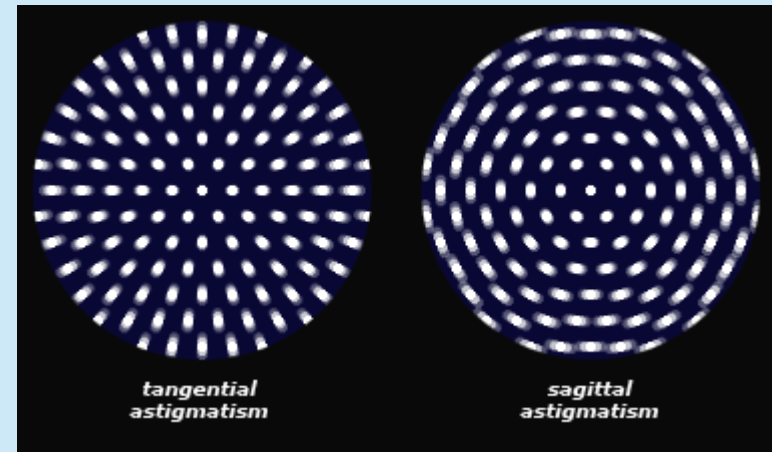
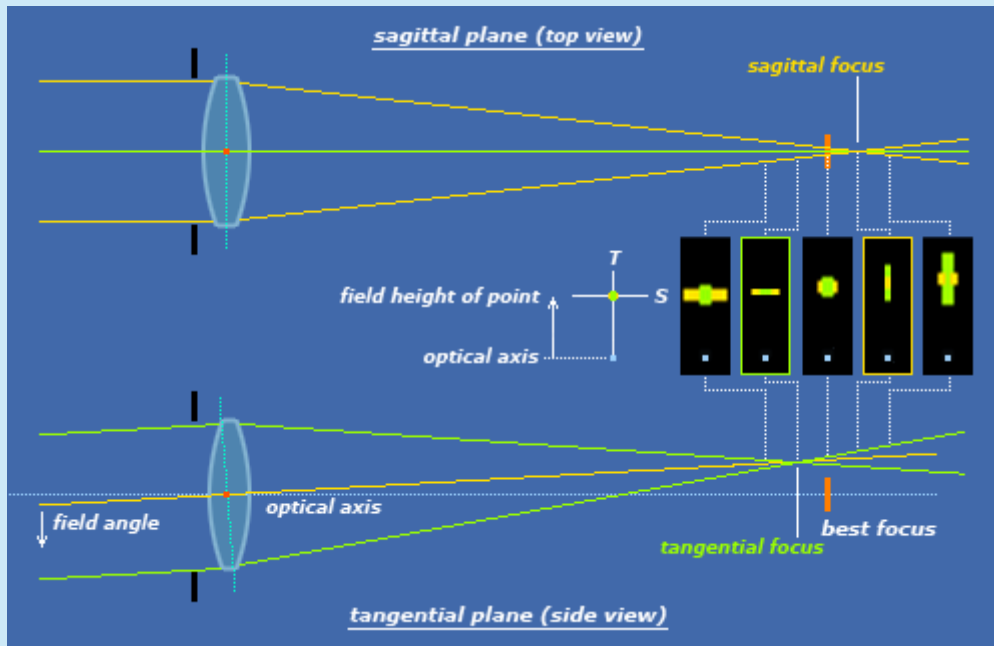
NOTA: i colori riportati nell'immagine a fianco rappresentano la posizione di un raggio, da centrale (rosso) a periferica (violetto), e non sono tinte spettrali.



Aberrazioni monocromatiche

Aberrazione da astigmatismo

L'aberrazione da astigmatismo si manifesta in sistemi ottici composti da una o più lenti. È di notevole importanza e torneremo a parlarne diffusamente in seguito.





Fisica della Visione

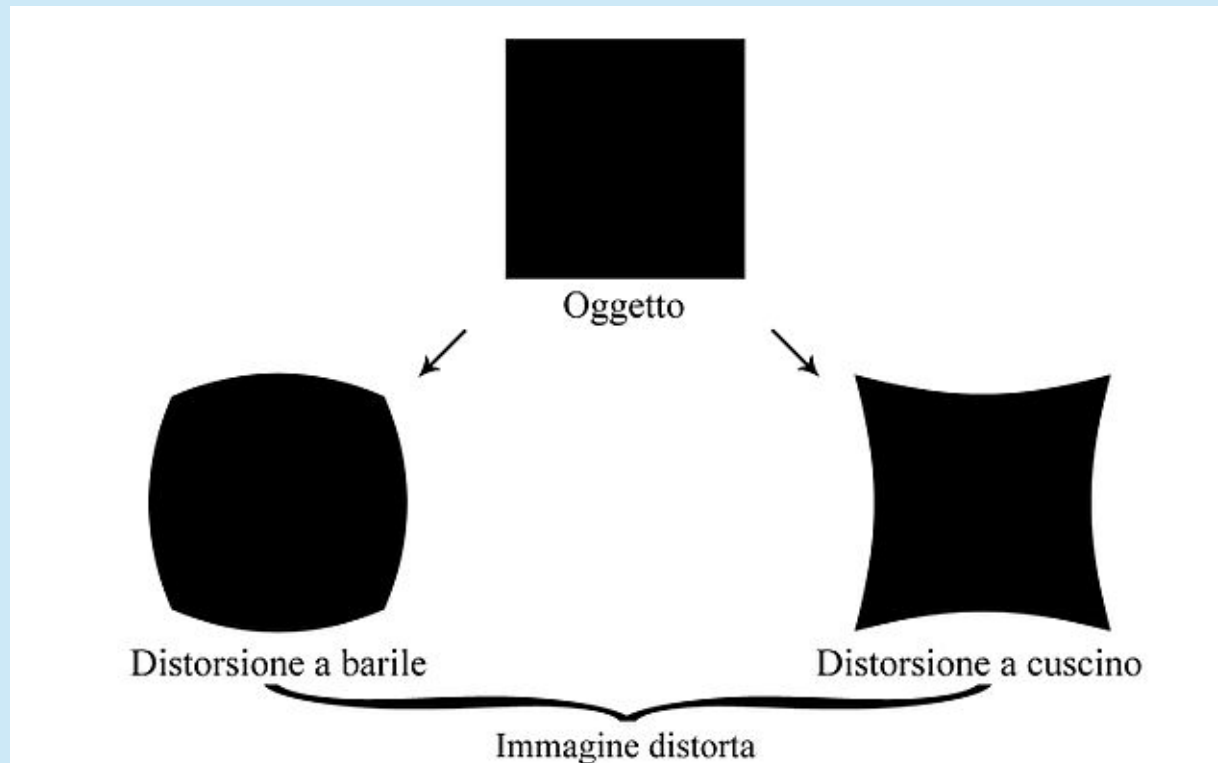
13



Aberrazioni monocromatiche

Aberrazione da distorsione

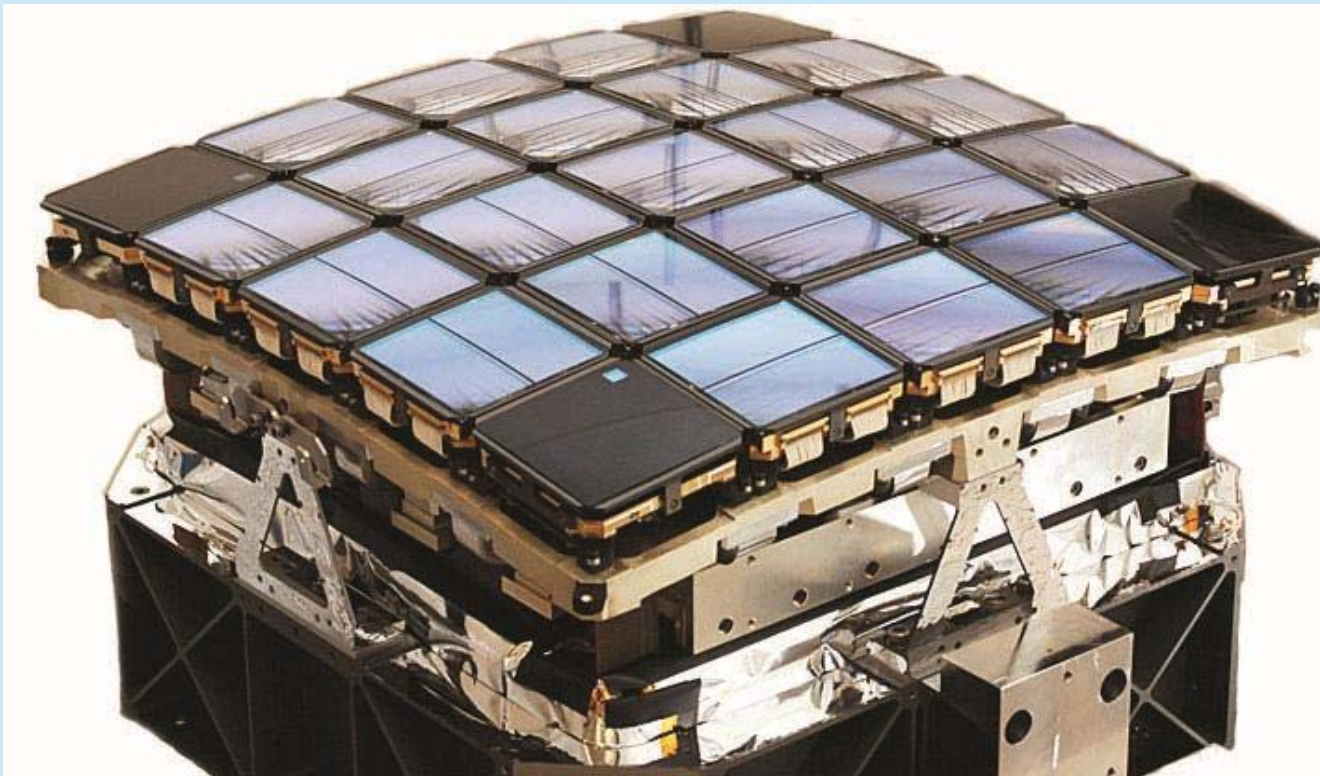
L'aberrazione da distorsione influenza solo la forma dell'oggetto ed è dovuta alle caratteristiche del sistema ottico in uso, che, avendo un certo spessore fisico (anche variabile), può allontanarsi dalla teoria della lente sottile. Fisicamente l'effetto è dovuto alla differente potenza d'ingrandimento delle varie parti del sistema ottico, che in genere varia radialmente rispetto alla distanza dall'asse ottico.



Aberrazioni monocromatiche

Aberrazione da curvatura di campo

L'aberrazione da curvatura di campo è dovuta al fatto che l'immagine di un oggetto piano, cioè l'insieme di raggi provenienti dai punti di un oggetto esteso ortogonalmente rispetto all'asse ottico, va a formarsi su una superficie non piana. Lo scostamento di tale superficie curva rispetto al piano immagine ideale viene definito curvatura di campo.



Per poter compensare l'aberrazione da curvatura di campo, il sensore CCD composto da 95 Megapixel del telescopio spaziale Kepler (*che ha scoperto diverse migliaia di pianeti al di fuori del sistema solare*) ha una superficie ricurva che si adatta all'aberrazione del sistema ottico.



Fisica della Visione

15



Aberrazione da astigmatismo

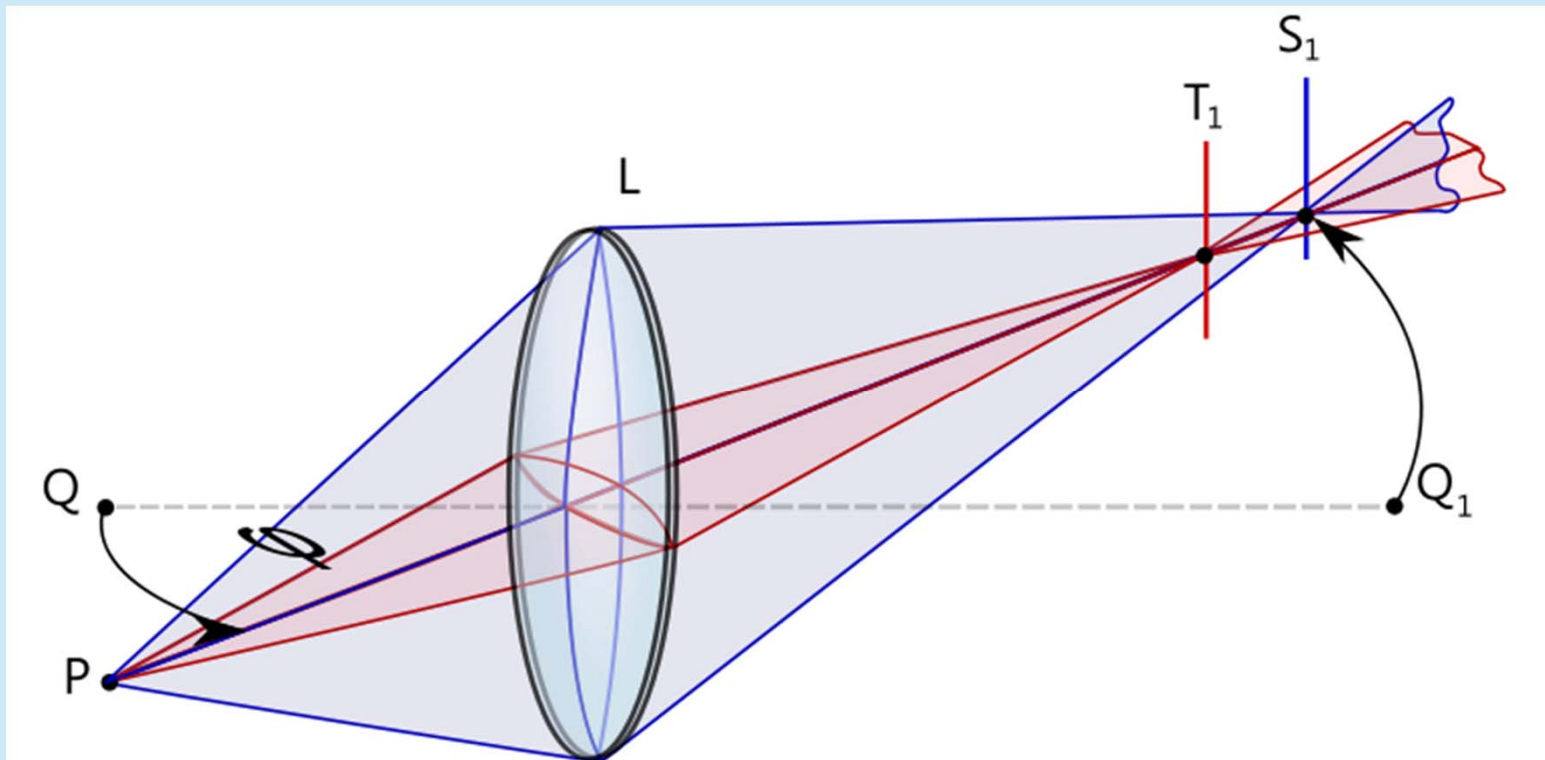
Un sistema ottico in cui c'è aberrazione da **astigmatismo** è caratterizzato dal fatto che raggi che si propagano in due piani perpendicolari hanno fuochi differenti. Se si usa un sistema ottico astigmatico per formare l'immagine di una croce, le linee orizzontale e verticale saranno a fuoco a distanze differenti. Il termine viene dal greco, dove il prefisso "a" sta per una negazione e la parola $\sigma\acute{\iota}\gamma\mu\alpha$ (*stigma*) significa "segno, punto, buco".

Nei sistemi ottici non stigmatici esistono due tipi distinti di astigmatismo.

Il primo tipo, detto **astigmatismo dei fasci obliqui**, si presenta con oggetti (o parti di oggetti) non posti sull'asse ottico. Questo tipo di aberrazione può comparire anche quando il sistema ottico è idealmente simmetrico per rotazioni intorno all'asse ottico. In genere, infatti, possono esserci piccole asimmetrie dovute a imperfezioni dei componenti elementari del sistema ottico. Spesso ci si riferisce a questo caso chiamandolo "aberrazione astigmatica monocromatica", perché si presenta anche con luce di una sola lunghezza d'onda, ma questa terminologia è in parte imprecisa perché l'entità dell'aberrazione può variare molto con la lunghezza d'onda della luce che si propaga nel sistema ottico.

Aberrazione da astigmatismo

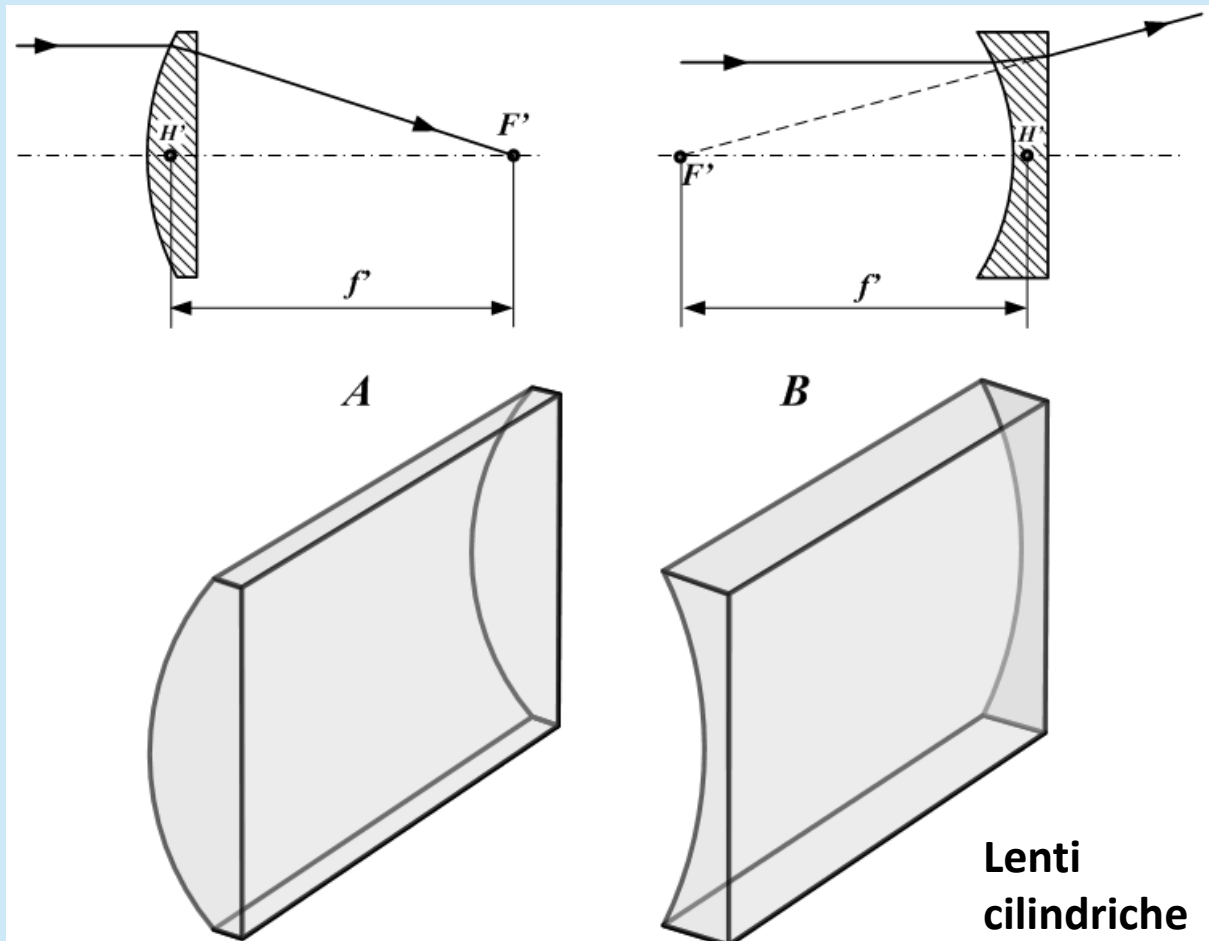
Nell'analisi dell'**astigmatismo dei fasci obliqui** si considerano raggi che partono da un dato punto P dell'oggetto. Essi si propagano nel piano tangente (in rosa) che comprende il punto P e l'asse della lente QQ_1 , e nel piano sagittale (in grigio) ortogonale al piano tangente e passante per P e per la pupilla d'ingresso (in questo caso l'intera lente). Se c'è questo tipo di astigmatismo, i raggi che si propagano nel piano tangente (raggi trasversali) e nel piano sagittale (raggi sagittali) vanno a concentrarsi in punti differenti T_1 e S_1 .



Aberrazione da astigmatismo

Il secondo tipo di astigmatismo, detto **astigmatismo di sistema rotazionalmente asimmetrico**, si presenta quando il sistema ottico non è simmetrico intorno all'asse ottico. Questo può avvenire per progetto (come nel caso di lenti cilindriche), o può essere dovuto a errori di lavorazione delle superfici dei componenti o a un loro possibile disallineamento.

Questo caso si differenzia dal precedente perché si osserva l'astigmatismo anche per raggi che provengono da una sorgente posta sull'asse ottico. Questo tipo di astigmatismo è di vitale importanza nella scienza della visione e nella cura degli occhi, perché l'occhio umano spesso si presenta con questa aberrazione a causa di imperfezioni nella forma della cornea o del cristallino.



Lenti cilindriche