

## O5 - LE ABERRAZIONI delle LENTI

Per “aberrazione” intendiamo qualsiasi differenza fra le caratteristiche ottiche di un oggetto e quelle della sua immagine, creata da un sistema ottico. In altre parole, ogni difetto della lente. Si esclude però da questo concetto l'errore accidentale, di fabbricazione o di utilizzazione, come pure qualunque effetto della natura ondulatoria della luce (diffrazione, ecc.).

L'argomento è un po' complesso, ma ci limiteremo qui ad alcune osservazioni pratiche. Per comprendere bene quello che illustreremo, sarebbe però assai utile leggere quel poco di teoria che si trova nel cap. 13 del manuale “Problemi tecnici della microscopia...”, presente in questo sito, oppure qualche trattato di fisica od i testi di ottica citati nella Premessa alla serie degli articoli.

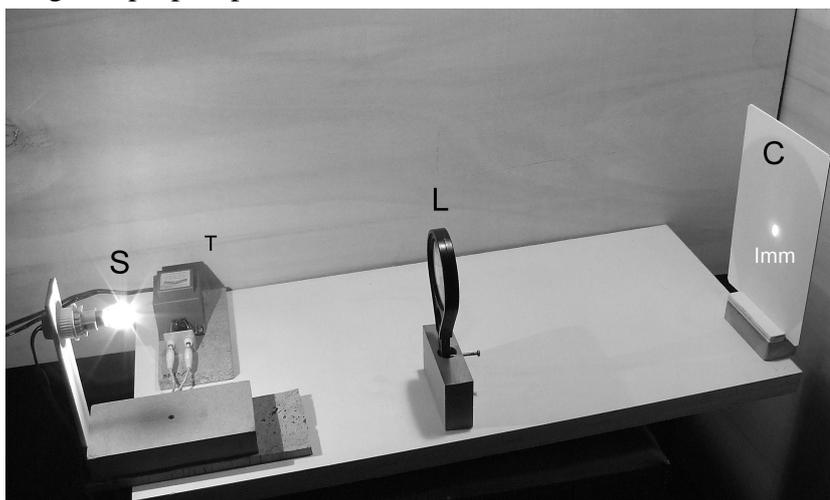
Essendo a portata di clic almeno uno dei testi indicati, non ci ripeteremo e daremo per scontata la conoscenza dei termini di base; in particolare, per brevità, non diremo, ad es., “aberrazione sferica” o “aberrazione cromatica” ma semplicemente “sferica” o “cromatica”. Così come diremo spesso “loupe” invece di “lente d'ingrandimento”.

Cominciamo dal riprendere una disposizione già vista nella fig. 45, nell'articolo O3. Sostenemmo che, per quel caso, conveniva utilizzare un obiettivo da binocolo al fine di ottenere un'immagine più nitida. Riprendiamo lo stesso schema, ma con una normale lente d'ingrandimento (loupe), come in fig. 69, proprio per renderne evidenti le aberrazioni.

Fig. 69

Una “loupe” (L) è posta a metà strada fra una lampadina (S) a filamento concentrato (fig. 7 ed 8, in O1) e lo schermo (C). L'ingrandimento in queste condizioni è circa “unitario” (= in grandezza naturale).

In T il trasformatore 12 V, 30 W, che alimenta la lampadina.



Qui, invece della lampadina “da frigo” a filamento esteso (fig. 44 in O3), abbiamo reintrodotta la lampadina per auto (12 V, 21 W), che avevamo usato per molte altre esperienze (fig. 7 in O1). Si tratta di avere un oggetto di piccolo spessore e quindi un'immagine che potrebbe essere tutta a fuoco.

Se ora guardiamo da vicino l'immagine (Imm) visibile sullo schermo C, vedremo che essa non è nitida, e si noti che la foto è ancora in bianco e nero, ancora per ignorare gli effetti del colore. Spostando avanti ed indietro lo schermo, si potrà avere un'immagine parziale del filamento della lampadina, ma circondato da un forte alone: in fig. 70 si vede quest'effetto, in cui i raggi più vicini all'asse (“parassiali”) creano un'immagine parziale, ma i raggi passanti per la periferia della lente (“marginali”) non s'incontrano, non focalizzano, sullo stesso piano e creano un forte alone sfumato. In fig. 71 si è posto lo schermo più vicino alla lente, ma non si riesce comunque ad avere un'immagine nitida, poiché questa volta sono i raggi parassiali a creare un forte alone.

È questo il segno distintivo della **sferica**: al variare dell'apertura<sup>47</sup> varia la focale e quindi la posizione del fuoco; ad ogni zona della lente corrisponde un diverso fuoco e non si avrà mai una posizione di fuoco ottimale. La sferica si verifica su tutto il campo immagine, magari sovrapponendosi ad altre aberrazioni che vedremo; essa non è indipendente dalla lunghezza

<sup>47</sup> Semplificando, al variare dell'inclinazione dei raggi rispetto all'asse, o, piuttosto, al variare della zona della lente attraversata dalla luce ... intendendo per “zona” una porzione anulare centrata della lente stessa.

d'onda della radiazione impiegata, ma si verifica anche con luce monocromatica.

Nell'obbiettivo da binocolo che abbiamo usato nelle figg. 45 e 46, questa aberrazione è ragionevolmente corretta e può fornire immagini senza alone apprezzabile, come in fig. 72, la quale è ottenuta con una disposizione identica a quella di fig.69, semplicemente cambiando lente. La lente di fig. 69 è "semplice" o "singoletto": è formata da un singolo elemento; la lente usata per le figg. 45, 46 e 72 è un "doppietto", una combinazione di due lenti di diverso vetro, progettata proprio per minimizzare le aberrazioni.

Fig. 70 e 71

Vediamo qui gli effetti della "sferica". L'immagine del filamento della lampadina è appena visibile col "fuoco lungo" (a sinistra), dove si incontrano i raggi meno inclinati ("parassiali"). Con la foceggiatura "corta" (a destra) il fuoco parassiale scompare e crea un largo alone che copre un'eventuale immagine creata dai raggi più inclinati (marginali).

Si noti che queste immagini non sono rotonde, ma allungate verticalmente, per la buona ragione che anche il filamento è allungato verticalmente.

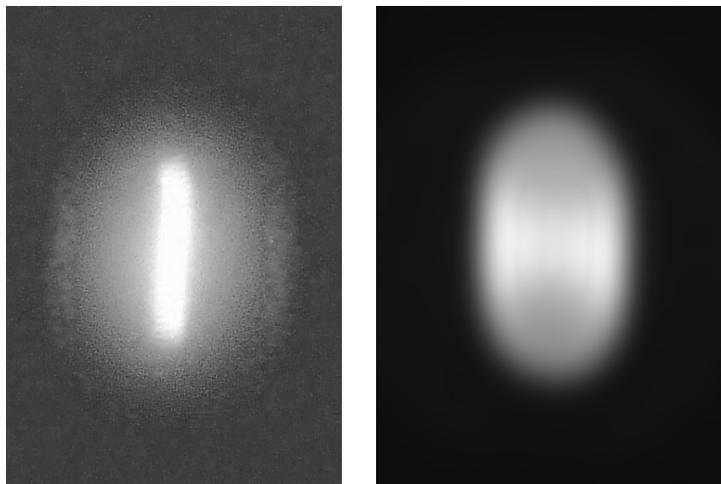


Fig. 72

La stessa immagine delle due figure precedenti, ottenuta dalla stessa disposizione sperimentale, ma usando un obbiettivo da binocolo, un "doppietto" corretto, invece di una lente semplice. Il confronto dimostra che, con una scelta opportuna del tipo di vetro ottico e dei parametri geometrici delle lenti (curvatura delle facce, spessore, distanza fra le lenti) si migliorano assai le cose.

Si può capire da queste immagini la differenza di prestazioni fra una lente semplice ed una lente "corretta".

Questa "correzione" delle lenti è stata ottenuta solo verso la fine del 1700 in Inghilterra per gli obbiettivi da cannocchiale; occorse qualche decennio per ottenerla negli obbiettivi da microscopio i quali, essendo assai più piccoli, sono molto più difficili da lavorare.

Fu per preparare il presente esperimento che si consigliò fin dal primo articolo lo smontaggio di un binocolo.



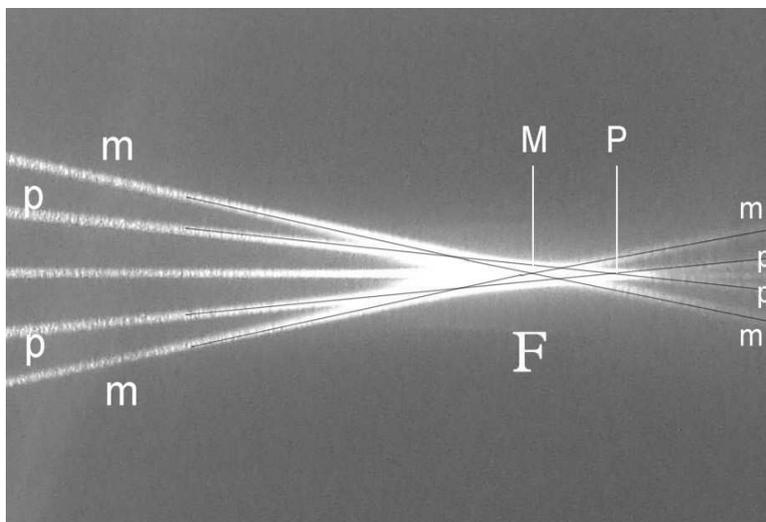
Per meglio interpretare le figure 70 e 71, può essere utile ritornare alla fig. 41, nell'articolo O3; lì si vedeva una lente semplice (loupe) che convergeva i cinque fasci paralleli prodotti dalla lente a fessure (ricordate la fig. 9, in O1 ?). In fig. 41 s'indicò semplicemente il punto di convergenza dei cinque fasci con la lettera F, ma non era esatto.

Fig. 73

Dato un insieme di cinque fasci paralleli, una lente convergente semplice (non "corretta") li fa convergere non in un punto solo, ma in tanti punti quanti sono i valori di apertura dei fasci. I fasci "marginali" s'incontrano in un "fuoco marginale" (M), che è più vicino alla lente in quanto, per essi, la focale è minore. I raggi "parassiali" s'incontrano più lontano, in P.

Per chiarire il percorso dei vari fasci, si è tracciata una riga nera su di essi (tranne che per quello centrale: esso è unico e non possiede un punto di focalizzazione definito).

NB: la figura arrotondata a doppio cono formata dall'involuppo di tutti i raggi del fascio si chiama "caustica".



Proviamo ad osservare da vicino cosa avviene sul cartone orizzontale, su cui i cinque fasci

lasciano una traccia: in fig. 73 sono stati evidenziati i due raggi “marginali” (m), che attraversano l’orlo della lente a fessure e della loupe che la segue; con (p) si sono invece evidenziati due raggi “parassiali”, più vicini all’asse. Ebbene, i due raggi **m** si incontrano in un punto (fuoco marginale, M) che si trova più vicino alla lente (immaginiamola a sinistra, fuori figura); i raggi **p** si incontrano qualche mm più in là, in P. Il fuoco F che avevamo indicato finora non esiste, o almeno vi sono tanti fuochi quanti sono i valori di apertura considerati.

La fig. 70 è stata quindi ripresa con lo schermo di cartone nel piano passante per P, dove si nota una parziale concentrazione dei raggi **p**, mentre la fig. 71 mostra l’immagine raccolta nel piano M, dove non esiste un’immagine definita. Se vogliamo, la fig. 73 mostra una sezione longitudinale, passante per l’asse, del fascio prodotto dalla loupe, mentre le figg. 70 e 71 mostrano due sezioni trasversali in corrispondenza dei piani passanti per i punti P ed M della fig. 73.

**La cromatica.** Chiarite alcune manifestazioni della sferica, chiediamoci ora cosa succede se si usa una radiazione policromatica<sup>48</sup>, come ad es. la luce bianca, composta più o meno da tutti i colori dello spettro. Succede che, variando  $\lambda$ , variano un poco tutte le figure prodotte dalla sferica, ovvero si formano tante figure di sferica leggermente diverse quante sono le lunghezze d’onda in gioco.

Facile verificarlo. Prepariamo il nostro dispositivo come in fig. 69, poco più su. Sostituiamo lo schermo verticale in cartone bianco (C) con uno orizzontale, come si vede in fig. 74, ma con la cura di regolare bene l’altezza di tale schermo e di sollevarlo di un paio di mm sulla destra.

In fig. 74, ancora una volta, vedremo una sezione longitudinale del fascio e la macchiolina che si vedeva sullo schermo verticale in fig. 69 appare allungata come in fig. 73. Ma stavolta la foto va vista a colori, e vedremo qualcosa di nuovo, come appare in fig. 75. Vediamo che i vari colori delle luce bianca non sono distribuiti uniformemente: nelle varie regioni della figura compaiono bordi colorati.

Fig. 74

Una lente semplice L (una “loupe”) produce in F un’immagine reale leggermente impiccolita del filamento della lampadina S. Poiché lo schermo è sub-orizzontale, il fascio appare allungato.

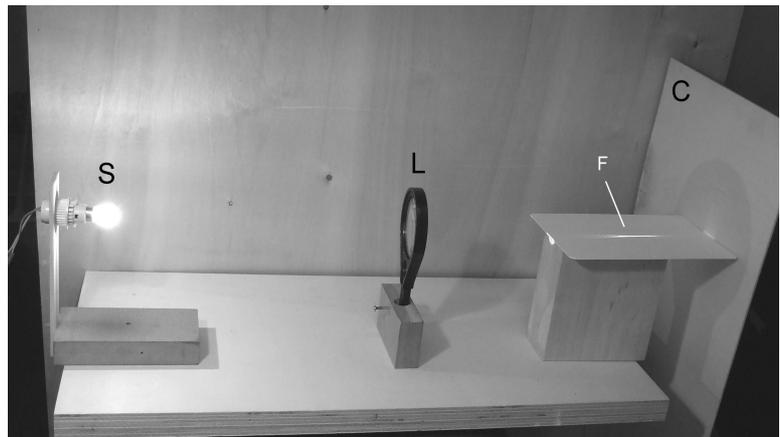
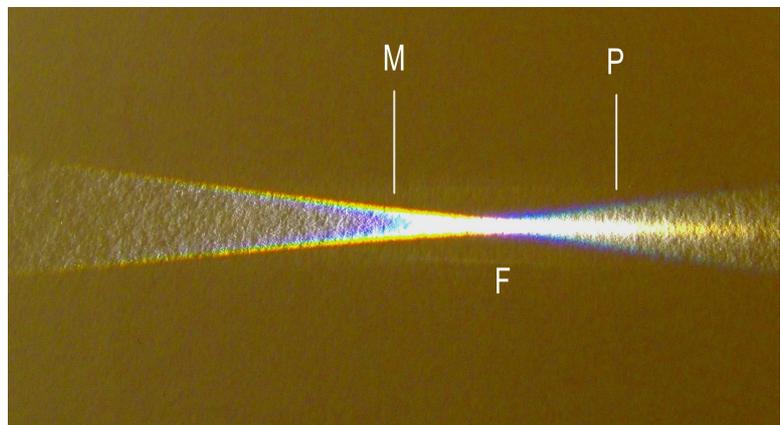


Fig. 75

La figura che si forma è dovuta anche alla sferica, e quindi somiglia alla figura 73 ma, fotografando a colori, appaiono anche gli effetti della “dispersione dell’indice”, e quindi della variazione della focale della lente al variare di  $\lambda$  (“aberrazione cromatica”). Le due aberrazioni si sovrappongono.

Il fondo giallastro della foto è dovuto all’illuminazione artificiale dell’ambiente.



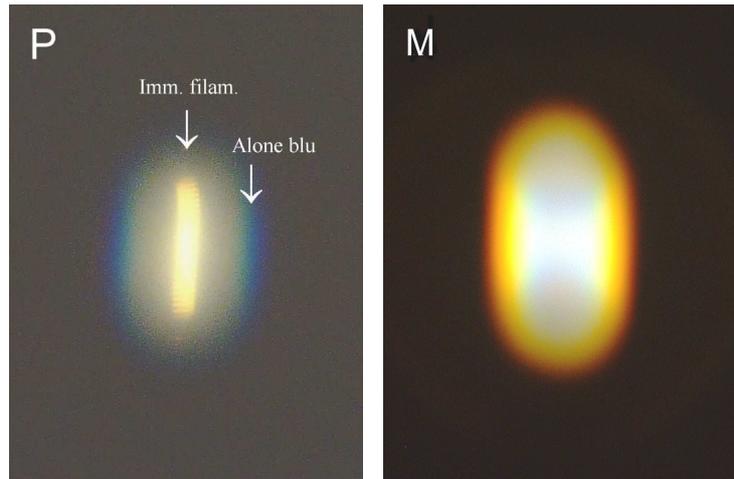
Proviamo ora a mettere uno schermo verticale in corrispondenza dei piani passanti per M e P della fig. 75. Vedremo due figure come la 70 e la 71, ma con colori variamente distribuiti.

<sup>48</sup> cioè costituita da un miscuglio di vari colori o, per meglio dire, di varie lunghezze d’onda.

Confrontiamo le figg. 70/71 con le seguenti 76/77.

Fig. 76 e 77

Anche qui, due immagini allungate del filamento; a sinistra si è posto lo schermo sul fuoco parassiale P, e l'alone contiene una prevalenza di raggi blu che, per il maggior valore dell'indice corrispondente a minori lunghezze d'onda, s'incrociano prima e sono divergenti rispetto agli altri. A destra, lo schermo è stato posto sul piano M ed i raggi "rossi", meno rifratti (minore indice) non si sono ancora focalizzati e prevalgono nell'alone.



Vediamo che l'immagine è ancora poco nitida, ma non si tratta più di sola sferica: col variare di  $\lambda$  varia l'indice di rifrazione, quindi la focale della lente e quindi la posizione del fuoco o del punto di convergenza. Nella fig. 76 la regione centrale è quasi bianca, ma i raggi blu-viola, essendo maggiormente rifratti, s'incontrano prima (più vicino alla lente), poi divergono e si portano nell'alone. La fig. 77 invece è ancora bianca al centro, ma i raggi rossi (minore indice, maggiore focale) non si sono ancora focalizzati e si trovano alla periferia.

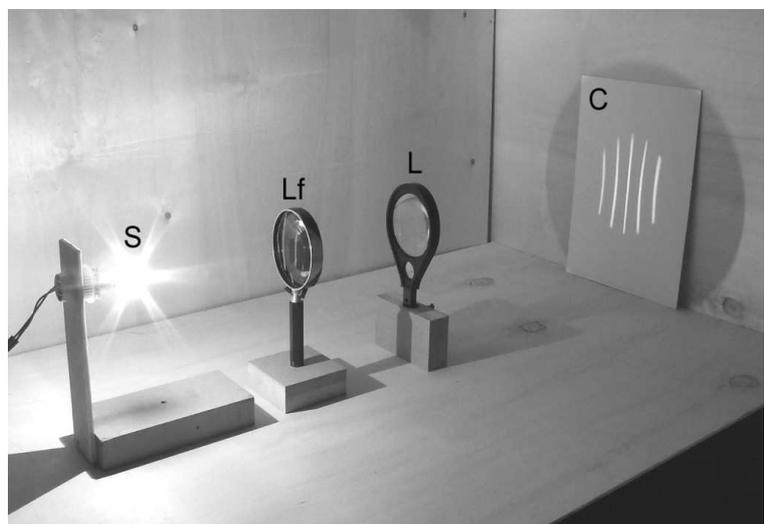
Se, per riprendere queste foto, avessimo usato una lente "corretta" (l'obbiettivo da binocolo) avremmo avuto una foto come in fig. 72 la quale, pur essendo stata ripresa a colori, non mostra apprezzabili bordature colorate. Prima dell'invenzione dell'"acromatismo" (fine '700), in altre parole quando gli obbiettivi da cannocchiale erano fabbricati con lenti semplici, un fanale di notte sarebbe apparso nel cannocchiale come in fig. 76 o 77 (si poteva scegliere fra le due variando la messa a fuoco) mentre, dopo gli inizi dell'800, la stessa immagine cominciò ad apparire come in fig. 72. Questo indica cosa ha potuto fare il progresso dell'ottica, lo sforzo degli scienziati e quello dei tecnici.

Da quanto detto, dovrebbe risultare chiaro che la "cromatica" deriva da una variazione (dispersione) dell'indice in funzione della lunghezza d'onda  $\lambda$ , quindi da una variazione della focale di una lente, quindi da una variazione della posizione dell'immagine. Infatti, le figg. 76 e 77 sono state riprese ponendo lo schermo a diversa distanza dalla lente. Questa è la "cromatica longitudinale" o "assiale".

Ma, se varia la focale, varia anche l'ingrandimento. Questo significa che un oggetto piccolo al centro del campo non viene deformato ma, se è grande ed occupa i margini, verrà rappresentato da tanti oggetti di diversa grandezza quante sono le lunghezze d'onda presenti. In altri termini, un oggetto chiaro periferico appare come un piccolo spettro. Si parla ora di "cromatica laterale". La prova?

Fig. 78

Un dispositivo per mettere in evidenza la "cromatica laterale" o "trasversale". La solita lampadina da auto (S) a filamento concentrato (12 V, 21 W), la solita lente a fessure (Lf), la solita loupe (L) ed il solito cartone bianco verticale (C).



In fig. 78 una semplice disposizione in cui la lente a fessure Lf concentra la luce della sorgente S su una seconda lente d'ingrandimento (L). La lente L produce un'immagine reale

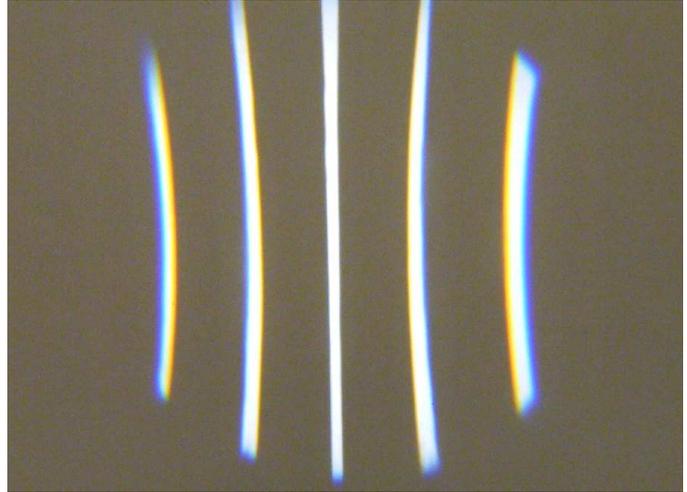
leggermente ingrandita della lente  $L_f$  sullo schermo  $C$ . In  $C$  si vede infatti l'immagine delle cinque fessure create dalle strisce di scotch sulla lente  $L_f$ .

Se però si guarda attentamente questa immagine a cinque linee (fig. 79), si nota che la striscia centrale è perfettamente "acromatica", senza colori, mentre quelle laterali sono bordate di rosso all'interno (minore indice, maggiore focale, minore ingrandimento) e di blu-viola all'esterno (maggiore ingrandimento). Con la cromatica assiale cambia la distanza dell'immagine, con la cromatica laterale cambia l'ingrandimento. Due effetti diversi della stessa causa: la dispersione dell'indice.

Fig. 79

La cromatica laterale di una lente semplice fa sì che un oggetto (in questo caso, una fessura della lente  $L_f$  ai margini del campo) appaia più grande a bassa lunghezza d'onda (blu-viola) e più piccola all'estremo opposto dello spettro. Un oggetto puntiforme situato sull'asse non può mostrare quest'aberrazione, poiché le dimensioni della sua immagine sono in teoria nulle.

Si noti anche che le linee non al centro appaiono ricurve: un altro esempio di distorsione "a cuscinetto" (vedi sotto).



In tutte le esperienze descritte finora, abbiamo tacitamente supposto che la sorgente, il filamento della lampadina, fosse centrata rispetto all'asse ottico della lente. Abbiamo quindi considerato fasci il cui asse (si chiama in gergo "raggio principale") è parallelo all'asse della lente. Si può parlare di fasci "assiali", non "obliqui".

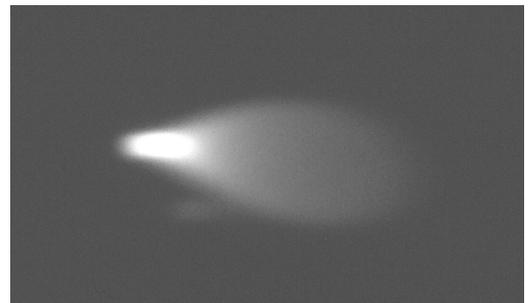
Ma ora riprendiamo la fig. 69 ed immaginiamo di spostare lateralmente la lampadina oppure di ruotare le lente attorno ad un asse verticale. Lavoreremo con fasci "disassati", obliqui rispetto all'asse della lente. La macchiolina "Imm" di fig. 69 a questo punto non sarà più rotonda, almeno nel caso nostro, che contempla una lente semplice. Sopravvengono in queste condizioni altre due aberrazioni.

La **coma** si manifesta colla formazione di un'immagine allungata in direzione radiale. Ma distinguiamo: noi lavoriamo con una sorgente (il filamento) che non è puntiforme e quindi, anche senza aberrazioni, la sua immagine non può che essere allungata, come nelle figure da 70 a 72, 76 e 77. La coma però, abbiamo detto, produce un'immagine allungata radialmente; ciò significa che, se la lampadina è spostata a destra, la figura delle coma si allunga orizzontalmente, verso l'asse della lente, mentre l'immagine geometrica del filamento è allungata verticalmente.

Fig. 80

Regolando con cura le distanze lampadina-lente e lente-schermo, nonché l'inclinazione della lente, si potrà osservare sullo schermo una figura del genere, in cui prevale la "coda" dell'immagine provocata dalla coma. L'asse della lente sta a destra, fuori figura.

NB: per evidenziare la "coda", si è usato un trucco: il filamento della lampadina è stato disposto orizzontalmente, invece che verticalmente come si è fatto in tutti gli altri casi.

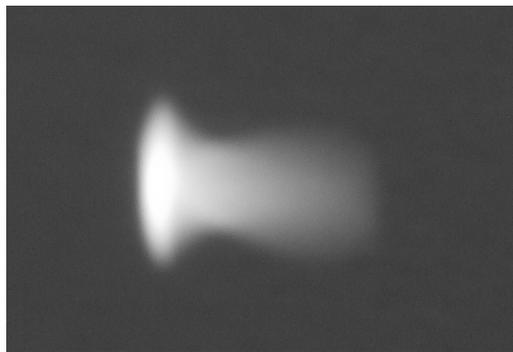


Invece l'**astigmatismo** forma due immagini di una sorgente "puntiforme" (o molto piccola): una più vicina ed una più lontana dalla lente, la prima allungata come la coma, verso l'asse della lente, l'altra "tangenziale", perpendicolare alla prima. Anche in questo caso, vista la forma allungata del filamento bisognerà distinguere la forma allungata dell'immagine ideale del filamento dalla figura allungata ("focalina") dell'astigmatismo. Per tentativi successivi, si dovrebbe vedere qualcosa come in fig. 81.

Fig. 81

Anche qui, per evidenziare la figura allungata prodotta dall'astigmatismo, occorrerà variare con pazienza le distanze fra le varie parti del sistema e l'inclinazione della lente.

Questa foto, come la precedente, è stata ripresa in bianco e nero per nascondere gli effetti della cromatica i quali, essendo sovrapposti agli effetti delle altre aberrazioni, renderebbero più complicata l'interpretazione della figura.



Sia la coma che l'astigmatismo si verificano solo per fasci inclinati; quindi non esistono al centro del campo immagine, "sull'asse". Si chiamano perciò "aberrazioni extra-assiali". È per questo motivo che si è dovuto inclinare la lente.

Si sarà notato che tutte le aberrazioni che abbiamo mostrato finora sono state rivelate in corrispondenza dell'immagine di un oggetto "piccolo", piccolo rispetto alle altre dimensioni del sistema (focale, diametro, distanze, campo, ecc.). Sarebbe stato più semplice discutere e sperimentare con una sorgente "puntiforme", senza dimensioni, ma abbiamo dovuto arrangiarci con oggetti facilmente reperibili, come una lampadina per auto.

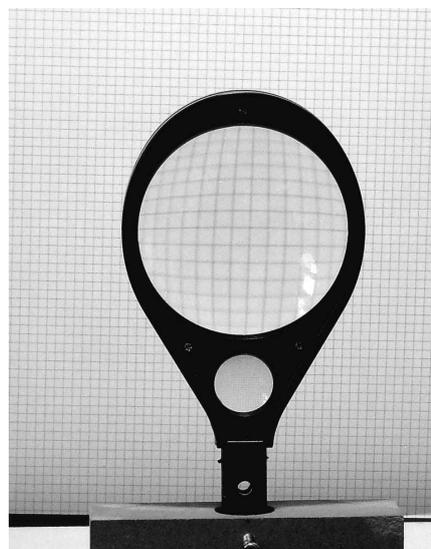
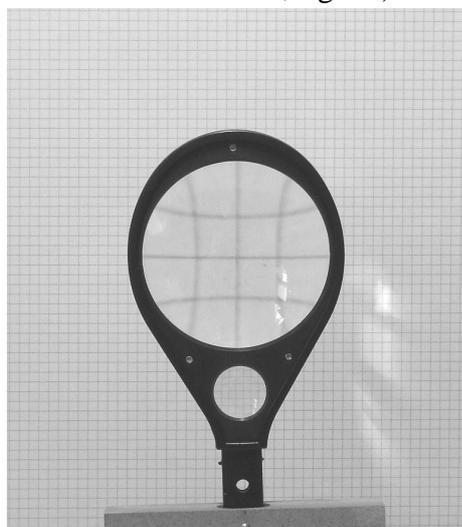
Tali aberrazioni, create nell'immagine di un oggetto "puntiforme", interessano tutti i punti (teoricamente infiniti) di cui si può immaginare costituito un oggetto qualunque, dotato di estensione, di dimensioni non nulle. Si possono globalmente chiamare "**aberrazioni del punto**" e si rivelano quindi per qualunque forma e qualunque dimensione dell'oggetto.

Ma immaginiamo di usare una lente ideale "corretta", cioè priva, di aberrazioni del punto. Se poniamo davanti ad essa un oggetto "esteso", non puntiforme, che forma avrebbe la sua immagine? Se la lente fosse davvero ideale, l'immagine da essa fornita dovrebbe essere geometricamente simile all'oggetto, cioè non deformata. Se l'oggetto è piano, anche l'immagine dovrebbe essere piana, e l'ingrandimento dovrebbe essere costante in qualunque punto dell'immagine. In altre parole, un oggetto quadrato dovrebbe produrre un'immagine quadrata. Ma così non avviene: saltano fuori le "**aberrazioni del piano**".

Già nell'articolo O3, parlando delle immagini reali e virtuali prodotte da una lente semplice (figg. 50 e 51), avevamo notato che certe linee che sono diritte nell'oggetto appaiono curve nell'immagine; altrettanto abbiamo notato nella fig. 79, qui sopra. Quest'aberrazione si chiama "**distorsione**" e consiste in una variazione dell'ingrandimento che, rispetto al centro dell'immagine (del campo immagine, cioè sull'asse), aumenta o diminuisce via via che ci si allontana dall'asse. Se aumenta, la figura appare dilatata verso i bordi ed un quadrato appare appuntito sui vertici (distorsione "a cuscinetto", fig. 82); se diminuisce, la figura si contrae ed i vertici si schiacciano (distorsione "a barilotto", fig. 83).

Fig. 82 e 83

Con un oggetto a struttura regolare, come una carta quadrettata, è facile rilevare una distorsione nell'immagine, "a cuscinetto" o "a barilotto".



Va notato che le figg. 82 ed 83 sono state riprese con lo stesso oggetto e la stessa loupe; viene spontaneo chiedersi come mai la stessa lente si comporta in maniera così diversa.

La spiegazione sta ancora una volta nelle diverse distanze. Nella fig.82, la lente si trovava

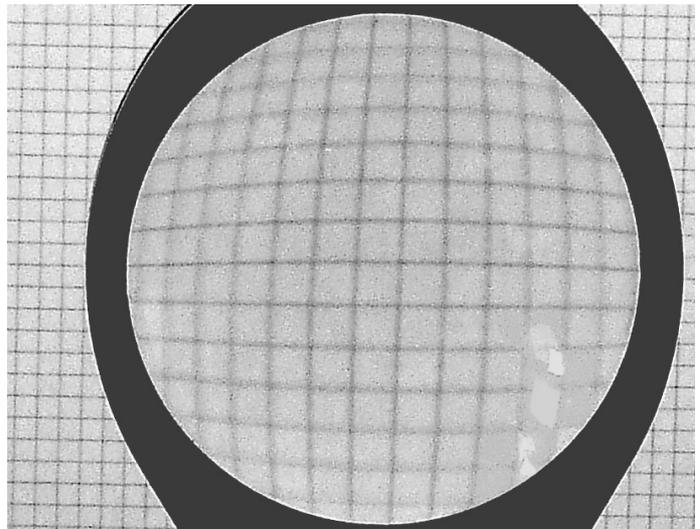
distante dal foglio di una lunghezza di poco inferiore alla focale della lente stessa; l'immagine che si forma in queste condizioni è virtuale e diritta. In fig. 83, invece, la lente distava dal foglio di più della focale e ne formava un'immagine reale e rovesciata. Armeggiando con la messa a fuoco ed il diaframma della fotocamera e con la distanza di questa dalla lente, si è riusciti a mettere (quasi) a fuoco entrambe le immagini ed in parte l'oggetto, che è in ogni caso più lontano.

Un'altra condizione cui deve soddisfare un'immagine (reale o virtuale) per essere geometricamente simile all'oggetto è che, se l'oggetto è piano, anche l'immagine sia piana. Una deviazione da questa situazione ideale rappresenta un'altra "aberrazione del piano", chiamata "**curvatura di campo**". Data la profondità di fuoco degli obbiettivi fotografici e dell'occhio, non è facile mettere in evidenza quest'aberrazione. Un'idea ci si può fare esaminando da vicino la fig. 83 (vedi la fig. seguente, che non è altro che un particolare della 83); si vedrà che l'immagine della carta quadrettata, visibile nella "loupe", è meno nitida sui bordi. Chi si occupa di microscopia ottica, conosce bene questo problema.

Fig. 84

L'immagine distorta della carta quadrettata, come può essere fornita da una lente semplice non corretta, mostra anche i segni della curvatura di campo: o si mette a fuoco nel centro, ed i bordi appaiono sfocati, oppure viceversa. Non esiste un fuoco unico per tutto il campo. Eppure l'oggetto è piano.

Una simile aberrazione non nuoce molto nell'osservazione visiva, dove l'occhio "accomoda", cioè mette a fuoco automaticamente; ma in fotografia l'effetto è deleterio.



Ecco dunque che, per semplici ragioni geometriche, vale a dire per il solo fatto di obbedire alle leggi della rifrazione, una lente semplice produce un'immagine affetta da molti difetti o "aberrazioni", e questo avviene anche escludendo qualunque difetto nei materiali, nella fabbricazione o nel montaggio della lente.

Vedremo in successivi articoli che, anche supponendo di aver corretto tutte le aberrazioni legate all'"ottica geometrica", compaiono in qualunque immagine ottica altri difetti legati a cause fisiche, e cioè alla natura ondulatoria della luce. Nessuna abilità di costruttore può evitare questi effetti; al massimo, conoscendone il meccanismo, si può cercare di minimizzarli. Stiamo parlando della diffrazione, dell'interferenza, ecc.

Ci occuperemo presto di "ottica ondulatoria".