

Art. n° 19 – **La COMPENSAZIONE dell’ASTIGMATISMO e della COMA**

Dal punto di vista della definizione, nell’immagine fornita da un obiettivo in genere, conta essenzialmente il “cerchio di confusione”. S’intende con questo termine l’immagine che l’obiettivo fornisce di ogni punto (geometricamente inteso, cioè senza dimensioni) esistente nell’oggetto. Più piccolo è questo “cerchio”, più definita, più nitida, sarà l’immagine complessiva.

Si suppone di andare a cercare questa immagine del punto oggetto sulla “superficie di miglior fuoco” (generalmente, non un piano): in altre parole, parliamo del “cerchio di minima confusione”, quello che si ottiene ottimizzando la messa a fuoco, punto per punto.

Al “cerchio di minima confusione” contribuisce la centrica o “immagine di diffrazione” o “immagine di Airy”, la quale dipende solo dall’apertura, e su quella si sovrappongono tutti i residui¹ delle “aberrazioni del punto”, così chiamate proprio perché influiscono sull’immagine di un oggetto puntiforme.

Su tutto il campo immagine esistono la sferica e la cromatica longitudinale: sono le **aberrazioni del punto “assiali”**.

In un microscopio, la sferica può essere controllata variando lo spessore della lamella e la lunghezza del tubo. Quando c’è, va benissimo il “collare di correzione”, spesso presente negli obiettivi con apertura superiore a 0,80.

Per la cromatica longitudinale, non esistono mezzi di correzione semplice, ma generalmente, negli obiettivi moderni, essa è irrilevante.

Invece, le **aberrazioni “extra-assiali”** sono quelle che si trovano solo sui margini del campo o, per essere più precisi, il cui valore cresce proporzionalmente alla distanza dall’asse od al suo quadrato: cromatica laterale (o CVD), coma ed astigmatismo.

Della CVD, esiste un metodo di “compensazione”. Dove l’obiettivo non è già corretto (acromatici deboli o sistemi “CF”), si tratta di trovare l’oculare “compensatore” più appropriato (vedi l’articolo n° 18: “Come controllare ...” sul sito www.funsci.com).

Della coma non esiste un metodo di correzione praticabile da parte dell’utilizzatore: ne parleremo fra poco.

E per l’astigmatismo?

Fissiamo alcune premesse.

• Il costruttore non parla volentieri di “compensazione” poiché, se lo facesse, ammetterebbe che i suoi obiettivi hanno un difetto che va “compensato”. Meglio non informare i clienti.

In particolare, non vengono mai date informazioni sulle aberrazioni in genere.

• Ogni “ricetta” di obiettivo consiste in un delicato equilibrio fra vari fattori, a volte conflittuali: abilità del progettista – disponibilità di particolari vetri ottici ed altre materie prime – costi di produzione – richieste del mercato – tempi di consegna.

• La stessa categoria di obiettivi, col tempo, va soggetta a variazioni della ricetta poiché varia col tempo la disponibilità delle materie prime, l’efficienza dei metodi di calcolo, la disponibilità economica per la produzione, ecc. La stessa ricetta va quindi soggetta ad evoluzione o involuzione.

• L’astigmatismo viene spesso nascosto da altre aberrazioni extra-assiali: coma e CVD. Lo si riconosce solo se il cerchio di confusione cambia la direzione di allungamento, da tangenziale a sagittale, nei dintorni della migliore messa a fuoco.

• L’astigmatismo, in particolare, è visibile solo sui margini del campo, dove l’utente

¹ Si chiama “residuo” di un’aberrazione ciò che resta di essa dopo un qualunque processo di correzione.

normale non guarda troppo. Per l'esattezza, considerando la lunghezza delle "focaline"² come criterio di giudizio, l'astigmatismo è proporzionale all'apertura numerica ed al quadrato del campo (distanza dall'asse).

•• Al residuo di astigmatismo dell'obbiettivo si aggiunge quello dell'oculare ed eventuali altri sistemi interposti. Solo nel caso dei tubi porta-oculari, se contengono solo prismi o specchi, si può dire che non è apprezzabile un contributo all'astigmatismo (la prova si può ottenere paragonando il residuo di astigmatismo che si osserva con un tubo semplice diritto al residuo di un tubo bioculare). Il contributo dei prismi alla CVD è invece sensibile.

Ma qui nasce una complicazione.

L'immagine data da un obbiettivo non è definibile con una superficie. Con un po' di astrazione, si può dire che vanno considerate tre superfici distinte:

1 – quella data dal calcolo della curvatura di campo (la "superficie di Petzval", che è funzione solo della curvatura delle superfici e dell'indice dei vetri interessati), una superficie ideale che si forma per ragioni semplicemente geometriche; è quella che resterebbe se l'astigmatismo venisse totalmente corretto;

2 – la "nappa"³ delle focaline "tangenziali", quei cerchi di confusione che, in una certa posizione del fuoco, appaiono come segmenti allungati in direzione tangente alla circonferenza del campo;

3 – la nappa delle focaline "sagittali", quei cerchi di confusione che, in un'altra posizione del fuoco, appaiono diretti secondo i raggi del campo (supposto circolare).

Può sembrare un assurdo che un'immagine vada rappresentata con tre superfici diverse, ma in pratica questo significa che il "cerchio di minima confusione" è solo la sezione più piccola di un fascio in cui coesistono, a diversi livelli, l'immagine di diffrazione, la sezione del fascio di convergenza geometrica ideale e le due focaline astigmatiche.

Ora, in una lente semplice, non corretta, la "nappa tangenziale" è la più ricurva, con la concavità verso la lente; la superficie di Petzval la meno ricurva; la nappa sagittale è intermedia.

In un sistema composto, più o meno corretto, le nappe possono avere altre curvature, anche convesse verso la lente, e trovarsi in diverso rapporto fra loro. L'ideale sarebbe che le tre superfici fossero più possibile piane e vicine fra loro e che la superficie di Petzval stesse a metà strada fra le due nappe.

Ebbene, visto che la posizione e la curvatura delle nappe non sono fisse ed il costruttore non ce ne informa, è impossibile sapere a priori qual è il miglior accoppiamento fra obbiettivo ed oculare e quale ne sarà il risultato. S'intende, dal punto di vista dell'astigmatismo.

A questo punto, non resta che il metodo sperimentale: combinare vari obbiettivi ed oculari e vedere cosa succede.

Il controllo va fatto con lo star test portato ai margini del campo visuale e con un oculare dotato di indice di campo di almeno 18 mm, il valore standard per gli oculari classici.

Nella tabella che segue sono illustrati i risultati di numerosi accoppiamenti obbiettivo-oculare.

Sono stati utilizzati i seguenti obbiettivi, tutti scelti perché presentano un proprio apprezzabile residuo di astigmatismo:

- 1) Zeiss Oberkochen, planare P 100/1,25 HI (che indicheremo d'ora in poi colla sigla "Zeiss Ob. P 100").
- 2) Nikon Planapocromatico 40/0,95 (a secco, a correzione) ("Nikon Papo 40").
- 3) Wild "Fluotar", semiapocromatico 40/0,75 ("Wild Fl 40")
- 4) Wild "Fluotar", semiapocromatico 20/0,60 ("Wild Fl 20")

² Vedi il manuale: "Problemi Tecnici della Microscopia Ottica", Cap. 13.2.5 e l'art. n° 18 ("Come controllare ed intervenire ...", pag. 34), sul sito "www.funsci.com".

³ "nappa" è un francesismo, sinonimo di "falda" o "superficie non piana". Qui serve ad indicare la superficie (generalmente paraboloidica, simmetrica attorno all'asse) su cui giacciono le focaline di un certo tipo.

- | | |
|--|------------------|
| 5) Wild acromatico 10/0,25 | ("Wild acr.10") |
| 6) Koristka acromatico 12/0,30 | ("Kor. acr. 12") |
| 7) Leitz EF 100/1,25 Öl (ad immersione omogenea) | ("Leitz EF 100") |

Ognuno di essi è stato accoppiato con ognuno dei seguenti oculari, i primi tre compensatori classici, i due successivi acromatici e l'ultimo semi-compensatore:

- 1) Zeiss Oberkochen compensatore negativo Kpl 10 × (16)
- 2) Leitz Periplan GF 10 × (18) compensatore negativo grandangolare
- 3) Wild W 10 × K (18) compensatore negativo grandangolare
- 4) Wild 10 × (14) acromatico negativo
- 5) Zeiss Jena GF P 10 × (18) acromatico positivo grandangolare a pupilla alta
- 6) Turi WF 10 × (20) semi-compensatore positivo grandangolare a pupilla alta⁴

NB: la cifra fra parentesi rappresenta l'indice di campo (diametro dell'immagine intermedia effettivamente utilizzata, espresso in mm).

I trattati di ottica danno come misura dell'astigmatismo la distanza (assiale) fra le due focaline. Dal punto di vista della definizione conta invece la forma del cerchio di confusione e quindi il rapporto lunghezza-larghezza delle focaline.

Le cifre indicate nelle celle della tabella che segue indicano pertanto l'allungamento delle focaline, espresso in "unità di diffrazione": si prende come riferimento il diametro del disco di Airy, come appare al centro del campo, cioè di forma circolare, e si valuta di quante volte la focalina è allungata rispetto a quel diametro. Una cifra di "1 - 2" indica, per esempio, che la focalina è lunga al massimo due volte la sua larghezza, e quindi l'aberrazione è poco percettibile: queste situazioni sono state evidenziate nella tabella col carattere in grassetto. Una misura di 3 indica invece una focalina lunga il triplo della sua larghezza: situazione mal tollerabile.

In un solo caso, l'astigmatismo è stato nascosto dalla CVD.

Le cifre indicate sono da prendere con prudenza, per vari motivi:

— La valutazione della forma di una focalina dipende anche dalla brillantezza dell'immagine, dalla sensibilità dell'occhio o da quella del sensore (pellicola, CCD, ecc.). E si ricordi che l'occhio reagisce alle variazioni di brillantezza, al contrasto, secondo una curva logaritmica, ben diversa dalla curva di risposta di qualunque sensore. In altre parole, l'occhio è molto più "elastico" e legge le sfumature molto meglio di qualunque apparecchio.

— La distribuzione fotometrica in un'immagine fotografica dipende molto dal tempo di esposizione.

— La valutazione visiva dipende molto dall'esperienza dell'osservatore.

— Una focalina non è mai pura, nel senso che si sovrappone a residui più o meno forti di altre aberrazioni extra-assiali. Il miglior criterio di discriminazione si ha foccheggiando: solo le focaline astigmatiche cambiano direzione di allungamento al variare del fuoco. Del resto, proprio per questo motivo, gli obiettivi utilizzati per questa ricerca sono stati scelti per avere un residuo di astigmatismo più forte dei residui di altre eventuali aberrazioni extra-assiali.

Oculare ↓	ZEISS Ob. P 100	NIKON Papo 40	WILD Fl 40	WILD Fl 20	WILD acr. 10	Kor acr. 12	Leitz EF 100
Zeiss Kpl 10	2 - 3	1 - 2	1 - 2	1 - 2	2 - 3	2	2 - 3
Leitz Peripl. GF 10	3 - 4	3 - 4	1 - 2	1 - 2	3 - 4	3	3
Wild W 10 K	3	3 - 4	1 - 2	1 - 2	2 - 3	3	3
Wild 10 (H)	1 - 2	2 - 3	1 - 2	2 - 3	1 - 2	2	3
Jena GF 10	2	2 - 3	CVD	3	1 - 2	2	2 - 3
Turi WF 10	3	1 - 2	2	3	2 - 3	2 - 3	3

⁴ Indichiamo col logo "Turi" i materiali per microscopia distribuiti in Italia dalla casa "Ottica Turi" di Pistoia.

Dall'esame della tabella qui sopra si possono trarre varie constatazioni:

- Gli obiettivi migliori (dal punto di vista dell'astigmatismo) sono due modesti Wild semi-apocromatici. Fin qui, nulla di nuovo: non è l'abito che fa il monaco. Del resto, stiamo esaminando una sola aberrazione e non si può trarre da questo una valutazione complessiva sull'obiettivo.

- Alcuni obiettivi traggono un forte vantaggio dall'accoppiamento con oculari compensatori (i due Wild semi-apocromatici), e questo è prevedibile, visto che quegli obiettivi erano nati proprio per accoppiarsi con oculari compensatori.

Altri si comportano meglio con oculari acromatici (Zeiss P 100, Wild acr. 10:1), ed anche questa è una combinazione consigliata.

- Gli oculari compensatori danno buoni risultati solo in certi casi: evidentemente, non sono nati per compensare l'astigmatismo ma solo la C VD.

- Non esiste l'oculare che corregge meglio l'astigmatismo in tutti i casi.

- L'obiettivo Zeiss Planare 100, stranamente, si comporta un po' meglio con un semplice oculare acromatico di altro costruttore (Wild 10 × Huygens).

- Il Nikon 40/0,95, ancora stranamente, accetta meglio un oculare compensatore (Zeiss Kpl 10) ed un semi-compensatore (Turi WF 10 ×), oculari molto diversi fra loro sotto altri aspetti.

- Il vecchio Koristka ed il Leitz EF 100 sono proprio acciaccati: non vanno d'accordo con nessun oculare.

CONCLUSIONI

L'astigmatismo si presenta in varia misura in obiettivi di ogni categoria e di ogni costruttore, anche di classe elevata. Non è la più dannosa fra le varie aberrazioni del punto ma, se non ci fosse, sarebbe meglio.

L'oculare può avere un effetto non trascurabile sul residuo complessivo di astigmatismo del sistema ottico del microscopio, ma tale effetto non ha rapporti col potere compensatore che lo stesso oculare può avere sulla CVD, né con la sua classe.

Data la mancanza quasi assoluta di informazioni da parte del costruttore, solo un esame attento collo star test può indicare volta per volta quale è l'oculare più adatto per un dato obiettivo.

Per tre degli obiettivi studiati, sono qui visibili alcune foto che illustrano meglio quanto detto; per ogni coppia obiettivo – oculare vengono espresse due foto, in corrispondenza del miglior fuoco per ognuna delle due focaline. Le foto sono state ingrandite elettronicamente di un fattore 3:1.

In ogni caso, il centro del campo è fuori figura, in basso, per cui le focaline tangenziali sono più o meno orizzontali, le focaline sagittali sono verticali.

Le centriche sono presso i margini di un campo di 18 mm di diametro.

Obiettivo Zeiss Oberkochen planare 100 HI –
Oculare Zeiss Ob. Kpl 10 ×.

Benché i due sistemi
siano figli della stessa
mamma, il risultato è
scadente.



38-Zeiss P 100-Kpl 10



41-Zeiss P 100-Kpl 10

Lo stesso obiettivo, con
l'oculare Leitz Periplan GF
10 ×.

Il risultato è peggiore.



43-Zeiss P 100-Peripl GF



42-Zeiss P 100-Peripl GF

Ancora l'obiettivo Zeiss planare 100 HI, con un altro oculare compensatore (Wild W 10 × K).

Ancora male.



47-Zeiss P 100-W 10WK

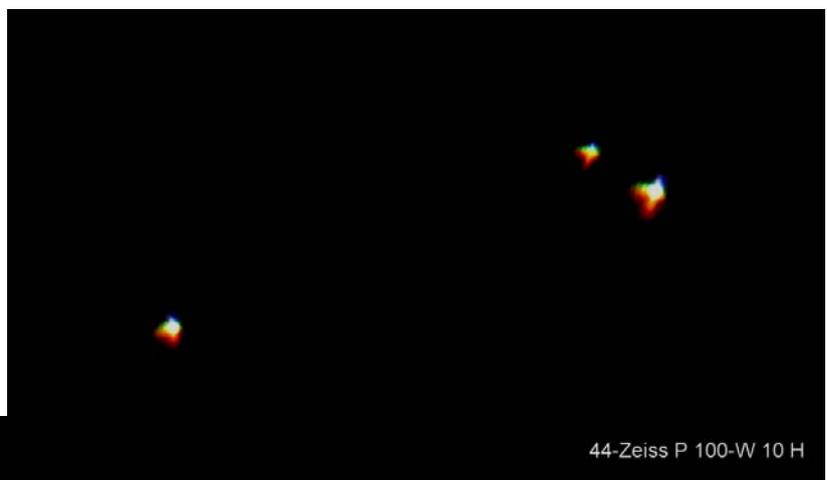


46-Zeiss P 100-W 10WK

Proviamo con l'oculare acromatico Wild 10 ×.

Le cose vanno meglio, se non altro perché le due focaline sono quasi complanari.

Si notino i colori da CVD (l'oculare non è compensatore).



44-Zeiss P 100-W 10 H



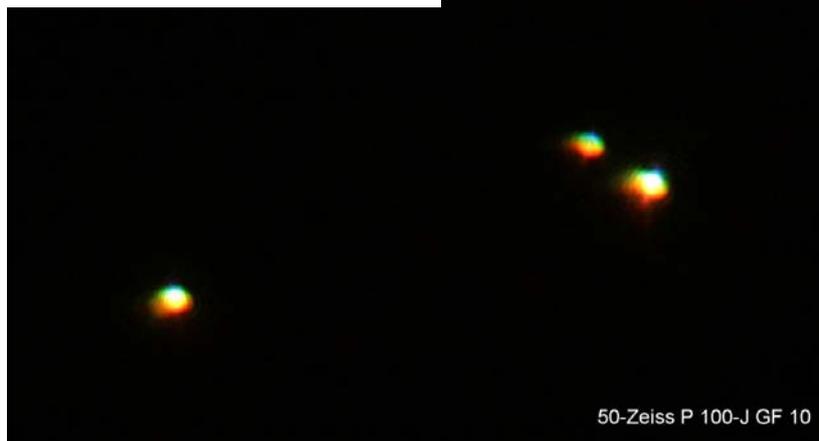
45-Zeiss P 100-W 10 H

Ancora l'obiettivo Zeiss planare 100 HI, con un altro oculare acromatico (Zeiss Jena GF P 10 × (18)).

Le centriche sono meno allungate, ma più arrotondate a causa di un residuo di CVD e di coma, che le stira in direzione radiale.



51-Zeiss P 100-J GF 10



50-Zeiss P 100-J GF 10

Infine, lo stesso obiettivo con l'oculare semi-compensatore dell'ottica Turi WF 10 ×/20.

Ancora peggio. Nella foto in basso, la focalina sagittale è più netta e risulta visibile anche sotto quella tangenziale.



49-Zeiss P 100-Turi 10/20



48-Zeiss P 100-Turi 10/20

NB: le foto che seguono sono state ingrandite elettronicamente di 4:1 invece che di 3:1, e quindi le centriche appaiono più grandi.

Ora l'incontro fra l'obiettivo Wild semi-apo-cromatico FI 20/0,60 e gli stessi oculari visti sopra.

Con l'oculare Zeiss Ob. Kpl 10 × (compensatore), l'allungamento delle focaline non supera il valore di 1:2. Ottimo risultato.



L'obiettivo Wild FI 20/0,60 con l'oculare Leitz Periplan GF 10 ×, altro compensatore.

Ancora meglio: l'allungamento delle focaline è impercettibile.



Ora, l'obiettivo Wild semi-apocromatico FI 20/0,60 con l'oculare compensatore della stessa casa: W 10 × K.

Ancora un buon risultato, ma la debole centrica in alto è scomparsa. Questo obiettivo gradisce comunque gli oculari compensatori.



Lo stesso obiettivo con l'oculare acromatico 10 × della stessa casa.

Le centriche sono più grandi, probabilmente per la sovrapposizione di altri residui che le allungano in direzione radiale.



L'obbiettivo Wild semi-apocromatico FI 20/0,60 e l'oculare acromatico Jena GF P 10 \times /18.

Modesto risultato. Si vedono i segni della CVD (l'obbiettivo esige un oculare compensatore).

Riappare la debole centrica in alto.



Infine, lo stesso obbiettivo con un oculare semi-compensatore (Ottica Turi, WF 10 \times /20).

Va meglio. La CVD è minore.



Come ultimo obiettivo sotto test, il Leitz EF 100/1,25 ÖI (HI), insolitamente dotato di astigmatismo, un po' come tutti quelli della stessa serie.

Con l'oculare Zeiss Ob. Kpl 10 × (compensatore), l'allungamento delle focaline è dell'ordine di 2/1 o 3/1, ma non vi sono segni di CVD; infatti, l'obiettivo è sottocorretto ma l'oculare fornisce una forte compensazione. Semmai, qualche residuo di coma, come si vede dalla diversa forma delle focaline: è presente una "coda" centripeta anche nella focalina tangenziale.



Con l'oculare "fratello", il Leitz Periplan 10 × / 18, grandangolare compensatore, le cose vanno decisamente peggio. Conflitti in seno alla famiglia? Ancora ben visibile la coda centripeta di coma.



Sempre l'obiettivo Leitz EF 100/1,25 ÖI (HI), accoppiato ancora con un oculare compensatore (Wild grandangolare W 10 × K), non produce risultati molto migliori. Ancora una buona correzione da CVD ed un residuo di coma.



Se accoppiamo l'obiettivo Leitz con un oculare acromatico (Wild 10 ×), c'è da aspettarsi un residuo di CVD sottocorretta, e lo si rivela da una debole colorazione delle centriche, blu verso l'alto, rosso verso il basso ma, in fatto di astigmatismo, nessun miglioramento, com'era logico attendersi.



Sempre l'obiettivo Leitz EF 100/1,25 ÖI (HI), con un altro oculare acromatico: lo Zeiss Jena GF – P 10 ×. Qui, i residui di CVD sono più evidenti e coprono parzialmente le focaline astigmatiche. Forse, queste ultime sono un po' più piccole. Anche in questo caso, un residuo di coma provoca un allargamento delle focaline tangenziali (foto inferiore).



Infine, lo stesso obiettivo con un oculare semi-compensatore, il Turi WF 10 × / 20. La CVD è ridotta, ma per l'astigmatismo non si vede un miglioramento.



La COMPENSAZIONE della COMA

Le prove sopra citate, eseguite per appurare qual è il miglior rapporto obiettivo-oculare dal punto di vista dell'astigmatismo, si possono ripetere per la coma, un'aberrazione assai più diffusa, anche fra obiettivi di alta classe e di costruttori famosi.

Si sono scelti due obiettivi particolarmente "dotati" di questa aberrazione: un Koristka acromatico 45/0,85 ed un Reichert acromatico 56/0,95, e li si è saggiati accoppiandoli con i sei oculari sopra descritti. I risultati del primo obiettivo sono strettamente comparabili con quelli del secondo.

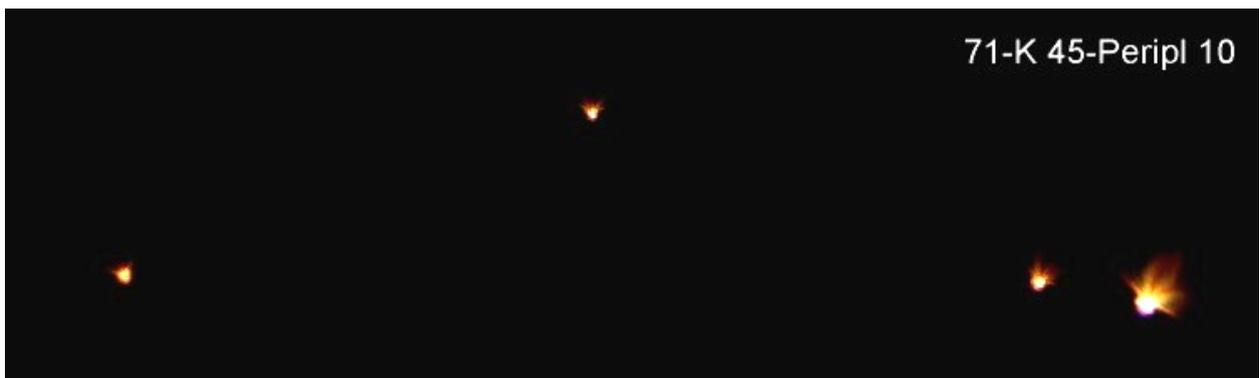
Le conclusioni cui si arriva sono assai più semplici di quanto si è visto per l'astigmatismo: nessuno degli oculari utilizzati ha dimostrato di influire sensibilmente sulla coma.

Riportiamo soltanto le foto del caso peggiore e del migliore, e si vedrà che le differenze non sono molto visibili. In presenza di questa aberrazione occorre quindi rassegnarsi.

L'obbiettivo Koristka 45/0.85 con l'oculare compensatore Wild W 10 × /18. Sembra essere il caso peggiore.



Ed ora il caso migliore, lo stesso obbiettivo con l'oculare Leitz Periplan GF 10 ×.



Da notare che entrambi gli oculari sono compensatori.

NB: Il centro del campo è sempre in basso, fuori figura.