

## L'UTILITÀ DEL “GRANDE CAMPO” IN MICROSCOPIA

Ci occupiamo qui del “campo”, della porzione di oggetto che si vede nell'oculare.

Il discorso che segue presuppone come acquisiti i concetti di:

“campo oggetto” dell'obbiettivo (la porzione del piano oggetto, del “vetrino”, che viene vista attraverso il microscopio); la fig. 1 ne indica il diametro con la freccia AB, diametro generalmente simboleggiato con la lettera  $s$ ;

“campo immagine” dell'obbiettivo (la porzione utilizzata dell'immagine intermedia, quale è delimitata dal diaframma di campo visivo (DV), che è contenuto nell'oculare, nel suo primo piano focale). La fig. 1 ne indica il diametro con  $A'B'$ .

Si suppone anche chiarito che il limite al campo visuale percepibile da parte dell'osservatore è dato dal diaframma DV. Il diametro di DV, indicato con  $s'$  e chiamato “indice di campo”<sup>1</sup>, consente di calcolare il diametro del campo oggetto ( $s$ ) semplicemente dividendo  $s'$  per l'ingrandimento dell'obbiettivo ( $M_{ob}$ ):

$$s = s' / M_{ob} \quad (1)$$

Nella fotografia al microscopio, i limiti del campo immagine (immagine finale proiettata sull'emulsione) sono dati o dal diaframma di campo visivo DV o dalla “finestrella” della fotocamera, o comunque dal più piccolo dei due, tenuto conto dell'ingrandimento dei mezzi interposti.

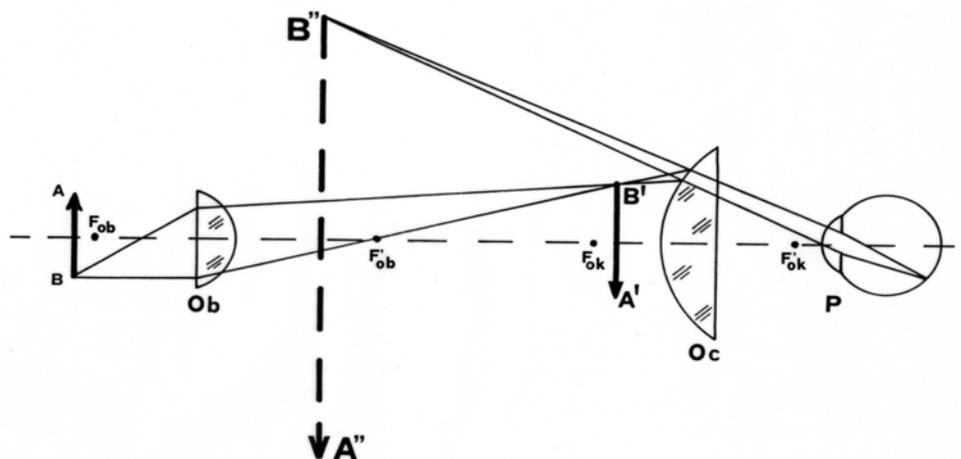


Fig. 1 – Schema generale di microscopio con obiettivo a coniugata finita, oculare positivo ed immagine finale (virtuale) a distanza finita ( $A''B''$ ).

Per maggior precisione, indipendentemente dal tipo di obiettivo, (“con seconda coniugata finita” o “infinita”<sup>2</sup>), si chiama “campo immagine” di esso il diametro nominale dell'immagine intermedia, entro il quale il progettista garantisce un certo grado di correzione delle aberrazioni (di tipo acromatico, planare, ecc.) ed assenza di vignettature. Ricordiamo

<sup>1</sup> L'indice di campo è chiamato dagli autori inglesi “field number” ed indicato coll'acronimo “FN”. Quasi sempre viene espresso in millimetri. ed è sempre dichiarato dai costruttori seri.

<sup>2</sup> cioè con immagine a distanza finita (di solito 160 mm) o infinita.

che l'immagine (reale, rovesciata ed ingrandita) fornita dall'obbiettivo è la “immagine intermedia”, che si deve formare, dopo corretta foceggiatura, nei pressi o nel primo piano focale dell'oculare e che l'oculare proietta poi a distanza infinita (virtuale, per l'osservazione) o comunque grande (reale, per la fotografia).

Va anche distinto il campo immagine nominale dell'obbiettivo, come appena definito (che dipende dalla “ricetta”, dalla struttura, dell'obbiettivo), dall' “indice di campo” dell'oculare  $s'$ , che dipende dalla struttura di quest'ultimo, in particolare dal diametro del diaframma DV, e che rappresenta quella porzione del campo dell'obbiettivo che l'oculare riesce effettivamente ad utilizzare.

Negli obbiettivi con “immagine all'infinito” si può considerare l'obbiettivo + la lente di tubo come un sistema unico che fornisce un'immagine intermedia reale a distanza finita (per es. 250 mm).

Ciò premesso, va detto che, indipendentemente da ciò che gli sta davanti (oggetto ed obbiettivo), l'occhio posto dietro un oculare vede l'immagine dell'oggetto sotto un certo angolo (si può parlare di “campo angolare” dell'oculare) e tale angolo dipende dal diametro del diaframma DV ( $s'$ ) e dalla focale dell'oculare.

La fig. 2 può chiarire questo: sia OB il raggio dell'immagine intermedia, cioè la metà di  $s'$  (che chiameremo  $r$ ); se O si trova nel fuoco F dell'oculare (positivo) DC, anche il raggio BD è pari alla focale dell'oculare. Se consideriamo il raggio BD, che proviene da un punto marginale dell'immagine intermedia viaggiando parallelamente all'asse ottico, esso emergerà dalla lente passando per il secondo fuoco F'. Il raggio BC invece, attraversando il centro C della lente, all'interno di certe approssimazioni, emerge dalla lente non deviato e, con semplici considerazioni geometriche, si può dimostrare che è parallelo a B'DF'. L'occhio, posto in F' o nei suoi pressi, percepisce i raggi DF' e BC come se provenissero da una sorgente a distanza infinita (B').

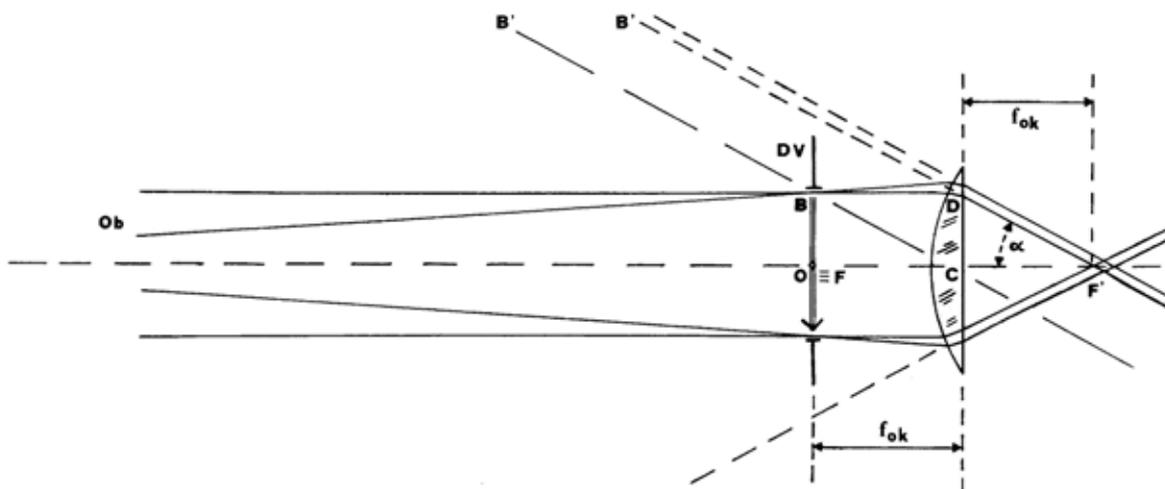


Fig. 2 – Schema per illustrare il concetto di campo angolare di un oculare. La messa a fuoco è corretta, nel senso che l'immagine intermedia (OB) si trova nel fuoco dell'oculare (F) e l'immagine finale (B'B') si trova a distanza infinita. L'obbiettivo, non figurato, si trova a sinistra. DB' e BB' sono ovviamente raggi virtuali. NB: per chiarezza, sono stati esagerati certi angoli: per es., il raggio BC non potrebbe esistere.

Bene, l'osservatore in F' vede il confine del campo visuale in direzione F'DB', quindi secondo l'angolo  $\alpha$ . Tale angolo<sup>3</sup> misura l'ampiezza del campo visuale dell'oculare, anche se generalmente si considera il valore doppio,  $2\alpha$ , sotteso dal diametro dell'immagine

<sup>3</sup>  $\alpha$  è la  $\alpha$  minuscola dell'alfabeto greco (alfa). In geometria, si usa indicare gli angoli con lettere greche.

intermedia, cioè da  $s'$ . La tangente di  $\alpha$  sarà ovviamente  $DC / CF' = r / f_{ok}$  in quanto chiamiamo  $r$  la metà di  $s'$  ( $r = BO = DC$ ) ed  $f_{ok}$  è la focale dell'oculare ( $f_{ok} = FC = CF'$ ):

$$\operatorname{tg} \alpha = s' / 2 f_{ok} \quad (2)$$

Risulta allora chiaro che il campo immagine dell'obbiettivo realmente utilizzato è dato da  $s'$  (diametro di DV), ed il campo angolare dell'oculare  $\alpha$  dipende sia da  $s'$  che da  $f_{ok}$ .

Ridurre sia  $s'$  che  $\alpha$  è facile: basta ridurre il diametro del diaframma DV, ma questo in genere non è gradito, sia per ragioni soggettive ("si vede la luna nel pozzo"), sia perché si limita il campo oggetto, la porzione visibile del vetrino. Viceversa, da sempre si è affermata la tendenza opposta.

Vogliamo ora approfondire le ragioni che spingono i costruttori ad aumentare il "campo", cioè il diametro del campo-immagine nominale dell'obbiettivo, in modo da poter aumentare l'indice di campo dell'oculare,  $s'$ , e quindi il campo angolare<sup>4</sup> di esso,  $\alpha$ .

È ovvio che  $s'$  non può superare il campo immagine dell'obbiettivo, quale è previsto dal progettista: se così avvenisse, si andrebbe ad utilizzare una regione periferica dell'immagine intermedia, dove il progettista non ha più controllato aberrazioni e vignettature. Nel comporre il corredo ottico di uno strumento, va quindi sempre accertato che nessun oculare possieda un indice di campo  $s'$  maggiore del campo nominale dell'obbiettivo<sup>5</sup>, tenendo conto di eventuali mezzi intermedi (lenti di campo, cambiatori d'ingrandimento, zoom, ecc.) capaci di modificare le dimensioni dell'immagine intermedia.

Ebbene, aumentando il campo lineare  $s'$  si ha un primo effetto dannoso: in una lente semplice, aumentano in proporzione ad  $s'$  le aberrazioni di coma e cromatica laterale; aumentano invece in proporzione al quadrato di  $s'$  la curvatura, l'astigmatismo e la distorsione (espressa in percentuale). Il compito principale del progettista, correggere le aberrazioni, è quindi complicato aumentando il campo  $s'$ .

Ma tale aumento porta un vantaggio: un aumento di risoluzione dell'immagine finale. E vediamo perché.

D'ora in poi, parleremo di risoluzione nel senso di "massimo numero di linee equidistanti e parallele che si riescono ancora a distinguere in un'immagine"; la esprimeremo dunque in linee per millimetro (1/mm). Parleremo naturalmente del limite massimo della risoluzione, legato essenzialmente alla diffrazione e quindi all'apertura dell'obbiettivo; supporremo allora sopresse tutte le cause eliminabili di perdita di risoluzione: contrasto nell'oggetto inferiore ad 1 - errori di focalizzazione o di centratura - difetti costruttivi del sistema - polvere o sporcizia - difetti del sistema illuminante - ecc.

La classica formula:

$$d = 0,6 \lambda / NA \quad (3)$$

fornisce la minima distanza ( $d$ ) fra due punti nell'oggetto che un obbiettivo di apertura numerica:

$$NA = n \operatorname{sen} \alpha \quad (4)$$

riesce ancora a "risolvere", cioè a mostrare distinti.  $\lambda$  è la lunghezza d'onda utilizzata,  $\alpha$  è in questo caso l'angolo di apertura massimo dell'obbiettivo ed  $n$  l'indice di rifrazione del mezzo interposto fra obbiettivo ed oggetto (aria od olio).

Possiamo all'incirca considerare  $d$  anche come la minima distanza risolvibile in un oggetto ideale costituito da linee chiare ed opache di eguale larghezza, parallele fra loro;  $d$  rappresenta il "passo" o "periodo" minimo del sistema di righe (larghezza di una linea trasparente + una linea opaca).

Se esprimiamo  $d$  e  $\lambda$  in micron ( $\mu$ ), la risoluzione  $r$  nel piano oggetto, espressa in linee/mm è data da:

<sup>4</sup> Spesso il valore di  $\alpha$  si chiama "semicampo" e  $2\alpha$  si chiama "campo", in senso stretto.

<sup>5</sup> Un costruttore serio denuncia sempre il campo nominale dei suoi obbiettivi, cioè il valore massimo dell'indice di campo dei relativi oculari.

$$r = 1000/d \quad (5)$$

poiché  $1 \text{ mm} = 1.000 \mu$ .

Ebbene, supposto di operare in luce bianca (valor medio di  $\lambda$  pari a circa  $0,5 \mu$ ), le formule di cui sopra ci permettono di calcolare la risoluzione  $r$  di un obiettivo nel piano oggetto, tenuto conto dell'eventuale lente di tubo. Combinando la (3) e la (5), si ha la risoluzione nel piano oggetto:

$$r \text{ (linee/mm)} = 1000 \text{ NA}/0,6 \lambda = 1670 \text{ NA}/\lambda = 3340 \text{ NA} \quad (6)$$

sempre considerando un valore di  $\lambda$  pari a  $0,5 \mu$ .

Ma l'immagine intermedia è ingrandita da parte dell'obiettivo, rispetto all'oggetto, di un fattore  $M_{ob}$  che rappresenta l'ingrandimento proprio dell'obiettivo; nell'immagine intermedia avremo così una risoluzione  $r'$ , inferiore ad  $r$  di un fattore  $M_{ob}$ : le righe dell'oggetto appariranno più distanziate:

$$r' \text{ (linee/mm)} = 3340 \text{ NA} / M_{ob} \quad (7)$$

In fotomicrografia, l'immagine intermedia viene ulteriormente ingrandita di un fattore  $M_{pc}$  ad opera di un oculare o di un "proiettivo" e di eventuali "lenti di camera" contenute nei vari raccordi o supporti per pellicole.

Per es., un noto costruttore offre proiettivi con fattore pari a:

2 - 3,2 - 4 - 6,3 e raccordi con fattore di camera pari a:

1,5  $\times$  (formato 24  $\times$  36 mm) - 3,2  $\times$  (formati 6  $\times$  6 e 6  $\times$  9 cm) -- 5  $\times$  (formati 9  $\times$  12 cm e 4"  $\times$  5"). Conglobando i due fattori, proiettivo e lente di camera, possiamo indicare con  $M_{pc}$  l'ingrandimento globale operato fra immagine intermedia e pellicola. Nel caso di cui sopra,  $M_{pc}$  va da un minimo di  $2 \times 1,5 = 3$  ad un massimo di  $6,3 \times 5 = 31,5$  (circa). Sull'emulsione fotografica avremo allora una risoluzione ancora più piccola di  $r'$  e cioè:

$$r'' = r'/M_{pc} = 3340 \cdot \text{NA} / M_{ob} \cdot M_{pc} \quad (8)$$

Per aumentare  $r''$ , cioè avere foto più nitide, occorre aumentare NA (per es. usando obiettivi apocromatici) e ridurre  $M_{ob}$  ed  $M_{pc}$ ; ovvero, a parità di NA, usare obiettivi, proiettivi e lenti di camera del minimo ingrandimento possibile.

Esaminiamo da vicino i fattori  $M_{ob}$  ed  $M_{pc}$ , sempre nel caso della fotografia. Per l'osservazione visuale, come vedremo, non esiste un ingrandimento lineare come  $M_{pc}$ , ma un ingrandimento "visuale"  $V_{oc}$ .

Per quanto riguarda gli obiettivi, occorre cercare il minimo ingrandimento  $M_{ob}$ , parallelamente alla massima NA, cioè il massimo rapporto  $\text{NA}/M_{ob}$ ; in questo senso, un obiettivo debole come un 10/0,25 ha un rapporto  $\text{NA}/M_{ob} = 0,25/10 = 0,025$ , molto maggiore di un obiettivo forte, come un 40/0,65 che ha un rapporto di  $0,65/40 = 0,0162$ . La risoluzione maggiore si ottiene quindi con gli obiettivi deboli, possibilmente apocromatici, che hanno una maggiore NA a pari ingrandimento  $M_{ob}$ .

Nella tabella seguente si possono confrontare i rapporti  $\text{NA}/M_{ob}$  (moltiplicati per 1.000 per eliminare gli zeri) di alcune serie di obiettivi moderni.

ACROMATICI $s' = 20 \text{ mm}$	$\text{NA}/M_{ob}$ $\times 1.000$	PLAN-ACROM. GRANDANGOLARI $s' = 25 \text{ mm}$	$\text{NA}/M_{ob}$ $\times 1.000$	PLAN-APOCROM. GRANDANGOLARI $s' = 25 \text{ mm}$	$\text{NA}/M_{ob}$ $\times 1.000$
5/0,12	24	6,3/0,12	19		
10/0,25	25	12,5/0,25	20	10/0,35	35
20/0,45	22,5	25/0,50	20	25/0,65	26
40/0,65	16,2	40/0,65	16,2	40/0,75	18,75
		50/0,80	16	50/0,95	19
100/1,25	12,5	100/1,25	12,5	100/1,35	13,5

Si noti che il rapporto  $\text{NA}/M_{ob}$  oscilla per questi esempi fra 12,5 e 35 ma il valore del rapporto crolla per ingrandimenti di obiettivo superiori a 20.

In altri casi, si costruiscono obbiettivi deboli con un rapporto fino a 45 (es. un 10/0,45). Obbiettivi con un rapporto così elevato sono poco utili dal punto di vista della risoluzione per le ragioni che si chiariranno sotto, ma la loro elevata NA conferisce loro una elevata "luminosità", il che li rende assai utili in fluorescenza, micro-proiezione, ecc. Si ricordi che l'illuminamento nell'immagine finale è proporzionale in molti casi al quadrato di NA ed inversamente proporzionale al quadrato di  $M_{ob}$  (vedi l'articolo n° 5: "La resa fotometrica...").

Per gli obbiettivi forti invece l'apertura non può superare 1,45 per ragioni teoriche e tecniche; con ingrandimento  $M_{ob} = 100$ , il rapporto non può superare allora  $1,45/100 (\times 1000) = 14,5$ . Sono invece preziosi, dal punto di vista della risoluzione e della luminosità, gli obbiettivi ad immersione con ingrandimento ridotto (ne esistono da  $10 \times$  in su).

Sul fattore  $M_{pc}$  si hanno ugualmente dei limiti e non si può scendere troppo: infatti, se  $M_{pc}$  è troppo basso, l'immagine finale può risultare troppo piccola e non coprire il formato fotografico desiderato. Se  $d_i$  è la diagonale del formato, il complesso proiettivo + lente di camera deve possedere un fattore di ingrandimento  $M_{pc}$  non inferiore a:

$$M_{pc} \geq d_i / s' \quad (9)$$

poiché l'immagine intermedia di diametro  $s'$  deve venire ingrandita appunto di un fattore  $M_{pc}$  per coprire fino agli spigoli la diagonale  $d_i$  del formato usato ed evitare le "vignettature" (ombre negli angoli).

Dunque, per aumentare la risoluzione  $r''$  in fotomicrografia occorre usare proiettivi più deboli possibile (fattore  $M_{pc}$  nella formula (8)); ma, per non scendere sotto al valore indicato dalla (9), non resta che aumentare  $s'$ , e questo è il vantaggio degli obbiettivi "a grande campo". E' quanto volevamo dimostrare.

Aumentare  $s'$  rende più difficile il progetto dell'obbiettivo: peggiorano le aberrazioni, come spiegato sopra, si richiedono lenti in soprannumero ed aumentano i costi di produzione. Il costruttore può allora scegliere:

— limitare il valore del campo  $s'$  (i sistemi classici si limitano a 18 mm; i moderni vanno da 20 a 32 mm);

— tollerare residui di aberrazioni, specialmente quelle extra-assiali, che si manifestano ai bordi del campo, come quelle elencate a pag. 3;

— accettare costi maggiori.

Ma andiamo avanti.

Secondo quanto detto sopra, a parità di correzioni, ignorando il fattore costo, è chiarito che, aumentando il campo  $s'$ , può diminuire il fattore  $M_{pc}$  (formula (9)) e quindi aumentare la risoluzione finale  $r''$  (formula (8)). Ma si badi: un aumento di  $r''$  può risultare inutile in due casi:

=== in osservazione visuale, quando  $r''$  risulta superiore alla risoluzione dell'occhio "medio" normale, che si aggira su 10 linee/mm nelle migliori condizioni, quando si osserva un'immagine virtuale a 250 mm di distanza, supponendo al solito un oggetto con contrasto pari ad 1, illuminazione ideale, ecc.

=== in fotografia, quando  $r''$  è maggiore della risoluzione della pellicola: 30 - 50 linee/mm per le emulsioni a colori, 50 - 150 per quelle in bianco e nero.

È chiaro che nell'osservazione visuale non entra il fattore  $M_{pc}$ , che è un ingrandimento "lineare", bensì l'ingrandimento "visuale" dell'oculare  $V_{oc}$ , che entrerà nei calcoli nella supposizione che esso produca un'immagine virtuale a 250 mm dalla pupilla d'uscita del microscopio, immagine per la quale si calcola  $r''$  in linee/mm.

Ma vediamo ora qualche caso pratico: confrontiamo tre obbiettivi moderni, debole, forte a secco e ad immersione omogenea (HI), e calcoliamo per ognuno la risoluzione sul piano

oggetto  $d$  secondo la formula (3)<sup>6</sup>, la risoluzione nell'immagine intermedia  $r'$  (formula (7)), e la risoluzione finale in fotografia  $r''$  (formula (8)) ed in visione. Calcoleremo anche la "informazione" totale contenuta nell'immagine intermedia, cioè il numero totale di "linee"  $I_{tot}$  (come si usa in campo televisivo)<sup>7</sup>.

In ognuno dei casi, il valore minimo di  $M_{pc}$  non dipende dall'ingrandimento, ma solo dal formato fotografico  $d_i$  e dal campo nominale dell'obiettivo  $s'$  (vedi la formula (9)).

Considereremo tre formati fotografici:

—  $24 \times 36$  mm (formato "Leica") con una diagonale  $d_i = 43$  mm.

—  $6 \times 9$  cm con  $d_i = 108$  mm.

—  $9 \times 12$  cm con  $d_i = 150$  mm.

Per questi formati, dalla formula (9) si ricavano i valori minimi di  $M_{pc}$  ( $= d_i / s'$ ) per due diversi valori dell'indice di campo dell'oculare: normale ( $s' = 18$ ) e grandangolare ( $s' = 25$ ).

Formato	Campo $s' = 18$ mm	Campo $s' = 25$ mm
$24 \times 36$ mm ( $d_i = 43$ mm)	$M_{pc} \geq 43/18 = 2,4 \times$	$M_{pc} \geq 43/25 = 1,7 \times$
$6 \times 9$ cm ( $d_i = 108$ mm)	$M_{pc} \geq 108/18 = 6 \times$	$M_{pc} \geq 108/25 = 4,3 \times$
$9 \times 12$ cm ( $d_i = 150$ mm)	$M_{pc} \geq 150/18 = 8,3 \times$	$M_{pc} \geq 150/25 = 6 \times$

Prevederemo sempre l'uso del proiettivo più debole (per es.:  $2 \times$ ) per avere in ogni caso la massima risoluzione. Tenuto conto del fattore di camera normalmente utilizzato per i vari formati (vedi sopra:  $1,5 \times$ ,  $3,2 \times$ ,  $5 \times$ ), vedremo che il valore ottenuto per  $M_{pc}$  sarà superiore al valore minimo sopra calcolato, per quasi tutte le combinazioni.

Poi confronteremo i valori ottenuti di  $r''$  con la risoluzione dell'occhio e delle normali emulsioni.

Per ogni obiettivo, confronteremo i risultati relativi a due valori del campo immagine: 18 mm, classico, e 25 mm, comune a molti sistemi moderni "grandangolari".

Nel caso degli obiettivi grandangolari (denominati GF o con altri acronimi), con campo immagine nominale, per es. = 25 mm, si noterà che gli oculari normali, con diametro esterno = 23,2 mm, hanno un indice di campo  $s'$  al massimo di 22 mm (il diametro interno dei tubi portaoculari è ancora 23,2 mm e l'immagine intermedia deve necessariamente essere più piccola, almeno con gli oculari "positivi"). Per questi oculari, un campo dell'obiettivo superiore a 22 mm sembra inutile poiché il diaframma dell'oculare ne taglia tutta la zona esterna, fra 22 e 25 mm. Ma allora si adoperano oculari con diametro esterno maggiore, per es. 30 mm, ed allora l'indice di campo  $s'$  può superare 25; quando l'oculare consente di utilizzare una simile immagine intermedia "maggiorata", ed essa viene riportata allo stesso formato fotografico, si guadagna in risoluzione  $r''$  nella stessa misura in cui aumenta  $s'$  poiché il valore di  $M_{pc}$  (formula (9)), come notato sopra, può diminuire ed il valore di  $r''$  aumenta (formula (8)). È questo il senso degli obiettivi "a grande campo".

Per l'osservazione, faremo i conti con un oculare di ingrandimento  $V_{oc} = 10 \times$ , considerando un'immagine finale virtuale a 250 mm di distanza dalla pupilla d'oculare.

Valori di RISOLUZIONE (in linee/mm) nell'IMMAGINE FINALE FOTOGRAFICA e VISUALE per vari obiettivi, normali e semi-apocromatici.

Considerati i seguenti valori:  $\lambda = 0,5 \mu$ . Ingrandimento di proiettivo = 2:1. Fattori di camera disponibili:  $1,5 \times / 3,2 \times / 5 \times$ . Ingrandimento dell'oculare =  $V_{oc} = 10 \times$ .

OBIETTIVO ACROMATICO 10/0,25 con campo immagine =  $s' = 18$  mm.  $NA/M_{ob} =$

<sup>6</sup> Nei calcoli, si introdurrà un valore di  $\lambda$  pari a  $0,5 \mu$ .

<sup>7</sup> Tale valore è ovviamente il prodotto delle linee per mm nell'immagine intermedia ( $r'$ ) moltiplicato il diametro dell'immagine stessa ( $s'$ ), espresso in mm:  $I_{tot} = r' \times s'$ .

0,025.  $d = 1,2 \mu$ ;  $r' = 83,3$  linee/mm;  $I_{tot} = 1500$  linee.

Formato fotografico utilizzato	Fattore di camera utilizzabile	$M_{pc}$ ( $d_i/s'$ ) Valori minimo e reale	$r''$ in fotografia (linee/mm) $r' / M_{pc}$	$r''$ in visione (linee/mm) $r' / V_{oc}$
24 × 36 mm $d_i = 43$ mm	1,5×	43/18 = 2,4 $2 \times 1,5 = 3$	83,3/3 = 27,8	83,3/10 = 8,3
6 × 9 cm $d_i = 108$ mm	3,2×	108/18 = 6 $2 \times 3,2 = 6,4$	83,3/6,4 = 13	83,3/10 = 8,3
9 × 12 cm $d_i = 150$ mm	5×	150/18 = 8,3 $2 \times 5 = 10$	83,3/10 = 8,3	83,3/10 = 8,3

OBBIETTIVO SEMI-APOCROMATICO 40/0.75 con campo immagine =  $s' = 22$  mm.  
NA/ $M_{ob} = 0,01875$ .  $d = 0,4 \mu$ ;  $r' = 62,5$  linee/mm;  $I_{tot} = 1375$  linee.

Formato fotografico utilizzato	Fattore di camera utilizzabile	$M_{pc}$ ( $d_i/s'$ ) Valori minimo e reale	$r''$ in fotografia (linee/mm) $r' / M_{pc}$	$r''$ in visione (linee/mm) $r' / V_{oc}$
24 × 36 mm $d_i = 43$ mm	1,5×	43/22 = 1,95 $2 \times 1,5 = 3$	62,5/3 = 21	62,5/10 = 6,25
6 × 9 cm $d_i = 108$ mm	3,2×	108/22 = 4,9 $2 \times 3,2 = 6,4$	62,5/6,4 = 9,8	62,5/10 = 6,25
9 × 12 cm $d_i = 150$ mm	5×	150/22 = 6,8 $2 \times 5 = 10$	62,5/10 = 6,25	62,5/10 = 6,25

OBBIETTIVO SEMI-APOCROMATICO HI 100/1,3 con campo immagine =  $s' = 22$  mm. NA/ $M_{ob} = 0,013$ .  $d = 0,23 \mu$ ;  $r' = 43,3$  linee/mm;  $I_{tot} = 953$  linee.

Formato fotografico utilizzato	Fattore di camera utilizzabile	$M_{pc}$ ( $d_i/s'$ ) Valori minimo e reale	$r''$ in fotografia (linee/mm) $r' / M_{pc}$	$r''$ in visione (linee/mm) $r' / V_{oc}$
24 × 36 mm $d_i = 43$ mm	1,5×	43/22 = 1,95 $2 \times 1,5 = 3$	43,3/3 = 14,4	43,3/10 = 4,3
6 × 9 cm $d_i = 108$ mm	3,2×	108/22 = 4,9 $2 \times 3,2 = 6,4$	43,3/6,4 = 6,77	43,3/10 = 4,3
9 × 12 cm $d_i = 150$ mm	5×	150/22 = 6,8 $2 \times 5 = 10$	43,3/10 = 4,3	43,3/10 = 4,3

Sui dati precedenti si possono fare alcuni commenti.

--- L'obiettivo 10 è un acromatico, ma agli altri abbiamo dato un margine di vantaggio prendendoli dalla categoria dei semi-apocromatici grandangolari. Ciò nonostante, il 10 presenta un valore maggiore del rapporto NA/ $M_{ob}$  e quindi della risoluzione  $r'$  nel piano dell'immagine intermedia. Nonostante il campo normale (18 mm), l'obiettivo 10 è superiore anche nel numero totale di linee ( $I_{tot}$ ). Se poi si confrontano i valori della risoluzione nell'immagine finale ( $r''$ ), sia in fotografia che in visione, la superiorità degli obiettivi deboli è palese: chi ha un po' d'esperienza sa che, passando dall'obiettivo 10 al 40 ed oltre, la definizione dell'immagine crolla miseramente.

--- Gli obiettivi con campo maggiorato ( $s' = 22$ ) dovrebbero essere aiutati nella determinazione del valore di risoluzione  $r''$  poiché accetterebbero minori valori di  $M_{pc}$ , ma i corredi usuali spesso non lo consentono: si osservi che, per i due obiettivi a campo  $s' = 22$  mm, è maggiore la differenza fra valore minimo necessario di  $M_{pc}$  (per es. 1,95 per il

formato 24×36) e valore realizzabile col corredo preso ad esempio (3). Per l'obiettivo 10 a campo 18 la differenza era 2,4 rispetto a 3. In altre parole, l'immagine data da un obiettivo a campo 22 viene troppo ingrandita dai fattori di camera del nostro esempio.

--- Sempre nel nostro esempio, per la massima risoluzione finale  $r''$  in fotografia, occorre usare SEMPRE il proiettivo più debole ( $2 \times$ ) poiché insieme ad esso i raccordi per i vari formati presentano già un fattore di camera che permette di coprire tali formati. I valori di  $M_{pc}$ , ottenuti col proiettivo  $2 \times$ , che sono indicati nella tabella, risultano sempre superiori ai valori minimi calcolati sopra per i tre formati presi in esame (terza colonna). Naturalmente, si tratta solo di esempi e per ogni strumento occorre ritoccare i calcoli.

--- Per l'osservazione visuale con un oculare normale ( $10 \times$ ) la risoluzione ( $r''$ ) è sempre inferiore a quella convenzionale dell'occhio umano (10 linee/mm). Solo un obiettivo 10 con apertura  $NA \geq 0,35$  per es., può avere una risoluzione nell'immagine intermedia ( $r'$ ) più elevata (117 linee/mm) e, nell'immagine finale, una risoluzione  $r''$  (11,7 linee/mm nel nostro esempio) superiore a quella dell'occhio e forse a quella di un'emulsione a colori nel formato piccolo ( $r'' = 117/3 = 39$  linee/mm nel nostro caso).

In altre parole, solo qualche obiettivo debole a forte apertura ha bisogno di un oculare con  $V_{oc}$  superiore a  $10 \times$ . Gli oculari più forti sono quindi in genere ridondanti: entra in gioco il concetto di "ingrandimento a vuoto". L'abitudine a cercare di aumentare l'ingrandimento con oculari forti è poco saggia, salvo che non sia necessaria per facilitare l'osservazione a persone con "visus" ridotto.

--- Gli obiettivi a campo maggiore, specialmente quelli deboli, danno sempre una immagine più risolta. Quello che conta è il rapporto

$$NA / M_{ob} \cdot M_{pc} \quad \text{(dalla formula (8))}$$

ma, essendo  $M_{pc} = d_i/s'$  (vedi la (9)), tutto si riduce al rapporto:

$$NA \cdot s' / M_{ob} \cdot d_i \quad (10)$$

Dalla (10) risulta quanto già detto: la miglior risoluzione si ha con i campi  $s'$  più grandi e col maggiore rapporto  $NA/M_{ob}$  ma il fattore " $d_i$ " può trarre in inganno: sembra che le maggiori risoluzioni si abbiano con i formati piccoli, che hanno una minore diagonale " $d_i$ ". Ma il negativo va poi ingrandito, tanto più quanto più piccolo è il suo formato per cui il vantaggio si annulla. Infatti, dagli esempi sopra esaminati, risulterebbe che i formati più grandi producono una risoluzione finale minore (quarta colonna); ciò è vero ma, se si suppone che ogni negativo venga poi ingrandito in fase di stampa in modo da avere un ingrandimento finale costante, la differenza scompare. Quello che conta alla fine è il numero delle "linee totali" ( $I_{tot}$ ) che dipende da  $s'$  e da  $r'$  (vedi la nota 7).

--- I veri vantaggi del formato piccolo stanno nella sua praticità e nel minor costo. I vantaggi del formato grande sono invece: 1) la "grana" dell'emulsione viene ingrandita poco o nulla e quindi non appare nella stampa. 2) si è sicuri che i dettagli dell'immagine finale non vanno perduti poiché la risoluzione fornita dal microscopio è sempre inferiore a quella dell'emulsione.

--- Gli obiettivi forti hanno in genere maggior risoluzione dal lato dell'oggetto, ma minor risoluzione lato immagine. Ciò dipende dal rapporto  $NA/M_{ob}$ , che è sempre maggiore negli obiettivi deboli. Gli obiettivi forti hanno, proporzionalmente all'ingrandimento, un valore minore di  $NA$ .

--- Gli obiettivi deboli producono una risoluzione che, anche per il formato Leica, difficilmente può essere superiore a quella delle emulsioni a colori (nel nostro esempio, 27,8 è il massimo valore fornito dall'obiettivo 10/0,25, contro le 30 - 50 linee/mm delle emulsioni a colori). L'aumento di risoluzione permesso dall'indice di campo di 22 mm ed oltre viene quindi "raccolto" dall'emulsione. Con obiettivi deboli di maggiore apertura, abbiamo visto, la situazione però si può invertire.

Come già detto, gli obiettivi deboli normali producono con un oculare di ingrandimento  $10 \times$  una risoluzione non superiore a quella dell'occhio. Però, con un oculare  $6 \times$ , l'obiettivo 10/0,25 produrrebbe una risoluzione visuale di  $83,3/6 = 13,9$  linee/mm, un po' superiore a

quella dell'occhio medio.

In questi casi (rari), gli obbiettivi a grande campo producono un vantaggio che l'occhio non può sfruttare. Si tratta di un inutile aggravio di spesa.

--- In tutti gli altri casi, specie con obbiettivi forti e con formati fotografici medi e grandi, l'aumento di risoluzione dato dai campi maggiorati è prezioso.

--- Un commento sarebbe da fare sugli oculari "grandangolari" a campo 22 o superiori, necessari per sfruttare visualmente i campi maggiorati. I loro vantaggi sono: 1) molti osservatori li gradiscono per ragioni psicologiche e, pertanto, soggettive; 2) nella ricerca rapida di oggetti rari, un campo grande richiede minori spostamenti del tavolino; 3) nell'osservazione di oggetti estesi, è possibile abbracciare con lo sguardo una porzione maggiore dell'oggetto senza ridurre l'ingrandimento.

Svantaggi: 1) la correzione delle aberrazioni dell'oculare diviene più problematica; 2) la visione distinta dell'occhio umano è limitata ad una porzione ristrettissima della retina (la "fovea"); ciò che si vede con l'angolo dell'occhio è visto senza dettagli; per sfruttare una immagine a grande campo l'occhio è costretto a vagare continuamente per il campo; ciò può distogliere dall'osservazione di dettaglio; 3) questa continua variazione della direzione dello sguardo porta ad un continuo spostamento della pupilla dell'occhio; in questo modo, tale pupilla si allontana di continuo dalla pupilla di uscita dell'oculare e l'immagine scompare; quindi, tutte le volte che l'occhio si sposta in una direzione, il capo deve spostarsi in direzione opposta. Sul piano soggettivo, ciò diviene snervante. Chi è abituato agli oculari classici dice che, con oculari a grande campo, "perde continuamente l'immagine".

--- Come già accennato, è anche ovvio che un campo grande dell'obbiettivo presuppone che l'oculare sia in grado di accoglierlo, ed ovviamente il diametro esterno dell'oculare deve essere sempre maggiore di  $s'$ , in modo da lasciare un po' di spazio per la montatura metallica. Per lo standard classico (RMS), tale diametro esterno è 23,2 mm; in questo caso  $s'$  non può superare 22 (di solito 18) mm. Ma la costruzione di "ottiche grandangolari" ha portato all'uso di un diametro esterno degli oculari di 25 - 30 mm con  $s'$  fino a 28 mm. Questo espediente, molto prima che nei microscopi mono-obbiettivo, era stato adottato nei microscopi stereoscopici fin dagli anni '50.

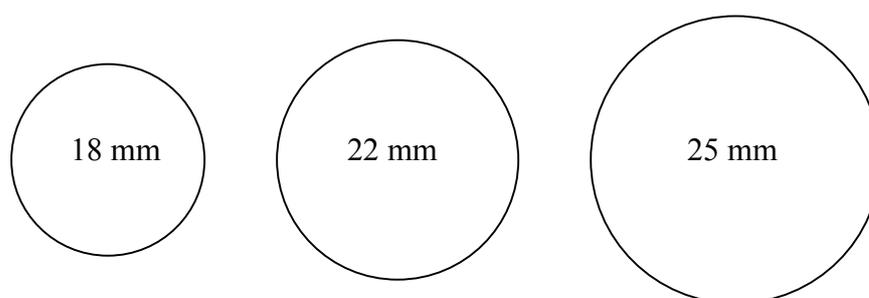


Fig. 3 - Confronto fra i campi visuali prodotti da oculari normali con indice di campo  $s' = 18$  mm e da oculari grandangolari con campo  $s' = 22$  e 25 mm.