

Gli **OBBIETTIVI “ALL’INFINITO”** e la loro (in)compatibilità con gli **ALTRI**

Nel linguaggio corrente e nella letteratura tecnica sulla microscopia ottica si parla spesso, sempre più spesso, di obiettivi “all’infinito”, contrapponendoli a quelli “normali”, e presentandoli come se si trattasse di una nuova categoria, più raffinata, da preferire sempre.

Bufala.

Prima di entrare nella definizione delle due categorie, diciamo subito che l’introduzione degli obiettivi “all’infinito” (vedremo che questa definizione è imprecisa) risale alla fine dell’800 quando vennero introdotti i primi stativi per polarizzazione ed episcopici, nei quali era necessario introdurre ed estrarre di frequente elementi ottici a facce piane e parallele (prismi polarizzanti o semiriflettenti, filtri, e simili) fra obiettivo ed oculare. La manovra di questi elementi, per non ostacolare il lavoro al microscopio, non deve alterare la focalizzazione, poiché ritrovare il fuoco, specie a forte ingrandimento, è scomodo ed espone al rischio di schiacciare l’obiettivo sul vetrino. Chi non si è mai scontrato con questo problema, alzi la mano.

È per questo motivo che uno strumento decente deve assicurare la cosiddetta parfocalità, almeno fra i vari obiettivi, nel senso che, dopo la sostituzione, sia ancora visibile la struttura dell’oggetto e basti un ritocco, senza la necessità di andare a casaccio. Se questa esigenza deve essere rispettata anche **quando s’introduce o si estrae sopra l’obiettivo un prisma** – od elemento analogo di spessore superiore al millimetro – un normale microscopio con prismi estraibili (polarizzatore, episcopico, con canale fotografico e simili), non sarebbe accettabile: **la focalizzazione verrebbe alterata in misura crescente**, quanto più spesso è il prisma.

Ma perché un elemento trasparente a facce piane produce uno spostamento della messa a fuoco, vale a dire uno spostamento della posizione dell’immagine? Se la distanza oggetto-obiettivo (“coniugata oggetto”) non cambia, perché cambia la “coniugata immagine”? Dopo tutto, abbiamo presupposto un elemento a facce piane, quindi senza “potenza”, senza potere convergente.

Se parliamo di obiettivi “normali” (“a coniugata finita”), la spiegazione della perdita del “fuoco” è semplice, come si deduce dalla figura seguente: tutta colpa della rifrazione.

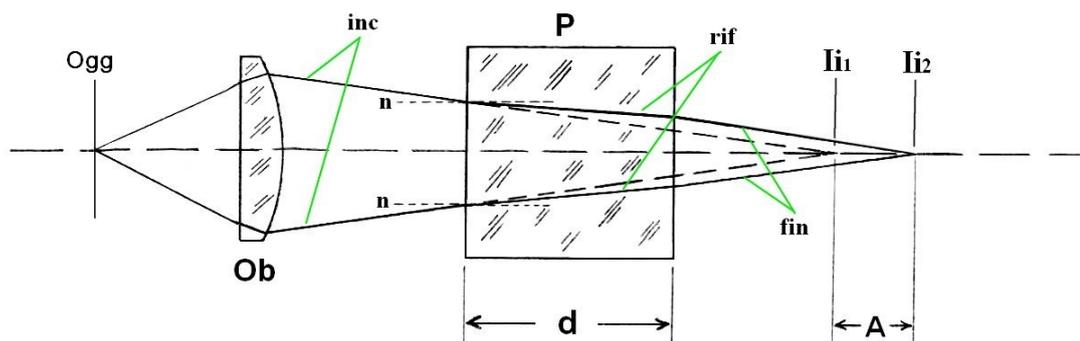


Fig. 1 – Un qualunque raggio (**inc**) del fascio emergente dall’obiettivo Ob, dovrebbe concorrere nell’immagine intermedia (**Ii1**) seguendo il tracciato delle righe a tratteggio largo.

Invece, in presenza di un elemento a facce piane e parallele (come il prisma P), ogni raggio, tranne quello assiale, incontra le superfici d’incidenza e d’emergenza del prisma P in direzione non perpendicolare (la normale alla superficie d’incidenza del prisma è indicata con **n**). Non può quindi che rifrangersi (**rif**) e si avvicina alla normale **n**. Quando tale raggio rifratto incontra la superficie d’emergenza del prisma, viene di nuovo rifratto, si allontana dalla normale (**fin**), e confluisce in un nuovo piano (**Ii2**). È come dire che l’immagine intermedia si sposta dal piano **Ii1** al piano **Ii2**. Si può parlare di un “avanzamento d’immagine” pari ad A

Si può dimostrare che il valore di A dipende, entro certi limiti, solo dall’indice di rifrazione

del prisma (n) e dal suo spessore (d) secondo la formula: $A = [(n - 1) / n] \cdot d$

Per i valori dell'indice dei vetri normali (circa 1,5), A risulta pari circa ad un terzo dello spessore d .

La situazione descritta nella figura precedente rispecchia il funzionamento di un microscopio "normale" in cui l'oggetto si trova "un po' prima" del fuoco dell'obbiettivo, cioè ad una distanza (dall'obbiettivo) leggermente superiore alla focale di esso. In queste condizioni, com'è noto, l'immagine si forma dall'altra parte dell'obbiettivo, ad una distanza superiore al doppio della focale di esso. In ogni punto dell'immagine confluisce così un fascio convergente ed i raggi di esso non saranno perpendicolari alla superficie di un eventuale prisma interposto: saranno rifratti. Da qui nasce l'"**avanzamento**" dell'immagine, provocato dall'eventuale presenza di un prisma, come è spiegato nella figura precedente.

Se invece l'oggetto si trova nel piano focale anteriore dell'obbiettivo, per ogni punto di esso emerge dalla lente un fascio parallelo¹. È come dire che l'immagine si trova a distanza infinita. Quest'affermazione nasce dalla stessa definizione di "fuoco" (si veda, in questo sito, il manuale "Problemi tecnici della microscopia ottica", cap. 2.6, fig. 14).

Quando l'oggetto si trova nel primo piano focale dell'obbiettivo, si crea allora una nuova situazione, ed il fascio emergente dall'obbiettivo si focalizza a distanza infinita ("le rette parallele s'incontrano all'infinito ..."): l'immagine intermedia non si troverebbe più all'interno del tubo, come nel sistema "normale". Ecco perché la presenza di un prisma in questo cammino "telecentrico" (con fuoco a distanza infinita) non produce effetti sul piano della formazione dell'immagine; i singoli fasci non sono più convergenti.

In altre parole, si può dire che un fascio parallelo non subisce alterazioni attraversando un elemento a facce piane e parallele, come il prisma del nostro esempio. **Di conseguenza, in un microscopio in cui l'oggetto si trova nel primo piano focale dell'obbiettivo, l'introduzione di un prisma come quello descritto non comporta alcuna modificazione o spostamento dell'immagine intermedia.**

In realtà, data l'estensione dell'oggetto, che non è mai puntiforme, i raggi che emergono da tutti i punti del piano oggetto, tranne quello assiale, attraversano obliquamente l'elemento a facce parallele e ciò comporta lievi aberrazioni (cromatica laterale, astigmatismo, ecc.) e variazioni d'ingrandimento. Dato però il modesto valore del campo di un obbiettivo da microscopio (pochi gradi), gli effetti descritti risultano irrilevanti: gli angoli d'incidenza sul prisma sono molto piccoli.

Dunque, per risolvere il problema dello spostamento dell'immagine intermedia (e del fuoco) conseguente all'introduzione di un prisma, i costruttori avevano adottato proprio l'espedito di calcolare il sistema prevedendo un oggetto sottile perpendicolare all'asse, posto esattamente nel primo piano focale dell'obbiettivo.

A questo punto nasce naturalmente un problema: se il fascio che normalmente concorre nell'immagine intermedia (un fascio convergente) nella nuova configurazione diventa parallelo, dove va a finire l'immagine stessa? Se il fascio emergente dall'obbiettivo è parallelo, come può convergere in un'immagine? Ovvero, se l'oggetto è nel fuoco di una lente convergente e l'immagine da questo fornita si trova a distanza infinita, come posso utilizzarla?

Il problema si risolve facilmente: se un fascio parallelo attraversa una lente convergente, quest'ultima lo rende convergente, convergente nel suo piano focale. Dunque, se dopo l'obbiettivo si pone una debole lente convergente, nel secondo fuoco di essa, per la definizione stessa di fuoco, si forma un'immagine, che sarà l'immagine intermedia da esaminare con l'oculare del microscopio. Si veda la figura seguente.

¹ Per "fascio parallelo" s'intende qui un fascio formato da raggi paralleli fra loro, un fascio "collimato", un fascio "coniugato all'infinito", con un punto di convergenza a distanza infinita, o "afocale", senza un fuoco definito. Lo si può chiamare "**fascio telecentrico**" in quanto il suo punto di convergenza ("centro") si trova a grande distanza ("tele").

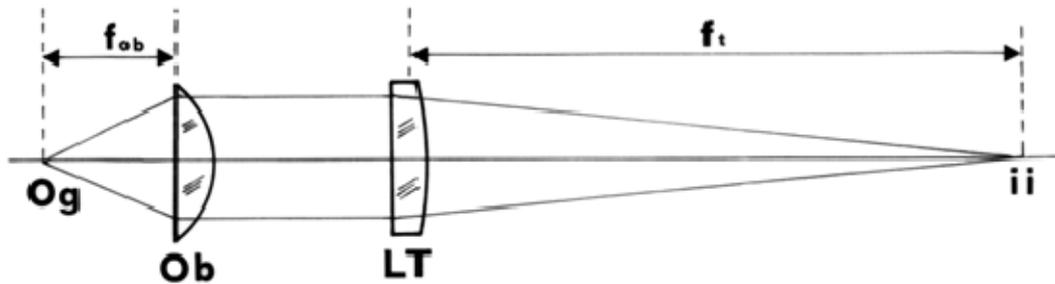


Fig. 2 – Schema essenziale dell'obiettivo "all'infinito". L'oggetto Og si trova dall'obiettivo ad una distanza pari alla focale di esso (f_{ob}) e l'immagine che se ne forma è coniugata "all'infinito", su un piano a distanza infinita.

La lente convergente LT fa convergere il fascio parallelo nel proprio piano focale posteriore (ii) e qui si forma quindi l'immagine intermedia.

La lente LT della figura precedente si pone all'interno del tubo (e per questo si chiama "lente di tubo") e, assieme all'obiettivo, produce quell'immagine reale ingrandita che poi l'oculare dovrà raccogliere per trasformarla in immagine finale (virtuale) adatta alla visione.

Nello spazio fra l'obiettivo e la lente LT , per ogni punto dell'oggetto, si può disporre di un fascio parallelo, insensibile all'interposizione di elementi trasparenti a facce piane e parallele.

Lo schema essenziale della figura precedente è quello adottato in ogni caso per l'uso degli obiettivi "all'infinito", che andrebbero allora chiamati "a seconda coniugata infinita", nel senso che la distanza fra essi e l'immagine da essi prodotta sarebbe infinita, se non fosse che la lente di tubo la riporta a valori realistici in modo da consentire l'uso di tubi di lunghezza accettabile.

Fig. 3 – Schema che illustra la differenza essenziale fra gli obiettivi "normali" (a sinistra) e quelli "all'infinito": la presenza di una "lente di tubo" convergente sopra l'obiettivo.

I simboli indicano:

a = altezza dell'immagine intermedia (distanza di essa dall'orlo superiore del tubo);

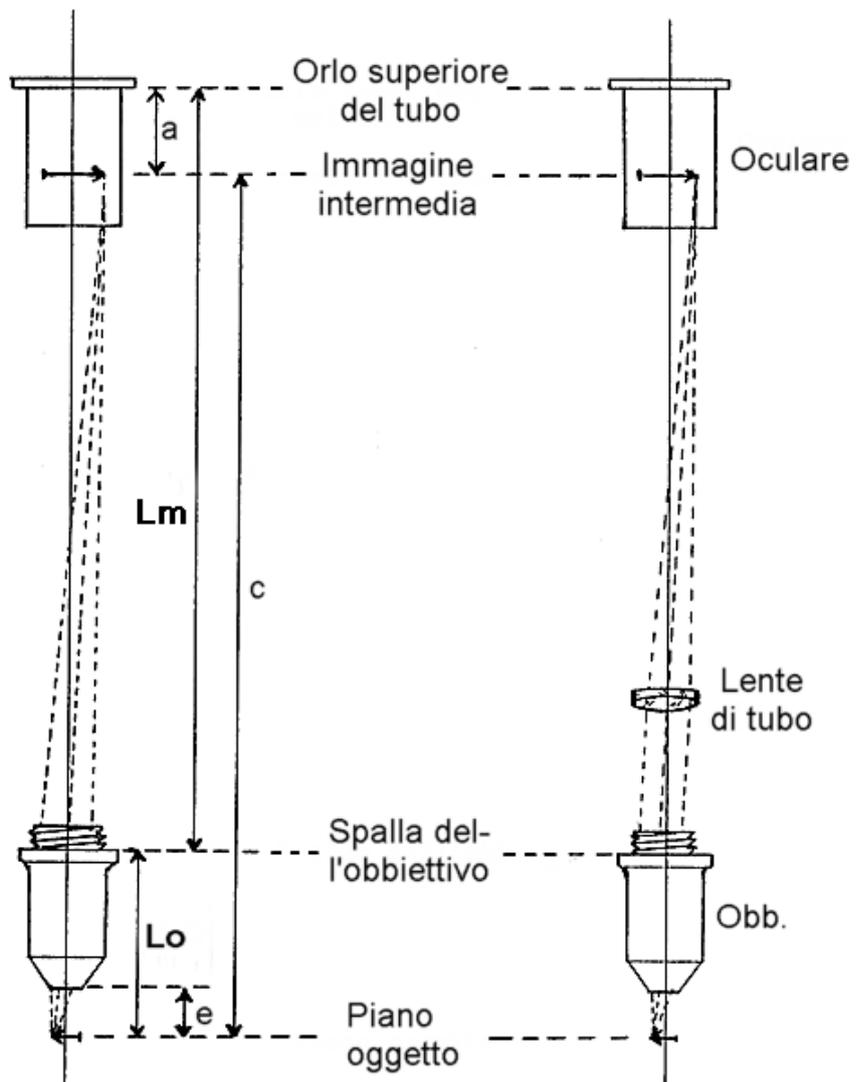
c = distanza complessiva fra piano oggetto e piano immagine;

e = distanza libera di lavoro dell'obiettivo (WD);

Lm = lunghezza meccanica (otticamente equivalente) del tubo; corrisponde alla distanza fra spalla dell'obiettivo e spalla dell'oculare;

Lo = lunghezza meccanica dell'obiettivo fra spalla e piano oggetto (lunghezza di parfocalità).

Visti da fuori, i due obiettivi sembrano uguali, ma nei dettagli le differenze sono forti.



Si può allora definire un obiettivo da microscopio “normale” come un sistema convergente forte il quale, dato un piano oggetto (OB nella figura seguente) posto dal suo centro ottico (dal suo primo piano principale, per l'esattezza) ad una distanza (a) di poco superiore alla sua distanza focale (f), produce di quel piano oggetto un'immagine reale ingrandita e rovesciata ad una distanza (a') superiore al doppio della sua focale; tale immagine (O'B' nella figura) rappresenta l'“immagine intermedia” di cui l'oculare produrrà un'immagine virtuale ulteriormente ingrandita.

La distanza obiettivo-immagine (a'), la “coniugata immagine” o “seconda coniugata”, ha dunque valore finito e perciò gli obiettivi “normali” vanno indicati come “**obiettivi a seconda coniugata finita**” o “obiettivi a coniugata finita”.²

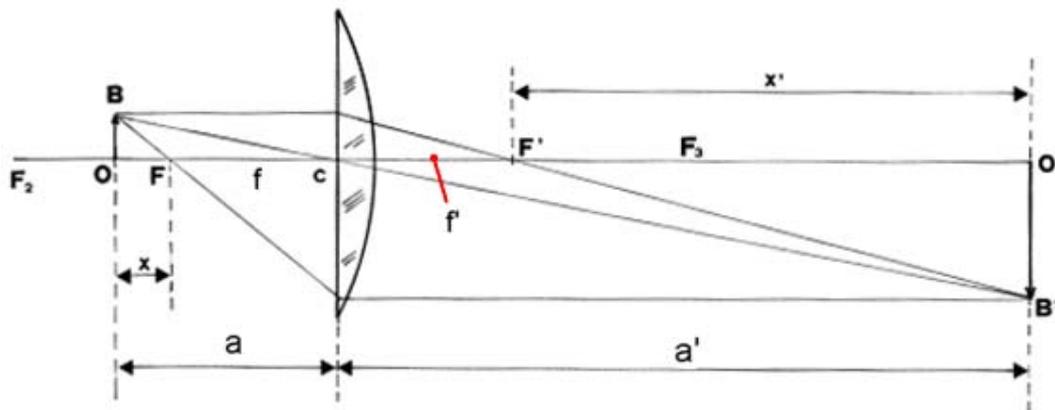


Fig. 4 – Lo schema di base di un obiettivo da microscopio “a seconda coniugata finita”.

a ed a' sono la prima e la seconda coniugata della lente. f ed f' le sue lunghezze focali. F ed F' i suoi fuochi. x ed x' i “tiraggi” o “distanze extrafocali”.

Nello schema è indicato con c il “centro ottico” della lente, il punto attraversando il quale un raggio non subisce deviazione. Tale concetto ha senso in una lente ideale, infinitamente sottile; in una lente reale occorre invece considerare i due “punti principali” ed altre complicazioni.

Per contro, gli obiettivi “all'infinito”, secondo lo schema delle figg. 2 e 3, sono progettati per avere un piano oggetto posto dall'obiettivo stesso ad una distanza pari alla sua focale. Per la definizione di fuoco, l'immagine (reale o virtuale, la distinzione perde di senso), rovesciata, si forma a distanza infinita, con ingrandimento concettualmente infinito. La seconda coniugata diviene così infinita e si deve parlare di obiettivi “**a seconda coniugata infinita**” o “**a coniugata infinita**”.

Tale obiettivi, come detto sopra, debbono essere montati su uno stativo che contenga a qualche centimetro sopra l'obiettivo stesso una debole lente convergente, la “**lente di tubo**”.

INTERCAMBIABILITÀ

Il primo problema che si pone appena ci si trova davanti ad un corredo misto riguarda la possibilità di usare obiettivi “all'infinito” su uno stativo privo di lente di tubo o viceversa usare obiettivi a coniugata finita su uno stativo contenente una lente di tubo.

A priori, è chiaro che un obiettivo da microscopio, che deve dare il massimo in fatto di definizione e quindi di correzione delle aberrazioni, viene progettato per operare con valori definiti di apertura, campo, e valore delle coniugate. Se si passa da una coniugata immagine di 160 mm ad una di lunghezza infinita, o viceversa, qualcosa deve succedere. Il sistema è troppo critico.

² I produttori non dichiarano mai il valore esatto di questa coniugata poiché essa dipende da altri valori, come la posizione dei piani principali dell'obiettivo e la posizione del primo fuoco dell'oculare. Si limitano ad indicare il valore richiesto per la “lunghezza meccanica del tubo” o **Lm** (vedi la didascalia della fig. 3).

Il valore di **Lm** è spesso 160 mm, ma in passato era spesso inferiore (strumenti miniaturizzati o giocattolo) o superiore: 170 ad es.

Prima di trarre conclusioni, occorre quantificare gli effetti dell'interscambio appena descritto.

Cosa di meglio di uno star test?

Nelle figure che seguono si vede il comportamento di un classico acromatico 40/0,65 a coniugata finita, operante sullo stativo previsto dal costruttore, con lunghezza meccanica di tubo $L_m = 160$ mm.

Figg. 5/6/7 – Le centriche sopra e sotto il miglior fuoco appaiono molto simili, segno che l'aberrazione sferica è ben corretta.

Una leggera differenza di colore fra di esse rivela un residuo di cromatica longitudinale, ma questo è fisiologico in un obiettivo acromatico classico.



Le centriche nel miglior fuoco sono abbastanza regolari (buona centratura) e mostrano un paio di anelli di diffrazione, com'è normale (il secondo anello è molto pallido poiché contiene solo il 2,8% dell'energia totale di una centrica ideale – si veda, in questo sito, il manuale “Problemi tecnici della microscopia ottica”, cap. 18.3, tab.III).



Queste tre foto sono state riprese al centro del campo di un oculare acromatico 10×, seguito da un ingrandimento elettronico di 3,5×.

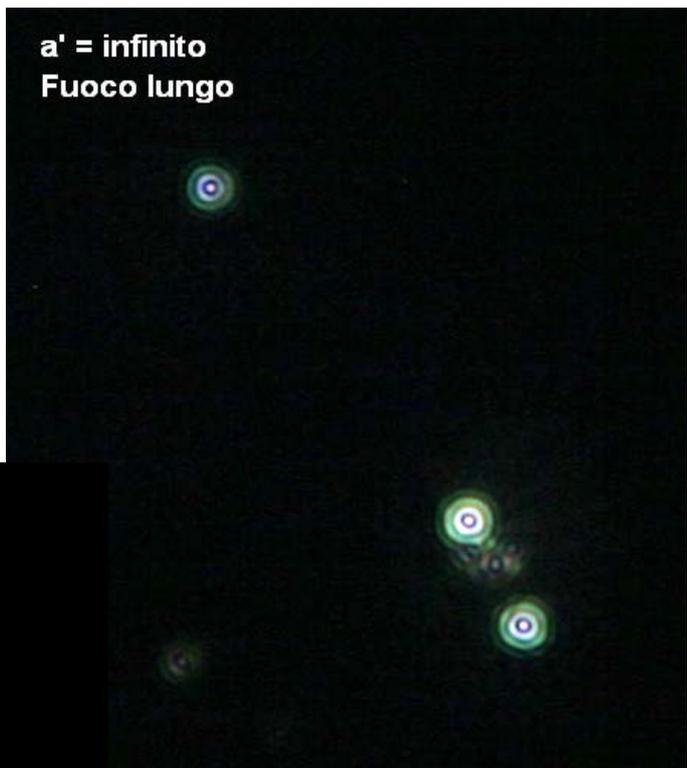
La lamella era dello spessore prescritto ($d = 0,17$ mm).

Ora trasportiamo lo stesso obiettivo su uno stativo contenente una lente di tubo, dunque predisposto per obiettivi a “coniugata infinita”.

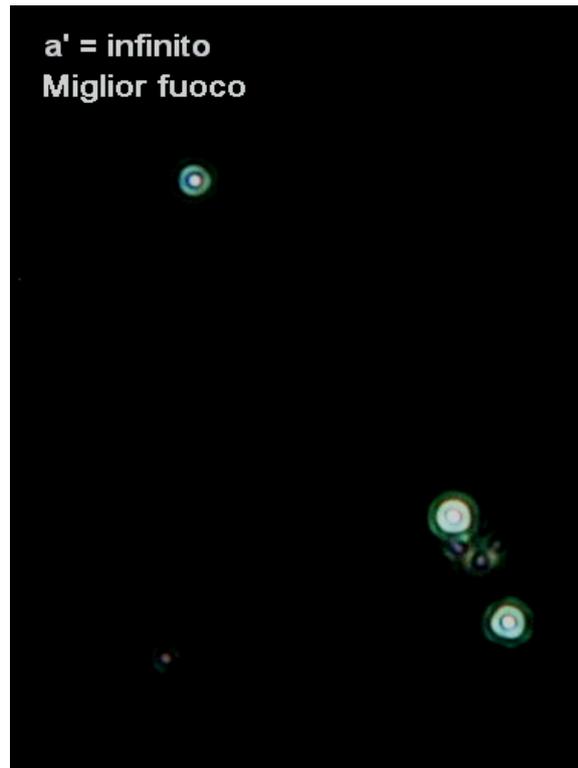
Figg. 8/9/10 – Sopra il miglior fuoco è ben visibile la centrica “ad anelli”, indice di un tubo troppo lungo: “infinito” invece che 160 mm!

Il risultato è un’aberrazione sferica fortemente sovracorretta.

La diagnosi è confermata dal fatto che, col fuoco “corto”, appare la tradizionale “immagine sfumata”.



Nel miglior fuoco, la centrica sembra regolare, ma è più grande del normale (confronta con la fig. 6) e gli anelli sono più intensi. Anche questo è segno di aberrazione sferica.



Queste tre foto sono state riprese al centro del campo con un oculare acromatico 10×, seguito da un ingrandimento elettronico di 4×.

Senza tanti calcoli, sembra chiarito che obiettivi “a coniugata finita” ed obiettivi “a coniugata infinita” non sono compatibili: l’alterazione della seconda coniugata fa lavorare l’obiettivo in condizioni non previste dal progetto ed uno dei fattori che più influiscono sulla correzione della sferica risulta alterato.

Ricordiamo che i fattori esterni che influiscono sul residuo di sferica di un obiettivo, a parte la ricetta, il progetto, quindi la sua struttura, sono lo spessore della lamella e la lunghezza del tubo.

Un cambiamento nella lunghezza del tubo altera poi anche la parfocalità.

Per essere onesti, l'effetto visibile nelle foto precedenti, una perdita di correzione della sferica, diventa via via meno importante usando obiettivi sempre più deboli: in una lente semplice, il valore della sferica (espresso come diametro del cerchio di confusione) è all'incirca proporzionale al cubo dell'apertura. Se applichiamo questo criterio all'obiettivo usato per ricavare le foto di cui sopra (40/0,65) e lo confrontiamo con un obiettivo, sempre acromatico, 10/0,25 otteniamo: $0,65^3 = 0,275$; $0,25^3 = 0,0156$. Il cubo delle due aperture è 0,275 e, rispettivamente, 0,0156. Il rapporto fra i due cubi è: $0,275:0,0156 = 17,63$. Questo significa che il valore dell'aberrazione sferica dell'obiettivo 10/0,25 sarebbe quasi 18 volte più piccolo di quello dell'obiettivo 40/0,65, a parità di condizioni.

Il calcolo qui esposto si basa su casi ideali e criteri semplificati, ma può dare un'idea di come vanno le cose.

Prima di procedere, ricordiamo che molti costruttori, piuttosto che produrre due serie di obiettivi con diverso valore della seconda coniugata, due serie che abbiamo visto essere incompatibili fra loro, riescono ad aggirare il problema dello spostamento d'immagine provocato dall'introduzione dei prismi con un semplice artificio.

Si tratta in sostanza di creare una porzione del cammino ottico del microscopio, fra obiettivo ed oculare, in cui (per ogni punto del campo oggetto) esista un fascio parallelo, collimato, che non risente dell'introduzione di elementi a facce piane e parallele. L'abbiamo chiamato "**fascio telecentrico**".

Il metodo usato è quello definito "**Telan**" (si veda, in questo sito, il già citato manuale "Problemi tecnici della microscopia ottica", cap. 3.2.2, dal quale riportiamo la fig. 17).

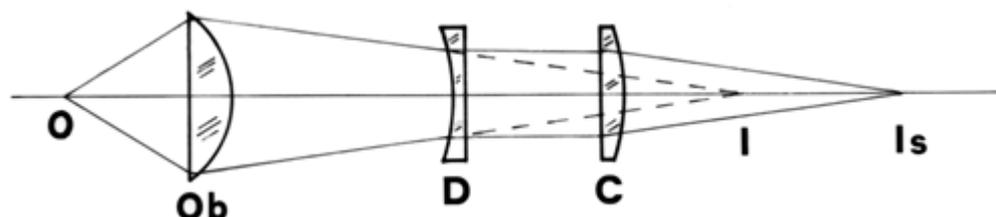


Fig. 11 – **Ob** rappresenta un obiettivo a coniugata finita, capace di produrre per proprio conto un'immagine intermedia in **I**. Il sistema Telan consiste in una prima lente divergente (**D**) il cui fuoco si trova proprio in **I**; essa trasforma il fascio convergente in uno parallelo. Una seconda lente convergente (**C**) fa convergere il fascio collimato nel suo fuoco (**Is**). Se le due focali, della lente **D** e della **C**, sono uguali, in **Is** si forma un'immagine intermedia secondaria con le stesse caratteristiche di quella primaria, in **I**.

Lo spazio fra le medesime lenti sarà telecentrico, e questo era lo scopo da raggiungere.

Le lenti **D** e **C** dovranno essere corrette in modo da non alterare le correzioni dell'obiettivo.

Ovviamente, il sistema Telan produce un avanzamento d'immagine pari alla distanza **D-C**, ma di questo si tiene conto nella costruzione meccanica dello strumento.

Il sistema Telan consente quindi di usufruire dei vantaggi del sistema telecentrico, pur facendo uso di obiettivi a coniugata finita.

Va ricordato anche che, nei microscopi stereoscopici, specie in quelli a schema CMO, il cambiamento dell'ingrandimento non viene ottenuto sostituendo l'obiettivo, ma introducendo qualche sistema intermedio afocale (un piccolo cannocchiale secondo lo schema di Galileo che prevede oggetto ed immagine finale a distanza infinita). Tale sistema deve funzionare in un fascio telecentrico e pertanto l'obiettivo principale di questi microscopi stereoscopici opera con la seconda coniugata infinita; sopra al sistema galileiano afocale si trova naturalmente una lente di tubo (si veda, nel manuale "Problemi tecnici della microscopia ottica", il cap. 29.7).

ENTRIAMO NEI DETTAGLI

Il principio della “seconda coniugata infinita” essendo chiarito, occorre precisare qualcosa.

●● La struttura a seconda coniugata infinita facilita l’intercambiabilità degli accessori e la costruzione di strumenti a struttura modulare. È una comodità per il costruttore, più che per l’utente. **Le prestazioni essenziali dell’obiettivo** (risoluzione, definizione, contrasto, campo) **non c’entrano**: dipendono solo dal progetto e dalla sua realizzazione. Sul piano teorico, nessuna delle due categorie di obiettivi può pretendere un primato.

D’altra parte questa disposizione presenta varie conseguenze.

●● Lo spazio telecentrico o afocale destinato all’introduzione dei prismi deve essere contemplato nel progetto dell’obiettivo e di tutto lo strumento: ne coinvolge tutta la struttura.

●● L’ingrandimento dell’obiettivo “all’infinito” dipende dalla sua focale, ma anche da quella della lente di tubo (si vedano, nel manuale “Problemi tecnici della microscopia ottica”, il cap. 2.6.2, 3.2.3 e 12.2); per calcolarlo si può fare questa approssimata considerazione: l’immagine intermedia è formata dal complesso dell’obiettivo + lente di tubo, che per il momento consideriamo come un’unica lente sottile; la prima coniugata (**a** – fig. 4) di questo complesso è la focale **f_{ob}** dell’obiettivo (fig. 2); la seconda coniugata (**a’**) è la focale della lente di tubo (**f_t**). Quindi, applicando la formula tradizionale per il calcolo dell’ingrandimento lineare trasversale, si ha:

$$M = \frac{a'}{a} = \frac{f_t}{f_{ob}}$$

In altre parole: un obiettivo a coniugata infinita produce l’immagine intermedia solo congiuntamente alla lente di tubo. Si può quindi considerare tale duplice sistema come un normale obiettivo a coniugata finita: basta ricordarsi che abbiamo a che fare con un sistema complesso.

Quando **f_t** è pari a 250 mm, si ha $M = 250 / f$; questa è l’espressione dell’ingrandimento visuale di un oculare e pertanto va seguita dal simbolo “×”. In genere, infatti, i costruttori indicano l’ingrandimento degli obiettivi a coniugata infinita con un numero seguito da “×”³.

Questa situazione è quella dei primi strumenti che, nel progetto di E. Abbe, dovevano montare una lente di tubo proprio con 250 mm di focale. Ma poi le cose sono evolute ed oggi la focale della lente di tubo varia da 160 ad oltre 250 mm, a seconda del costruttore, e quel valore raramente è dichiarato. Solo in rari casi viene dichiarata la focale dell’obiettivo. L’utente quindi non ha modo di calcolare l’ingrandimento del suo obiettivo, salvo fidarsi della notazione incisa su di esso; ma il risultato è che quell’obiettivo **deve** essere utilizzato **su quello stativo** e non su altri, a meno che non si possa verificare che essi montano una lente di tubo colla stessa focale.

Oltre tutto, se un dato obiettivo “all’infinito” viene usato con una lente di tubo a focale maggiore (o minore) di quella prevista dal costruttore, il diametro dell’immagine intermedia risulterà più grande (o più piccolo) del previsto e quindi l’oculare ne perderà una parte oppure ne mostrerà una zona periferica dove le correzioni non sono garantite.

Ma qui si presenta un’altra conseguenza: come si è appena detto, **f_t** è variabile almeno fra 180 e 250 mm, mentre la seconda coniugata di un obiettivo normale (che non coincide con la lunghezza del tubo poiché dipende dalla posizione del secondo punto principale dell’obiettivo e del primo fuoco dell’oculare) si aggira su 140 - 180 mm. Ne risulta che, a parità d’ingrandimento, un obiettivo a coniugata infinita ha di solito una focale maggiore del corrispondente a coniugata finita. Se maggiore è la focale, a parità di apertura sarà anche maggiore il diametro delle lenti e quindi l’ingombro generale dell’obiettivo.

³ Per gli obiettivi a coniugata finita, come dovrebbe essere noto, l’ingrandimento va espresso come rapporto di segmenti e quindi va indicato come “n:1”, come si fa per i disegni e le carte topografiche. L’espressione “n ×” è errata.

●● La distanza obiettivo – lente di tubo, influenza l’ingrandimento?

Si è detto che un obiettivo a coniugata infinita produce l’immagine intermedia reale solo congiuntamente alla lente di tubo e si può quindi considerare tale duplice sistema come un normale obiettivo a coniugata finita. La focale dell’obiettivo da considerare nelle formule dell’ingrandimento è allora la focale complessiva del sistema obiettivo + lente di tubo e tale focale dipende dalla distanza fra obiettivo e lente di tubo. Ma quella distanza, come si è visto, può variare entro ampi limiti non solo da uno stativo all’altro, ma anche in seguito all’introduzione di qualche tubo od accessorio intermedio. Ma come fa un obiettivo a coniugata infinita + lente di tubo a dare sempre lo stesso ingrandimento se la sua focale complessiva non è definita?

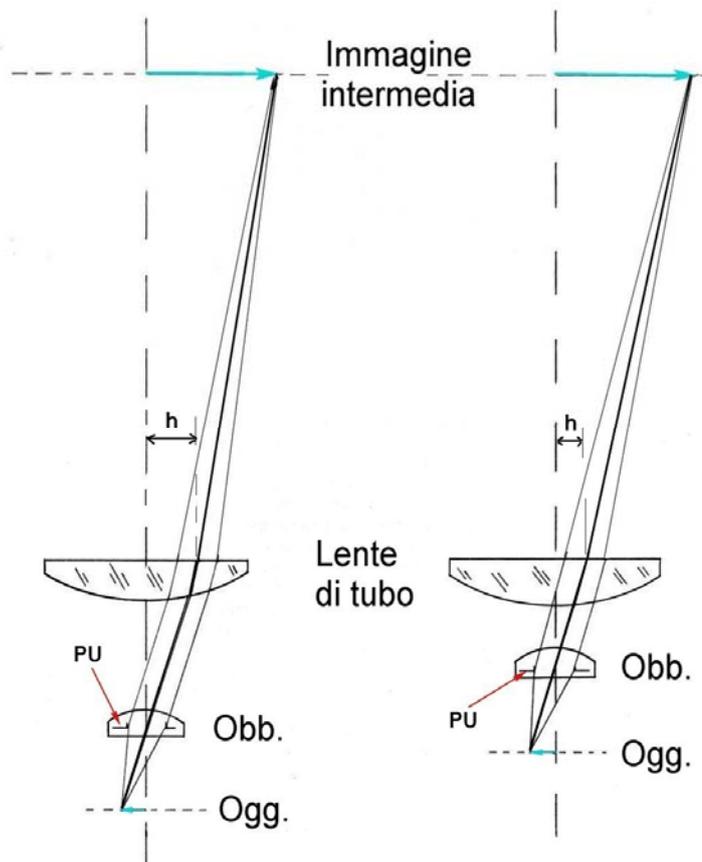
Questa apparente contraddizione si supera pensando che, variando la distanza fra obiettivo e lente di tubo, varia anche la posizione dei punti principali del sistema e l’altezza h d’incidenza dei fasci prodotti dall’obiettivo sulla lente di tubo stessa. Insomma, variando la distanza fra le due parti, varia il sistema complessivo sia nella sua focale che in altri parametri, e più o meno i vari effetti si elidono reciprocamente in modo che l’ingrandimento non vari.

Una visione semplice, forse troppo semplice, del concetto può venire dalla figura seguente.

Fig. 12 – A destra, uno schema di un obiettivo ideale “all’infinito” con la sua lente di tubo. Con PU è indicata la pupilla d’uscita dell’obiettivo⁴. Le frecce verdi indicano un segmento nel piano oggetto ed il suo corrispettivo nel piano dell’immagine intermedia.

Se la distanza obiettivo-lente di tubo viene aumentata (a sinistra) il fascio corrispondente ad un punto estremo dell’oggetto sembrerebbe allontanarsi maggiormente dall’asse (a livello della lente di tubo), aumentando le dimensioni dell’immagine intermedia. Ma tale fascio attraversa una zona più marginale della lente di tubo e pertanto viene maggiormente deviato verso l’asse in quanto l’“effetto cuneo” della lente diviene più forte⁵.

Il risultato finale è che, globalmente, nessuno si accorge di nulla. Ma qualche conseguenza è sempre possibile: il fascio utile globale che attraversa la lente di tubo si allarga (per es. se la distanza fra le due lenti aumenta) e quindi può venir intercettato dalla montatura della lente di tubo: ne consegue una vignettatura.



●● La notazione

Abbiamo già detto che l’ingrandimento di un obiettivo “all’infinito” va indicato con un numero seguito dal segno di moltiplicazione “per” \times (che non è la lettera “x”). Ma va sempre tenuto presente che tale valore è reale solo su uno stativo contenente una certa lente di tubo in una certa posizione. Usare quell’obiettivo su uno stativo diverso, può significare alterarne l’ingrandimento.

Inoltre, su quell’obiettivo non andrà indicata la lunghezza di tubo “finita” (160, 170 mm o altro) ma quella infinita, col segno matematico “ ∞ ”.

⁴ La pupilla d’uscita di un sistema ottico è il suo diaframma o l’immagine virtuale di questo, prodotta dalle lenti che stanno fra di esso e l’immagine.

⁵ Una lente convergente è limitata da due superfici che sono parallele fra loro solo al centro. Sui margini, esse formano un diedro che, come nei prismi, non può che deviare un qualunque fascio ottico che lo attraversi.

Le altre notazioni (apertura, classe di correzione, eventuale tipo d'immersione, spessore della lamella, ecc.) sono comuni a tutti gli obiettivi. Un esempio: "Fluorite 40 ×/0,75 – ∞/0,17".

●● Il valore della lunghezza meccanica (equivalente) del tubo (Lm)

Tale valore non ha più senso, poiché esso dipende dalla distanza fra obiettivo e lente di tubo, da altri dettagli geometrici dello stativo, dall'introduzione di tubi intermedi, ecc.

Il valore ∞ presente nella notazione si riferisce alla seconda coniugata dell'obiettivo, non a parametri meccanici.

●● Le correzioni della lente di tubo

Qui le cose si complicano. In linea di massima, dato il piccolo valore del campo angolare e dell'apertura della lente di tubo, sarebbe sufficiente che tale lente fosse corretta da cromatica longitudinale: la sferica è comunque piccola, come l'apertura. In tal modo, la lente di tubo non altera le correzioni dell'obiettivo.

Spesso, infatti, quella lente è costituita da un semplice doppietto acromatico.

Ma tutto dipende dalle correzioni dell'obiettivo. Infatti, alcuni costruttori (Zeiss Oberkochen, ad es.) predispongono lenti di tubo semplici, dotate di un residuo di cromatica ben definito. Poiché la lente di tubo è comune a tutti gli obiettivi del medesimo costruttore, è possibile correggere un residuo di cromatica che sia comune ad intere serie di obiettivi. Ciò facilita il lavoro del progettista, ma rende impossibile usare quegli obiettivi su stativi di altro costruttore.

●● L'attacco a vite

Non vi sono regole. Sovente, il passo di vite è quello classico "inglese" (RMS), ma si usano anche passi di maggior diametro. La ragione di ciò è stata detta prima: "... un obiettivo a coniugata infinita ha di solito una focale maggiore del corrispondente a coniugata finita. Se maggiore è la focale, a parità di apertura sarà anche maggiore il diametro delle lenti e quindi l'ingombro generale dell'obiettivo".

PROBLEMI PRATICI

A questo punto, se un micrografo si trova ad acquistare un obiettivo che corrisponde a particolari sue esigenze e si accorge che "sta dall'altra parte" (obiettivo "all'infinito" su uno stativo normale o un obiettivo a coniugata finita su uno stativo contenente una lente di tubo) cosa deve fare?

Caso 1) Se l'obiettivo è "all'infinito" e lo stativo non contiene una lente di tubo, sarebbe semplice mettercela.

Quale lente?

– Correzioni: spesso è sufficiente un doppietto acromatico, come quello che costituisce l'obiettivo di un binocolo prismatico. In certi casi, invece, occorre una lente con correzioni speciali che solo il costruttore dell'obiettivo può fornire (se ne ha voglia).

– Diametro: possono bastare 15–20 mm.

– Focale: bisognerebbe che fosse quella prevista dal costruttore⁶. In caso contrario l'ingrandimento effettivo non è più quello nominale. Se la focale della lente di tubo è minore del previsto, l'immagine intermedia sarà più piccola del valore nominale e l'oculare ne abbraccerà una zona marginale, dove le correzioni non sono garantite. Se è maggiore, l'immagine intermedia è ingrandita più del previsto e si perde perlomeno in definizione.

⁶ Sarà difficile ottenere questo valore dal costruttore. Si può procedere per tentativi: supponendo di disporre di una serie di lenti di tubo con differente valore di focale, si cercherà quella che produce un ingrandimento dell'obiettivo simile a quello nominale. La misura di tale ingrandimento si esegue con un micrometro oggetto ed un oculare micrometrico (vedi in questo sito, sez: "Approfondimenti", il manuale "Problemi tecnici della microscopia ottica", capp. 12 e 31.2.1).

In molti casi può essere utilizzato un obiettivo di un binocolo prismatico classico, della formula “8 × 30”, che ha un diametro anche eccessivo (30 mm) ed una focale intorno a 130 mm. Tale focale è probabilmente insufficiente ed occorrerà quindi utilizzare oculari con indice di campo piccolo, per es. $s' = 12-14$ mm.

I moderni binocoli compatti del tipo “a tetto” (“roof”) posseggono obiettivi a focale insufficiente, anche meno di 100 mm.

Il doppietto deve essere orientato con la superficie più convessa, quella che nel binocolo guarda verso l'oggetto, dalla parte dell'obiettivo del microscopio.

Dove metterla?

Il doppietto deve trovarsi ad una distanza dal primo fuoco dell'oculare⁷ pari alla propria focale. Salvo il caso rarissimo di uno strumento a tubo diritto, è difficile calcolare la lunghezza otticamente equivalente di un tubo.

Il più semplice modo di posizionare la lente di tubo può essere questo: porre sul tavolino un lamierino con un piccolo foro (un pezzo di foglio d'alluminio per alimenti forato con uno spillo); montare in posizione di lavoro l'obiettivo “all'infinito”, possibilmente debole; togliere tutto ciò che si trova sopra l'obiettivo, a partire dal tubo; usare la massima luminosità possibile della microlampada (togliere tutti i filtri e l'eventuale lente a grande campo, diaframmi tutti aperti, ecc.); stando al buio, focheggiare fino a che sul soffitto si vedrà un'immagine nitida del forellino. D'ora in poi la messa a fuoco deve rimanere costante: il forellino si trova (circa) nel primo fuoco del nostro obiettivo.

Ora si ponga il tubo, munito di oculari, sulla verticale dell'obiettivo, a qualche centimetro sopra di esso (ocorrerà un supporto separato). S'introduca il nostro doppietto fra obiettivo e tubo e lo si muova verticalmente, cercando di rimanere sull'asse dell'obiettivo, finché si vede il forellino a fuoco negli oculari.

Se per ottenere questa messa a fuoco il doppietto dovesse scendere troppo ed interferire col braccio, si sollevi il tubo e si riprovi. Se il doppietto dovesse salire troppo ed interferire col tubo, non c'è rimedio. Al massimo, si può pensare di aprire il tubo ed infilare il doppietto in qualche spazio fra i prismi.

Dopo ciò, occorre costruire una specie di tubo intermedio, da fissare al tubo (superiormente) ed al braccio (inferiormente) e montarci dentro il doppietto, allineato e centrato, all'altezza misurata prima.

La centratura non sarà critica data la grande focale del doppietto.

Caso 2) Se l'obiettivo è “normale” e lo stativo contiene una lente di tubo, sembra semplice toglierla. Ma allora, la distanza fra obiettivo ed oculare sarà quasi certamente assai più elevata dei 160 o 170 mm previsti come seconda coniugata di quell'obiettivo.

Per verificare se, per caso, la lunghezza del tubo è corretta, il modo più semplice è mettere a fuoco un micrometro oggetto e verificare se l'ingrandimento dell'obiettivo è rimasto quello previsto. Più decisiva è l'osservazione di uno star test per accertare se vi sono residui di sferica, come abbiamo visto più sopra, nelle figure 8, 9 e 10: se la sferica è corretta (centriche identiche a parità di sfocatura sopra e sotto il miglior fuoco) significa che un obiettivo lavora con le coniugate previste. S'intende che anche lo spessore della lamella che copre lo star test deve essere quello previsto dall'obiettivo in esame.

UN ESEMPIO

Per finire, possiamo esaminare un caso pratico in cui uno stativo tradizionale (mod. M12 della Wild), che funziona al meglio con obiettivi “a coniugata finita” ($L_m = 160$ mm), è stato adattato all'uso di obiettivi “all'infinito”.

La lente di tubo utilizzata è un doppietto, l'obiettivo di un binocolo prismatico come quello

⁷ Nei moderni strumenti tale fuoco si trova di solito a 10 mm sotto l'orlo del tubo.

descritto sopra: $\varnothing = 30 \text{ mm}$, $f_o = 125 \text{ mm}$.

La cosa è stata possibile per due motivi:

- il tubo bioculare è molto compatto e la sua lunghezza equivalente è risultata molto simile alla focale del doppietto; la lente di tubo può allora stare proprio sotto al tubo (fig. 13);
- l'estremità del braccio, proprio sopra al revolver, presenta una sede più larga del doppietto stesso, con una superficie interna cilindrica ragionevolmente centrata e con una battuta inferiore piana, perpendicolare all'asse dell'obbiettivo (fig. 14).

La disposizione qui illustrata non è facilmente ripetibile con altri strumenti e comunque presenta qualche limitazione:

– Dato il valore piuttosto basso della focale del doppietto utilizzato, l'ingrandimento finale è in genere minore di quello previsto per molti obbiettivi "all'infinito"; il diametro dell'immagine intermedia sarà quindi proporzionalmente minore dell'indice di campo (s') della maggioranza degli oculari: occorre quindi usare oculari con basso s' , generalmente i più forti. Per meglio avvicinarsi alle condizioni di lavoro previste per l'obbiettivo in esame occorrerebbe conoscere la focale della lente di tubo per cui è stato progettato e l'indice di campo degli oculari contemplati dal costruttore.

– La correzione del doppietto (un semplice acromatico) si presta bene per la maggioranza degli obbiettivi "all'infinito", ma non per tutti.

Fig. 13 – I tubi bioculari della Wild (lo stesso tipo per i vari modelli di stativi) erano fra i più compatti del commercio e godevano di qualche privilegio (un sistema Telan interno, brevettato, consentiva una lunghezza di tubo fissa al variare della distanza pupillare).



Fig. 14 – L'estremità del braccio dello stativo M12 sembra fatta apposta per accogliere un oggetto discoidale contenente la lente di tubo.

Si vedono le due punte fisse e quella a vite che servono a fissare la coda di rondine inferiore del tubo.

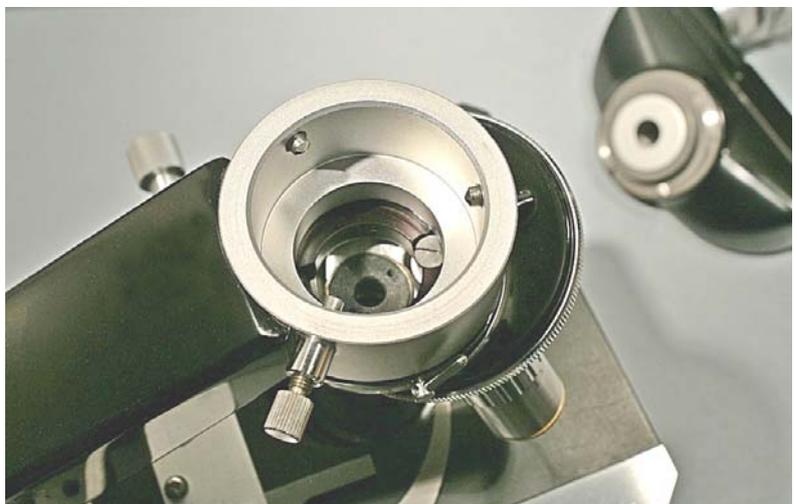


Fig. 15 – Un anello tornito fa da sede al doppietto. Due fori filettati (M3) consentono di infilarvi due viti che sono preziose per introdurre od estrarre l’anello nella sede prevista. **In questo modo, lo stativo può facilmente essere convertito per operare con obiettivi a coniugata finita ed infinita.**

Durante l’uso, le due viti vanno tolte.

Alla periferia dell’anello, tre intagli consentono di superare le tre punte viste nella foto precedente.



In altri stativi, lo spazio disponibile all’estremità del braccio può essere insufficiente e non fornire una superficie d’appoggio adeguata: nella foto seguente si vede la situazione in uno stativo classico, il mod. Gfl della Zeiss Oberkochen.

Fig. 16 – L’estremità del braccio dello stativo Gfl della Zeiss non presenta molto spazio: la superficie inferiore della cavità, su di un lato, viene a sfiorare la coda di rondine inferiore del tubo e comunque non è perpendicolare all’asse ottico.



Fig. 17 – Uno stativo PZO (mod. MS6) presenta all’estremità del braccio una cavità con la superficie interna non perpendicolare all’asse, ma lo spazio sarebbe sufficiente per introdurvi un anello di supporto per un obiettivo da binocolo del diametro di 32 mm.

Purtroppo, il tubo ha una lunghezza equivalente molto grande a causa di una lente divergente posta al suo ingresso (che crea un fattore di tubo di 1,6 ×) e la lente di tubo, per stare al posto giusto, richiederebbe una focale di quasi 200 mm.

