

# **L'ALLINEAMENTO del SISTEMA OTTICO del MICROSCOPIO**

## INDICE GENERALE

<b>L'ALLINEAMENTO DEL SISTEMA OTTICO .....</b>	<b>3</b>
<b>1 - GENERALITÀ .....</b>	<b>3</b>
1.1 - CENTRAMENTO O CENTRATURA .....	3
1.2 - ALLINEAMENTO.....	4
1.3 - L'ASSE DEL MICROSCOPIO.....	5
<b>2 - GLI ACCOPPIAMENTI MECCANICI .....</b>	<b>8</b>
<b>3 - GLI STRUMENTI DI CONTROLLO .....</b>	<b>9</b>
3.1 - L'AUTOCOLLIMATORE.....	10
3.2 - IL CANNOCCHIALE DI CENTRAMENTO.....	12
3.3 - L'OCULARE DI CENTRAMENTO .....	14
<b>4 - IL SISTEMA FORMATORE D'IMMAGINE (OBBIETTIVO ED OCULARE).....</b>	<b>15</b>
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>18</b>
<b>5 - ALLINEAMENTO DEI MICROSCOPI STEREOSCOPICI.....</b>	<b>20</b>
<b>SISTEMA CMO.....</b>	<b>20</b>
<b>SISTEMA GREENOUGH .....</b>	<b>21</b>

# L'ALLINEAMENTO del SISTEMA OTTICO del MICROSCOPIO<sup>1</sup>

Questo articolo si propone di suggerire i concetti fondamentali ed alcuni strumenti utili all'allineamento generale di un microscopio, come il tecnico e l'amatore possono dover eseguire dopo lo smontaggio e la riparazione di uno strumento. Siamo a cavallo fra il dilettantistico ed il professionale.

## 1 - GENERALITÀ

Quella parte del sistema ottico del microscopio che fornisce l'immagine finale (il "sistema formatore d'immagine") è costituita essenzialmente da obiettivo ed oculare.

Può avvenire che l'oculare sia sostituito da un "proiettivo" per la fotografia, il quale non è altro che un oculare espressamente progettato per fornire un'immagine finale reale a distanza finita, ma ciò non cambia il nostro discorso.

L'altra parte essenziale del microscopio, il "sistema illuminante", può essere più complessa e rispondere a schemi di principio più vari, che non si possono descrivere separatamente in questa sede.

In ogni caso, si tratta di sistemi di lenti sferiche<sup>2</sup> centrate, in linea di principio, su un asse comune: l'asse ottico del microscopio (poiché questo termine ricorrerà molte volte, per brevità, scriveremo d'ora innanzi: A.MI.).

Supponendo che tutte le lenti dell'obiettivo o, rispettivamente, dell'oculare siano centrate su un asse indipendente (asse ottico dell'obiettivo = A.OB. o asse ottico dell'oculare = A.OC.), avremo in realtà due assi, A.OB. ed A.OC., i quali, sempre in linea di principio, dovrebbero coincidere fra loro e con l'A.MI.

Tratteremo qui delle condizioni e degli scarti accettabili da questa coincidenza, nonché delle procedure necessarie per ottenere dallo strumento le migliori prestazioni.

### 1.1 - CENTRAMENTO o CENTRATURA

Sia dato un sistema ottico formato da due o più lenti (o sistemi riconducibili ognuno ad una lente semplice, eventualmente nei limiti dell'approssimazione di Gauss). Un esempio di un tale sistema può essere il microscopio composto, costituito dai due sistemi (o "sub-sistemi") essenziali: obiettivo ed oculare.

Ogni lente (o sub-sistema) possiede un centro ottico o (fuori dall'approssimazione di Gauss) due punti nodali ed inoltre un proprio asse ottico.

Il sistema complessivo è centrato quando i centri ottici (o i punti nodali) di tutte le singole lenti o sub-sistemi giacciono sulla stessa retta, che diventa a questa condizione l'asse ottico del sistema.

Se uno o più dei centri non giacciono sull'asse appena definito, il sistema è **decentrato**. Si può dire che la lente, il cui centro non giace sulla stessa retta degli altri, è stata traslata,

---

<sup>1</sup> In questo testo la voce: "centro ottico dell'obiettivo" significa "centro ottico (o uno dei punti nodali) dell'obiettivo"; la voce "centro ottico dell'oculare" significa "centro ottico (o uno dei punti nodali) dell'oculare". •• A.MI. = Asse ottico del microscopio •• A.OB. = Asse ottico dell'obiettivo •• A.OC. = Asse ottico dell'oculare.

<sup>2</sup> Certe lenti del sistema illuminante (collettore, condensatore) possono in realtà essere asferiche, almeno su una delle loro superfici.

rispetto alla posizione ideale, secondo una direzione non parallela all'asse comune (fig. A 1).

Se il sistema complessivo è costituito da due sole lenti (o sub-sistemi), è evidente che esso sarà sempre centrato poiché per due punti (i centri delle due lenti) passa sempre una retta.

Nel concetto di centratura appena esposto non rientra però la considerazione dell'orientamento degli assi ottici delle singole lenti, orientamento che rientra invece nel concetto di allineamento, esposto subito appresso. Perciò un sistema a due lenti, che è sempre centrato per quanto detto qui sopra, può non essere allineato quando gli assi delle due lenti non sono paralleli fra loro (fig. da A 2 ad A 7)

Il concetto di centratura non considera neppure la distanza fra le due lenti, la quale si può far rientrare nel concetto di "focalizzazione". Si intende qui la distanza "assiale", cioè secondo una direzione parallela all'asse ottico.

Un sistema può così essere centrato ma non allineato (assi non paralleli) né focalizzato (distanze assiali non corrette).

Così pure un sistema può essere focalizzato (distanze corrette) ed allineato (assi fra loro paralleli) ma non centrato. Si avrà un decentramento puro (figg. A 1, 9 e 10).

Un elemento ottico a facce piane (lamina plan-parallela o cuneo) è sempre centrato poiché non ha asse né centro ottico, ma può essere non allineato (fig. A 9, se l'elemento indicato come centrale è una lamina plan-parallela con facce non perpendicolari all'asse comune).

## 1.2 - ALLINEAMENTO

Un sistema ottico è allineato quando gli assi ottici di tutte le lenti che lo compongono sono paralleli ad un'unica direzione, che dovrebbe coincidere con l'asse comune di tutto il sistema. Se una o più delle lenti (o dei sub-sistemi) ha un asse non parallelo a quello comune, si dirà che quell'elemento è **disallineato**. Rispetto alla sua posizione ideale, esso è stato ruotato attorno ad una qualche retta non parallela all'asse comune.

I sistemi di fig. A 1 e 10 sono allineati ma non centrati; quelli di fig. A 2, 3, 4 e 5 sono centrati (su un asse teorico indicato a linea intera) ma non allineati; quelli di fig. A 6 e 7 sono anche decentrati, sempre rispetto all'asse teorico, che può essere l'asse meccanico del microscopio, come sotto definito.

Anche nel concetto di allineamento non rientra la considerazione delle distanze assiali fra i vari elementi.

Quando un sistema è centrato ed allineato, tutti i centri giacciono sulla stessa retta e tutti gli assi sono paralleli (e coincidono) colla stessa retta.

Quando, fra i vari elementi di un sistema, esistono superfici piane (specchi o lamine trasparenti a facce piane non perpendicolari all'A.MI., l'asse comune viene spezzato (figg. A 8, 9 e 10) ma, considerando l'immagine virtuale creata dallo specchio o dalla lamina, si può ugualmente identificare un asse comune non spezzato. Uno spostamento parallelo di uno specchio rispetto alla posizione ideale crea uno spostamento di una porzione dell'asse in modo che essa resta parallela a se stessa e quindi si ha un decentramento degli elementi a monte rispetto a quelli a valle dello specchio (fig. A 10); un cattivo orientamento dello specchio<sup>3</sup> può orientare male la parte dell'asse ottico a valle dello specchio rispetto alla parte a monte, e quindi provocare un disallineamento (fig. A 8); un cattivo orientamento di una lamina a facce piane e parallele provoca ancora una divisione dell'asse ottico in due parti parallele fra loro, ma non più coincidenti e quindi un decentramento puro delle parti a monte rispetto alle parti a valle della lamina (fig. A 9).

Poiché la rotazione di uno specchio provoca una rotazione di angolo doppio nel raggio

---

<sup>3</sup> per rotazione di esso attorno ad una retta passante per il punto d'incontro fra specchio ed asse ottico comune.

riflesso, l'orientamento degli specchi è molto critico. Se poi si pensa che, in generale, uno specchio male orientato è stato ruotato attorno ad una retta non passante per il centro dello specchio, esso avrà subito sia una traslazione parallela (secondo la fig. A 10), sia una rotazione (fig. A 8) e si avrà la sovrapposizione di errori di centramento e di allineamento.

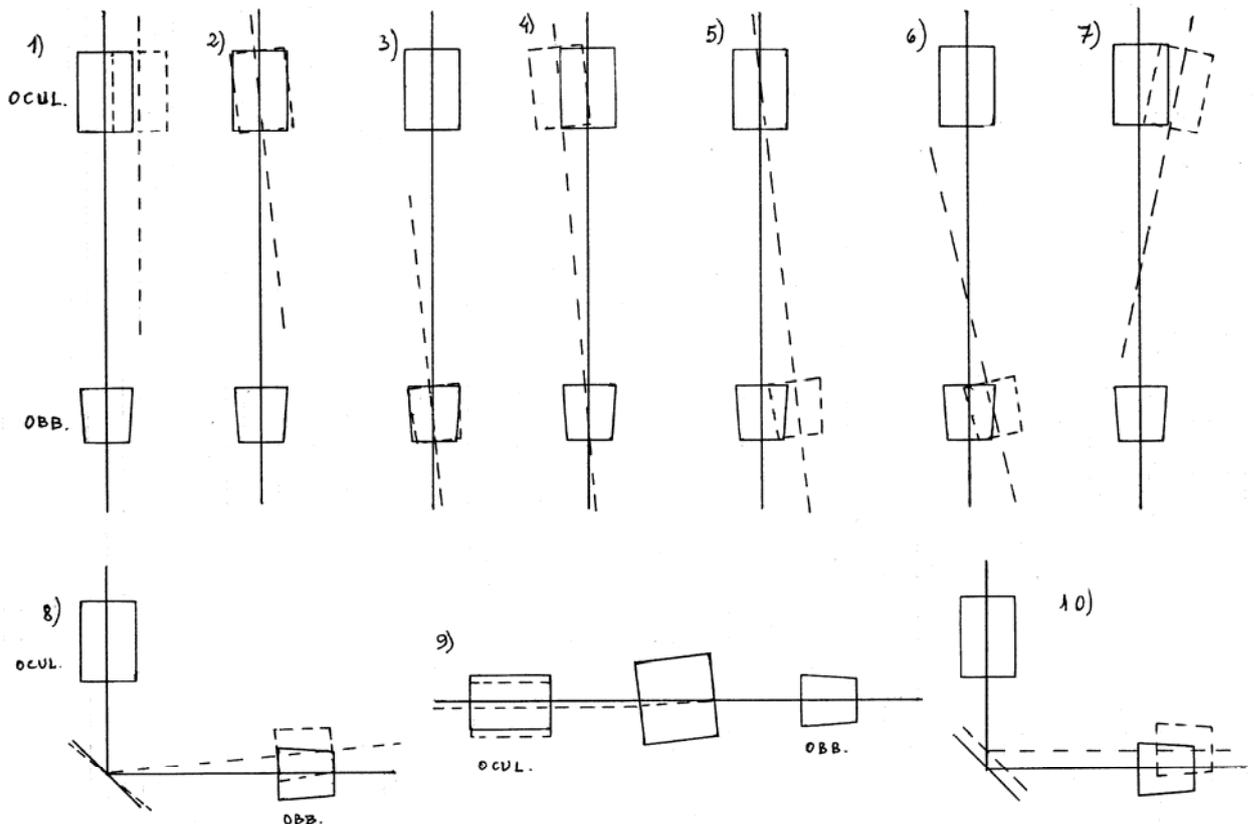


Fig. A – Casi tipici di decentramento e disallineamento (vedi testo).

In fig. A 10 è disegnato a tratteggio l'asse ottico su cui occorre allineare gli elementi a valle in conseguenza di uno spostamento parallelo dello specchio. In fig. A 8 è a tratteggio l'asse ideale conseguente ad una rotazione dello specchio.

### 1.3 - L'ASSE del MICROSCOPIO

In ogni sistema ottico alloggiato in una montatura comune, si può distinguere un asse ottico (retta ideale su cui devono essere centrate ed allineate tutte le lenti del sistema) ed un **asse meccanico**, che è la retta ideale su cui sono centrate ed allineate tutte le **superfici meccaniche significative**. Indichiamo come “significative” quelle superfici che determinano la posizione (centratura e focalizzazione) e l'orientamento (allineamento) di uno o più sottosistemi ottici.

In un microscopio, queste ultime superfici sono molte. Ecco le principali:

- Nel tubo porta-oculari (o almeno nella sua parte superiore<sup>4</sup>, poiché il “tubo” contiene in genere, fra oculare ed estremità inferiore, anche prismi o specchi, lenti, ecc.), si può considerare la superficie interna del tubo, quella che entra in contatto con l'oculare, e l'orlo superiore del tubo (“battuta d'oculare”) su cui poggia l'oculare, spesso ad opera della gravità. L'operazione di tornitura con cui è lavorata questa parte del tubo garantisce in genere una sufficiente perpendicolarità del piano dell'orlo con l'asse del tubo. Gli elementi di riferimento sono dunque l'orlo e l'asse della parte superiore del tubo (o “boccola”).

<sup>4</sup> Questa parte superiore si può chiamare “boccola”.

- L'attacco inferiore del tubo, generalmente del tipo a "coda di rondine" (CDR) "circolare"; si tratta di un tronco di cono che si continua dalla parte della base minore con un orlo piano perpendicolare all'asse (vedi la fig. B).

Qui, gli elementi di riferimento sono l'orlo piano, la cui perpendicolare dovrebbe essere parallela all'A.MI., e l'asse del tronco di cono, che dovrebbe coincidere con l'asse medesimo. Per tornitura, l'asse del tronco di cono è ragionevolmente perpendicolare all'orlo piano.

Altre volte, il tubo non termina con una coda di rondine, ma solo con una superficie piana, fissata da viti. In questo caso, esiste solo una direzione, non un asse, nel senso che non è definito il centro della superficie piana di riferimento.

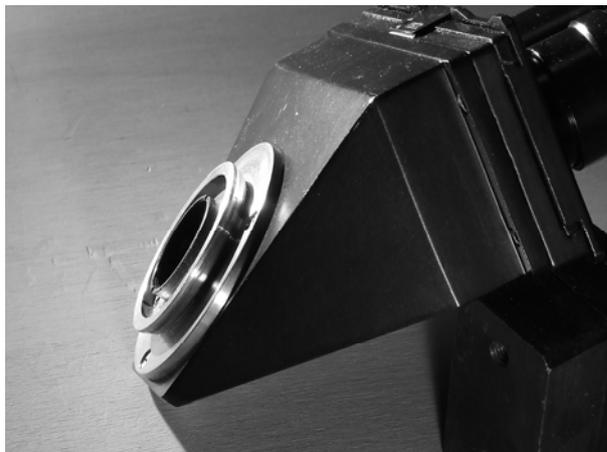


Fig. B – Esempio di coda di rondine sulla faccia inferiore di un tubo bioculare. È evidente la sezione trapezoidale dell'anello sporgente a sinistra rispetto ad una superficie circolare piana.

Se vi è una "guida cilindrica", vale quanto detto per la coda di rondine poiché anch'essa definisce un asse.

- L'estremità superiore del braccio, su cui va fissato il tubo.

In genere, vi è un orlo piano, che definisce una direzione (la sua perpendicolare); spesso vi sono tre viti (di cui una molleggiata ed estraibile) che danno la posizione della coda di rondine e definiscono un asse. Si noti che questo tipo di fissaggio è "cinematico", ed elimina i giochi. Le due viti non estraibili sono spesso costituite dalla punta di due "grani" (viti senza testa) bloccati in sede, al termine della centratura, con qualche adesivo del tipo "Loctite". Ammorbidendo l'adesivo, spesso basta l'immersione in alcool per qualche ora, è possibile ruotare i due grani e con ciò variare la centratura della coda di rondine e del tubo che essa supporta.

L'orlo piano di cui stiamo trattando può essere ricavato da un separato anello incavato, a sua volta fissato al braccio con viti; con "spessori" sotto l'anello (vedi sotto) o sfruttando il gioco delle viti è possibile allineare e centrare l'anello medesimo.

- L'attacco del revolver.

In qualche caso, il revolver è amovibile e fissato ad una slitta con sezione trapezoidale (coda di rondine "lineare"), la cui corsa è limitata da una vite regolabile e fissabile con controdado. In genere, tale vite consente di correggere la posizione della slitta e quindi del revolver in direzione sagittale<sup>5</sup>; trasversalmente, la regolazione è possibile modificando le posizioni di lavoro del revolver, come spiegato più sotto. Altre volte, il revolver o la parte fissa della slitta sono fissati a mezzo di tre o quattro viti ad una superficie piana. Sfruttando il gioco delle viti, è possibile centrare il revolver in tutte le direzioni. Con opportuni "spessori" (vedi oltre, nota 6) fra le due superfici, posti presso le viti, è possibile variare l'inclinazione del revolver, cioè l'allineamento di questa parte.

- Il braccio, cioè il supporto, orizzontale o quasi, che porta ad una estremità le superfici di riferimento sopra descritte per il tubo ed il revolver.

Il braccio può essere fissato per l'estremità opposta ad una "colonna" verticale o quasi, oppure fa corpo unico con la colonna ed è fissato al piede. In ogni caso, il fissaggio è affidato quasi sempre a superfici piane e viti. Il gioco delle viti consente di muovere fra loro il braccio

<sup>5</sup> La direzione "sagittale" in un oggetto a simmetria bilaterale giace nel piano di simmetria dell'oggetto (piano mediano).

rispetto alla colonna o la colonna rispetto al piede. Questo per quanto riguarda la centratura. Con opportuni spessori posti vicino alle viti è normalmente consentito anche variare l'orientamento, cioè l'allineamento.

Poiché il braccio porta in genere il sistema formatore d'immagine (oculare, obbiettivo e sistemi intermedi) ed il piede porta il sistema illuminante, spostando il braccio rispetto al piede si possono di solito centrare fra loro i due sistemi citati.

- Il porta-tavolino. Per il tavolino, non vi sono esigenze di centratura (si tratta di una superficie piana); è sufficiente che esso sia perpendicolare all'A.MI. Un eventuale errore in questo senso si può correggere in genere con piccoli spessori fra tavolino e porta-tavolino, che sono collegati fra loro con superfici piane e viti.

- Il porta-condensatore. Il supporto meccanico fra condensatore e relativo supporto può essere affidato a:

- 1) coda di rondine circolare; spesso, due delle viti che si impegnano sulla coda di rondine sono regolabili e consentono la centratura del condensatore. Il suo allineamento può spesso ottenersi, come per il tavolino, a mezzo di "spessori" oppure sfruttando il gioco delle viti fra il porta-condensatore e la guida verticale che ne consente la focalizzazione.

- 2) coda di rondine lineare. Non vi sono viti di centratura, ma spesso la parte fissa della coda di rondine può essere spostata rispetto al supporto sfruttando il gioco delle viti.

- 3) Doccia cilindrica. Una flangia consente l'accoppiamento col porta-condensatore ed è serrata da tre o quattro viti. Al solito, il gioco delle viti consente la centratura e qualche spessore sotto la flangia consente di correggere l'allineamento.

- Il sistema illuminante è composto in genere da almeno:

- Un'ampolla

- Un collettore

- Un diaframma di campo

- Uno o più specchi

Qualcuna di queste parti può essere fissa (spesso il collettore o il diaframma di campo), ma altre vanno centrate o allineate. La varietà delle soluzioni costruttive obbligherà ogni volta a studiare il procedimento più opportuno.

Alla luce di tutto ciò, dato il gran numero delle superfici "significative", occorre identificare quella fondamentale, quella che reca il sistema sul quale centrare ed allineare tutti gli altri. Si tratta insomma di identificare quella parte meccanica che determina l'asse generale del microscopio, ovvero un asse legato ad una o più superfici meccaniche.

Non è possibile dare regole generali. Solo la conoscenza dei principi, l'esperienza e l'intuito consentono, davanti ad uno strumento sconosciuto, di risolvere i singoli casi.

In genere conviene partire dalla superficie piana su cui poggia il tubo porta-oculari poiché spesso si tratta di una superficie fissa, non regolabile. Essa determina una direzione che deve essere assunta come parallela all'A.MI.

Subito dopo, ci si assicura che tale superficie sia parallela a quella che contiene l'orlo dei fori del revolver (o almeno del foro in posizione di lavoro); il controllo va ripetuto per ognuno dei fori e, in caso di discrepanze, si cercherà l'orientamento "medio" dei fori.

Il parallelismo fra le due superfici si può in genere ottenere con piccoli "spessori"<sup>6</sup> fra il

---

<sup>6</sup> In meccanica, uno "spessore" è una laminetta di materiale poco comprimibile, alluminio od altri metalli, di vario spessore, che serve a distanziare opportunamente due superfici prima di serrarle fra loro. È bene evitare la carta, essendo relativamente comprimibile; può andare bene il foglio d'alluminio per alimenti, ben liscio, oppure il sottile foglio di ottone che si adopera per posizionare verticalmente i ferri del tornio od altre operazioni d'officina; tale foglio, chiamato spesso "carta di Spagna", è venduto nelle ferramenta o nelle utensilerie in spessori standard, per es. 0,05 - 0,10 - 0,15 - 0,20 mm. Lo si può tagliare nelle dimensioni richieste con una robusta forbice, avendo poi cura di eliminare con una limetta le "bave", cioè le arricciature che si formano sui

revolver e la superficie cui esso è fissato e lo si controlla con l'auto-collimatore (vedi sotto, § 3.1). Viene determinata a questo punto la direzione dell'A.MI.

Per definirne anche la posizione, il modo migliore è di fissare, in luogo del tubo, il "cannocchiale di centramento" (vedi sotto, § 3.2) e, tramite questo, osservare la pupilla d'uscita di alcuni obbiettivi montati sul revolver. Se vi sono discrepanze fra un obiettivo e l'altro, si cerchi la posizione "media" delle varie pupille. Se i fori del revolver sono centrabili (alcuni microscopi polarizzatori ed episcopici), si porranno le viti di centratura a metà corsa. Per identificare le pupille, si ponga in luogo del vetrino un vetro smerigliato o un pezzo di carta sottile, più o meno focalizzato, e lo si illumini da sotto in un modo qualunque. Se la pupilla "media" non cade al centro del campo del cannocchiale di centramento, si cerchi di spostare il revolver sfruttando il gioco delle viti che lo reggono. Se il revolver è su slitta a coda di rondine lineare, si può regolare la vitolina che determina il fine corsa della slitta, e ciò dà una possibilità di centratura in direzione sagittale. Se rimane un errore di centratura in direzione trasversale, come accennato sopra, si può alterare la posizione della punta (o della sferetta o della molla<sup>7</sup>) che determina le posizioni di lavoro del revolver, in modo da modificarle tutte quante d'un colpo; poiché quello che conta è la posizione dell'obiettivo, spostare trasversalmente il revolver o la posizione dei fori di esso è la stessa cosa.

Se le discrepanze fra un obiettivo e l'altro sono troppo forti, si pongano gli obbiettivi più forti in quei fori che danno loro la maggiore congruenza reciproca.

## 2 - GLI ACCOPPIAMENTI MECCANICI

Le varie parti dello stativo che recano le superfici "significative" sopra accennate ed i vari sub-sistemi sono accoppiati fra loro a mezzo di:

- Passo di vite. È il caso dell'obiettivo, di certe lampadine, dei barilotti<sup>8</sup> di certe lenti del sistema illuminante, lenti di tubo ecc. Questo accoppiamento non consente aggiustamenti e non sempre è preciso. Quando la centratura dell'obiettivo è critica (microscopi polarizzatori, ad es.), si ricorre ad altri sistemi (slitte a cuneo, fori centrabili, obbiettivi internamente centrabili, ecc.).

- Superfici piane serrate da viti. Fra vite e relativo foro vi è sempre del gioco, che può essere aumentato restringendo il diametro della vite fra filetto e testa<sup>9</sup> od allargando il foro (interporre una rondella di grande diametro sotto la testa della vite affinché essa non si incastri nel foro allargato!). Allentando e riserrando le viti è in genere possibile un aggiustamento, generalmente in direzione perpendicolare all'asse (centratura). È anche possibile asolare i fori nel pezzo serrato dalle viti al fine di aumentare il gioco in una direzione preferenziale; dicendo "asolare" intendiamo trasformare un foro circolare in fessura ("asola") a mezzo di una limetta rotonda ("coda di topo", reperibile in vari diametri); se si riesce ad aumentare il diametro del foro solo in una direzione, si aumenta il gioco solo in quella direzione.

Questo aggiustamento è sempre effettuato dal costruttore. Quando è necessario smontare i pezzi serrati da viti (sostituzioni, pulizie, correzioni di errori residui, ecc.) si perde la centratura d'origine ed occorre ripartire da zero. Per evitare questo inconveniente, i migliori costruttori fissano le due parti accoppiate con "spine" cilindriche o coniche: quando le viti vengono serrate, al termine della centratura, si praticano due fori che attraversano le due parti ed hanno lo stesso diametro (o la stessa conicità) delle spine; nei fori si infilano poi le spine stesse a leggera pressione. Le spine vanno tolte prima dello smontaggio e poi rimesse in sede

---

bordi dopo il taglio.

<sup>7</sup> La molla in genere è fissata da due viti e si può sfruttare il gioco fra viti e fori nella molla.

<sup>8</sup> Il "barilotto" è la montatura metallica cava, generalmente cilindrica, in cui è alloggiata e serrata una lente od un gruppo di lenti. Può contenere uno o più "distanziali" (anelli di varia foggia che tengono alla corretta distanza le varie parti) e vari sistemi di fissaggio, che bloccano le parti all'interno del barilotto stesso.

<sup>9</sup> Questo restringimento si può eseguire al tornio, ma sarebbe più semplice ricorrere alle viti speciali reperibili sul mercato.

prima del riserraggio delle viti, quando le due parti accoppiate possono ancora muoversi fra di loro. Con questa tecnica, la ripetibilità della posizione reciproca fra le due parti è in genere ottima, ma spesso i costruttori moderni “hanno fretta” ed omettono la spinatura: un tecnico accorto esegue allora la spinatura prima dello smontaggio in modo da poter sempre riportare le due parti nella posizione reciproca originale. Se tale posizione va poi alterata, si ignorano le spine originali e se ne montano altre due, un po’ più in là.

L’accoppiamento a mezzo di superfici piane consente ancora, introducendo piccoli spessori fra di esse e su di un lato solo, di correggere anche l’orientamento e quindi l’allineamento<sup>10</sup>.

Nel caso degli spessori, conoscendo la larghezza del pezzo che deve essere allineato, si può calcolare il valore esatto dello spessore da introdurre: se l’errore constatato<sup>11</sup> è, ad es., di 20’, la tangente relativa è  $5,8 \times 10^{-3}$ ; se il pezzo da inclinare è largo, ad es., 30 mm, lo spessore sarà pari alla tangente moltiplicata per 30 mm:  $0,0058 \times 30 = 0,174$  mm.

- Coda di rondine circolare. Questo accoppiamento non consente aggiustamento, a meno che non siano regolabili (a vite) le tre punte di riferimento.

- Coda di rondine lineare. In genere, la posizione longitudinale della parte mobile della guida è regolabile con una vite bloccata da un controdado.

Una delle due ganasce della guida può essere fissa e l’altra molleggiata; in questo caso non vi è possibilità di regolazione trasversale. Solo raramente una delle ganasce è munita di “lardone” (stretta striscia regolabile a mezzo di viti laterali, che funziona da superficie di scorrimento per uno dei lati della coda di rondine); ma anche in questo caso non è possibile alcuna regolazione trasversale se l’altra ganascia è fissa (la regolazione del lardone serve solo alla “ripresa” o riduzione del gioco). Se invece la ganascia fissa è rappresentata da un pezzo separato, fissato da viti, vi sono possibilità di regolazione sfruttando il gioco delle viti; il lardone o la molla consentiranno poi di “riprendere” il gioco.

- Guida cilindrica (condensatore, certe lenti, certi tubi). In genere non vi sono possibilità di aggiustamento; tutto dipende dal gioco residuo nell’accoppiamento. Se però la guida è ricavata da un pezzo separato dotato di flangia, fissata da viti, si può sempre sperare nel gioco delle viti.

### 3 - GLI STRUMENTI di CONTROLLO

Le operazioni di allineamento e centratura eseguite “in serie” al termine della produzione su molti apparecchi identici vengono in genere effettuate a mezzo di strumenti speciali, che il produttore confeziona ad hoc per la propria catena di montaggio.

Ci occupiamo qui invece solo di alcuni strumenti di dimensioni e costo contenuti, che si prestano ad operazioni di messa a punto su microscopi di struttura molto varia. Essi sono indispensabili in un laboratorio di verifica, di manutenzione e di restauro di microscopi.

Disponendo di una buona officina meccanica, questi apparecchi possono anche essere autocostruiti partendo da lenti di recupero.

---

<sup>10</sup> Affinché l’accoppiamento sia stabile, è bene che gli “spessori” siano due e non troppo vicini fra loro: i due pezzi si toccano allora in un punto direttamente ed in altri due punti tramite i due spessori. Per tre punti passa un solo piano ed i due pezzi non possono oscillare fra loro.

<sup>11</sup> Come vedremo, gli errori di allineamento si misurano con l’autocollimatore.

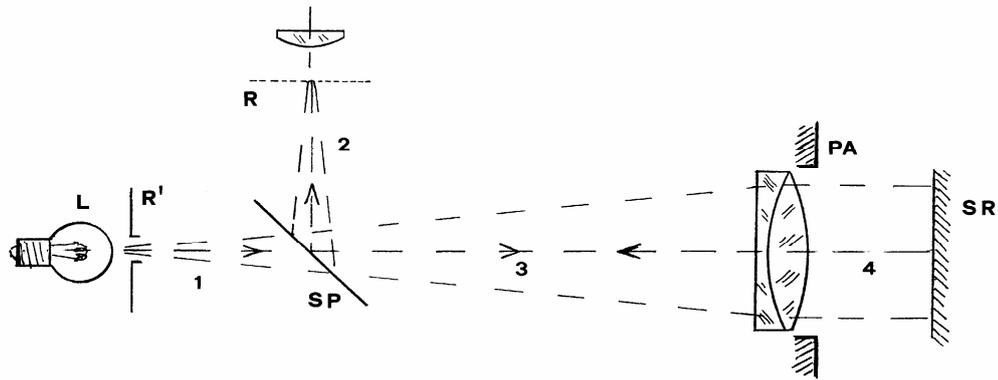


Fig. C - Schema di auto-collimatore (vedi testo). I rami 1 (lampadina più schermo) e 2 (oculare con reticolo) possono essere in posizione invertita, come nella figura seguente.

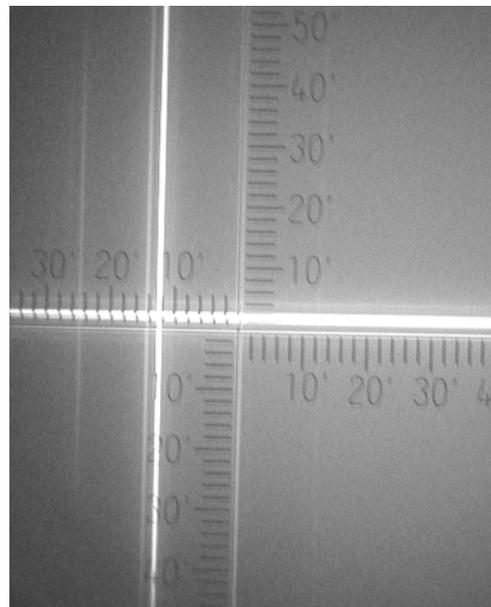


Fig. D - A sinistra: esempio di autocollimatore. La lampadina è nel ramo laterale; l'oculare è in alto, in asse con l'obbiettivo. In basso, concentrica coll'obbiettivo, la superficie di riferimento (PA in fig. C). A destra: ciò che si vede nell'oculare. La croce brillante non coincide col crocefile: la superficie in esame non è parallela alla superficie di riferimento, con un errore di 2' in verticale e 12,5' in orizzontale.

### 3.1 - L'AUTOCOLLIMATORE

Si tratta di un cannocchiale ad oculare convergente (secondo Kepler), focalizzato esattamente e rigidamente su un oggetto a distanza infinita. Fra oculare ed obbiettivo vi è un semiriflettente piano (SP in figura C) inclinato di  $45^\circ$  rispetto all'asse ottico. SP crea un secondo cammino (2) coniugato con il cammino principale (1). In questo modo, il piano R è coniugato col piano focale dell'obbiettivo, e coincide col primo piano focale dell'oculare (schematizzato al di sopra di R). Nel cammino principale (1) vi è un piano coniugato con R (R'); dietro R', eventualmente dietro un vetro smerigliato e un semplice collettore, si trova

una lampadina L.

In R' vi è un reticolo costituito da una lamina opaca con un disegno trasparente (in genere una croce). Il fascio illuminante che traversa R' ed è trasmesso da SP, proviene da un oggetto (la croce trasparente) che viene coniugato all'infinito dall'obbiettivo; nel cammino 4 si ha quindi un fascio telecentrico (raggi paralleli per ogni punto del diaframma R'). Se, davanti all'obbiettivo, si pone uno specchio piano<sup>12</sup> perpendicolare all'asse, detto "specchio di riferimento" (SR), il fascio telecentrico che emerge dall'obbiettivo (4) viene riflesso su se stesso, rimanendo parallelo all'asse (per il punto assiale di R'); lo stesso fascio viene reso convergente dall'obbiettivo e, dopo parziale riflessione su SP, si focalizza nel primo fuoco dell'oculare (nel piano R). Guardando nell'oculare, si vedrà quindi un'immagine di R' e della croce luminosa in esso presente. Nell'oculare, nel suo piano focale anteriore, vi sarà inoltre un reticolo con un filo o due fili in croce, a bracci graduati e, se lo specchio SR è veramente perpendicolare all'asse ottico, la croce luminosa in R' verrà vista sovrapposta al filo nell'oculare. Ogni deviazione nell'orientamento di SR sarà rivelato da uno spostamento della croce luminosa rispetto al crocefilo. Naturalmente, SR può essere costituito da ogni superficie piana e lucida già presente nel microscopio (prismi, filtri, lenti con una faccia piana<sup>13</sup>, "finestre" in vetro, ecc.).

Altra parte essenziale dello strumento è un anello metallico che circonda l'obbiettivo, solidale col resto dello strumento, terminato da una superficie piana (PA) rigorosamente perpendicolare all'asse ottico.

Se si poggia lo specchio SR sulla superficie PA, si deve vedere la croce luminosa a fuoco nell'oculare, ben centrata rispetto al reticolo dell'oculare stesso. Eventuali errori residui si possono correggere spostando R' nel proprio piano con apposito meccanismo (grani o simili).

Se ora si poggia lo strumento, in particolare la superficie PA, su una superficie in esame A (può essere anche una superficie metallica, purché vi sia una finestra trasparente davanti all'obbiettivo del collimatore) e lo specchio SR su un'altra superficie B, si è certi che A e B sono paralleli quando la croce luminosa nell'oculare appare centrata.

Per evitare riflessi multipli fra le due facce di un eventuale specchio "posteriore"<sup>14</sup>, è bene che SR sia costituito da uno specchio "di superficie"<sup>15</sup>. In tal caso, se la superficie B da controllare (rispetto al suo parallelismo con PA) è rivolta dalla parte apposta al collimatore<sup>16</sup>, la superficie riflettente di SR può poggiare direttamente sulla superficie B. Se invece B è rivolta verso il collimatore, su di essa va poggiato il dorso di SR. Tale dorso non è necessariamente parallelo alla superficie riflettente di SR; per evitare errori, si può semplicemente ruotare SR nel proprio piano attorno all'asse ottico (tenendolo aderente alla superficie B) e, se l'immagine della croce descrive un cerchio, si esegua l'allineamento rispetto al centro di questo cerchio, cioè rispetto alla posizione "media" della croce. Si possono anche eseguire quattro diverse misure con quattro diverse posizioni dello specchio, ottenute ruotando lo specchio stesso attorno all'asse ottico del collimatore, di 90° ogni volta. Si farà poi la media delle quattro misure.

Se la base PA del collimatore non trova un appoggio sicuro su una qualche superficie troppo piccola<sup>17</sup>, si può allargare quest'ultima poggiandovi sopra una lamina plan-parallela.

<sup>12</sup> La pianeità dello specchio deve essere rispettata entro  $1/8 \mu$  per una superficie pari a quella utile dell'obbiettivo.

<sup>13</sup> La faccia piana dovrà essere rivolta verso lo strumento poiché ogni superficie non piana interposta fra specchio ed obbiettivo renderebbe non più telecentrico il fascio di ritorno e l'immagine di R' non sarebbe più vista a fuoco o non più vista del tutto.

<sup>14</sup> Si chiama "posteriore" uno specchio in cui la superficie più riflettente (metallizzata) si trova sul retro di una lamina in vetro.

<sup>15</sup> Invece, è "di superficie" uno specchio in cui si sfrutta il riflesso della superficie anteriore della lamina.

<sup>16</sup> In questo caso, occorre che il pezzo che porta la superficie B sia trasparente al centro: fra collimatore e specchio il cammino deve essere libero! Il caso che stiamo trattando è, per es., quello del controllo dei fori del revolver rispetto alla superficie d'appoggio del braccio; se ne parla subito sotto.

<sup>17</sup> Può essere il caso dell'orlo del tubo porta-oculari.

Che la lamina sia veramente a facce parallele si verifica poggiandovi sopra il collimatore e controllando che coincidano le due immagini riflesse dalle due facce della lamina. Naturalmente, la lamina produce due riflessi in più rispetto a quello dello specchio di riferimento SR, ed occorre discriminare fra i vari riflessi: se lo specchio è alluminato od argentato, il relativo riflesso sarà più luminoso degli altri e quindi facilmente riconoscibile.

Ecco un esempio di questa applicazione: A può essere la superficie d'appoggio della coda di rondine porta-tubo (all'estremità del braccio) e B l'orlo dei fori del revolver. È il primo parallelismo da controllare quando si allinea un microscopio (vedi sopra). Ovviamente, lo specchio SR va poggiato e tenuto premuto contro l'orlo dei fori. Verificare che quest'ultimo non sia rientrante, cioè che lo specchio non vada a poggiare su qualche parte che sporge rispetto l'orlo del foro stesso. Se ciò si verifica, occorrerà interporre fra orlo del foro (quello che fa da riferimento all'obbiettivo) e specchio una rondella di precisione di adatto diametro.

Altro esempio: A è ancora la superficie d'appoggio del tubo e B è la superficie superiore del tavolino. In quest'ultimo caso occorre che lo specchio sia poggiato sul tavolino e sia costituito da una lamina a facce parallele. Come detto sopra, quest'ultima condizione si verifica ruotando lo specchio nel proprio piano attorno all'asse ottico: se il riflesso dello specchio ruota assieme allo specchio, la superficie superiore, riflettente, non è parallela alla superficie inferiore, di appoggio. Con opportune misure in posizioni diverse dello specchio e facendo la media è possibile neutralizzare questo inconveniente, come detto sopra.

L'autocollimatore è dunque lo strumento principe per controllare gli allineamenti. Si noti che, fra l'obbiettivo del collimatore e lo specchio SR, vi può essere una lamina a facce piane e parallele, ma non può esservi un cuneo (inclinazione del fascio) né una lente, come già detto (perdita di fuoco). Se, sopra l'obbiettivo del microscopio, è prevista una "lente di tubo" (obbiettivi "a coniugata infinita"), occorre toglierla per poter eseguire allineamenti su parti poste sotto tale lente. Se lo specchio SR non è "di superficie" ma "posteriore", occorre ancora che le sue due facce siano esattamente parallele, oppure si ricorre alla rotazione dello specchio nel proprio piano.

La sensibilità dell'autocollimatore (intervallo minimo della graduazione) deve corrispondere ad 1 - 2 minuti primi d'arco. Nel suo campo visuale si deve poter osservare una deviazione dello specchio di riferimento di almeno 1°. Esso non rivela ovviamente gli spostamenti laterali fra se stesso ed SR.

Uno strumento come quello descritto è difficilmente reperibile sul mercato poiché il suo uso è specifico per le case costruttrici, che sono in grado di realizzarlo per i loro bisogni interni.

L'auto-costruzione presuppone la disponibilità di lenti adeguate (può bastare l'obbiettivo e l'oculare di un binocolo) e di una buona officina meccanica in grado di realizzare parti con elevato grado di precisione. Come reticolo oculare (R), occorre un sistema di due graduazioni in croce. Si può utilizzare uno dei reticoli usati negli oculari di certi binocoli militari. Più difficile sarà procurarsi il semiriflettente SP, che dovrebbe essere del tipo a prisma "splitter" (vedi il manuale "Problemi tecnici della microscopia...", Cap. 11, fig. 34 C).

### 3.2 - II CANNOCCHIALE di CENTRAMENTO

Ci si può ancora riferire alla fig. C poiché si tratta pur sempre di un cannocchiale sec. Kepler ad oculare positivo (ed immagine rovesciata). Manca però il semiriflettente SP, la lampadina L ed il reticolo R'; tutto il canale 2 si trova in luogo del canale 1. La differenza essenziale rispetto al collimatore è che la superficie di riferimento PA non è solo un anello piano, ma porta una coda di rondine o altro riferimento meccanico, come nel caso di un tubo portaoculare. Lo strumento infatti è di solito usato proprio in luogo di quel tubo; in questo modo si presuppone che l'A.MI. sia coincidente con quello della coda di rondine porta-tubo e

su questo asse va centrato tutto il resto. Vedi la fig. E.



Fig. E – A sinistra: Esempio di cannocchiale di centramento, con coda di rondine (a sinistra) ed oculare (a destra, foceggiabile). La ghiera di messa a fuoco dell’obbiettivo è al centro.

A destra: ciò che si vede nell’oculare, con le due graduazioni in croce, l’immagine di una pupilla d’obbiettivo (poco centrata) ed un alone diffuso dovuto all’oggetto ed alle riflessioni spurie. Il telescopio è fissato in luogo del tubo porta-oculari.

Per quanto detto, il cannocchiale è utilizzabile solo su microscopi che prevedono quella certa coda di rondine. In realtà, qualunque sia la forma della coda di rondine o della “guida cilindrica” (vedi il § 2) esistente sul microscopio da centrare, il cannocchiale può sempre essere utilizzato: è sufficiente tornire un raccordo con un attacco femmina di diametro pari al diametro massimo della coda di rondine del cannocchiale ed un attacco maschio identico alla coda di rondine del tubo del microscopio in esame. Con 5 - 6 raccordi, è possibile lavorare sul 90 % degli strumenti del commercio. La precisione di un normale tornio è sufficiente per la realizzazione di questi raccordi.

L’oculare dello strumento è ancora munito di un reticolo in croce con due scale graduate. Si può focalizzare l’obbiettivo per una distanza variabile da pochi centimetri all’infinito ed oltre, cioè su distanze negative o, se si preferisce, su immagini virtuali (si può focalizzare anche su un fascio convergente verso lo strumento). Il punto d’incrocio delle due graduazioni, che si vede sovrapposto ad un punto situato al centro del campo oggetto, definisce una retta che congiunge il centro della coda di rondine di fissaggio dello strumento con quel punto del campo oggetto (per “campo oggetto” intendiamo il campo visibile nell’oculare del cannocchiale). Quella retta è l’asse ottico del cannocchiale. Se, per es., si mette a fuoco un dischetto (una pupilla, un diaframma, ecc.) e lo si sposta finché non appare centrato rispetto alla croce, allora il dischetto è centrato rispetto all’asse ottico dello strumento.

Nell’uso pratico, si fissa il cannocchiale all’estremità del braccio, quella che normalmente porta il tubo, e così l’asse del cannocchiale coincide con l’asse nominale del tubo e dell’oculare. Questo diventa il riferimento per centrare tutto il resto: le pupille d’obbiettivo (e quindi il revolver, vedi il § 2), il condensatore (la sua lente frontale o le immagini da esso fornite di qualche diaframma che gli è anteposto), il diaframma di campo, il collettore, la montatura di qualche altra lente, il filamento dell’ampolla, ecc.

Il cannocchiale è dunque lo strumento che identifica un asse sul quale è possibile centrare qualunque oggetto od immagine di forma regolare che possa venir osservato “a fuoco”. Poiché questo strumento va posto in luogo del tubo, con esso NON si può osservare ciò che sta nel tubo stesso; quindi la centratura e l’allineamento del tubo (dei prismi, degli oculari, ecc.) va effettuato con altri mezzi, con strumenti speciali o con l’oculare di centramento qui sotto descritto.

La sensibilità del cannocchiale, cioè il più piccolo intervallo leggibile sulla scala, deve

corrispondere ad un angolo di non più di 10 minuti primi, cioè ad uno spostamento trasversale di poco più di 0,5 mm a 200 mm di distanza.

Per un cannocchiale come quello descritto vale quanto detto per l'autocollimatore: difficilmente reperibile sul mercato e difficilmente realizzabile "in casa"; chi l'usa di più (il fabbricante di microscopi) se lo costruisce da solo.

### 3.3 - L'OCULARE di CENTRAMENTO

Si tratta in realtà di uno strumento in tutto simile al cannocchiale appena descritto; le differenze essenziali stanno nelle minori dimensioni e nella superficie di riferimento, che è la superficie esterna del cilindro che costituisce la parte inferiore dello strumento. Il termine "oculare" è dunque improprio ed è giustificato solo perché lo strumento si pone in luogo dell'oculare normale. In fondo, esso somiglia molto al "microscopio ausiliario" o "telescopio di centramento" che si usa per la centratura degli anelli di fase, con in più la solita doppia graduazione in croce (fig. F). Esso svolge dunque una funzione simile a quella del cannocchiale di centramento appena visto, ma col vantaggio che lo si pone in luogo dell'oculare e consente di centrare la boccia porta-oculari (la parte superiore del tubo), nonché il o i prismi o l'eventuale lente nella parte inferiore del tubo.

Con l'oculare di centramento in posizione, si osserva una pupilla d'obbiettivo e si muovono le boccole o i prismi finché essa non appare centrata. Nei tubi bioculari, un ritocco finale a questa centratura è bene sia effettuata con gli oculari normali, osservando un qualunque oggetto a fuoco e controllando la congruenza fra i due campi visuali. In questo modo si ottiene la "parcentralità" fra i due oculari di un tubo bioculare, ma occorre anche che i due assi (dei due oculari) siano paralleli, sia pure con la tolleranza di alcuni decimi di grado. Per controllare ciò occorrono altri strumenti, assai più complessi, oppure si usa una tecnica di ripiego: si illumina fortemente un preparato trasparente con un punto scuro ben definito; può bastare un micrometro oggetto o un vetrino pulito sul quale si sia depositato un granello di limatura metallica; si usi un obbiettivo ed un oculare debole e si metta a fuoco il granello di limatura al centro del campo; con un foglio di carta posto sopra gli oculari, si osservino i due campi visuali, che appaiono come cerchi chiari col puntino scuro al centro. I due cerchi debbono essere allineati su una retta parallela a quella che congiunge gli oculari, e tale allineamento si deve conservare ponendo il foglio a qualche decimetro sopra gli oculari. La loro distanza deve rimanere sempre pari alla distanza inter-pupillare impostata.



Fig: F – Esempio di oculare di centramento. La lente oculare è regolabile e bloccabile colla vite in basso; ciò consente di mettere a fuoco su distanze molto variabili, e cioè su tutto l'interno dello strumento. A sua volta, la distanza fra lente oculare e reticolo può essere variabile per consentire sempre una visione nitida del reticolo stesso.

Un problema relativo all'oculare di centramento è che il suo accoppiamento con la superficie interna della boccia porta-oculari non è "cinematico" ed ammette dei giochi; poiché deve esistere una pur minima differenza di diametro fra l'oculare e la relativa boccia,

lo strumento non può avere una posizione definita quando è infilato nella boccola stessa. Per ovviare a ciò, il diametro esterno della sua parte inferiore deve essere regolabile (con molle, camme, o altro) in modo da poterlo serrare all'interno della boccola. Affinché esso rimanga centrato nella boccola, il meccanismo di espansione deve essere assai preciso e deve interessare due diversi livelli dello strumento, in modo da assicurare anche l'allineamento. È difficile trovare in commercio uno strumento con queste caratteristiche, ma qualcosa si può costruire con mezzi semplici, modificando un "microscopio ausiliario" del tipo usato in contrasto di fase, modifica consistente essenzialmente nell'aggiunta del crocefilo.

#### **4 - IL SISTEMA FORMATORE d'IMMAGINE (obbiettivo ed oculare)**

Per quanto detto nel § 1.2, quando fra obiettivo ed oculare vi sono superfici piane (specchi o lamine) non perpendicolari all'A.MI. (figg. A 8, 9 e 10) è possibile considerare le immagini virtuali delle parti che stanno da una parte dello specchio e ricostruire un asse generale non spezzato su cui allineare tutto. Se lo specchio ruota attorno ad un asse più o meno perpendicolare all'A.MI., si può dire che l'A.OB. si sposta rispetto all'oculare, come in fig. A 6 e 7.

Se, fra obiettivo ed oculare, vi sono lenti, occorre smontarle, allineare obiettivo ed oculare e poi, una alla volta, rimontare e centrare quelle lenti. Questo si fa sempre con l'oculare di centramento, controllando che la pupilla d'obiettivo rimanga sempre centrata, con e senza la lente in esame.

Si può così limitarsi a studiare la posizione reciproca di obiettivo ed oculare (figure da A 1 a 7). Nella pratica, osservando la struttura meccanica del microscopio, si potrà capire quali sono gli spostamenti o le rotazioni possibili, consentite dalla conformazione delle varie parti meccaniche, ed a questi spostamenti possibili sarà limitata l'attenzione.

Per l'obiettivo come per l'oculare sono da prevedere, in generale, tutte le deviazioni possibili rispetto alla posizione ideale (A.OB. ed A.OC. coincidenti). Ogni deviazione si può poi ricondurre a tre traslazioni del sub-sistema ottico in tre direzioni ortogonali dello spazio, di cui una si fa coincidere con l'A.MI., o a tre rotazioni attorno a tre assi ortogonali, di cui uno si fa ancora coincidere con l'A.MI.

Come già detto, dal concetto di centratura si può escludere una traslazione parallela all'A.MI., per cui tutte le altre traslazioni si possono ricondurre ad una traslazione in una qualche direzione perpendicolare all'A.MI. (fig. A 1); che poi sia decentrato l'oculare rispetto all'obiettivo o viceversa, è la stessa cosa; su quale di queste due parti si deve intervenire per centrarle ed allinearle fra di loro, sarà dettato dalla disposizione delle parti meccaniche. Se la retta di traslazione non è perpendicolare all'A.MI., il movimento si può decomporre in una traslazione perpendicolare ed una parallela. Quest'ultima si ignora.

Allo stesso modo si può ignorare una rotazione attorno all'A.MI. (abbiamo sempre supposto sistemi sferici centrati, quindi simmetrici rispetto all'asse) e ci si può limitare a considerare le rotazioni attorno ad un qualche asse perpendicolare all'A.MI. (Fig. da A 2 a 7). Se poi tale asse non passa per il centro ottico dell'obiettivo né per il centro ottico dell'oculare (come sarebbe illustrato in fig. A 2 e 3), si ha, oltre alla rotazione, una traslazione, come avviene nelle figure A 6 e 7 (si ignora ancora la traslazione lungo l'A.MI.).

Se tale asse di rotazione non è perpendicolare all'A.MI., si può sempre decomporre il movimento in rotazioni su due assi perpendicolari fra loro ed all'A.MI. (e traslazioni se l'asse di rotazione non passa per il centro ottico dell'obiettivo né per il centro ottico dell'oculare).

Nel caso delle rotazioni attorno ad un asse trasversale, si può avere rotazione dell'obiettivo come dell'oculare; per analizzare gli effetti di una rotazione pura, si può supporre che l'asse di rotazione sia perpendicolare all'asse (dell'obiettivo o dell'oculare) e

che esso attraversi rispettivamente il centro ottico dell'obbiettivo (figg. A 3 e 4) od il centro ottico dell'oculare (figg. A 2 e 5).

Se vi è rotazione dell'obbiettivo attorno ad un asse passante per il centro ottico dell'obbiettivo stesso (fig. A 3), il cannocchiale fissato in luogo del tubo o l'oculare di centramento NON lo rivelano, poiché essi puntano comunque verso il centro ottico dell'obbiettivo, che è molto vicino alla pupilla. Se è l'oculare ad essere ruotato attorno ad una retta passante per il centro ottico dell'obbiettivo (fig. A 4), ciò ancora una volta NON può essere rivelato dal cannocchiale, che è allineato sulla coda di rondine del tubo, cioè sull'asse meccanico del microscopio, né dall'oculare di centramento (che punta ancora sulla pupilla d'obbiettivo). In questi casi, sarà il collimatore ad indicare un non parallelismo delle superfici di riferimento dell'oculare o dell'obbiettivo.

Se vi è rotazione attorno ad un asse passante per il centro ottico dell'oculare (figg. A 2 e 5), solo l'oculare di centramento può rivelarlo.

Nelle rotazioni attorno ad una retta che non passa né per il centro ottico dell'oculare né per il centro ottico dell'obbiettivo (figg. A 6 e 7), la seconda rotazione (fig. A 7) dipenderà probabilmente da un errore di posizione nei prismi del tubo e può essere rivelata dall'oculare di centramento; la prima (fig. A 6) dipenderà in genere dal posizionamento del revolver e si rivela sia col cannocchiale, sia con l'oculare di centramento (pupilla d'obbiettivo non centrata).

Per tutti questi motivi, come già detto, è bene cominciare sempre con l'allineamento del revolver rispetto all'A.MI. (collimatore poggiato sul piano di riferimento del tubo, in cima al braccio), poi con la centratura del revolver (cannocchiale nella sede della coda di rondine del tubo). Si parte cioè dal presupposto che il punto di partenza sia la coda di rondine del tubo, il suo orientamento ed il suo centro.

Resta da allineare il tubo in se stesso (specchi, prismi o lenti in esso contenuti), per la qual cosa può bastare l'oculare di centramento e, se il tubo è bioculare, l'osservazione della congruenza fra i campi, come già detto.

Come tolleranza sul decentramento trasversale delle pupille d'obbiettivo si può accettare il 3 - 4 % del raggio dell'immagine intermedia, il che corrisponde a pochi decimi di millimetro. Per la parcentralità fra i due campi di un tubo bioculare, si deve essere più esigenti.

Ma ora torniamo alla rotazione dell'oculare attorno ad un asse trasversale, passante per il centro ottico dell'oculare stesso (fig. A 2). Questo può avvenire, per es., per un errore di allineamento della boccola porta-oculari o dei prismi.

In questo caso, è più semplice considerare un asse passante per il fuoco anteriore dell'oculare. Il centro ottico dell'oculare o il suo fuoco anteriore giace ancora sull'A.MI. ma i due assi non sono paralleli. L'oculare "guarda" in una direzione che non passa per il centro ottico dell'obbiettivo. L'effetto di questa deviazione si può esaminare da due punti di vista:

1) L'immagine intermedia è inclinata rispetto al piano focale anteriore dell'oculare; la distanza fra i due piani si annulla sull'asse (dell'obbiettivo) e cresce andando da parti opposte. Tale distanza non deve superare la profondità di fuoco dell'oculare, calcolabile come  $P = \lambda f_{\#}^2$ , in cui  $\lambda = 0,550 \mu$ , considerando di lavorare in luce bianca, ed  $f_{\#} =$  inverso dell'apertura relativa lato immagine dell'obbiettivo<sup>18</sup>; tale apertura è ovviamente pari all'apertura lato oggetto dell'oculare. Tale valore di  $f_{\#}$  si calcola facilmente come  $f_{\#} = s' / d$  in cui  $s'$  è la coniugata immagine del sistema obbiettivo + lente di tubo (circa 150 mm per gli obbiettivi classici, 250 mm o meno per quelli "a coniugata infinita", ecc.) e  $d$  è il

---

<sup>18</sup> Il simbolo #, che in lingua inglese significa genericamente "numero", contraddistingue il "numero f" o "f number" ("f<sub>#</sub>"), cioè l'inverso dell'apertura relativa di un sistema ottico, distinguendolo dal simbolo "f", usato di solito per indicare la focale.

diametro della pupilla d'uscita dell'obbiettivo, che difficilmente supera 16 mm.

Quindi:  $f_{\#} \geq 250 / 16 = 15,6$  e:  $P = \lambda f_{\#}^2 \geq 0,55 \cdot 15,6^2 = 134 \mu = 0,134 \text{ mm}$ .

Se il piano immagine dell'obbiettivo non può distare dal piano focale dell'oculare più di 0,134 mm, l'angolo massimo di deviazione avrà una tangente pari a  $0,134 / 12,5$ , essendo 12,5 mm il raggio del campo di un oculare a grande campo. Tale angolo è pari a circa  $37'$ , ben visibile nel collimatore, ma difficilmente si potrà poggiare il collimatore sull'orlo superiore del tubo; come detto, si può interporre fra collimatore ed orlo del tubo una lamina a facce piane e parallele. Lo specchio di riferimento si poggia sull'orlo dei fori del revolver.

Naturalmente, si è supposto che immagine intermedia e piano focale dell'oculare si incontrino sull'asse, cioè che la messa a fuoco sia corretta.

Più facile, anche se meno preciso, è osservare un oggetto ben piano (micrometro oggetto, striscio di sangue) poggiato bene sul tavolino (di cui si sia controllata la perpendicolarità col collimatore). Due punti qualunque, purché equidistanti dall'asse, devono sempre apparire simultaneamente a fuoco. Scegliere coppie di punti vicini al margine, su vari diametri. Si curi che il vetrino poggi sul tavolino senza corpi estranei interposti: basta un capello a falsare la misura.

2) L'inclinazione dell'oculare fa sì che i raggi assiali attraversino obliquamente le lenti dell'oculare. Ciò significa che sull'asse compaiono aberrazioni extra-assiali come cromatica laterale, coma ed astigmatismo.

L'aberrazione che compare con più evidenza è la cromatica laterale la quale si rivela, osservando un reticolo a righe trasparenti ed opache<sup>19</sup>, come una asimmetria dei colori ai due lati di ogni riga (sull'asse!). Con obbiettivi ed oculari di medio ingrandimento, è normalmente tollerabile un'inclinazione di tutto il tubo bioculare (che si può provocare con uno spessore di circa 0,4 mm da un lato della coda di rondine) non superiore a circa  $0,8^\circ$  (pari a  $48'$ ).

Lo stesso effetto può venire però da un disallineamento dell'obbiettivo come raffigurato in fig. 3.

Per l'inclinazione dell'oculare, questo criterio darebbe allora una tolleranza di almeno  $30'$ , circa la metà per l'inclinazione dei singoli prismi o specchi.

Per quanto riguarda una rotazione dell'obbiettivo attorno ad un asse trasversale (fig. A 3), sarà in genere dovuta ad un errore di allineamento del revolver, supposto di prendere come riferimento l'asse della coda di rondine del tubo. Abbiamo già detto che ciò si controlla col collimatore e si corregge con opportuni spessori se il revolver è fissato ad una superficie piana all'estremità del braccio.

Ma può avvenire che vi sia errore di allineamento negli specchi, prismi o lenti del tubo (fig. A 7). Si è già detto che ciò si può rivelare con l'oculare di centramento che consente di controllare l'orientamento dell'A.OC. verso la pupilla d'obbiettivo (fig. A 4); ma dopo di ciò l'A.OB. probabilmente non sarà più parallelo all'A.OC. A mezzo del collimatore<sup>20</sup> si può ripristinare il parallelismo fra i due assi (A.OB. ed A.OC.), ma può darsi che questo nuovo asse non coincida più coll'asse meccanico del microscopio, individuato dall'asse della coda di rondine di fissaggio del tubo.

A questo punto, occorre ripetere gli allineamenti: controllato il parallelismo e la centratura reciproca fra coda di rondine del tubo e fori del revolver, si ritoccano i prismi finché l'oculare punta sulla pupilla d'obbiettivo e simultaneamente la battuta d'oculare è parallela alla battuta d'obbiettivo (orlo dei fori del revolver).

Quando si ha a che fare con tubi (tubi intermedi inseribili come accessori, o tubi integrati nella struttura dello strumento) capaci di fornire due o più "uscite" (per l'osservazione, la fotografia, la ripresa televisiva, ecc.), occorre ripetere il controllo del parallelismo e della

<sup>19</sup> Vedi l'articolo n° 11: "Controllo dei residui di aberrazioni ...".

<sup>20</sup> Come si è detto, sarà probabilmente necessario poggiare sulla battuta d'oculare una lamina a facce piane e parallele per avere una superficie d'appoggio abbastanza ampia.

centratura con tutte le uscite disponibili. Vi sarà in genere un'uscita "diretta", per la quale il fascio prodotto dall'obiettivo o dalla lente di tubo arriva direttamente all'oculare o ad un sistema analogo (microcamera, ecc.); conviene cominciare la regolazione del parallelismo o della centratura da questa uscita diretta; per tutte le altre uscite, vi sarà interposto un prisma, uno specchio, un semi-riflettente, che crea il fascio secondario relativo e che influisce sul parallelismo e sulla centratura di quella uscita senza influire sulle altre. La centratura di queste finestre secondarie si persegue spostando solo lo specchio o il prisma relativo.

Se per una certa uscita è integrato nello strumento un attacco speciale per microcamera, telecamera, ecc., sarà difficile applicare su quella uscita il collimatore, il cannocchiale di centramento od altro. Nel caso di una microcamera si può allora applicare in luogo dell'emulsione un vetro smerigliato ed eseguire su questo, osservato con apposita lente d'ingrandimento, il controllo del parallelismo (deve apparire a fuoco su tutto l'orlo del campo un reticolo o un micrometro oggetto posato sul tavolino, ma ciò presuppone che sia prima verificato il parallelismo fra tavolino e battuta d'obiettivo per l'uscita diretta: vedi sopra); meglio usare un vetro lucido con qualche rigatura<sup>21</sup> ed esplorare il piano di questo vetro colla lente d'ingrandimento per verificare la complanarità fra immagine del reticolo e graffi del vetro<sup>22</sup>. Per la centratura, sarà meglio inserire un obiettivo, focalizzarlo su un reticolo con filo a croce, ed osservare se il reticolo appare centrato prima nell'uscita diretta e poi sulle altre uscite.

Il metodo di osservare l'immagine del reticolo nel piano dell'emulsione consente anche di curare la parfocalità e la "parcentralità" fra canale "osservazione" e canale "fotografico".

Nel caso della telecamera, il controllo di parallelismo e centratura va verificato nell'immagine televisiva quale appare in un monitor. In caso di discrepanze, occorre lavorare sul raccordo.

Solo a questo punto si passerà all'allineamento del tavolino e del sistema illuminante.

## CONCLUSIONI

Tutti i casi possibili che si presentano nella posizione reciproca di obiettivo ed oculare si possono ricondurre a due casi fondamentali: traslazione (parallelismo ma non coincidenza di A.OB. ed A.OC.) e rotazione dell'oculare o dell'obiettivo attorno ad un asse trasversale passante per il loro centro. Quando è l'obiettivo ad essere ruotato (fig. A 3), è come se l'oculare si fosse spostato lateralmente come in fig. A 1 e poi fosse ruotato attorno al proprio centro ottico (fig. A 2); quindi, anche questo caso si può concettualmente ricondurre ad uno spostamento dell'oculare.

In pratica, poiché il telescopio di centramento rivela sia le traslazioni che certe rotazioni, è bene cominciare col collimatore ed eliminare le rotazioni. Come tolleranza, si può accettare  $\pm 8'$ , il che corrisponde, per una distanza oculare-obiettivo di 160 mm, ad un decentramento reciproco di circa 0,4 mm fra oculare e centro dell'immagine intermedia.

Poi, col telescopio, eliminare le traslazioni, ancora con una tolleranza di pochi decimi di mm.

Quest'ultima operazione può apparire critica quando, fra obiettivo ed oculare, vi sono sistemi intermedi di lenti e prismi, per es. quelli che creano un'immagine intermedia

---

<sup>21</sup> Basta qualche graffio creato con una punta dura, come la punta di un "maschio" da meccanico.

<sup>22</sup> La complanarità fra immagine e superficie graffiata del vetro si può controllare col "metodo della parallasse": spostando lateralmente il capo, entro i limiti consentiti dalle dimensioni della lente, le due immagini (reticolo e graffi) non si spostano l'una rispetto all'altra solo se sono complanari.

supplementare. La distanza meccanica fra obiettivo ed oculare può aumentare di molto; alla medesima traslazione corrisponde un angolo più piccolo e la tolleranza si stringe.

Questa elevata criticità è però apparente; infatti, in condizioni normali di funzionamento, le apposite lenti producono un'immagine intermedia aggiuntiva che dista dall'obiettivo di una distanza normale; il lungo cammino meccanico viene cioè frazionato. Inoltre, un errore di posizione in uno degli elementi del sistema può venir sempre compensato da un altro; la verifica della traslazione va quindi eseguita alla fine, con tutto montato.

## 5 - ALLINEAMENTO dei MICROSCOPI STEREOSCOPICI

(vedi il manuale “Problemi tecnici della microscopia...”, Cap. 29)

### SISTEMA ad OBIETTIVO PRINCIPALE COMUNE (CMO)

Si prende come riferimento iniziale la superficie su cui appoggia il tubo bioculare (“testata”), ed a questa si riferisce la superficie di appoggio dell’oggetto, ricavata sulla base; di solito si tratta di un disco di vetro; in assenza di questo, si poggia sulla base una lamina di vetro a facce piane e parallele (si può provare con un pezzo di vetro da finestre, ma la sua cattiva pianeità può alterare l’immagine della croce visibile nell’oculare dell’autocollimatore).

Togliere l’obbiettivo principale (CMO) ed il tubo binoculare; mettere il tamburo cambiatore d’ingrandimento in posizione “vuota”; comunque, deve essere eliminato qualunque sistema intermedio.

Poggiare l’auto-collimatore sulla superficie di appoggio della testata; se questa è troppo piccola o troppo grande, interporre una lamina in vetro plan-parallela. Controllare il parallelismo rispetto al piano di appoggio dell’oggetto, piano presente sulla base. Se tale parallelismo è carente (la tolleranza è di una decina di minuti primi), lo si corregga con opportuni spessori posti sotto il disco della base.

Montare la testata. Poggiare un collimatore<sup>23</sup> sul piano di appoggio nella base. Sull’immagine fornita dal collimatore<sup>24</sup> e vista negli oculari, mettere a fuoco (per l’infinito) in uno dei seguenti modi:

- regolando la lente di tubo (inferiormente alla testata)
- traslando in senso antero-posteriore i prismi
- variando la lunghezza dei tubi.

NB : probabilmente occorrerà spostare il collimatore (sempre aderente alla base di appoggio) per porlo sotto l’uno o l’altro dei due canali: se il collimatore lavora troppo disassato, fornisce un’immagine affetta da aberrazioni, anche se ciò non toglie precisione all’allineamento.

Centrare, separatamente per i due canali, l’immagine data dal collimatore muovendo i prismi. Ricontrollare che sia rimasta a fuoco l’immagine data dal collimatore, in entrambi i canali. Eventualmente, ripetere questa messa a fuoco come sopra detto.

Togliere il collimatore e montare sulla base un oggetto piano che presenti dei cerchi concentrici (può bastare un pezzo di cartoncino su cui sia stata tracciata una serie di cerchi concentrici con un compasso).

Sempre col tamburo in posizione vuoto, montare il CMO e focalizzare il sistema dei cerchi concentrici. Perfezionare la centratura reciproca fra i due canali regolando i prismi o le piastrine che reggono le boccole porta-oculari.

Osservare sempre l’oggetto a cerchi concentrici e perfezionare la messa a fuoco. Uno alla volta, inserire i sistemi galileiani, in posizione diritta e rovesciata. Focalizzarli uno per uno ruotando le lenti del galileiano, di solito la negativa. Poi centrarli con:

- movimento trasversale della lente divergente (di solito solo quella è centrabile);

<sup>23</sup> Può servire l’auto-collimatore descritto in 3.1, purché venga munito di una base d’appoggio, dalla parte opposta all’obbiettivo, parallela alla superficie di riferimento (PA in fig. C).

<sup>24</sup> Il collimatore avrà in genere, nel proprio piano focale, un reticolo nel quale deve essere indetificabile il centro, giacente sull’asse ottico del sistema (crocefile o simili).

- spostamento delle o della posizione di arresto del tamburo;
- spostamento dell'asse di rotazione del tamburo, ove possibile.

NB : Questo metodo non si applica ai microscopi stereoscopici secondo Greenough.

## **SISTEMA GREENOUGH**

Qui, la centratura singola e reciproca dei due canali è affidata sia ai prismi, sia agli obbiettivi.

Conviene esaminare la centratura delle varie coppie di obbiettivi ed individuare la media delle singole situazioni. Il controllo si fa focalizzando su un oggetto geometricamente definito: una crocetta, che si può tracciare con normali mezzi grafici, oppure una serie di cerchi concentrici di diametro da 1 a 30 mm, ecc.

Scelta la coppia di obbiettivi che dà i migliori risultati, con quella si centrano i prismi in modo da ottenere la migliore parcentralità fra i due oculari. Si controlli subito, osservando un oggetto ben piano e perpendicolare al piano mediano dello strumento, che le due immagini, quelle visibili nei due oculari, siano simmetricamente disposte rispetto al piano mediano, sia riguardo alle sfocature (normali nei sistemi Greenough ai due lati del campo visuale per un oggetto come quello appena descritto (vedi il manuale “Problemi tecnici della microscopia...”, cap. 29.5.1)), sia riguardo ai residui di aberrazioni. Se le dissimmetrie sono troppo appariscenti, rifare la centratura dei prismi spostandoli entrambi da una parte o dall'altra, per tentativi.

Dopo di ciò, inserire una alla volta le altre coppie di obbiettivi e cercare con esse la parcentralità fra i due oculari spostando solo gli obbiettivi; in genere, ogni obiettivo è fissato da tre grani alla sua base e lo spostamento si ottiene allentando un grano e stringendo gli altri due.

Si ricordi però che tutti i microscopi stereoscopici possono dare difficoltà di fusione delle due immagini retiniche, anche in soggetti dalla vista del tutto normale: i meccanismi nervosi implicati nella visione sono assai complessi (come l' “effetto del tubo”<sup>25</sup> e la conseguente convergenza dei due assi visuali dell'osservatore). Ci si limiti quindi agli esami obbiettivi.

---

<sup>25</sup> Vedi il manuale “Problemi tecnici della microscopia...”, Cap. 4.2 e 24.1.2.