

# I TEODOLITI MODERNI E IL LORO IMPIEGO

C. Bonfigli

1. — Una direzione dello spazio può essere individuata per mezzo di due angoli presi rispetto ad un opportuno sistema spaziale di riferimento. Come è noto, di solito ci si riferisce al piano del meridiano geografico e al piano orizzontale passanti per un punto della retta che individua la direzione e gli elementi che definiscono quest'ultima sono gli angoli che essa forma con i due piani suddetti: l'azimut e l'inclinazione.

Quando si richiede una notevole precisione nella misura di questi angoli si usa il teodolite, nome che si riserva appunto ai goniometri di precisione. La misura degli angoli richiede particolari accorgimenti costruttivi ed operativi atti ad eliminare, o almeno attenuare, gli errori che influiscono sulle misure. Si pensi infatti cosa vuol dire valutare il secondo sessagesimale (l'ordine di grandezza raggiungibile con i buoni teodoliti è del decimo di secondo); sopra l'arco del cerchio graduato di un goniometro avente 100 mm di diametro, un secondo è rappresentato da un archetto della lunghezza  $l = r \cdot 1'' \cdot \text{arc } 1'' = 50 \cdot 1 \cdot 48 \cdot 10^{-7} = 0,0002 \text{ mm}$ , ossia di due decimi di  $\mu$  ( $1 \mu = 1 \text{ micron} = 0,001 \text{ mm}$ ).

Viceversa, per risolvere il problema inverso, ossia per individuare una direzione azimutale riportando l'angolo sul terreno con un teodolite che presenta l'incertezza di  $1''$  alla distanza  $d$  si commette un errore lineare trasversale alla direzione di:  $e = d \text{ arc } 1'' = 48 \cdot 10^{-7} d$ . Ad es. l'errore che si commetterebbe nell'operazione di ripristino di un vertice trigonometrico a Pavia per mezzo dell'angolo azimutale riportato su un vertice a Milano ( $d = 40 \text{ km}$ ) con un teodolite avente un errore temibile di  $1''$  risulta di 19,2 cm.

Queste semplici considerazioni ci danno un'idea dell'estrema delicatezza con cui bisogna, non solo operare, ma costruire un goniometro: un errore nel porre un segno della graduazione di appena due decimillesimi di mm pregiudica l'angolo di  $1''$  e dà luogo ad un errore lineare trasversale di 19 cm a 40 km di distanza. Se si riflette che oggi i migliori teodoliti nel campo topografico-geodetico, sia pur con particolari procedimenti operativi che tendono a ridurre notevolmente l'influenza degli errori di costruzione, di rettifica e di misura, danno risultati certi nell'ordine del decimo di  $1''$ , si comprende quali precisioni sono state raggiunte nella costruzione di tali strumenti.

Ne segue subito anche un avvertimento per gli operatori inesperti che si trovano ad operare strumenti di alta precisione: non è del tutto improbabile che anche un abile costruttore, per quanta cura abbia posto nell'operazione, abbia tracciato i segni della graduazione con errore dei due decimillesimi di mm sopra menzionati e che quindi, per questo solo fatto, la misura di un angolo con quello strumento sia errata di  $1''$ . Va da sé, allora, che la lettura al micrometro al decimo o magari al centesimo di secondo è semplicemente illusoria e *non si può far credito ad essa presa da sola*. Vi sono però procedimenti operativi noti, giustificati da sensati ragionamenti, che permettono di ricavare un valore dell'angolo che dà maggior affidamento attraverso più misure dello stesso angolo, distribuite in modo opportuno sopra parti diverse del cerchio graduato; infatti se in un settore di questo le graduazioni hanno un intervallo maggiore del vero, certamente in altri settori tale intervallo sarà più piccolo del vero e la media delle misure eseguite su più parti del cerchio, con un logico criterio, condurrà certamente ad un valore che tende a diventare sempre più indipendente dalle piccole imperfezioni della graduazione del cerchio, quanto più numerose sono le misurazioni fatte in posizioni diverse di questo.

2. — Quando un goniometro, come il teodolite, presenta precisioni così spinte, tante altre cause di errore, che nei goniometri meno precisi non hanno praticamente influenza, debbono essere esaminate ed escogitati i modi di eliminarne o almeno attenuarne l'influenza nelle misure.

Così succede per esempio per l'errore derivante dalla imperfetta verticalità dell'asse generale dello strumento. E' noto infatti che non esiste alcun procedimento operativo attraverso il quale sia possibile eliminare o attenuare l'influenza di tale errore nella misura dell'angolo azimutale.

L'errore  $\epsilon$  nell'angolo azimutale provocato da quello di verticalità  $\nu$  è dunque assai temibile nei risultati se le collimazioni avvengono con inclinazioni  $\alpha$  sensibili perché, come è noto, esso è dato, per una stessa direzione, da:  
 $\epsilon = \nu \tan \alpha$ .

Per avere un'idea dei valori di  $\epsilon$  al variare di  $\alpha$  si osservi la tabella seguente corrispondente al valore  $\nu = 2''$ .

$\alpha =$	1°	5°	10°	20°	30°	45°	60°
$\epsilon =$	0,04''	0,2''	0,4''	0,7''	1,2''	2''	3,5''

Per fortuna questo errore è sempre piccolo nelle misurazioni relative alle triangolazioni geodetico-topografiche in cui  $\alpha$  è piccolo, essendo i vertici a distanza reciproca notevole in confronto ai loro dislivelli, ma non è affatto da trascurare quando col teodolite di precisione si opera con visuale alquanto inclinata. Come conclusione di questo esame si può quindi dire che nei teodoliti l'operazione di rendere verticale l'asse principale deve essere fatta con molta cura usando la livella più sensibile di cui dispone lo strumento.

3. — Altri errori di rettifica dello strumento possono pregiudicare la misura di un angolo, ma ve ne sono alcuni la cui influenza può essere eliminata nella misura con opportuni procedimenti operativi.

Gli errori dovuti all'imperfetta orizzontalità dell'asse di rotazione del cannocchiale, quelli derivanti dalla imperfetta perpendicolarità di questo asse di rotazione con quello di collimazione e ancora quello causato dall'eventuale eccentricità dell'asse di collimazione vengono eliminati nelle misure dell'angolo azimutale con l'applicazione della nota regola di Bessel e non preoccupano gran che quando nelle operazioni di costruzione e di rettifica siano stati già resi sufficientemente piccoli.

4. — Via via che i mezzi per la lavorazione di precisione si sono venuti affinando si è cercato, oltre che di rendere sempre più piccoli gli errori di costruzione degli strumenti, anche di dotare gli stessi di organi perfezionati per apprezzare i piccoli intervalli delle graduazioni e organi ausiliari per correggere o con l'intervento dell'operatore o addirittura in modo automatico, le più temibili cause di errore nelle misurazioni angolari.

Mentre un tempo il metodo più preciso per la valutazione degli intervalli delle graduazioni era il microscopio con vite micrometrica, oggi quello universalmente impiegato è il microscopio con lastra di vetro a facce piane e parallele che sfrutta la proprietà di quest'ultima di spostare parallelamente a loro stessi i raggi che la attraversano di quantità proporzionale all'angolo d'incidenza, sempre che questo sia sufficientemente piccolo.

Questo dispositivo è costituito schematicamente (fig. 1a, b) di un veicolo ottico formato da un prisma  $P$  trapezoidale o da due prismi triangolari  $P_1$  e  $P_2$  formati dalle parti estreme di  $P$ , di una lastra a facce piane e parallele  $L$  che può ruotare comandata da un bottone  $T$ , di una lente obbiettiva  $L'$ , di un reticolo  $R$  costituito da un tratto e di una lente oculare  $L''$ .

L'effetto del prisma  $P$  o dei due  $P_1$  e  $P_2$  è quello di dare due riflessioni totali

della graduazione  $G$  e di inviare l'immagine di questa verso l'alto nella direzione dell'asse del microscopio composto il cui reticolo  $R$  è posto dal costruttore nel piano coniugato di quello della graduazione rispetto all'obiettivo, ossia  $C$  ed  $R$  sono posti nella relazione di oggetto e immagine rispetto ad  $O'$  seguendo i cammini ottici corrispondenti. Se la lastra ha le facce piane normali all'asse  $O'R$ , osservando con l'oculare  $L''$  si vedrà in  $R$  l'immagine del punto  $C$  del cerchio, mentre se ruota la lastra  $L$  in  $R$  apparirà un altro punto del piano della graduazione (nella figura è indicato, col segno più marcato, il percorso dei raggi che portano in  $R$  l'immagine di  $C'$ ). Un dispositivo così fatto serve egregiamente a valutare piccoli intervalli di graduazione. Infatti, per la proprietà della lastra pian parallela sopra ricordata, se, ruotando la lastra col bottone  $T$ , si fa avvenire uno spostamento dell'immagine della graduazione pari ad un intervallo di questa e si divide in  $n$  parti l'arco periferico di cui ha ruotato un disco col-

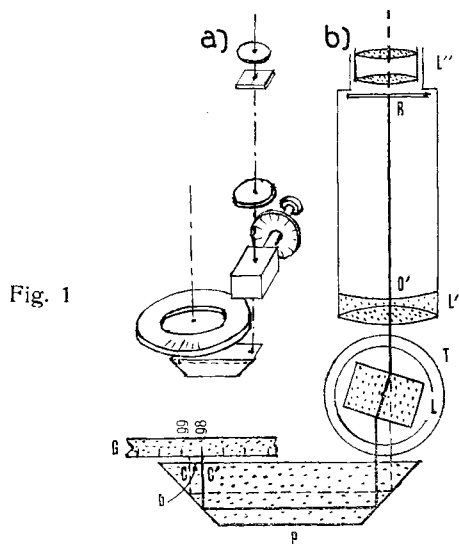


Fig. 1

legato al bottone, ad  $1/n$  di tale arco corrisponderà  $1/n$  dell'intervallo della graduazione e quindi il disco potrà essere graduato con le frazioni angolari che esso rappresenta. Nella figura la lettura all'asse del microscopio dovrebbe essere in  $C$ , ossia  $98 + a$ ; si ruota il bottone  $T$  fino a portare sul tratto del reticolo  $R$  la graduazione  $98$  e sul disco collegato a  $T$  si legge la frazione  $a$ .

Come è noto, un dispositivo analogo è largamente usato nei livelli di precisione per apprezzare gli intervalli di stadia, sostituendo ad una stima una vera e propria misura.

E' interessante notare che lo schema di fig. 1a, b, tolta la lastra, può funzionare da microscopio a stima, la cui lettura al cerchio si esegue all'immagine portata sul reticolo  $R$ ; può anche farsi diventare un microscopio a scala sostituendo al tratto del reticolo una opportuna scala graduata.

5. — L'errore di eccentricità dell'alidada, che può dare luogo a sensibili errori nella misura dell'angolo, viene eliminato, come è noto, disponendo sul cerchio due indici diametralmente opposti (si noti che per una direzione e per un goniometro avente il diametro del cerchio di 10 cm, l'eccentricità di un solo millesimo di mm produce un errore massimo di ben  $4''$ ).

Nei moderni teodoliti l'eliminazione dell'influenza di tale errore nella misura degli angoli è ottenuta con i metodi seguenti:

- a) metodo della « coincidenza » delle immagini delle graduazioni diametrali;
- b) metodo della « simmetria » delle immagini dei doppi cerchi graduati;
- c) metodo della « simmetria » delle immagini rispetto al cerchio di riferimento.

5.1. — Il dispositivo descritto al n. 4, applicato per costruire l'indice normale di lettura al cerchio graduato ed un altro analogo, applicato in posizione diametralmente opposta allo stesso cerchio, permettono dunque di eliminare l'influenza dell'errore di eccentricità dell'alidada nella misura dell'angolo, assumendo come valore della lettura la media fra quelle ai due indici (occorre mediare solo le frazioni più piccole dell'angolo).

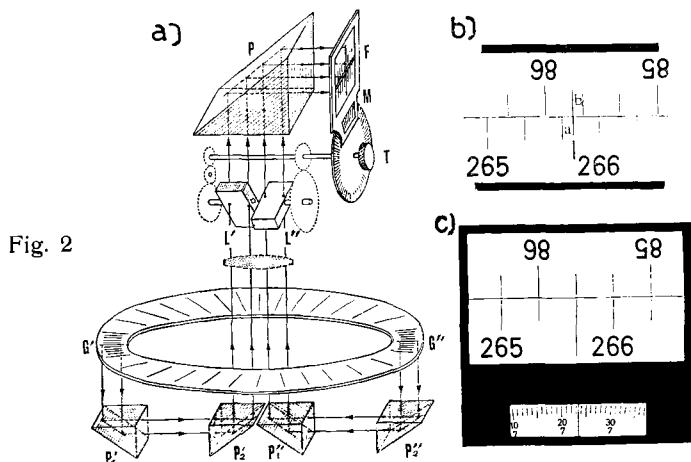


Fig. 2

Si è allora pensato (Wild-Zeiss verso il 1920) di riunire i cammini ottici dei due dispositivi predetti in un unico microscopio di lettura (fig. 2a), di comandare la rotazione delle due lastre  $L'$  e  $L''$  con un unico bottone  $T$  e di fare in modo che, azionando quest'ultimo, le rotazioni delle lastre avvengano in senso contrario (rotazione a forcice), di raccogliere i raggi luminosi provenienti dalle parti opposte del cerchio in un unico prisma  $P$  in modo che le immagini reali dei due estremi appaiano affiancate in  $F$  nel piano del disco micrometrico graduato fissato al bottone (nella figura, in alto); con l'oculare, si possono osservare nitidamente tanto le immagini delle graduazioni diametralmente opposte in  $F$  che, sotto, in  $M$ , le graduazioni del disco micrometrico.

La parte più interessante, forse, del dispositivo è che esso permette di leggere di colpo la media agli indici opposti, ossia di eseguire la lettura immune dall'influenza dell'eccentricità dell'alidada. Basta, per questo, come è noto, agire sul bottone  $T$  fino ad ottenere la coincidenza dei tratti diametralmente opposti. In questo movimento il disco del bottone ruota metà di quanto sarebbe stato necessario se il movimento fosse dato ad una sola lastra ed il risultato è perciò la media cercata. Infatti immaginando indipendenti i due dispositivi, al primo si leggerebbe  $265^{\circ}40' + a$ , alla seconda  $85^{\circ}40' + b$  (fig. 2b) e la media ridotta al primo indice risulterebbe  $265^{\circ}40' + (a+b)/2$ . Il movimento del disco provoca, durante il passaggio dalla posizione iniziale di cui alla fig. 2c a quella della coincidenza (fig. 2c) lo spostamento  $a+b$  col movimento contemporaneo di entrambe le lastre che sommano gli spostamenti, per cui la rotazione del disco è la metà dello spostamento totale, ossia  $(a+b)/2$ . In altre parole sulla graduazione del disco, opportunamente tracciata, si legge la media voluta. Si veda un esempio di lettura nella figura 2c ove risulta  $265^{\circ}40' + 7'23,4'' = 265^{\circ}47'23,4''$ .

Spesso nei teodoliti moderni la graduazione del cerchio, incisa sopra una

corona di vetro ottico, è segnata con tratti doppi anziché singoli per aumentare la sensibilità dell'operazione di coincidenza e in qualche tipo per fare in modo che l'asse della coppia di tratti abbia la funzione del tratto unico, onde sfruttare la proprietà dell'occhio di essere particolarmente sensibile ad individuare la bisettrice della striscia compresa fra due tratti paralleli e vicini.

5.2. — La Casa KERN ha introdotto i cerchi a doppia graduazione di cui una, più interna, con tratti semplici (DKM2) o doppi (DKM3) e l'altra, più esterna, graduata, con semplici tratti.

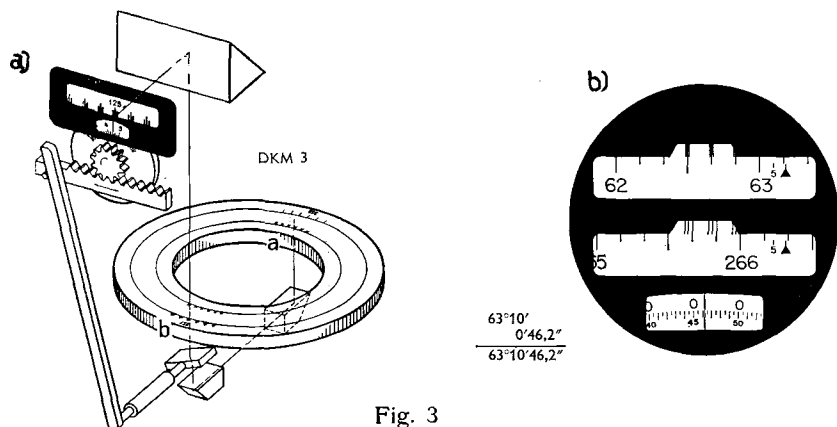


Fig. 3

Il dispositivo della lettura secondo il metodo della « simmetria » è diverso da quello di cui si è parlato sopra ed è costituito, per il tipo DKM3 (fig. 3), oltre che dal veicolo ottico che porta l'immagine di parte della graduazione *a*, interna, sulla parte diametralmente opposta *b* della graduazione esterna, da una sola lastra pian parallela azionata dal bottone del micrometro, interposta sul cammino ottico da *a* a *b*: muovendo la lastra è possibile portare in *b* i tratti della doppia graduazione *a* in modo che le coppie di questa siano bisecate dai tratti semplici di *b*. L'insieme delle immagini delle due graduazioni, attraverso un altro veicolo ottico è portato sul piano delle graduazioni del micrometro in modo da poter osservare contemporaneamente il tutto con l'oculare. Le letture si eseguono come nella fig. 3b. Il teodolite DKM3 è descritto al n. 9.3. Si veda al n. 9.2, la spiegazione del funzionamento del dispositivo dei doppi cerchi a tratti semplici, per il teodolite DKM2.

5.3. — La Casa SALMOIRAGHI, recentemente, ha introdotto un altro sistema per raggiungere lo scopo di eliminare l'errore dovuto all'eccentricità dell'alidada che si ritiene di chiarire nel seguente modo.

L'errore angolare dovuto all'eccentricità, come è noto, proviene dal fatto che l'indice di lettura è collegato all'alidada e non ruota intorno al centro del cerchio graduato, se esiste l'eccentricità; cioè la rotazione angolare  $\alpha$  dell'indice, ossia dell'alidada, non è la stessa di quella  $\alpha'$  che si valuta sul cerchio e da ciò deriva appunto l'errore in causa. Si potrebbe pensare di ragionare in modo diverso dai metodi precedenti e vedere se non sia possibile, attraverso qualche artificio, fare in modo che quando l'alidada ruota di  $\alpha$ , l'indice di lettura ruoti anch'esso di  $\alpha$ , e non di  $\alpha'$  intorno al centro del cerchio, ossia su quest'ultimo si possa eseguire la lettura  $\alpha$  senza errore. A questo fine la predetta Casa ha realizzato il dispositivo seguente, che permette di riferire le letture al centro del cerchio graduato in virtù di una circonferenza di ri-

ferimento tracciata contemporaneamente alla graduazione e rigorosamente concentrica con questa. Un veicolo ottico opportuno (fig. 4a) porta l'immagine di un tratto  $I$  di tale circonferenza, in  $I'$ , ruotata di  $90^\circ$  sulla graduazione del cerchio (fig. 4a, b), l'indice fittizio  $I''$  ruota con l'alidada ma, essendo l'immagine di  $I$ , rimane rigorosamente riferito al centro del cerchio graduato durante la rotazione dell'alidada come deve essere per eseguire la lettura giusta. Infatti (fig. 4b) se vi fosse un indice normale applicato all'alidada, la lettura in  $I''$  che si farebbe in una direzione, con l'asse dell'alidada avente traccia  $A$  sul cerchio, sarebbe sbagliata di  $\varepsilon = I'' C I'$  rispetto a quella in  $I'$  che si eseguirebbe se  $A$  coincidesse con  $C$ , mentre col dispositivo descritto la lettura si esegue sempre in  $I'$ .

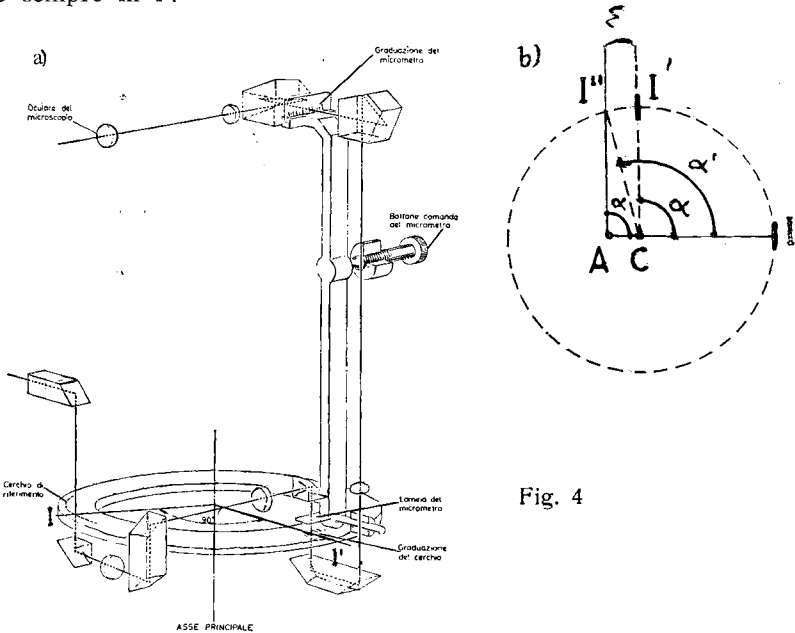


Fig. 4

Il dispositivo è poi perfezionato col micrometro a lastra per valutare gli intervalli. Nella fig. 4a è visibile anche il dispositivo di funzionamento meccanico di questo: l'asta verticale, che porta a lato della base la lastra e nella parte alta il vetrino graduato del micrometro sul quale si eseguono le letture, è incernierata alla base mediante il perno visibile in figura e può ruotare di piccole quantità mediante l'azione di un bottone di comando; la lettura si esegue dopo aver portato l'indice sopra una graduazione.

6. — I vari dispositivi della « coincidenza » o della « simmetria » sono applicati tanto al cerchio orizzontale che al cerchio verticale. Ma per la misura degli angoli zenitali o di inclinazione, come è noto, occorre anche procedere alla rettifica dello zenit strumentale, ossia dell'errore d'indice, oppure adottare ogni volta il procedimento delle letture coniugate (centrare la livella zenitale, collimare al punto, leggere  $S$  al cerchio verticale, capovolgere il cannocchiale e, ruotando l'alidada, ricollimare al punto, ricentrare eventualmente la livella e leggere  $D$  al cerchio: l'angolo  $\varphi$  è dato da  $(S-D)/2$ ).

Nell'impiego del teodolite per misure di precisione la via da seguire è quest'ultima, non potendo dare completo affidamento alla bontà e alla costanza della rettifica eseguita. Tuttavia, qualora interessi una precisione minore ci

si può fidare di una buona rettifica dell'indice e di una sola osservazione nella posizione normale del cannocchiale.

Il notevole progresso di questi ultimi tempi, ottenuto nell'impiego dei dispositivi stabilizzatori della linea di mira orizzontale nei cannocchiali dei livelli automatici, ha fornito la possibilità di dotare l'indice del cerchio verticale di un analogo stabilizzatore che, una volta messo a punto, mantiene l'indice stesso nella giusta posizione indipendentemente (entro un certo campo) dalla verticalità dell'asse principale.

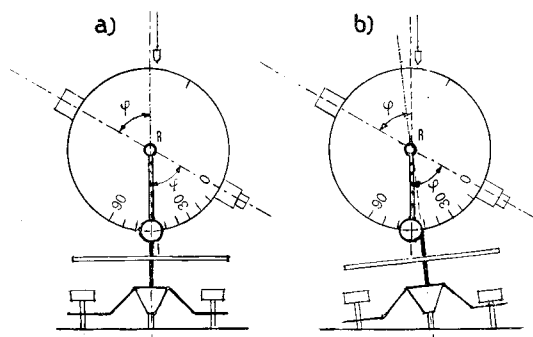


Fig. 5

Il principio dell'indice automatico al cerchio verticale è semplicissimo.

Supponiamo che il teodolite abbia l'asse principale verticale (fig. 5a), che l'indice di lettura al cerchio verticale sia costituito da un tratto di riferimento  $I$  sospeso ad un'asticciuola che può ruotare senza attrito intorno al punto  $R$ , traccia dell'asse di rotazione del cannocchiale (come un pendolo) in modo che, in condizione di riposo, l'indice  $I$  sia sulla verticale di  $R$ .

Immaginiamo di collimare allo zenit col cannocchiale e di leggere zero all'indice  $I$  (è noto come si fa a soddisfare questa condizione).

Volendo misurare l'angolo zenitale che forma l'asse di collimazione diretto ad un punto  $P$ , basta leggere all'indice  $I$  perché la lettura stessa  $S$  è  $\varphi$ .

Un tale dispositivo funziona da indice automatico e non risente affatto dell'eventuale mancata verticalità dell'asse principale. Infatti supponiamo che tale asse sia inclinato (fig. 5b) e ripetiamo le operazioni di prima. Se riportassimo l'asse di collimazione verticale, all'indice si leggerebbe ancora zero e collimando  $P$  ancora  $\varphi$ , come è evidente dalla figura; il dispositivo funziona perciò automaticamente, indipendentemente dalla verticalità dell'asse principale.

Alcune case costruttrici hanno escogitato dispositivi diversi che raggiungono la stabilità automatica dell'indice verticale con buona precisione. Occorre però ripetere che nei teodoliti di precisione, per la misura di un angolo zenitale o di inclinazione, è sempre necessario eseguire le letture coniugate, dopo aver centrato la livella zenitale con cura.

7. — Fra gli organi da prendere in considerazione per l'esame delle cause che influiscono sulla buona riuscita di una misurazione angolare vi è il mezzo di collimazione, ossia il cannocchiale. In esso risiedono alcune fonti di errore e, prima fra queste, la stabilità della linea di mira, la quale è praticamente definita dall'asse di collimazione, ossia dalla retta passante per il centro del reticolo e il centro ottico dell'obbiettivo.

Per eseguire le operazioni di adattamento del cannocchiale alle diverse distanze, ossia per fare in modo che l'immagine di un punto oggetto che si muove nel senso dell'asse cada sul piano del reticolo, occorre variare la distanza relativa fra la lente divergente interna e il reticolo e il movimento relativo, per i possibili giuochi nelle parti meccaniche, può essere tale da non

conservare immutata la posizione dell'asse di collimazione, il che significherebbe avere una linea di mira non stabile. (Si noti che uno spostamento trasversale di un millesimo di mm rispetto ad un punto fisso, posto a 20 cm di distanza, produce un errore angolare di 1"). Nei cannocchiali moderni tale eventualità è molto ridotta rispetto agli antichi nei quali l'obbiettivo si muoveva a sbalzo; oggi essi sono di lunghezza costante e il compito dell'adattamento alla distanza è affidato alla lente divergente interna (che costituisce parte dell'obbiettivo) la quale si sposta sopra una guida ben rettificata entro il tubo del cannocchiale e garantisce bene la stabilità richiesta.

I grandi teodoliti impiegati nelle osservazioni astronomiche non risentono di questo difetto perché sono adattati permanentemente per distanze grandissime e l'immagine di un astro cade sempre nel piano focale in cui viene fissato il reticolo (la impropria dicitura usata in senso generico di « mettere a fuoco » ha significato esatto solo in questo caso: mettere il reticolo nel piano focale dell'obbiettivo).

8. — Altra causa di errore angolare è la cattiva stima del puntamento ad un determinato segnale oggetto. L'errore di puntamento dipenderà, ovviamente, dalla nitidezza e grandezza dell'immagine di esso sul reticolo, le quali dipendono dalla luminosità e dall'ingrandimento dell'obbiettivo. E' noto che l'ingrandimento di un cannocchiale è proporzionale direttamente alla focale dell'obbiettivo e inversamente a quella dell'oculare e pertanto per avere forti ingrandimenti occorrono obiettivi a grande focale. I vecchi cannocchiali astronomici a forte ingrandimento erano assai lunghi, perché praticamente la focale è la distanza fra obiettivo e reticolo ossia quasi la totale lunghezza del cannocchiale. E' noto che l'introduzione della lente divergente nel sistema obiettivo ha permesso di ottenere cannocchiali più corti, a parità di ingrandimento.

In tempi piuttosto recenti, nell'intento di ottenere forti ingrandimenti e molta luminosità, si sono costruiti i cannocchiali spezzati entro i quali il percorso dei raggi dall'obbiettivo al reticolo segue un andamento spezzato da specchi in modo da allungare artificialmente il percorso interno, ossia la focale e quindi l'ingrandimento; ne vedremo alcuni esempi più oltre. Ritornando all'errore di puntamento, si sono studiati anche i tipi di reticoli più idonei a collimare i segnali e si è trovato che si prestano meglio i reticoli a doppio tratto stabilendo che l'indice sia l'asse della striscia limitata dal doppio segno; si è già detto che l'occhio ha una particolare sensibilità a valutare quando l'immagine di un segnale cade sopra tale asse. I reticoli dei teodoliti hanno pertanto la caratteristica forma di croce di cui una metà del tratto verticale e di quello orizzontale sono sostituite dall'asse di due coppie di tratti paralleli e vicini. Questo artificio è usato anche da qualche casa costruttrice per la lettura dei cerchi ponendo, ad esempio, le graduazioni pari sfalsate rispetto a quelle dispari, in modo che il porre l'indice di lettura sopra una di queste significa bisecare l'intervallo delle altre graduazioni affacciate.

Ultimamente si sono anche introdotti dei dispositivi elettronici per rendere l'operazione di puntamento indipendente o quasi dall'abilità specifica dell'operatore, ma di questo si darà un cenno più oltre.

9. — Esaminate le principali cause di errore nella misura degli angoli col teodolite e i mezzi escogitati per raggiungere i migliori risultati, poniamo ora la nostra attenzione sopra alcuni tipi di teodoliti più caratteristici. E' doveroso ricordare che i teodoliti moderni sono in gran parte il frutto degli studi di E. Wild il quale progettò quelli della vecchia Casa Zeiss di Jena verso il 1920, poi quelli della Casa Wild, da lui fondata in seguito, e successivamente quelli della Casa Kern.



9.1. — Descriveremo per primo il teodolite WILD T 2 che ha caratteristiche analoghe a quello Zeiss e ad altri, occupandoci principalmente del dispositivo di lettura al cerchio orizzontale, analogo a quello per il cerchio verticale.

La fig. 6a rappresenta la sezione schematica dello strumento col piano che passa per l'asse principale e per quello secondario. Le graduazioni del cerchio sono incise sulla faccia superiore della corona circolare di vetro ottico la quale è stata poi resa speculare. Sotto il cerchio orizzontale è collocato il sistema di prismi *D* ed *E*, posto in senso diametricale rispetto al cerchio, e, sotto ancora, una lente *B* e un prisma *A* che ricevono la luce dallo specchio *S* esterno.

I prismi *D* ed *E* hanno la doppia funzione di costituire un veicolo ottico per illuminare la graduazione e per condurre l'immagine di questa nel microscopio di osservazione *O*.

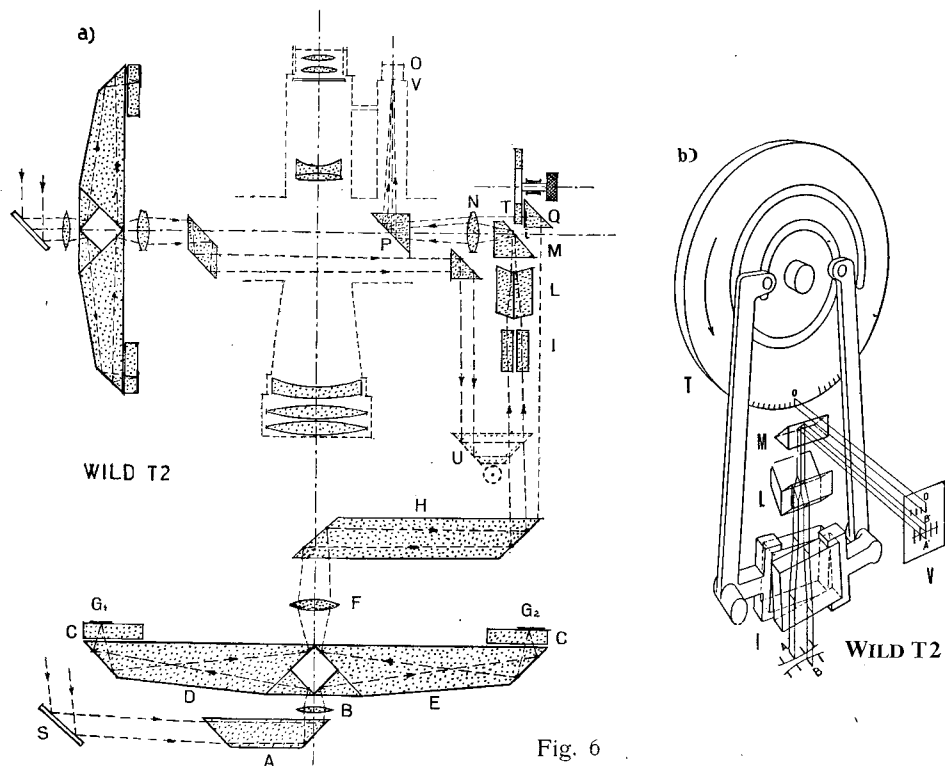


Fig. 6

La luce viene inviata, per mezzo dello specchio *S*, orientabile, entro il prisma *A* che la conduce alla lente *B* la quale la converge, secondo i percorsi tratteggiati in figura entro i prismi *D* ed *E*, sopra le graduazioni *G*<sub>1</sub> ed *G*<sub>2</sub>. La superficie speculare, che porta *G*<sub>1</sub> ed *G*<sub>2</sub>, riflette i raggi luminosi entro i prismi stessi secondo il percorso pure tratteggiato, i quali raggi poi escono, per riflessione totale, verso l'alto, attraversano la lente *F* e vengono deviati prima orizzontalmente poi verticalmente dal prisma romboedrico *H*. La funzione di quest'ultimo è semplicemente quella di spostare il percorso dei raggi dalla posizione vicina all'asse di rotazione a quella lungo un montante cavo dell'alidada, entro cui sono collocati i dispositivi per la coincidenza delle immagini, che sono simili a quello di cui si è già parlato al n. 4. I raggi luminosi vengono poi ricevuti dalle due lastre pian parallele *I* che possono ruotare in senso contrario e normale al piano della figura; ognuna di esse è posta sul cammino

dei raggi provenienti da uno degli estremi della graduazione del cerchio. Usciti dalle lastre, i raggi vengono fatti attraversare una coppia di prismi  $L$  che hanno lo scopo di avvicinare le immagini di  $G_1$  e  $G_2$  in modo che si presentino nel micrometro ben accostate (le facce oblique ai raggi obbligano questi ultimi a rifrangersi, avvicinandosi alla faccia comune ai due prismi in modo che alla osservazione non rimangano intervalli fra le due immagini affacciate). Successivamente i predetti raggi vengono raccolti nell'unico prisma  $M$  che li invia ad una lente  $N$  la quale li converge, insieme con quelli che vengono dal disco graduato  $T$  del micrometro, sul piano  $V$  ed ivi osservati con l'oculare  $O$  posto a lato di quello del cannocchiale. Un tratto  $i$  inciso sul prisma  $Q$  funziona da indice, la cui immagine viene portata in  $V$  insieme a quelle di  $G_1$ ,  $G_2$  e  $T$ . L'osservazione si presenta come nella fig. 2b, c, di cui al n. 5.1. Nella fig. 6b è visibile una prospettiva del dispositivo micrometrico con le lettere identiche a quelle dello schema 6a, dalla quale appare piuttosto chiaramente anche il meccanismo di rotazione delle lastre  $I$ , ruotando il tamburo  $T$ .

La lettura al cerchio verticale si esegue per mezzo di analogo veicolo ottico che conduce le immagini della graduazione allo stesso dispositivo della coincidenza e al quale si inserisce mediante la introduzione del prisma  $U$  che esclude l'osservazione al cerchio orizzontale; tale prisma è manovrato mediante un bottone esterno .

9.2. — Il teodolite KERN DKM2 presenta la particolarità dei doppi cerchi graduati o meglio del cerchio con doppia graduazione a semplici tratti: l'una nella parte esterna, senza numerazione, l'altra, più interna ma vicina alla precedente, numerata.

Lo schema dello strumento è riportato in fig. 7a che rappresenta la sezione dello stesso con un piano verticale passante per l'asse principale  $ZZ$  e per l'asse secondario  $RR$ , con l'asse di collimazione del cannocchiale immaginato verticale. In basso è visibile quanto riguarda il cerchio orizzontale, a sinistra il dispositivo d'ingresso della luce e il cerchio verticale, al centro il cannocchiale di lunghezza costante. Si noti subito in quest'ultimo l'obbiettivo acromatico costituito di tre lenti non a contatto, la lente interna divergente, composta, per l'adattamento alla distanza, il reticolo inciso sopra la faccia interna di una lastrina di vetro incollata ad una lente e infine l'oculare composto di alcune lenti. L'osservazione del reticolo così protetto, mediante un corretto adattamento dell'oculare alla vista, risulta nitida, non essendo disturbata da eventuale polvere o umidità che si deposita sulle superfici libere e per le quali in questo caso l'oculare non è adattato.

L'illuminazione dei cerchi orizzontali  $C_o$  e verticale  $C_v$ , avviene per mezzo dello specchio esterno  $S$  che, opportunamente orientato, invia la luce al  $C_o$  per mezzo del veicolo ottico costituito da prismi e lenti  $PABDEF$  e al  $C_v$  per mezzo del sistema  $TUVW$ . Le immagini dei cerchi vengono poi condotte, con i veicoli ottici  $GHK$  e  $WY$  al dispositivo micrometrico  $IL$  e, attraverso  $LMNQ$ , all'oculare.

Vediamo ora come si eseguono le osservazioni al cerchio orizzontale. Il fascio di raggi luminosi paralleli provenienti da  $S$  e  $P$  viene concentrato dalla lente  $A$  sul piano  $C_o'$  della graduazione del cerchio orizzontale (ossia questo piano è il piano focale della lente  $A$ , seguendo il cammino ottico spezzato dal prisma  $B$ . La graduazione è incisa sulla faccia inferiore del cerchio, che è trasparente, per cui la graduazione  $C_o'$  diventa oggetto illuminato rispetto alla lente  $E$  che è posta in modo da dare l'immagine di  $C_o'$  sul piano della graduazione  $C_o''$ , ma leggermente sfalsata rispetto a questa come si dirà fra poco, seguendo il cammino ottico spezzato dai prismi  $D$  ed  $F$ . La graduazione  $C_o''$  e l'immagine di  $C_o'$  su questa diventano nuovamente oggetto illuminato del quale il veicolo ottico successivo  $GHKILMNQ$  permetterà l'osservazione nel-

l'oculare; sopra questo percorso è inserito il dispositivo micrometrico di cui parleremo dopo.

Ritorniamo ora a descrivere minutamente la funzione della doppia graduazione già citata. I prismi  $D$  ed  $F$  e la lente  $E$  interposta danno luogo alle immagini  $a''$  e  $b''$  delle graduazioni  $a$  e  $b$  sul piano delle stesse, ma in posizione diametralmente opposta, in modo che  $a''$  si sovrappone a  $b$  e  $b''$  ad  $a$  (fig. 7 in

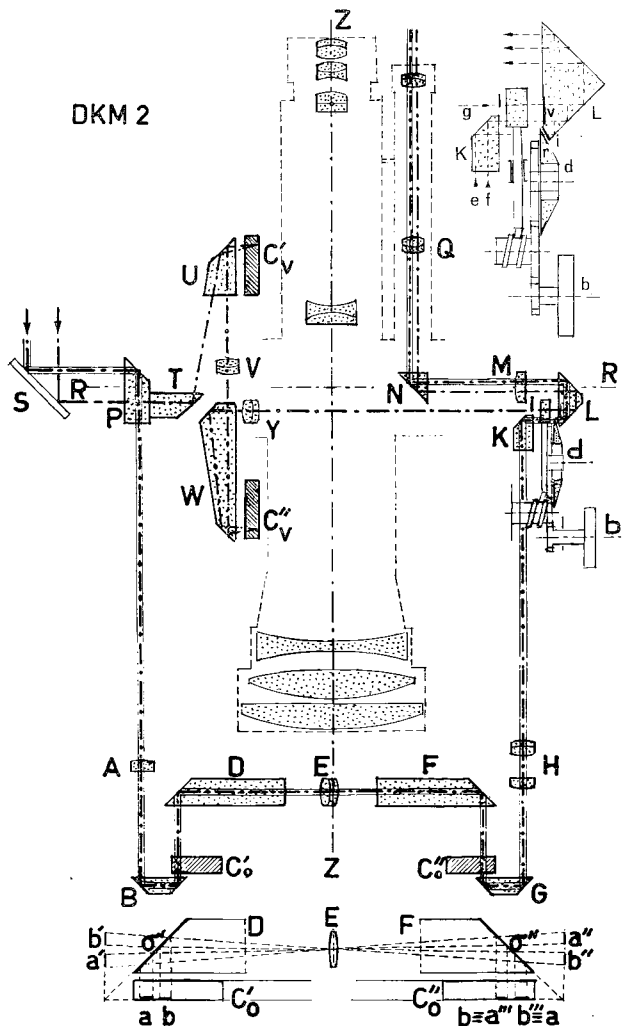


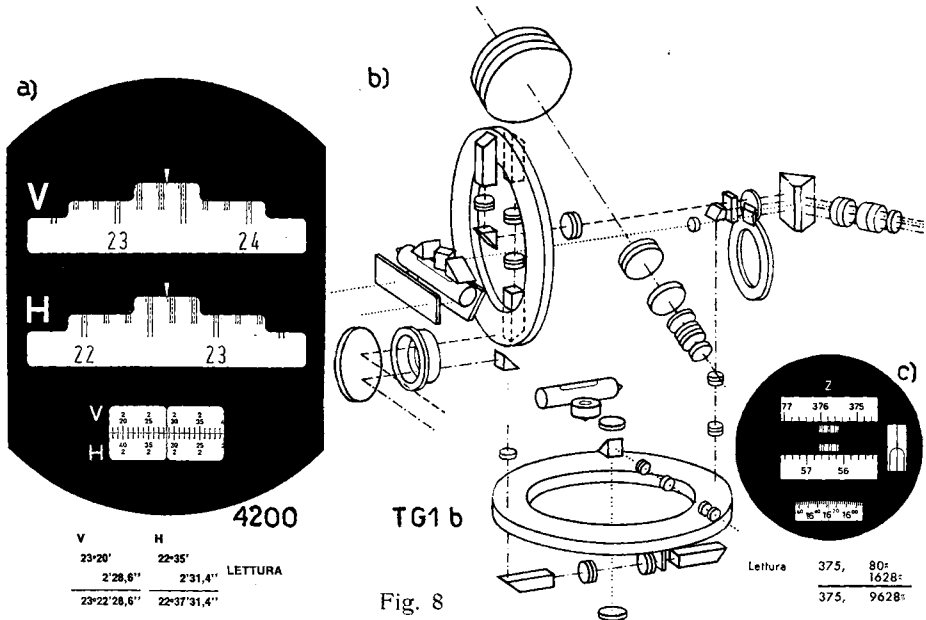
Fig. 7

basso). Infatti se la lente giace sulla verticale del centro delle graduazioni e i prismi  $D$  ed  $F$  sono simmetrici rispetto a questa, la faccia  $\sigma'$  del prisma  $D$ , che funziona da specchio, dà delle graduazioni  $a$  e  $b$  le immagini  $a'$  e  $b'$ , la lente  $E$  dà le immagini di queste in  $a''$  e  $b''$  e finalmente la faccia  $\sigma''$  di  $F$  dà, di  $a''$  e  $b''$  le immagini speculari  $a'''$  e  $b'''$  le quali si sovrappongono,  $a'''$  su  $b$  e  $b'''$  su  $a$ .

Vediamo ora come si presenta questo dispositivo nei riguardi dell'errore di eccentricità dell'alidada. Se non esiste tale errore, come nel caso supposto sopra, avviene una sovrapposizione dei tratti opposti ed è evidente che se

vi è un'eccentricità (fuori del piano della figura) tale sovrapposizione verrà a mancare e la lettura corretta dovrebbe essere fatta in corrispondenza alla bisettrice di due graduazioni opposte, che rappresenta la media cercata. Ma se le graduazioni sono quasi coincidenti è difficile stimare la bisettrice, per cui il costruttore ha fatto in modo che le immagini della prima graduazione non cadessero esattamente su quella opposta, come si è detto sopra, anche in assenza di eccentricità, ma risultassero comunque spostate di un certo piccolo intervallo: l'asse di tale intervallo rappresenta la lettura media fra quelle opposte ed è quindi immune dall'errore dovuto all'eccentricità. Per ottenere questo spostamento dell'immagine della graduazione di sinistra rispetto a quella di destra basta spostare la lente  $E$  nel senso normale al piano della figura, della metà dello spostamento voluto nelle graduazioni (la lente  $E$  è a metà percorso  $C_0'C_0''$  e quindi spostando il suo centro ottico di una certa quantità l'immagine di uno stesso punto su  $C_0'$  si sposta in  $C_0''$  del doppio). In definitiva l'immagine  $a'''$  su  $C_0''$  delle graduazioni  $a$  di  $C_0'$  e le graduazioni  $b$  di  $C_0''$  si vedono a coppie di tratti.

Passiamo ora al dispositivo micrometrico. Le graduazioni predette sul piano  $C_0''$  costituiscono un nuovo oggetto illuminato la cui immagine, attraverso il veicolo ottico  $GHIKLMNQ$ , è portata all'oculare di osservazione. In questo percorso (fig. 7 e particolare in alto, a destra), i raggi attraversano la lastra pian parallela  $I$  che può ruotare intorno ad un asse verticale, comandata dal bottone esterno  $b$  col quale ruota rigidamente il disco  $d$  il cui orlo graduato  $r$  si affaccia ad un tratto  $i$  inciso sulla parte smussata del prisma  $L$ . Agendo su  $b$  si fa in modo che l'immagine della coppia di tratti citata venga bisecata dall'indice  $i$  e alla lettura alla graduazione principale basta aggiungere la lettura al disco micrometrico fatta in corrispondenza all'indice  $i$ .



Lo stesso criterio è usato per il cerchio verticale: lo specchio esterno  $S$  invia la luce nel veicolo ottico  $TUVWY$  che porta l'immagine del cerchio verticale  $C_v'$  sopra  $C_v''$  e quindi quella di entrambi nel dispositivo micrometrico visto prima (che serve, separatamente, per i due cerchi) e all'osservazione in

Q. (v. fig. 7).

9.3. — Altri teodoliti sono costruiti da diverse Case: la SALMOIRAGHI presenta il mod. 4200, al secondo, con indice zenitale automatico. I cerchi portano una doppia graduazione e la lettura si esegue in due fasi, come in altri tipi, prima al cerchio con l'approssimazione di  $5'$  o  $10''$  e il resto sul micrometro, dopo aver portato a bisecare una coppia di tratti con uno dei tratti della coppia diametralmente opposta; la lettura al micrometro si esegue stimando  $0,1''$  (fig. 8a).

La Casa GALILEO presenta il mod. TG1b il cui schema è riportato in fig. 8b ed è analogo a quello descritto per il Wild T2. Le graduazioni sono a tratti semplici e tali appaiono anche nel microscopio di lettura per dare la prima parte della lettura (in fig. 375,\*80). In una finestrina vicina (sotto a quella zenitale e sopra a quella azimutale) appaiono invece le immagini di coppie di graduazioni ognuna costituita da tratti diametralmente opposti secondo schemi già noti. In tal modo è possibile eseguire le coincidenze del tratto di riferimento con la bisettrice delle coppie e leggere poi le frazioni (1628) sul disco micrometrico (finestrella inferiore).

Un teodolite di precisione è il WILD T 3 che permette di valutare un angolo al  $0,1''$ : il suo schema è simile a quello spiegato al n. 9.1. In esso si può oggi applicare una macchina fotografica al microscopio di lettura per fotografarne le graduazioni che vengono poi interpretate con comodo. Più preciso ancora è l'universale WILD T 4, a cannocchiale spezzato, che serve anche per misure astronomiche.

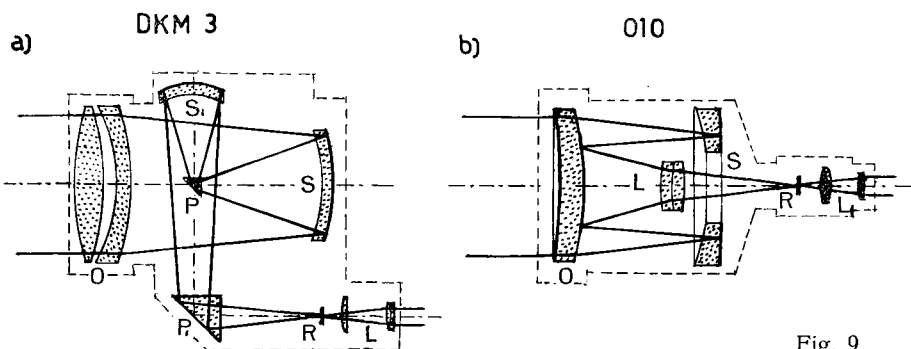


Fig. 9

Altro teodolite di precisione è il KERN DKM3 col cannocchiale catadiottrico e il doppio cerchio già descritto al n. 5.2. Il cannocchiale, per montare un obiettivo a grande focale, deve essere piuttosto lungo e allo scopo di ridurne le dimensioni si è spezzato il percorso dei raggi visuali (fig. 9a) facendo riflettere quelli che provengono dall'obbiettivo O dallo specchio concavo S in modo che sul prisma P si formi l'immagine reale dell'oggetto collimato; successivamente tale immagine, attraverso la riflessione sullo specchio concavo  $S_1$  e sul prisma  $P_2$ , dà luogo all'immagine reale della precedente e quindi dell'oggetto sul reticolo R che si osserva con l'oculare L. L'obbiettivo viene ad avere una focale di 510 mm e un'apertura di 72 mm, il cannocchiale è capovolgibile ed è corredato di due oculari che forniscono l'ingrandimento di 27 e 45 volte. Le letture al micrometro si eseguono al  $0,05''$ .

L'attuale Casa Carl ZEISS di Jena costruisce il mod. 010 con cannocchiale a percorso ottico spezzato internamente come è mostrato nella fig. 9b

ma di precisione un po' minore di quella del precedente. I raggi paralleli all'asse provenienti dall'oggetto attraverso una corona circolare esterna dell'obbiettivo  $O$ , vengono riflessi dallo specchio concavo  $S$ , anch'esso a corona circolare, riflessi ancora dalla superficie speculare che l'obbiettivo presenta internamente nella sua parte centrale e fatti attraversare la lente convergente  $L$  che li conduce sul reticolo  $R$  dove vengono osservati con l'oculare  $L$ . Le letture ai cerchi si eseguono per coincidenza al  $0,1''$ .

La Casa Carl ZEISS Oberkochen/Württ. costruisce il mod. *Th 3* al  $1''$  sul tipo di quello di Wild.

La Casa ASKANIA-WERKE di Berlino-Fridman costruisce il mod. *Tu* al  $1''$ . Recentemente questa Casa ha costruito un *teodolite di precisione a registrazione fotografica* delle letture progettato dal prof. *Gigas*. Con questo strumento l'operatore, dopo aver eseguito la collimazione, invece di leggere al cerchio, premere un pulsante che fa scattare l'otturatore della macchina fotografica e fa avvenire automaticamente l'avanzamento della pellicola. Su questa vengono raccolte le immagini dei cerchi orizzontale e verticale nelle due posizioni diametrali, l'immagine della livella zenitale e quella del quadrante di un cronometro.

La lettura dei fotogrammi si esegue successivamente a tavolino usando lo stesso micrometro dello strumento che è asportabile. Sono evidenti i vantaggi di un tale teodolite specialmente nei casi di osservazione a punti non rigorosamente stabili nello spazio o in condizioni climatiche sfavorevoli. La stessa Casa Askania ha recentemente provveduto il teodolite di un dispositivo elettronico di puntamento denominato «occhio elettrico». L'apparecchiatura è piuttosto complicata ma si basa sopra un principio piuttosto semplice: un segnale luminoso lontano (supponiamo sferico) sarà collimato quando la sua immagine sul piano del reticolo (cioè il disco circolare immagine, illuminato) avrà come assi di simmetria i tratti del reticolo, ossia volendo per ora una collimazione giusta per gli angoli azimutali, quando la quantità di luce che cade sul piano del reticolo sia uguale da una parte e dall'altra del tratto verticale di questo. Se al posto del reticolo poniamo una lastrina di vetro, trasparente da una parte e speculare dall'altra, in modo che la linea di separazione funzioni da tratto verticale del reticolo e questa lastra sia obliqua alla direzione dei raggi luminosi, il disco illuminato si potrà scindere in due parti uguali: i raggi luminosi che incontrano la metà trasparente passeranno, mentre quelli che incontrano lo specchio saranno deviati. Con opportuno dispositivo che trasforma le radiazioni luminose in impulsi luminosi e quindi questi in impulsi elettrici, si fanno entrare le correnti elettriche provenienti dalle due parti, opportunamente amplificate, in senso contrario entro un galvanometro il cui indice segnerà zero quando le intensità luminose saranno uguali, ossia quando il segnale sarà perfettamente collimato. L'operatore deve quindi collimare normalmente il punto luminoso e poi perfezionare la collimazione fino a che l'indice del galvanometro sia centrato sullo zero.