



I micrometri astronomici

Una delle principali differenze tra la scienza medioevale e la scienza moderna è che la prima cercava di comprendere la natura sulla base di argomentazioni qualitative, mentre la seconda la descrive in termini quantitativi, per mezzo di relazioni matematiche che legano tra di loro le diverse grandezze fisiche. Uno dei presupposti di questa nuova scienza è la disponibilità di strumenti di misura, cioè di dispositivi in grado di descrivere angoli, lunghezze, volumi, pesi, tempi, velocità, ecc., per mezzo di valori numerici che esprimano il loro rapporto rispetto a unità di misura. È difficile dire se in questa evoluzione sia venuto prima l'uovo o la gallina, cioè se la disponibilità di strumenti scientifici abbia determinato la scoperta di leggi quantitative, oppure se il desiderio di una maggiore precisione matematica abbia stimolato la ricerca e l'invenzione di nuovi strumenti di misura e di osservazione; probabilmente i due fenomeni sono avvenuti in parallelo e si sono fecondati a vicenda.

La ricerca della precisione alle origini dell'astronomia moderna

La prima scienza che si è evoluta in senso matematico, tra la fine del Cinquecento e gli inizi del Seicento, è stata la meccanica, cioè lo studio delle leggi che governano il moto dei corpi materiali, e soprattutto quella sua parte che riguarda il moto dei corpi celesti (quella che nel Settecento verrà chiamata *meccanica celeste*); ciò non deve stupire, se si pensa che nell'ambiente terrestre le traiettorie dei corpi sono soggette a molteplici e complesse perturbazioni (come le forze d'attrito) mentre i pianeti si muovono nel vuoto e sono quindi governati unicamente dalla legge di gravitazione universale. Il successo della meccanica celeste nel descrivere e prevedere con precisione il moto dei pianeti fu tale che essa divenne il prototipo del sogno moderno di poter comprendere ogni fenomeno naturale riducendolo a processi materiali descrivibili in termini matematici, quella concezione che non a caso è chiamata *meccanicismo*. Un passo importante per il progresso dell'astronomia è costituito dall'attività di Tycho Brahe (1546-1601), che negli ultimi due decenni del XVI secolo intraprese un vasto programma di misurazione delle posizioni delle stelle e dei pianeti; grazie a strumenti di nuova concezione, da lui progettati e costruiti, le sue osservazioni astrometriche¹ avevano errori spesso inferiori al minuto d'arco², un livello di accuratezza mai raggiunto fino ad allora, e che fu un elemento essenziale per la scoperta delle leggi del moto planetario. Keplero³ giunse alla conclusione che le orbite dei pianeti sono ellittiche perché, in base ai suoi calcoli, la migliore orbita circolare dava uno scarto di otto minuti d'arco rispetto alle osservazioni di Tycho, un errore che egli giudicò

-
- 1 I termini *astrometria* (lett. "misura degli astri") oppure *astronomia di posizione* sono usati per indicare quella branca dell'astronomia che si occupa di misurare con precisione, calcolare e prevedere le posizioni delle stelle e dei pianeti, per distinguerla dall'*astrofisica*, che ha per oggetto lo studio delle proprietà fisiche (composizione, produzione di energia, irraggiamento, evoluzione) degli stessi corpi celesti. Entrambi i termini sono di conio recente, in quanto fino al XIX secolo, cioè prima della nascita dell'astrofisica, quella che oggi chiamiamo "astrometria" veniva chiamata "astronomia" *tout court*.
 - 2 Il *minuto d'arco* (o *minuto primo*) è la sessantesima parte di un grado; a sua volta si divide in sessanta *secondi d'arco* (o *minuti secondi*). Per rendere l'idea, un grado (1°) è l'angolo sotteso da una moneta da un euro vista dalla distanza di 1.33 m; i diametri apparenti dei dischi del Sole e della Luna corrispondono a circa mezzo grado (30 minuti). Analogamente un minuto (1') e un secondo (1'') sono gli angoli sottesi dalla stessa moneta rispettivamente alla distanza di 80 m e 4800 m.
 - 3 Johannes Kepler (1571-1630) ha formulato le leggi del moto planetario che, a meno di piccole correzioni, vengono considerate valide anche oggi. Keplero portò a compimento la rivoluzione copernicana e fu il primo a porre il problema del moto dei pianeti in termini fisici, di traiettorie di corpi materiali soggetti a forze generate dal Sole, aprendo così la strada alla sintesi newtoniana. Una descrizione molto vivida dell'itinerario intellettuale di Keplero e dei suoi rapporti con Tycho Brahe è data da Koestler (1982); sullo stesso tema vedi anche Hall (1976).

inammissibile. Se gli errori nelle misure angolari di Tycho fossero stati dell'ordine di $10'$, qual era appunto l'accuratezza tipica dei migliori tra i suoi immediati predecessori, Keplero non avrebbe potuto scoprire le sue tre leggi. Come spesso è accaduto nell'evoluzione della scienza, un miglioramento *quantitativo* nell'accuratezza strumentale aveva portato a un progresso *qualitativo* nella comprensione della natura, cioè alla possibilità di evidenziare fenomeni che altrimenti sarebbero stati inosservabili e a discriminare sulla base di essi tra teorie alternative.

Gli strumenti di misura di Tycho sono precedenti all'invenzione del cannocchiale e non utilizzavano alcun sistema di lenti per ingrandire le immagini; si basavano su sistemi di mire a occhio nudo, che permettevano di puntare un braccio ruotante (tecnicamente chiamato *alidada*) in direzione dell'astro, e di leggerne la posizione su una scala graduata. Un esempio tipico di questa strumentazione è il grande quadrante murale costruito da Tycho nel 1582 (figura 1): era costituito da una scala graduata in bronzo che aveva la forma di un quarto di circonferenza di circa 2 m di raggio ed era fissata a una parete in muratura orientata con precisione in direzione nord-sud. Su di essa erano applicate due mire⁴ che potevano scorrere in modo indipendente lungo la scala graduata, traguardando un astro attraverso un'altra mira fissa ricavata in una finestrella sulla parete di fronte allo strumento. Con questo strumento l'osservatore poteva misurare l'altezza sull'orizzonte di un astro nel momento in cui esso passava per il piano del meridiano (direzione sud); da questa misura è possibile calcolare direttamente una delle due coordinate celesti dell'astro, cioè la sua *declinazione*⁵. Tycho aveva sperato di poter determinare l'altra coordinata celeste dell'astro, la sua



Figura 1: Il grande quadrante murale costruito da Tycho Brahe nel 1582; la scala graduata, dotata di due mire indipendenti, è fissata su una parete orientata in direzione nord-sud, decorata da un grande affresco che ritrae l'astronomo all'interno del suo castello-osservatorio. Si notino in particolare: la finestrella, in alto a sinistra, che contiene la mira fissa attraverso cui venivano traguardati gli astri; la suddivisione fine della scala graduata per mezzo di linee trasversali (vedi figura 4); la presenza di due orologi, in basso a destra, che dovevano servire per la determinazione dell'ascensione retta degli astri attraverso la misura dei tempi di passaggio al meridiano.

4 La presenza di due mire permetteva l'uso contemporaneo dello strumento da parte di due osservatori, che potevano così misurare la posizione relativa di due astri.

5 La posizione di un astro è descritta da due coordinate angolari che sono l'esatto equivalente della longitudine e della latitudine sulla superficie terrestre, tranne per il fatto che sono misurate in un sistema di riferimento fisso con la volta celeste invece che con la superficie terrestre: l'*ascensione retta* (analogo della *longitudine*) è un angolo misurato lungo l'equatore celeste; la *declinazione* è l'altezza dell'astro sul piano dell'equatore celeste ed è quindi l'ana-

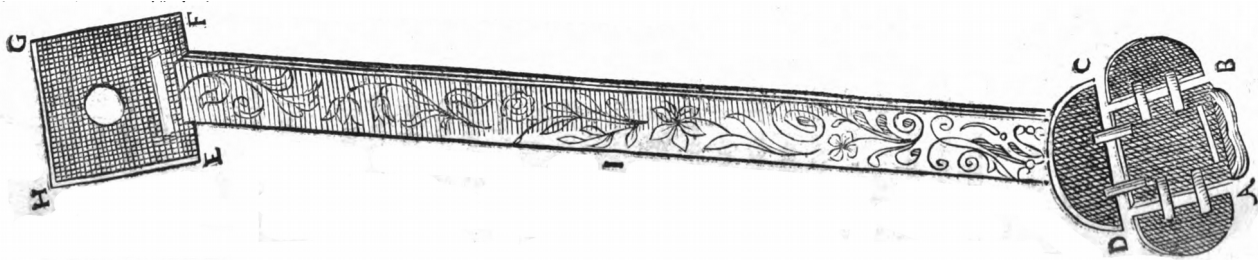


Figura 2: La mira inventata da Tycho Brahe per i suoi strumenti astrometrici. Alle estremità dell'alidada (I) sono fissate due lamine quadrate di uguali dimensioni (ABCD ed EFGH); sui bordi della lamina vicina all'occhio dell'osservatore (ABCD) sono poste sottili fessure, la cui ampiezza può essere regolata per mezzo di viti. L'astro da misurare viene tralungato alternativamente lungo i due bordi opposti delle lamine, cioè sia tra i bordi BC e FG, sia tra AD e EH, restringendo progressivamente lo spessore delle fessure. Il sistema è privo di errori di parallasse perché qualsiasi disallineamento della direzione dell'alidada rispetto a quella della stella provocherebbe la scomparsa dell'astro dietro uno dei bordi (EH o FG) della lamina anteriore.

ascensione retta, misurando i tempi dei passaggi al meridiano; aveva perciò dotato il proprio osservatorio di alcuni orologi, che però si rivelarono troppo poco precisi per questo compito, e dovette quindi ricorrere a strumenti che misuravano angoli nel piano orizzontale oltre che in verticale. L'utilizzo dei tempi dei passaggi per misure astrometriche diventerà possibile solo nella seconda metà del Seicento, quando saranno disponibili i primi orologi a pendolo⁶.

È veramente notevole il fatto che Tycho con questi mezzi abbia raggiunto il limite massimo della precisione possibile a occhio nudo. Il potere di risoluzione dell'occhio umano è infatti di circa un minuto d'arco; ciò significa che, se due sorgenti luminose distano tra di loro di un angolo inferiore a questa quantità, esse non possono essere viste come due oggetti distinti, e appaiono confuse in un'unica immagine. Egli poté raggiungere una simile precisione utilizzando un nuovo tipo di mira di sua invenzione, che permetteva di eliminare l'errore di parallasse delle mire tradizionali. Nelle mire tradizionali, la posizione della stella è tralungata attraverso due fori allineati, uno posto vicino all'occhio dell'osservatore, e l'altro all'altra estremità dell'alidada; questi fori non possono avere dimensioni troppo piccole, altrimenti l'osservatore non riuscirebbe a inquadrare la stella; essi quindi permettono uno spostamento laterale dell'occhio dell'osservatore che, seppur molto piccolo, introduce un errore (detto *errore di parallasse*) nel puntamento dell'alidada. Invece la mira ideata da Tycho consiste in due lamine di forma quadrata di uguali dimensioni che sono fissate alle estremità dell'alidada; la lamina vicina all'occhio dell'osservatore porta sui bordi delle sottili fessure, la cui ampiezza può essere regolata per mezzo di viti. La stella viene tralungata alternativamente attraverso due bordi opposti delle lamine, eliminando l'errore di parallasse (figura 2).

logo della *latitudine* sulla Terra. L'ascensione retta si misura a partire dal punto dell'equatore celeste per cui passa il Sole all'equinozio di primavera (chiamato *punto vernale* o anche *primo punto dell'Ariete* perché si trova appunto in questa costellazione): il meridiano celeste che passa per questo punto svolge quindi la funzione del *meridiano di Greenwich* sulla Terra. Nell'istante in cui un astro attraversa il meridiano locale (punto sud), il piano del meridiano celeste passante per l'astro coincide con il piano del meridiano locale: di conseguenza il polo celeste, lo zenit e l'astro si trovano allineati lungo uno stesso cerchio massimo, e la declinazione δ dell'astro è legata alla sua altezza h sull'orizzonte dalla semplice relazione $\delta = h + \varphi - 90^\circ$, dove φ è la latitudine del luogo di osservazione. L'altra coordinata dell'astro, l'ascensione retta α , che si misura lungo l'equatore celeste, può essere determinata sia attraverso una misura di angoli, sia attraverso una misura di tempi, sfruttando il fatto che la rotazione della Terra attorno al proprio asse avviene con velocità costante: se t_1 e t_2 sono gli istanti del passaggio di due astri al meridiano, la loro differenza di ascensione retta $\alpha_1 - \alpha_2$ è proporzionale all'intervallo di tempo tramite la relazione $(\alpha_1 - \alpha_2)/360^\circ = (t_1 - t_2)/T$, dove T è la durata del giorno siderale ($23^h 56^m 4^s.1$).

6 Su questo argomento vedi la scheda MusAB: [L'evoluzione dell'orologio a pendolo](#).

Nonii, linee trasversali, vernieri

Uno dei problemi tecnologici principali nella costruzione di strumenti per la misura delle posizioni di oggetti celesti era costituito dalla divisione della scala graduata, cioè dalla tracciatura su di essa di una serie di tacche equispaziate. I metodi e gli strumenti per effettuare questa operazione subirono una costante evoluzione per opera di scienziati e di artigiani specializzati, e spesso costituivano il “segreto del mestiere” che permetteva a un certo produttore di prevalere sulla concorrenza. Anche il problema di tracciare le tacche a una distanza reciproca sufficientemente piccola da permettere la lettura con la precisione richiesta non era di semplice soluzione. Si consideri che sulla circonferenza di una scala graduata del raggio di un metro un angolo di un minuto d’arco corrisponde a una distanza lineare di circa tre decimi di millimetro: una scala tracciata con questa finezza richiederebbe tacche estremamente sottili e difficili da realizzare; le tacche risulterebbero anche scarsamente visibili, e renderebbero lo strumento difficile da utilizzare. Una possibile soluzione consiste nell’aumentare il raggio della scala, una via che fu effettivamente seguita da diversi astronomi ma che non può essere portata oltre un certo limite, perché strumenti molto grandi diventano molto ingombranti e difficili da manovrare, e soprattutto soggetti a flessioni meccaniche a causa del loro stesso peso, deformazioni che fanno perdere in accuratezza quanto si è guadagnato con la migliore risoluzione della scala.

Furono quindi escogitati sistemi che permettevano una precisione di lettura superiore alla risoluzione fornita dalla distanza tra le tacche. Il primo di essi fu ideato nel 1542 dal cartografo portoghese Pedro Nunez (1502-1578): consisteva nel dotare lo strumento di diverse scale concentriche, con un numero totale di divisioni che diminuiva di una unità passando da una scala alla successiva. Ad esempio, supponendo di voler realizzare un quadrante (quarto di cerchio) che misuri angoli da 0 a 90 gradi, si può tracciare una prima scala divisa in 90 tacche a distanza di un grado, una seconda scala divisa in 89 tacche a distanza di $90/89$ di grado, una terza scala divisa in 88 tacche, e così via, fino a un’ultima scala divisa in 46 tacche⁷. Mentre le tacche della prima scala cadono sui valori interi di grado, quelli delle scale successive sono in corrispondenza di valori frazionari, intermedi tra

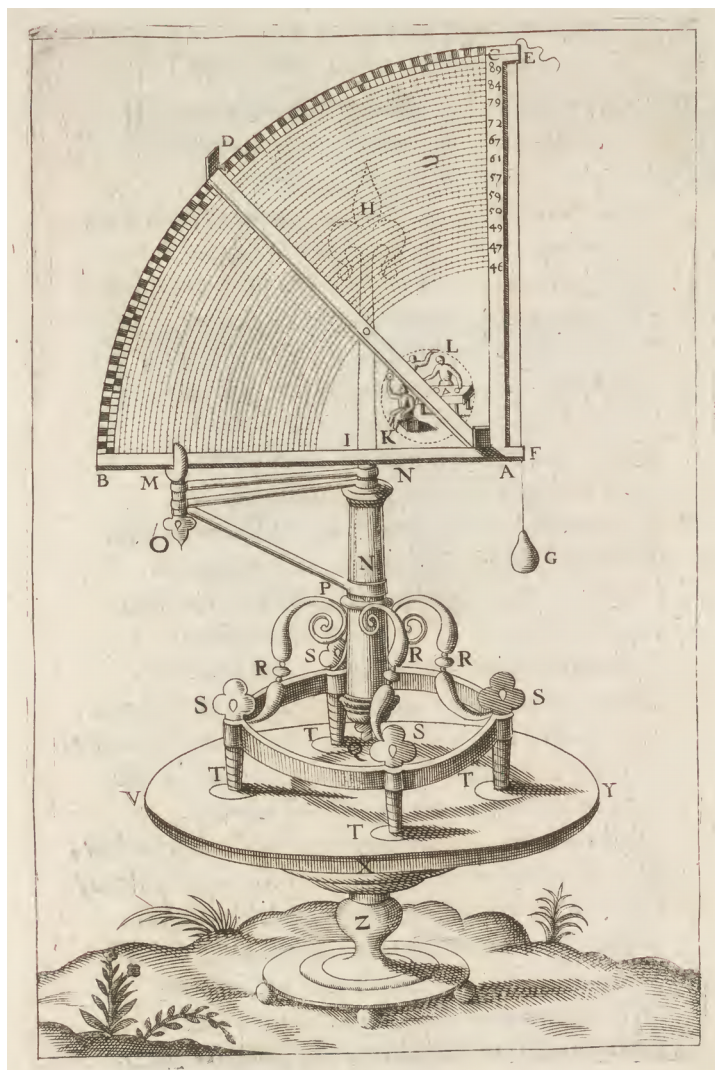


Figura 3: Il cosiddetto *quadrans minor* costruito da Tycho Brahe nel 1577, che fa uso del nonio inventato da Pedro Nunez.

⁷ Aggiungere altre scale non avrebbe alcuna utilità, perché le tacche di una scala divisa in 45 parti coinciderebbero con quelle della scala in 90 parti, saltandone una ogni due; le tacche di una scala divisa in 44 parti coinciderebbero con quelle della scala in 88 parti, ecc.

quelli della prima scala. Quando esegue la misura, l'astronomo deve fare riferimento alla tacca più vicina alla posizione dell'alidada, scegliendola tra le tacche di tutte le scale. L'idea è che l'insieme di tutti i valori, interi e frazionari, costituisca una sequenza abbastanza densa da accrescere significativamente la precisione dello strumento; e tutto ciò è ottenuto senza mai dover tracciare tacche a distanza di meno di un grado tra di loro. Lo strumento fu chiamato *nonio* (dal nome latinizzato del suo inventore, Petrus Nonius) ed ebbe una certa diffusione tra la fine del Cinquecento e l'inizio del Seicento; anche Tycho Brahe inizialmente lo adottò (figura 3), senza tuttavia esserne molto soddisfatto. In effetti il sistema aveva parecchi difetti: era molto complesso da costruire⁸ e macchinoso da usare; tra l'altro, ogni misura richiedeva il calcolo del valore di una frazione (in un'epoca in cui, ricordiamolo, non esistevano calcolatrici tascabili e tutti i conti dovevano essere fatti a mano). Ma soprattutto la divisione del cerchio che fornisce non è uniforme: nella maggior parte dei casi la distanza tra tacche successive è inferiore a 6-7 centesimi di divisione, ma in alcune zone della scala è maggiore di 20 centesimi, arrivando fino a più di 50 centesimi⁹.

Per i suoi strumenti successivi Tycho utilizzò il metodo delle *linee trasversali* che era già stato proposto dall'astronomo ebreo-francese Levi ben Gerson (o Gersonide, 1288-1344), e che consiste nell'aggiungere alla scala graduata principale una serie di tacche secondarie costituite da linee molto brevi o da punti, disposti lungo linee fortemente inclinate rispetto alla scala stessa (figura 4): in questo modo le tacche risultano ben separate e facilmente leggibili anche se la loro distanza reciproca (misurata nella direzione della scala) è molto piccola, anche inferiore al loro spessore. Tycho adottò questo metodo per la scala graduata del suo grande quadrante murale del 1582 (figura 1), in cui la distanza tra le linee trasversali era di un sesto di minuto d'arco!

Un sistema ancora più efficace per misurare le frazioni di divisione fu proposto nel 1631 da Pierre Vernier (1580-1637): consiste nell'affiancare la scala graduata principale dello strumento con una scala secondaria, fissata all'alidada o comunque alla parte mobile di cui si vuole misurare la posizione, che ha le tacche spaziate di un intervallo leggermente inferiore a quello della scala principale. Illustriamone il principio di funzionamento con un esempio. Supponiamo di voler costruire uno strumento che misuri distanze lineari e che quindi ha una scala principale con tacche alla distanza di 1 mm una dall'altra (figura 5); sulla parte mobile dello strumento, quella che porta l'indice che scorre lungo la scala principale, costruiamo una scala secondaria in cui una lunghezza totale di 9 mm viene divisa in dieci tacche equispaziate: la distanza tra le singole tacche è quindi di 0.9 mm. Nella sua posizione iniziale (figura 5, in alto) lo zero della scala secondaria, che ha la funzione di indice principale, coincide con lo zero della scala principale, e quindi l'ultima tacca della scala secondaria (contrassegnata dal numero 10) coincide con la tacca dei 9 mm della scala principale. Nella parte inferiore della figura 5 la parte mobile dello strumento è stata spostata di 11.3 mm verso destra: è questa la lunghezza che vorremmo misurare. Senza l'ausilio della scala secondaria si vede che l'indice dello strumento (A nella figura) si trova poco dopo la tacca degli 11 mm, ma a occhio

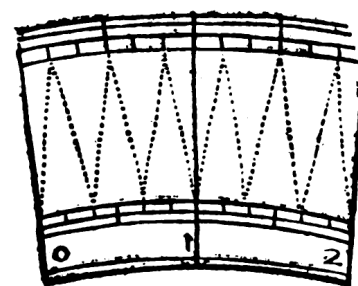


Figura 4: Le *linee trasversali* usate da Tycho Brahe per infittire le tacche delle scale graduate per la misura di angoli.

8 All'epoca la divisione dei cerchi graduati si basava sui procedimenti geometrici di bisezione e trisezione degli angoli che nella loro essenza risalivano a Euclide; ma se dividere un angolo retto in 90 parti uguali è un compito che può essere ragionevolmente affrontato con questi metodi (dividendolo successivamente in 3, in 3 e in 2 parti si ottengono settori di 5°), una divisione in 79 o 61 parti è un'impresa disperata.

9 Nell'esempio sopra descritto della scala da 0° a 90°, l'intervallo tra 1° e 2° comprende 45 tacche (non equispaziate!) mentre l'intervallo tra 45° e 46° ne ha solo 23; e la prima tacca dopo il valore intero di 45° si trova a 45.5056° (= $45 \times 90 / 89$), a una distanza di ben 0.5056°!

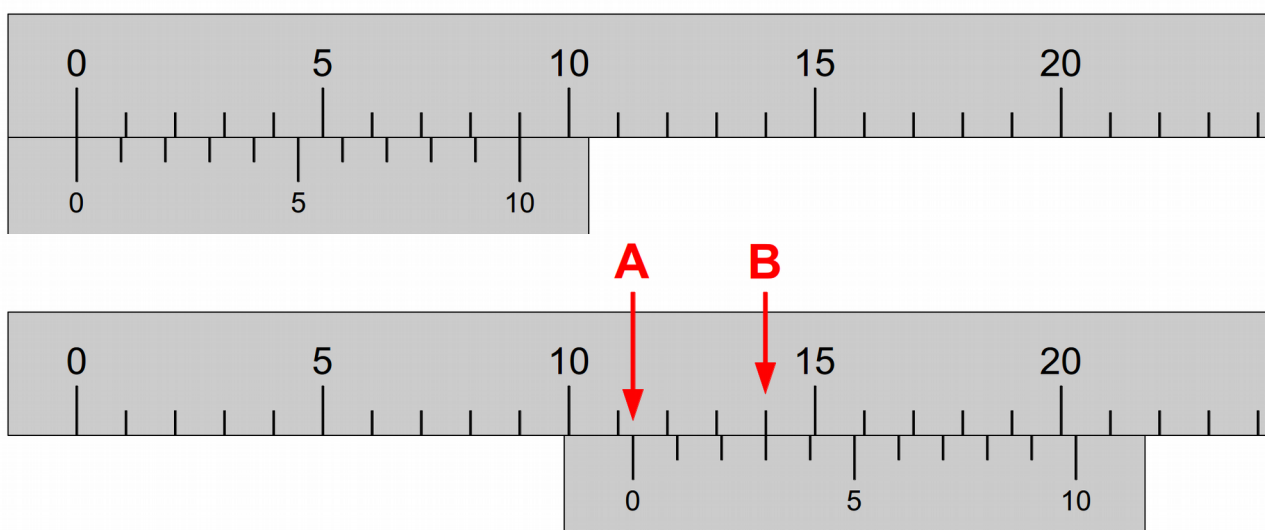


Figura 5: Schema di funzionamento della scala di Vernier (comunemente detta *nonio*). (In alto) Lo strumento con la scala nella sua posizione di partenza, con lo zero della scala secondaria che coincide con quello della scala primaria (posizione che corrisponde a una lettura 0.0). In questa posizione si vede chiaramente che la scala secondaria, pur essendo divisa in dieci tacche, ha una lunghezza totale pari a nove tacche della scala primaria. (In basso) Lo strumento con la scala secondaria spostata di 11.3 divisioni rispetto alla scala primaria (posizione indicata dalla lettera **A**); la parte frazionaria della lettura (tre decimi) si ricava dal fatto che la terza tacca del nonio (indicata dalla lettera **B**) è perfettamente allineata con una delle tacche della scala primaria.

sarebbe difficile stimare di quanto¹⁰. Usiamo allora la scala secondaria: la sua prima tacca dopo l'indice si trova a una distanza di $11.3 + 0.9 = 12.2$ mm dall'origine, la seconda tacca a $11.3 + 2 \times 0.9 = 13.1$ mm, la terza a $11.3 + 3 \times 0.9 = 14.0$ mm, la quarta a $11.3 + 4 \times 0.9 = 14.9$ mm, e così via: come si vede, solo la *terza tacca* della scala secondaria (**B** nella figura) dista di un numero intero di millimetri dall'origine e perciò si trova in perfetta corrispondenza con una delle tacche della scala principale. Detto altrimenti: poiché la distanza tra le tacche della scala secondaria è inferiore di un decimo di millimetro rispetto alla scala principale, per ogni tacca di cui ci si sposta verso sinistra la scala secondaria “guadagna” un decimo di millimetro rispetto alla scala principale; dato che, nel nostro caso, la scala secondaria partiva con uno “svantaggio” iniziale di *tre decimi* di millimetro (la tacca iniziale della scala secondaria è situata tre decimi di millimetro dopo la tacca degli 11 mm della scala principale), dopo *tre tacche* essa avrà “recuperato” tale svantaggio e le tacche delle due scale si troveranno perfettamente allineate. Il procedimento per eseguire la misurazione con uno strumento simile è quindi il seguente. Per prima cosa si controlla la posizione dello zero della scala secondaria (mobile): la tacca della scala principale che si trova immediatamente prima di esso dà la parte intera del valore della misura (nel nostro esempio, 11 mm). Quindi si controlla quale delle tacche della scala secondaria è meglio allineata con una delle tacche della scala principale: il numero d'ordine di tale tacca rispetto allo zero indica quanti decimi di divisione bisogna aggiungere al valore intero. Nel nostro esempio, siccome la tacca che si trova in migliore coincidenza è la terza, occorre aggiungere tre decimi di millimetro: il valore completo della misura sarà quindi $11 + 0.3 = 11.3$ mm. Naturalmente potrebbe anche accadere che la tacca secondaria che dà il migliore allineamento sia proprio quella dello zero: in tal caso non occorre aggiungere nulla al valore intero (nel nostro esempio il valore della misura sarebbe 11.0 mm¹¹). Abbiamo descritto il funzionamento dello stru-

¹⁰ Si tenga presente che stiamo parlando di una scala tarata in millimetri, che nella figura per chiarezza è rappresentata fortemente ingrandita.

¹¹ In fisica è buona norma riportare i valori delle grandezze con un numero di cifre significative che corrisponda all'accuratezza effettiva della misura. Quindi scrivere che una lunghezza è di 11 mm non è lo stesso che scrivere



Figura 6: Un calibro dotato di nonio ventesimale; la lettura fornita dallo strumento è 23.20 ± 0.05 mm.

mento nel caso di una scala secondaria decimale, di lunghezza totale pari a nove tacche della scala principale, ma lo stesso principio può essere applicato anche a scale divise in modo differente, ad esempio scale ventesimali (la scala secondaria è lunga come diciannove tacche della scala principale ed è divisa in venti parti uguali, permettendo di leggere un ventesimo di divisione) oppure cinquantesimali. È anche chiaro che il meccanismo può essere applicato, oltre che a scale lineari per la misura di distanze, anche a scale circolari per la misura di angoli (ed è questa l'applicazione che ci interessa maggiormente).

A rigore l'invenzione di Pierre Vernier dovrebbe essere chiamata *verniero*, e questo è il termine effettivamente usato in diverse lingue (ad esempio in inglese e francese: *vernier*). In italiano essa è più comunemente indicata con lo stesso termine *nonio* usato per il dispositivo di Nunez; anche noi ci conformeremo a questa consuetudine e, da ora in poi, useremo la parola *nonio* solo per indicare la scala di Vernier. D'altra parte ciò non rischia di creare confusioni, perché dopo gli inizi del Seicento lo strumento di Nunez è caduto completamente in disuso. La scala di Vernier è invece usata ancora oggi in molti strumenti di precisione, a partire dal comune *calibro* per la misura delle lunghezze (figura 6).

L'introduzione del telescopio

La data del 13 marzo 1610 è fondamentale per la nascita dell'astronomia moderna: in quel giorno fu pubblicato il *Sidereus Nuncius*, un libretto di una sessantina di pagine in cui Galileo Galilei illustrava i risultati delle sue prime osservazioni di corpi celesti fatte con un telescopio (o cannocchiale, come era anche chiamato lo strumento): la Luna, di cui descrisse la conformazione superficiale, costituita da valli, crateri e montagne; le stelle fisse, che al telescopio appaiono molto più numerose di quante siano visibili a occhio nudo; la Via Lattea, costituita da una moltitudine di piccole stelle; e Giove, di cui scoprì i quattro satelliti principali. Non fu Galileo a inventare il telescopio: il nuovo strumento era stato costruito (quasi contemporaneamente, e probabilmente in modo indipen-

11.0 mm: nel primo caso si intende che il valore reale della misura non può essere 10 o 12 mm (o, per essere pignoli, che esso è compreso tra 10.5 e 11.5 mm); nel secondo caso, che esso è compreso tra 10.95 e 11.05 mm. Nei casi in cui occorre indicare in modo più esplicito l'intervallo di errore si può ricorrere alla notazione \pm (che si legge *più o meno*), ad esempio: 11.0 ± 0.3 mm.

dente) da alcuni occhialai olandesi, e quando Galileo ne ebbe notizia, nell'estate del 1609, era già abbastanza diffuso e al centro dell'attenzione, soprattutto per il suo possibile impiego in campo militare. Galileo però riuscì a migliorarne notevolmente le prestazioni, aumentandone la nitidezza e il potere di ingrandimento (approssimativamente da 3 a 30 volte), e rendendolo uno strumento adatto alla ricerca astronomica. Galileo non fu neppure il primo a rivolgere il nuovo strumento verso il cielo¹²; fu però il primo a rendersi conto delle potenzialità che il telescopio aveva nel fornire nuove informazioni sulla natura dei corpi celesti, informazioni che avrebbero costituito uno degli elementi decisivi per l'abbandono delle concezioni cosmologiche aristoteliche e medioevali e aperto la via all'affermazione della visione meccanicistica del mondo che è una delle basi della scienza moderna.

Nei suoi scritti Galileo dà pochissime informazioni su come erano fatti i suoi cannocchiali e sui principi fisici su cui si basava il loro funzionamento, forse perché li considerava alla stregua di un proprio segreto industriale. Ma già l'anno successivo (1611) Keplero pubblicava il *Dioptrice*, un trattato di ottica in cui l'astronomo tedesco illustrava dettagliatamente le leggi della rifrazione, le proprietà delle lenti convergenti e divergenti e come esse determinano il funzionamento del telescopio, e in particolare come il potere d'ingrandimento dello strumento dipende dalla lunghezza focale delle lenti; egli proponeva anche un nuovo tipo di telescopio, che utilizzava come oculare una lente convergente invece della lente divergente usata da Galileo¹³. Da questo importantissimo trattato inizia l'evoluzione tecnologica del telescopio, quell'evoluzione che, nel corso di quattro secoli, ha portato fino ai grandi telescopi dei nostri giorni; in particolare il telescopio di Keplero ha soppiantato in breve tempo il cannocchiale di Galileo ed è diventato il tipo più diffuso di telescopio astronomico almeno fino alla fine del XIX secolo, epoca in cui i telescopi *riflettori*, il cui obiettivo è costituito da uno specchio concavo, sostituirono progressivamente i *rifrattori*, che fanno uso solo di lenti.

Dopo Galileo il telescopio fu progressivamente adottato da altri astronomi, inizialmente solo per *osservare* i corpi celesti; ci vorranno alcuni decenni prima che esso sia utilizzato anche per *misurare* le loro posizioni e distanze angolari reciproche. L'introduzione del telescopio in astrometria avvenne secondo due linee di sviluppo parallele. Da un lato esso fu applicato agli strumenti astrometrici preesistenti (astrolabi, sestanti, quadranti portatili e murali) in sostituzione delle mire visuali, come un mezzo per migliorarne la precisione di puntamento. Questo modo di usare il telescopio sfrutta il fatto che, se si pone un oggetto (ad esempio un filo sottile) nel piano focale primario di un telescopio kepleriano, cioè nel piano su cui l'obiettivo forma l'immagine, osservando attraverso l'oculare il filo appare sovrapposto al campo stellare che si sta osservando, e risulta a fuoco contemporaneamente ad esso¹⁴. Si può quindi ottenere una *mira telescopica* fissando all'alidada di uno strumento astrometrico un telescopio kepleriano nel cui piano focale sono inseriti due sottili fili disposti ad angolo retto: questi formano un *reticolo di puntamento* a forma di croce che definisce esattamente il centro del campo di vista e permette di puntare l'alidada con una precisione molto superiore a quella possibile a occhio nudo, sfruttando l'ingrandimento dell'immagine prodotta dal tele-

12 Già nel luglio del 1609 l'astronomo inglese Thomas Harriot aveva guardato la Luna con un cannocchiale, ma le sue osservazioni non hanno la stessa acutezza di quelle di Galileo, né egli si era dato la pena di renderle pubbliche.

13 Il telescopio di Keplero, a differenza di quello di Galileo, produce immagini capovolte, caratteristica che non ha importanza nelle osservazioni astronomiche ma che costituisce uno svantaggio nelle applicazioni terrestri; esso viene solitamente indicato con il nome di "telescopio astronomico". Per una spiegazione del funzionamento del telescopio, e in particolare della differenza tra telescopio galileiano e kepleriano, vedi la scheda MusAB: [Come funzionano i telescopi?](#)

14 Ciò è possibile solo per i telescopi di tipo kepleriano, in cui l'oculare è costituito da una lente convergente (conca-va); è questa una caratteristica di questo tipo di telescopio che Keplero stesso non aveva previsto, e che fu scoperta successivamente per via sperimentale. Nei cannocchiali galileiani invece non esiste un piano focale primario e l'immagine si forma direttamente sulla retina: non è quindi possibile applicarvi alcun reticolo di puntamento perché, in qualunque posizione venisse inserito, risulterebbe fuori fuoco.

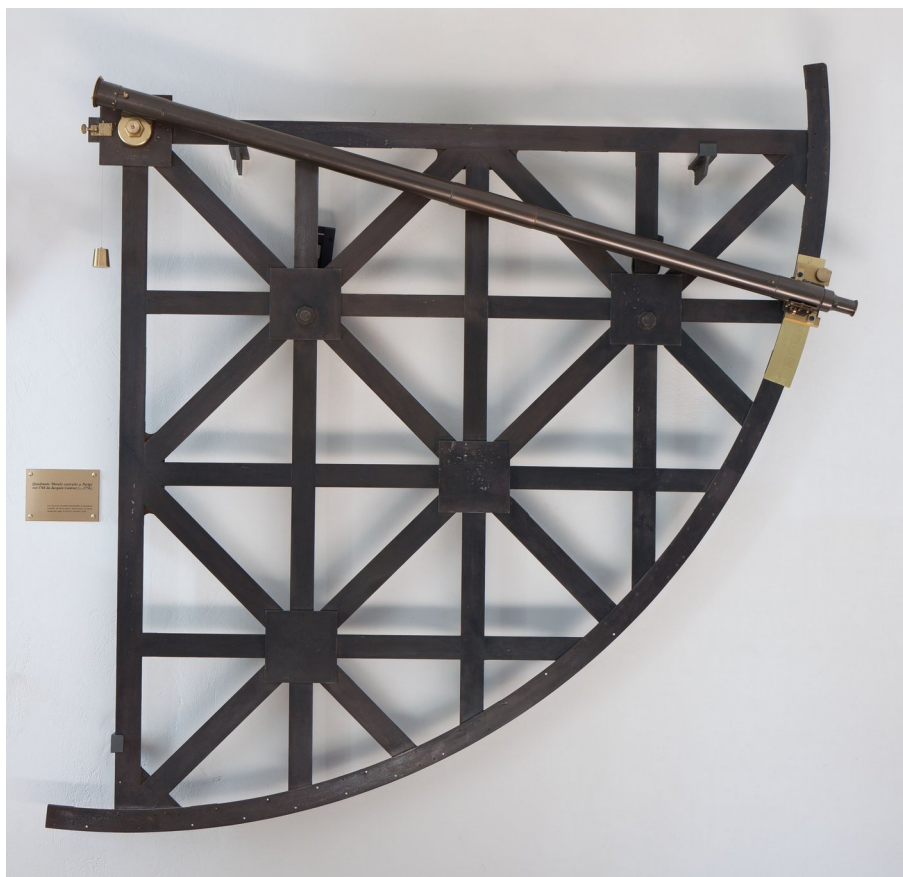


Figura 7: Questo quadrante murale, costruito dall'artigiano parigino Jacques Canivet nel 1768, è stato uno dei primi strumenti astrometrici di precisione in dotazione all'Osservatorio Astronomico di Brera. Era dotato di una mira telescopica di circa due metri di focale; la scala graduata (ora perduta) aveva divisioni primarie a distanza di un dodicesimo di grado ($5'$) ed era dotata di un nonio ventesimale (che permetteva quindi di leggere intervalli di $15''$) e di un micrometro a vite con la precisione di circa $1''$. Lo strumento è attualmente esposto nella sala POE della sede di Merate dell'Osservatorio.

scopio¹⁵. La mira telescopica fu inventata nel 1638 o 1639 dall'inglese William Gascoigne¹⁶, ma rimase relativamente sconosciuta fino al 1660; a partire dalla fine del Seicento divenne però di uso generale, e fu adottata da quasi tutti gli astronomi. Il vantaggio offerto dalla mira telescopica è evidente: il potere di risoluzione dei primi telescopi di Galileo era attorno ai $10''$, cioè già diverse volte superiore a quello dell'occhio nudo, e nel corso dei decenni successivi migliorò fino a $1-2''$. Tuttavia l'accuratezza di una misura astrometrica non dipende solo dalla risoluzione ottica, ma da tutta una serie di fattori legati alla costruzione dello strumento (stabilità, assenza di deformazioni, accuratezza nella divisione della scala graduata e nei sistemi di lettura) e ai procedimenti di riduzione delle osservazioni, cosicché saranno necessari parecchi decenni prima che l'introduzione della mira

¹⁵ È lo stesso sistema di funzionamento dei cannocchiali con mire telescopiche sono usati nei fucili di precisione.

¹⁶ William Gascoigne (1620?-1644) faceva parte di un gruppo di astronomi inglesi (che comprendeva anche Jeremiah Horrocks, William Oughtred e William Crabtree) che lavoravano per confermare le teorie di Keplero; morì prematuramente durante la guerra civile inglese del 1642-51, e la sua opera rimase poco conosciuta fino a quando, attorno al 1660, fu riscoperta e perfezionata da diversi astronomi, tra cui Christiaan Huygens, Richard Towneley, Robert Hooke e John Flamsteed (che poco dopo sarebbe diventato il primo direttore dell'Osservatorio Reale di Greenwich). In una lettera a Oughtred, Gascoigne scrive di aver avuto l'idea della mira telescopica osservando che la tela che un ragno aveva tessuto all'interno di un suo oculare risultava perfettamente a fuoco. Gascoigne applicò la mira telescopica a un sestante di circa un metro e mezzo di raggio, uno strumento che (a parte l'uso del telescopio) era simile a quelli usati da Tycho.



Figura 8: Strumento di precisione per la misura delle coordinate celesti, costruito nel 1808 da Georg Friedrich von Reichenbach, uno dei più famosi costruttori di strumenti astronomici del XIX secolo. È dotato di una mira telescopica di 110 cm di focale e di due grandi cerchi graduati (del diametro di 75 e 100 cm) che permettono di leggere contemporaneamente l'altezza dell'astro sull'orizzonte e il suo azimut (distanza angolare rispetto alla direzione sud). Il cerchio verticale è diviso in ventesimi di grado centesimale ($2'.7$) ed è dotato di quattro nonii centesimali che forniscono intervalli di $1''.62$ e che potevano essere letti per mezzo di due microscopi montati su un braccio rotante. Lo strumento è attualmente esposto nella galleria del Museo Astronomico di Brera.

telescopica possa produrre tutti i suoi effetti¹⁷. Non seguiremo oltre l'evoluzione di questo tipo di strumenti, e ci limiteremo a citarne due esempi, tratti dal patrimonio storico dell'Osservatorio Astronomico di Brera: un quadrante murale¹⁸ di Canivet (figura 7) e un circolo moltiplicatore di Reichenbach (figura 8).

17 Si è verificato che gli errori tipici delle posizioni riportate nel catalogo stellare di John Flamsteed (pubblicato nel 1725 sulla base di osservazioni eseguite nel periodo 1675-1719 con strumenti dotati di mire telescopiche) siano dell'ordine di $1'$, cioè inferiori solamente di un fattore 3 rispetto al catalogo di Hevelius (pubblicato nel 1690), che è stato l'ultimo catalogo stellare ottenuto con strumenti dotati solamente di mire a occhio nudo, in un certo senso il canto del cigno della tradizione di Tycho Brahe. Tuttavia un catalogo stellare è il prodotto finale di una serie complessa di operazioni di cui le osservazioni costituiscono solo il punto di partenza: sulla sua accuratezza influiscono non solo le misure, ma anche i metodi utilizzati per ridurle ed eseguire i calcoli, e il modo in cui si tiene conto di effetti sistematici (precessione, nutazione, aberrazione, rifrazione atmosferica). Si stima quindi che gli errori tipici delle singole misure fossero molto inferiori: circa $15-20''$ per Hevelius e $12-15''$ per Flamsteed.

18 Il quadrante murale è lo strumento principale dell'astronomia di posizione fino alla metà del XVIII secolo; è essenzialmente l'evoluzione del quadrante di Tycho, in cui però, a partire dall'epoca di Hooke e Flamsteed (fine XVII secolo), è utilizzata la mira telescopica.

I primi micrometri filari (XVII-XVIII secolo)

Una seconda linea di sviluppo nell'utilizzo del telescopio in astrometria fu la creazione di strumenti che permettessero di misurare le posizioni relative di corpi celesti visibili contemporaneamente nel suo campo di vista. La necessità di misure di questo tipo emerge già dalle primissime osservazioni telescopiche, ad esempio le osservazioni dei satelliti “medicei” di Giove eseguite da Galileo, come egli le riporta nel *Sidereus Nuncius*. La prima osservazione in assoluto, del 7 gennaio 1610, si limita a constatare l'esistenza delle nuove

“stelle”, di cui Galileo non comprende ancora la natura: *dalla parte orientale c'erano due Stelle, una sola invece verso occidente (ex parte scilicet orientali duæ aderant Stellæ, una vero occasum versus)*. Nelle notti successive, quando Galileo si rende conto che i corpi celesti erano satelliti di Giove, le osservazioni si fanno sempre più quantitative; ad esempio l'osservazione del giorno 11 riporta: *[vidi] soltanto due Stelle ad oriente, delle quali la media distava da Giove il triplo che dalla più orientale (Stellas scilicet tantum duas orientales; quarum media triplo distabat a Iove, quam ab orientali)*. Le osservazioni successive spesso riportano stime numeriche della separazione angolare tra i satelliti, espresse in minuti e secondi d'arco (figura 9). Sicuramente questo aumento della precisione delle osservazioni è dovuto al fatto che Galileo, dopo essersi accorto che i corpi celesti ruotavano attorno a Giove, intendeva calcolare i raggi e i periodi delle loro orbite. Nelle prime pagine del *Sidereus Nuncius* Galileo descrive un metodo per misurare gli angoli attraverso il cannocchiale, che consisterebbe nel coprire l'obiettivo con diaframmi aventi fori di dimensioni diverse, ottenendo campi di vista di ampiezze differenti, che possono essere calcolate dal rapporto tra il diametro del diaframma e la lunghezza focale dell'obiettivo. Tuttavia questo metodo non funziona, perché diaframmando l'obiettivo si riducono la luminosità e il potere di risoluzione del cannocchiale, ma l'ampiezza del suo campo visivo non cambia¹⁹. In uno scritto posteriore Galileo ammette semplicemente di aver effettuato queste prime osservazioni “a occhio”²⁰. Solo in seguito (a partire da gennaio

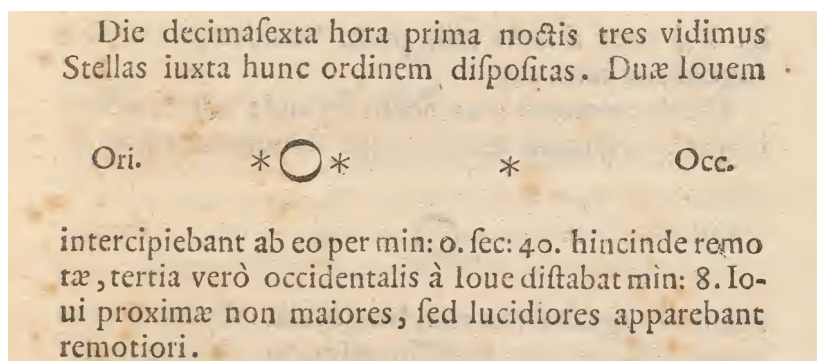


Figura 9: La descrizione data da Galileo nel *Sidereus Nuncius* della sua osservazione dei satelliti di Giove del 16 gennaio 1610. Il testo recita: *Il giorno 16, all'ora prima della notte, vidi tre Stelle disposte secondo quest'ordine: [...] due circondavano Giove dai due lati, e distavano da esso di qua e di là min. 0 e sec. 40; la terza poi a occidente distava da Giove min. 8. Quelle più vicine a Giove apparivano non più grandi, ma più brillanti di quella più lontana.*



Figura 10: Ricostruzione ipotetica del regolo graduato usato da Galileo Galilei per le sue osservazioni dei satelliti di Giove.

19 Anche su questo punto vedi la scheda MusAB: [Come funzionano i telescopi?](#)

20 L'affermazione è contenuta nelle pagine iniziali del *Discorso al Serenissimo Don Cosimo II Gran Duca di Toscana intorno alle cose, che stanno in su l'acqua, o che in quella si muovono* dove, dopo aver spiegato che la determinazione dei periodi dei satelliti di Giove richiede osservazioni di grande precisione, prosegue dicendo: *Per simili precisioni non mi bastano le prime osservazioni [cioè quelle eseguite nel 1610], non solo per li brevi intervalli di tempi, ma perché, non avendo io allora ritrovato modo di misurar con istrumento alcuno le distanze di luogo tra essi pianeti, notai tali interstizi con le semplici relazioni al diametro del corpo di Giove, prese, come diciamo, a occhio, le quali, benché non ammettano errore d'un minuto primo, non bastano però per la determinazione*

del 1612) egli adotterà un semplice strumento di misura che si basa sul principio della *doppia visione*, cioè della visione contemporanea del campo stellare con un occhio, attraverso il cannocchiale, e di un regolo graduato posto di fianco al cannocchiale a occhio nudo, con l'altro occhio; il meccanismo fisiologico della visione binoculare fa sì che le due immagini appaiano sovrapposte, cosicché è possibile utilizzare le tacche del regolo per misurare le distanze tra gli oggetti visibili nel cannocchiale²¹ (figura 10).

I primi dispositivi di precisione per la misura di distanze all'interno del campo di vista di un telescopio si basano però sull'applicazione all'astronomia del *micrometro*, uno strumento originariamente concepito per misurare dimensioni e spessori di piccoli oggetti sfruttando l'avanzamento di una vite all'interno della sua sede: ad ogni giro completo attorno al proprio asse, la vite entra o esce dalla madrevite di una quantità costante, pari al *passo* della vite, cioè alla distanza tra i solchi successivi della sua filettatura elicoidale. Il passo della vite può essere una quantità piuttosto piccola, dell'ordine del millimetro o anche meno; dotando la vite di un indice e di una scala graduata che permetta di leggere piccoli angoli di rotazione (ad esempio un centesimo o un millesimo di giro), si capisce come sia possibile costruire uno strumento che abbia una precisione di lettura della posizione pari a una piccola frazione (centesimo o millesimo) di millimetro²². Il micrometro è utilizzato ancora oggi come strumento di misura nelle officine meccaniche (in questo uso è chiamato anche *calibro Palmer*).

È ancora a Gascoigne che si deve l'idea di applicare il micrometro a misure astronomiche. Nello stesso periodo in cui stava sperimentando la mira telescopica (1638-39) egli costruì anche uno strumento composto da due lamine metalliche parallele (lancette) che potevano scorrere lungo un telaio; la distanza tra le lamine poteva essere variata per mezzo di due viti micrometriche che, attraverso due scale graduate, permettevano anche di leggere la loro separazione. Le lamine erano poste al fuoco primario di un telescopio kepleriano, in modo che fossero visibili sovrapposte all'immagine prodotta dal telescopio in modo analogo ai fili di una mira telescopica. Avvicinando le lamine fino a che risultassero tangenti ai bordi di un corpo celeste, si poteva leggere sulla scala del micrometro la dimensione dell'immagine del corpo sul piano focale del telescopio e da questa, conoscendo la lunghezza focale dell'obiettivo, calcolare il diametro angolare dell'oggetto; in modo simile si poteva misurare la separazione angolare tra due stelle.

Gascoigne aveva sviluppato questi nuovi strumenti con l'intento di studiare il moto orbitale dei pianeti. In particolare aveva iniziato un programma sistematico di osservazioni della posizione della Luna, che gli aveva permesso di confermare che essa si muoveva realmente su un'orbita ellittica, secondo quanto previsto da Keplero²³; non solo, le osservazioni permisero a Gascoigne di stabilire

dell'esquisite grandezze delle sfere [=orbite] di esse stelle (Edizione Nazionale delle opere di Galileo Galilei, vol. IV, 1894, p. 64). Su questo argomento vedi anche Romano (2010).

- 21 La descrizione di questo metodo non è dovuta a Galileo stesso, ma è contenuta nel trattato *Theoricæ medicorum planetarum ex causis phisicis deductæ* di Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679): vedi Borelli (1666), p. 142 ss. Una semplice spiegazione del funzionamento del regolo di Galileo è contenuta nella seguente pagina del Museo Galileo di Firenze: https://brunelleschi.imss.fi.it/esplora/cannocchiale/dswmedia/simula/isimula1_2_1.html. Vedi anche Bellone (2013), pp. 116 ss.
- 22 Sembra che il primo micrometro sia stato ideato dal matematico tedesco Lucas Brunn (1572-1628) e costruito dall'artigiano Christoph Trechsler (?-1628) come strumento per misurare lo spessore di lamine di metallo usate per la costruzione di armi e armature.
- 23 Poiché il diametro apparente (angolare) di un corpo celeste è inversamente proporzionale alla sua distanza dall'osservatore, la misura delle variazioni del diametro della Luna nel corso della sua orbita, misurate con il micrometro, permisero a Gascoigne di determinare le variazioni della sua distanza dalla Terra e verificare che la sua traiettoria è effettivamente un'ellisse (prima legge di Keplero). Inoltre la misura della posizione della Luna rispetto alle stelle fisse, che egli eseguì con una precisione superiore a quella possibile fino ad allora, grazie all'uso della mira telescopica, gli permise di confermare che le variazioni di velocità angolare della Luna lungo la sua orbita seguono la cosiddetta *legge delle aree* (seconda legge di Keplero).

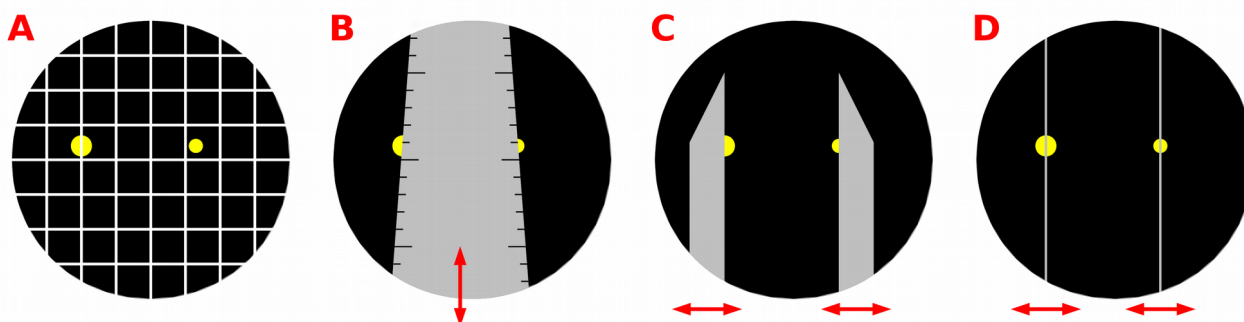


Figura 11: Principio di funzionamento di alcuni tipi di micrometro per uso astronomico: le figure rappresentano schematicamente come si presenta il campo di vista del telescopio nei diversi strumenti, nella misura della distanza angolare tra due stelle. (A) Micrometro a reticolo (di Malvasia): la distanza angolare tra i corpi celesti viene misurata contando il numero di quadrati del reticolo e stimando a occhio le frazioni di quadrato. (B) Micrometro di Huygens: la misura si ottiene facendo scorrere una lamina di forma trapezoidale fino a quando i suoi lati opposti sfiorano i due astri; le tacche delle scale graduate incise sui bordi della lamina indicano il valore della separazione. (C) Micrometro a lamine di Gascoigne: due lamine di metallo sono mosse per mezzo di viti micrometriche fino a quando i loro bordi interni sfiorano i due astri; le scale graduate delle viti danno la separazione delle lamine, da cui si ricava il valore della separazione angolare. (D) Micrometro a fili: due sottili fili paralleli sono spostati per mezzo di viti micrometriche fino a sovrapporsi ai due astri; anche in questo caso la misura è ottenuta dalla lettura delle scale graduate delle viti.

che l'asse maggiore dell'orbita lunare non ha direzione fissa nello spazio ma ruota attorno alla Terra, un fenomeno che non era noto fino ad allora e che sarà spiegato da Newton come un effetto della perturbazione gravitazionale del Sole²⁴. Poiché Gascoigne e tutti quelli che avevano collaborato con lui erano morti durante la guerra civile del 1642-51, le sue ricerche rimasero praticamente sconosciute per più di vent'anni. Nel frattempo però altri astronomi, lavorando in modo indipendente, stavano mettendo a punto strumenti che avevano la stessa funzione, anche se non necessariamente basati sull'uso di una vite micrometrica (figura 11). Ad esempio nel 1659 il danese Christiaan Huygens (1629-1695), nell'opera *Systema Saturnium*, in cui riporta le proprie osservazioni del pianeta Saturno, descrive anche uno strumento per misurare distanze angolari: era costituito da una lamina di metallo rastremata, cioè di larghezza decrescente da un'estremità all'altra, come un cuneo; ponendo la lamina sul piano focale del telescopio e facendola scorrere fino a che i bordi toccassero le immagini di due corpi celesti, se ne poteva leggere la separazione angolare sulle scale graduate che erano incise lungo i bordi della lamina. Ancora, nel 1662 Cornelio Malvasia (1603-1664), un aristocratico emiliano appassionato di astronomia, costruì e utilizzò un micrometro costituito da un reticolo di sottili fili metallici disposti in modo da formare una griglia di quadrati di uguali dimensioni: le distanze angolari potevano essere stimate contando il numero di quadrati interposti tra due punti, e stimando a occhio le frazioni di divisione. Così, quando nel 1667 l'astronomo francese Adrien Auzout (1622-1691) pubblicò sulle *Philosophical Transactions* (la rivista della Royal Society di Londra) una lettera in cui dichiarava di aver inventato un micrometro astronomico basato su una vite *in grado di dividere un piede in 24000 o 30000 parti* (cioè con una precisione di circa un centesimo di millimetro), alcuni astronomi inglesi (tra cui Christopher Wren, 1632-1723, e Robert Hooke, 1635-1703) gli contestarono la priorità dell'invenzione, e Richard Towneley (1629-1707) pubblicò una descrizione del micrometro di Gascoigne, di cui egli era venuto in possesso e che aveva utilizzato, dopo averlo modificato. Il micrometro di Towneley (figura 12) è uno strumento ingegnoso e presenta soluzioni raffinate, anche rispetto a strumenti successivi. Ad esempio il fatto che le due lamine si muovano in modo simmetrico rispetto al centro permette di sfruttare al massimo il campo di vista del telescopio; la precisione della vite micrometrica è migliorata dall'uso di una mol-

24 Per un'illustrazione dell'attività di Gascoigne e dell'ambiente culturale e scientifico in cui si svolse, vedi Chapman (2004).

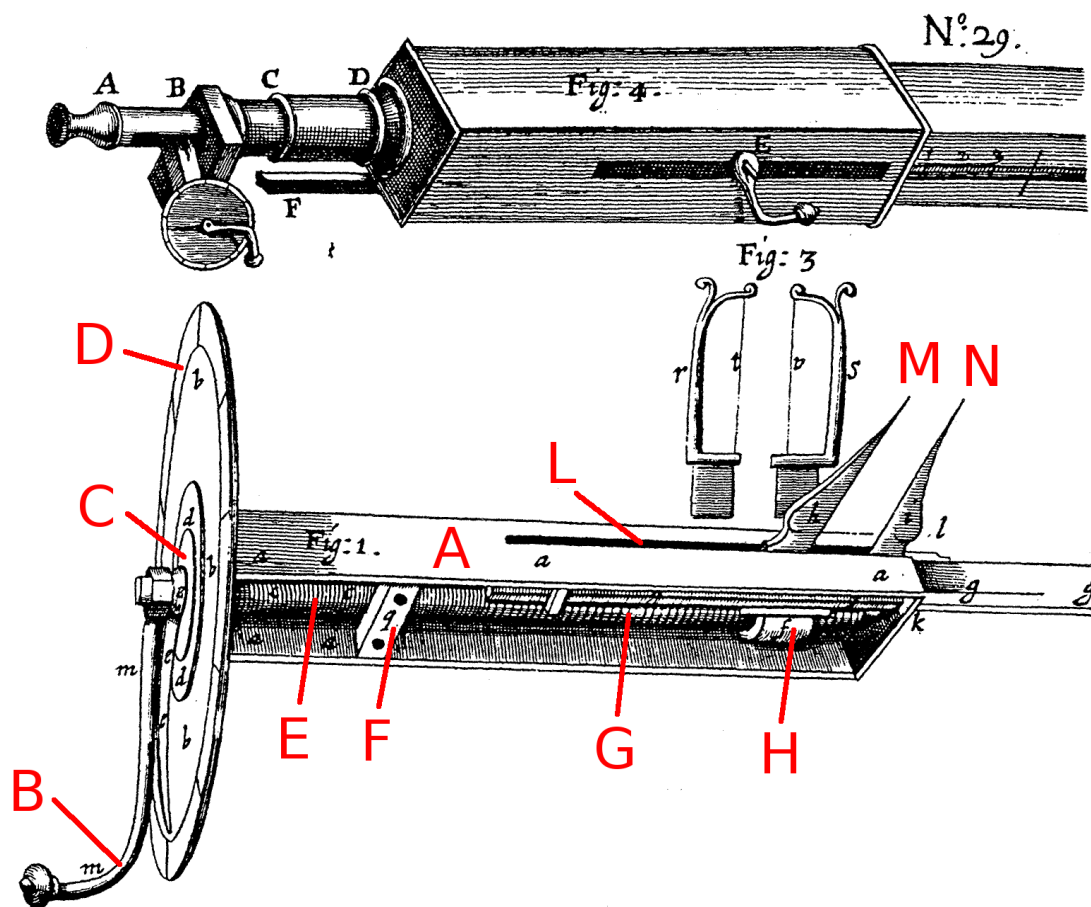


Figura 12: Le figure con cui Hooke (1667) illustra il funzionamento del micrometro di Gascoigne, nella versione modificata da Towneley: una veduta d'insieme della parte posteriore del telescopio con il micrometro installato (figura superiore) e la struttura del micrometro stesso (figura inferiore). La vite del micrometro è contenuta in una scatoletta metallica (A) su cui è fissata solidalmente una delle due lancette (quella che nella figura appare più a destra, N). La vite è composta di due sezioni, che hanno passo differente: quella più a sinistra (E) ha passo più fine (p) e passa attraverso un blocchetto filettato (F) che può scorrere all'interno della scatoletta ed è fissato al tubo del telescopio (vedi figura superiore). Ruotando la maniglia (B) la parte filettata E si avvita all'interno del blocchetto F e quindi fa spostare lateralmente tutta la scatoletta (e con essa la lancetta N) rispetto all'asse del telescopio. La parte più a destra della vite (G) ha passo doppio ($2p$) rispetto a quella più a sinistra: su di essa si avvita un dado (H) su cui è fissata la seconda lancetta (M), che può scorrere lungo la scatoletta all'interno di una fessura (L). Un giro completo della vite in senso orario provoca uno spostamento verso destra della scatoletta e della lancetta N di una quantità p , e uno spostamento verso sinistra della lancetta M di una quantità $2p$ rispetto alla scatoletta, quindi di una quantità p rispetto all'asse del telescopio; in altre parole le due lancette si allontanano o avvicinano al centro del campo di vista in modo simmetrico. L'angolo di rotazione della vite può essere letto per mezzo di un indice su una scala graduata (D); la rondella elastica C esercita una pressione sulla vite, eliminando il gioco assiale nel blocchetto F. La forma alternativa delle due mire, che utilizza fili invece che lancette metalliche, non è dovuta a Towneley ma è una modifica proposta da Hooke.

la che la tiene premuta contro il blocchetto, eliminando i giochi dovuti alle imperfezioni di esecuzione dei filetti.

La disputa sulla priorità dell'invenzione del nuovo strumento che seguì alla pubblicazione della lettera di Auzout, da cui non erano esenti elementi di nazionalismo, ebbe comunque il merito di portare il micrometro alla ribalta della comunità internazionale: da quel momento l'uso del micrometro si diffuse rapidamente, ed esso divenne uno dei più importanti strumenti di misura utilizzati in astronomia, almeno fino alla fine del XIX secolo. Nel corso del XVIII secolo i micrometri avevano una struttura abbastanza semplice e spesso rinunciavano al movimento simmetrico delle due mire in

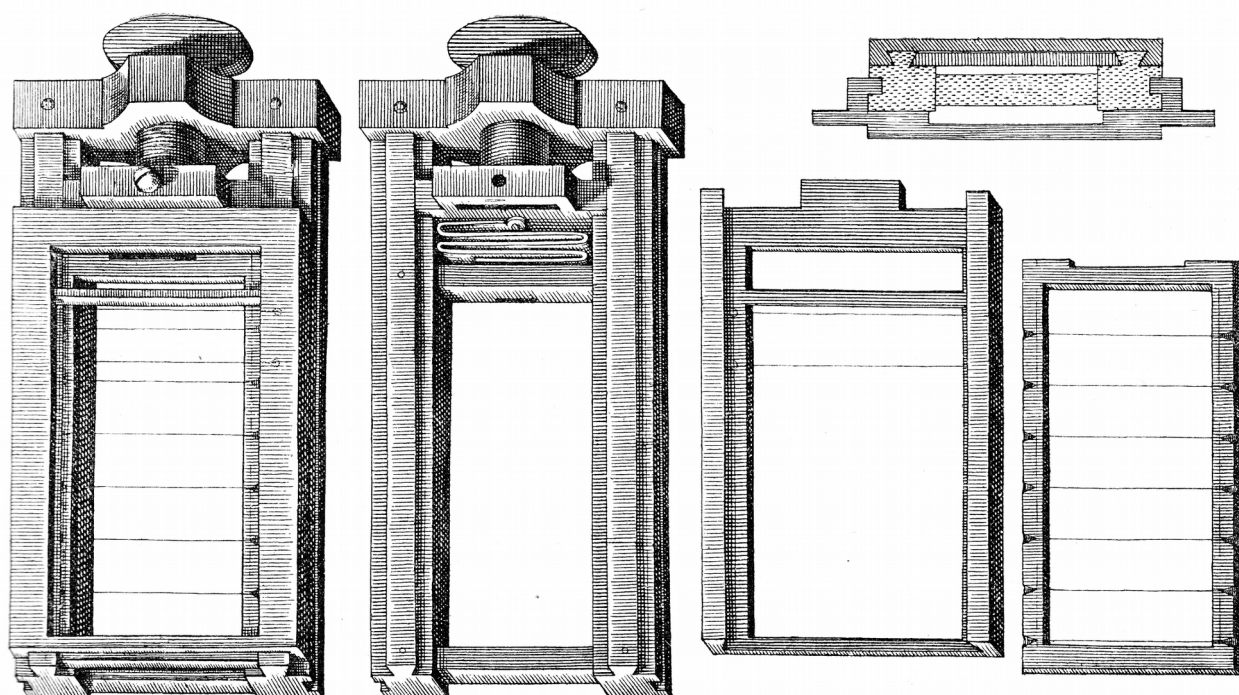


Figura 13: Il micrometro di Rømer (1672) aveva una vite micrometrica piuttosto corta, che permetteva un'escursione limitata. Per questo motivo il telaietto mobile aveva montati diversi fili paralleli tra di loro: l'astronomo doveva usare quello che gli permetteva di raggiungere la distanza dal filo fisso richiesta dall'angolo che doveva misurare. Il telaietto mobile scorreva sul corpo dello strumento lungo un binario a coda di rondine; il micrometro era dotato di una molla a forma di serpentina (visibile nella parte alta della seconda figura a sinistra) che eliminava il gioco della vite micrometrica tenendola premuta verso l'alto.

cambio di una maggiore semplicità di costruzione; molto presto l'uso delle lamine fu abbandonato a favore di fili sottili, che permettevano di centrare meglio la mira sull'immagine dell'oggetto. Un esempio è il micrometro inventato nel 1672 da Ole Rømer (1644-1710), l'astronomo danese a cui si deve la prima misura della velocità della luce (figura 13): aveva un filo fisso e diversi fili mobili paralleli tra di loro, che si muovevano in modo solidale tra di loro (cioè la cui distanza reciproca non variava) perché erano montati su un unico telaietto scorrevole, e la cui funzione era quella di permettere la misura di angoli di diversa grandezza nonostante la ridotta escursione del movimento micrometrico. Un altro strumento tipico di questo periodo è il micrometro progettato da James Bradley (1692-1762) e che usa due fili di misura, di cui uno fisso e uno mobile per mezzo di un telaietto comandato da un'unica vite (figura 14). Oltre a questi fili c'è un terzo filo fisso, ortogonale ai primi due, che serve per orientare lo strumento nella direzione lungo la quale si vuole eseguire la misura; questa operazione è facilitata da un meccanismo a cremagliera che permette di ruotare il micrometro di circa $\pm 10^\circ$ attorno all'asse ottico del telescopio.

Il micrometro filare nel XIX secolo

Un forte impulso allo sviluppo del micrometro venne, a cavallo tra il XVIII e il XIX secolo, dall'attività di William Herschel²⁵, e in particolare dalle sue ricerche sulle stelle doppie, che egli

25 Frederick William (Wilhelm) Herschel (1738-1822), di professione musicista, iniziò a studiare astronomia da autodidatta, dopo essersi trasferito dalla nativa Germania in Inghilterra. Fu uno degli astronomi più geniali di tutti i tempi: si dedicò a ricerche innovative come la determinazione della distribuzione spaziale delle stelle nella nostra Galassia e la natura delle nebulose; nel corso della sua minuziosa esplorazione del cielo scoprì il pianeta Urano (13 marzo 1781). Fu anche abile costruttore di telescopi: in un'epoca in cui la maggior parte degli astronomi usavano

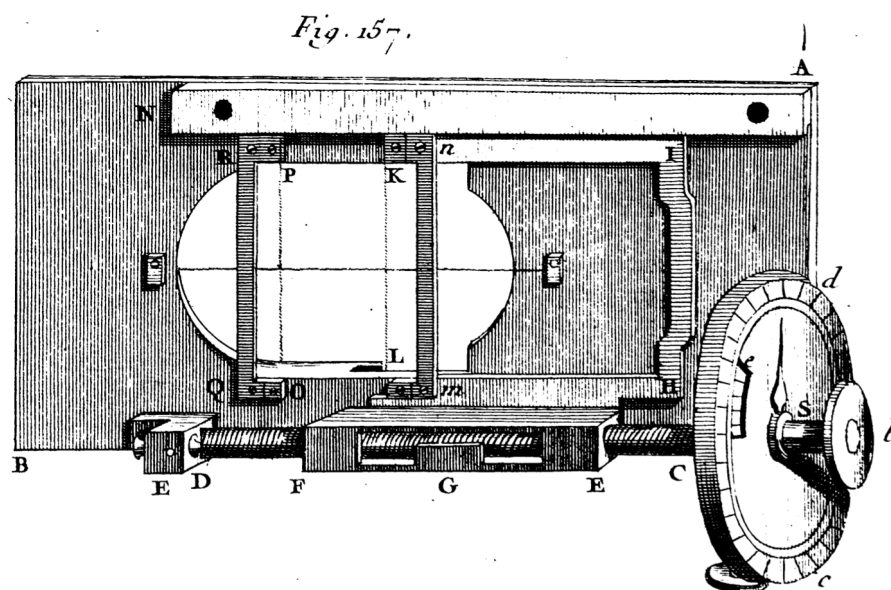


Fig. 158:

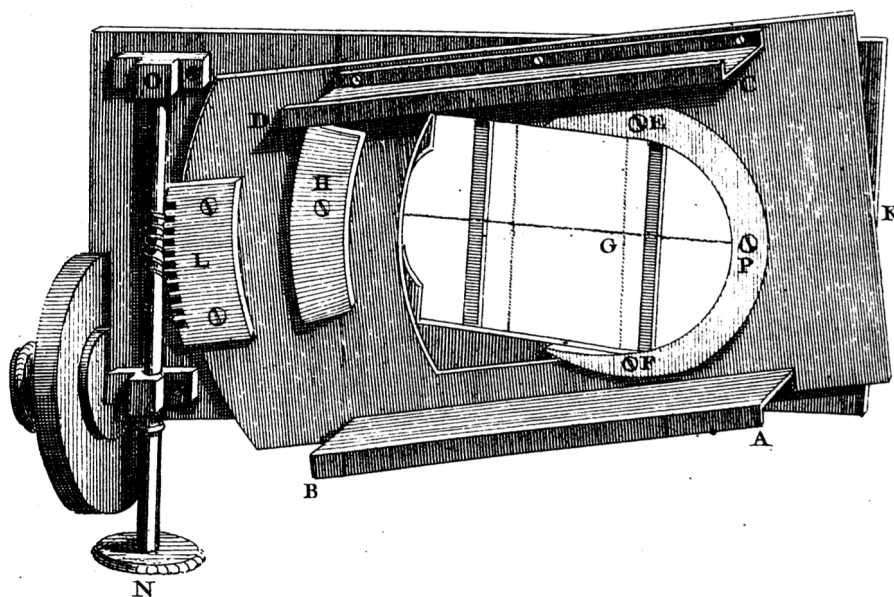


Figura 14: Il micrometro di Bradley aveva un unico filo mobile; la manopola che comanda la vite micrometrica è dotata, oltre che della solita scala graduata per le frazioni di giro, di un ingranaggio interno che permette di leggere anche il numero intero di rivoluzioni, attraverso una finestrella (indicata con *e* nella figura superiore). La figura inferiore mostra la parte posteriore dello strumento, con il meccanismo a vite senza fine e cremagliera che permette di variare con precisione l'orientamento dei fili, ruotandoli attorno all'asse del telescopio; questo meccanismo tuttavia non ha alcun sistema di lettura dell'angolo di rotazione.

aveva iniziato con la speranza di poter determinare le distanze stellari con il metodo della *parallasse trigonometrica*. All'epoca si conoscevano parecchie *stelle doppie*, cioè coppie di stelle che appaiono molto vicine tra di loro; si pensava allora che si trattasse di allineamenti fortuiti, cioè di stelle che, pur trovandosi a distanze diverse, sembrano vicine perché si trovano casualmente nella stessa direzione rispetto a noi. Già Galileo aveva proposto di determinare la distanza di queste stelle misurando la variazione della loro separazione angolare dovuta al movimento della Terra nel corso della

riflettori di circa 10 cm di diametro, egli si costruì due riflettori di 47 e 126 cm di apertura.

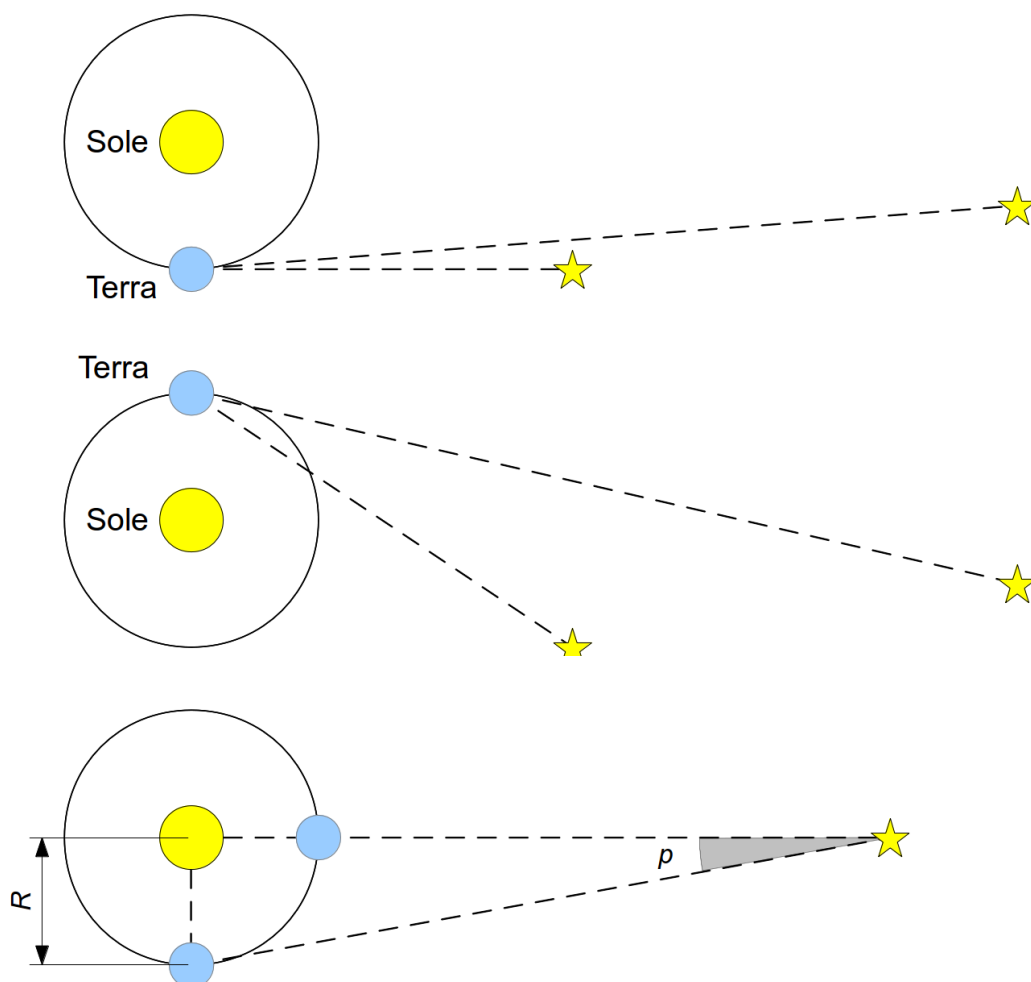


Figura 15: Schema di principio dell'effetto di parallasse stellare dovuta al movimento orbitale della Terra (chiamata anche *parallasse annua*). *In alto e al centro*: la separazione angolare tra due stelle poste a diversa distanza varia nel corso dell'anno a seconda della posizione della Terra lungo la propria orbita. L'effetto si ripete con periodicità annuale ed è tanto più pronunciato quanto più le due stelle hanno differente distanza dal nostro Sistema Solare. *In basso*: supponendo che una delle due stelle si trovi a distanza "infinita" (cioè a distanza così grande che la direzione in cui la si osserva rimane fissa nel corso dell'anno) l'angolo di parallasse dipende solo dalla distanza della stella più vicina; la parallasse p risulta quindi uguale all'angolo sotteso dal raggio dell'orbita terrestre alla distanza della stella, cioè all'angolo al vertice di un triangolo che ha per vertice la stella e per base il raggio R dell'orbita terrestre. (Nota: il disegno è volutamente fuori scala per ragioni di chiarezza; in realtà la distanza delle stelle più vicine al Sole è centinaia di migliaia di volte più grande del raggio dell'orbita terrestre).

sua orbita attorno al Sole (figura 15)²⁶. Herschel si era quindi dedicato alla ricerca sistematica di stelle doppie, e ne aveva trovate molte di più di quante fosse ragionevole attendersene se gli allineamenti fossero stati casuali²⁷. Proseguendo le osservazioni per anni egli si accorse che alcune coppie si muovevano in un modo che non era compatibile né con l'effetto di parallasse (che avrebbe prodotto un moto oscillante di periodo annuale) né con un possibile moto di deriva delle stelle nello spazio (che avrebbe prodotto un moto rettilineo a velocità costante); le stelle sembravano invece muoversi su orbite chiuse di forma ellittica, come i pianeti del Sistema Solare intorno al Sole: si

²⁶ Naturalmente il fenomeno della parallasse si verifica anche per coppie di stelle che abbiano una grande separazione angolare: in questo caso tuttavia è molto più difficile misurare con precisione la piccola variazione dell'angolo.

²⁷ Herschel pubblicò tre cataloghi di stelle doppie (nel 1782, 1784 e 1821) che comprendevano in tutto 848 sistemi di due o più stelle.

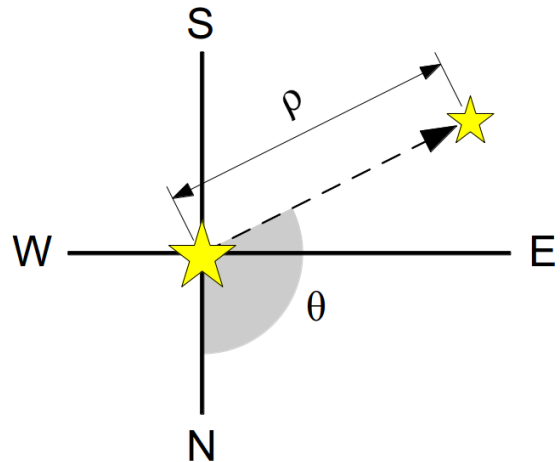
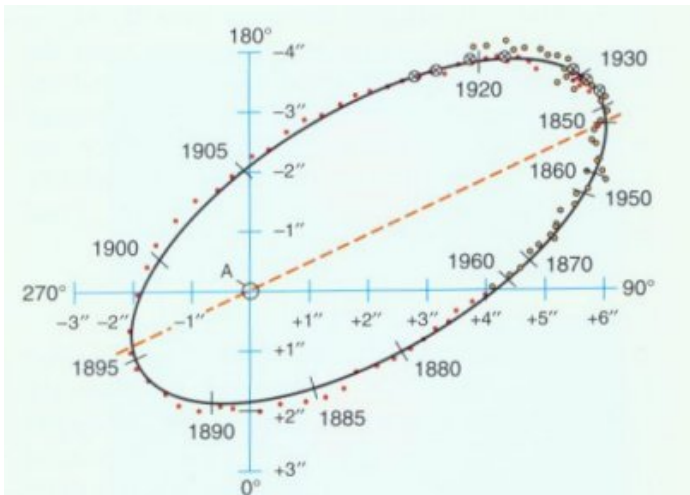


Figura 16: (A sinistra) Ricostruzione dell'orbita di un sistema stellare binario sulla base di una serie ripetuta di misurazioni micrometriche: i puntini colorati rappresentano le singole misure, la traccia ellittica continua la soluzione orbitale ricavata da esse. Il grafico si riferisce al sistema binario di *70 Ophiuchi*, che ha un periodo orbitale di 88.3 anni e un semiasse maggiore di $4''.53$ corrispondente alla distanza di 16.6 anni luce a cui il sistema si trova, a 23 unità astronomiche. (A destra) Per descrivere completamente la posizione relativa di due stelle, il micrometro deve fornire due coordinate indipendenti: la separazione angolare ρ e l'angolo di posizione θ , cioè la direzione della retta che congiunge le due stelle, misurata rispetto alla direzione del nord (nella figura i punti cardinali sono mostrati rovesciati, come appaiono all'oculare di un telescopio astronomico).

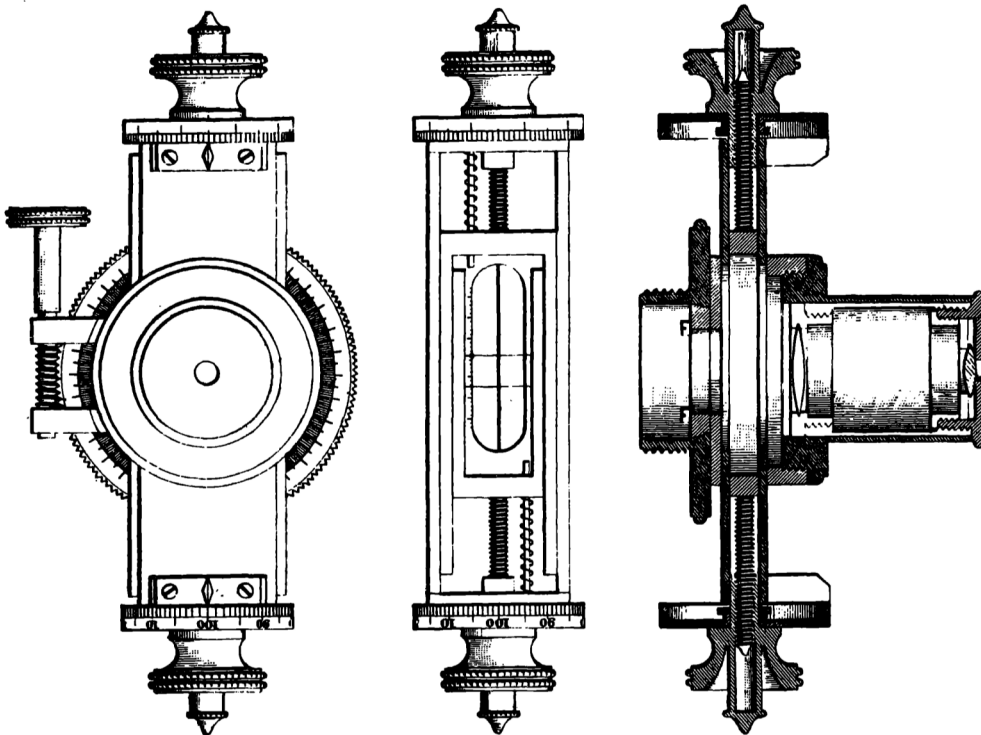


Figura 17: Il micrometro costruito da Edward Troughton attorno al 1795 era dotato di due fili mobili, comandati separatamente da due viti micrometriche dotate di scale graduate. Ortogonalmente ai fili mobili, al centro del campo di vista, era montato un filo fisso che serviva come riferimento per ruotare tutto lo strumento nella direzione in cui vi voleva effettuare la misura, ad esempio lungo la retta che congiunge le due componenti di un sistema stellare binario. L'angolo di rotazione era controllato da una manopola collegata a una vite senza fine che si ingranava su una ruota dentata, che aveva sulla sua circonferenza una scala graduata per leggere l'angolo di posizione; questo modo di ruotare lo strumento era molto preciso ma aveva il difetto di essere piuttosto lento, perché la vite senza fine non poteva disimpegnarsi dalla ruota dentata.

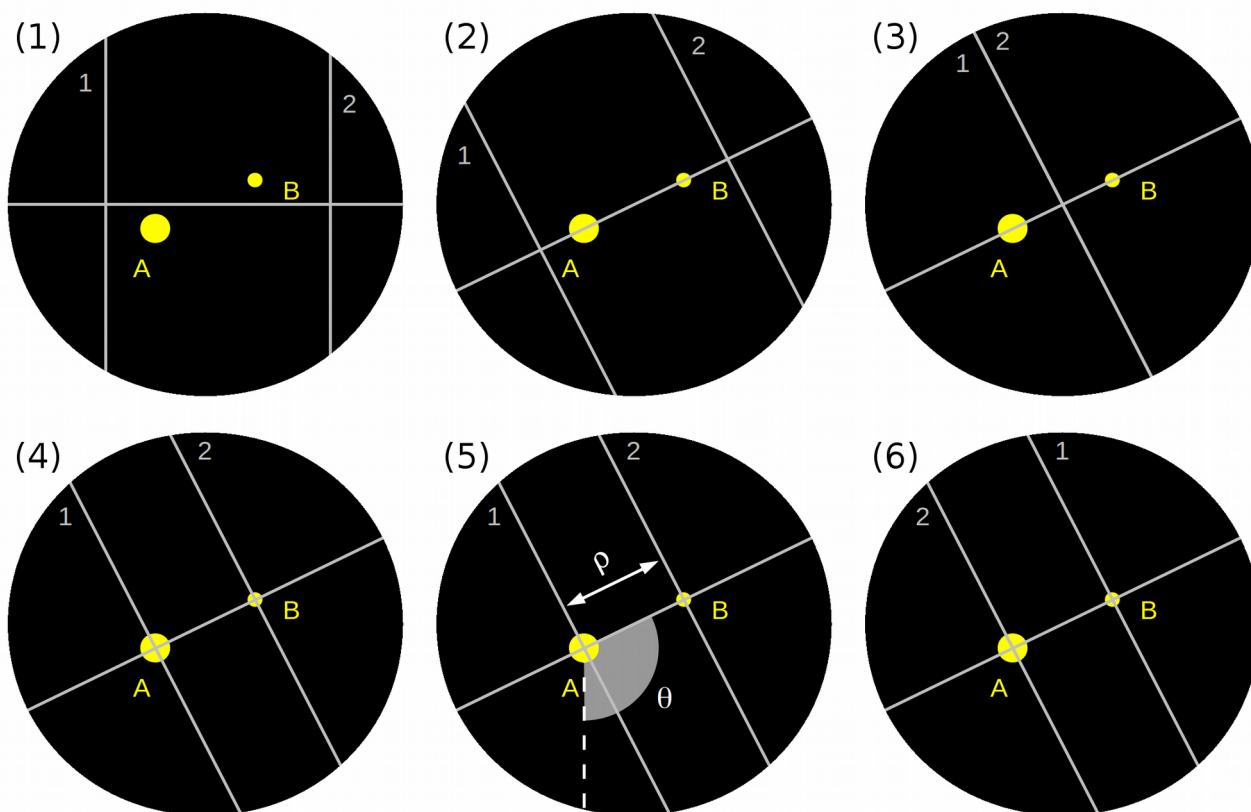


Figura 18: Procedimento per misurare la separazione di una stella doppia usando un micrometro a due fili mobili (come quelli costruiti da Troughton o da Repsold): (1) Si punta il telescopio in modo da inquadrare le due stelle più o meno al centro del campo di vista (A e B sono le componenti del sistema binario, 1 e 2 sono i due fili mobili del micrometro). (2) Si ruota il micrometro (ed eventualmente si muove il telescopio) in modo che il filo fisso di misura dell'angolo di posizione (ortogonale ai due fili mobili) passi attraverso le due stelle. (3) Si “fa lo zero” del micrometro, cioè si spostano i due fili fino a sovrapporli e si legge il valore della scala graduata per entrambi. (4) Si spostano i due fili del micrometro fino a sovrapporsi alle due stelle. (5) Si leggono sulle scale graduate gli spostamenti dei due fili, la cui somma dà la distanza tra le stelle; si legge sul cerchio graduato il valore dell'angolo di posizione. (6) Si ripete la misura scambiando i fili tra le due stelle e si fa la media con la misura precedente, per eliminare eventuali differenze di passo tra le due viti micrometriche.

trattava cioè di sistemi binari reali, tenuti insieme dalla forza di attrazione gravitazionale.

La scoperta dei sistemi stellari binari è stata molto importante nello sviluppo dell'astronomia. Prima di tutto ha permesso di verificare che la legge di gravitazione di Newton vale non solo per i pianeti del Sistema Solare ma anche per corpi celesti molto più lontani nell'Universo, cioè è veramente *universale*. In secondo luogo la determinazione del periodo orbitale dei sistemi binari apriva per la prima volta la possibilità di calcolare le masse stellari: per far questo occorre però conoscere (oltre alla separazione angolare della coppia, che si ottiene dalla misura micrometrica) anche la distanza delle stelle dalla Terra²⁸, misura che Herschel non era riuscito a ottenere, ma che sarebbe

28 In base alla soluzione delle equazioni del moto trovata da Newton, la massa M di un sistema binario è data dall'equazione

$$M = \frac{4\pi^2}{GT^2} a^3 \quad ,$$

dove G è la costante di gravitazione universale, T è il periodo orbitale e a il semiasse maggiore dell'orbita, cioè la distanza media tra le due stelle; il valore di a può essere calcolato dalla separazione angolare solo conoscendo la distanza delle due stelle dalla Terra.

stata eseguita pochi anni più tardi²⁹. Questo nuovo campo d'indagine introdusse l'esigenza che i micrometri misurassero, oltre alla separazione tra due stelle, anche il loro *angolo di posizione*, cioè la direzione della linea congiungente le due stelle rispetto, ad esempio, alla direzione del polo nord celeste (figura 16). Il primo strumento di questo tipo fu ideato da Edward Troughton (1753-1835) attorno al 1795 (figura 17). Era dotato di due fili che potevano essere mossi in modo indipendente per mezzo di due viti micrometriche separate: per misurare la separazione occorreva quindi tener conto della lettura di entrambe le scale graduate (figura 18). In questo modo però si poteva sfruttare meglio tutta l'ampiezza del campo di vista del telescopio, e soprattutto si poteva ripetere la misura usando diverse zone delle due viti micrometriche, e quindi stimare l'errore dovuto alla non uniformità del passo delle viti. Il micrometro di Troughton era molto preciso (si pensa sia stato il primo micrometro a raggiungere la precisione effettiva di 1") e fu il capostipite della maggior parte dei micrometri sviluppati nel corso del XIX secolo.

Il tipo più perfezionato di micrometro filare fu però quello sviluppato da Fraunhofer³⁰ attorno al 1820. È un micrometro di grandi dimensioni (figura 19) perché era costruito per essere avvitato direttamente sul tubo del telescopio (mentre i micrometri precedenti erano inseriti nel tubo portaoculare, al posto di un oculare normale). Questa configurazione richiedeva che per montare il micrometro si smontasse prima la torretta portaoculare con il suo sistema di

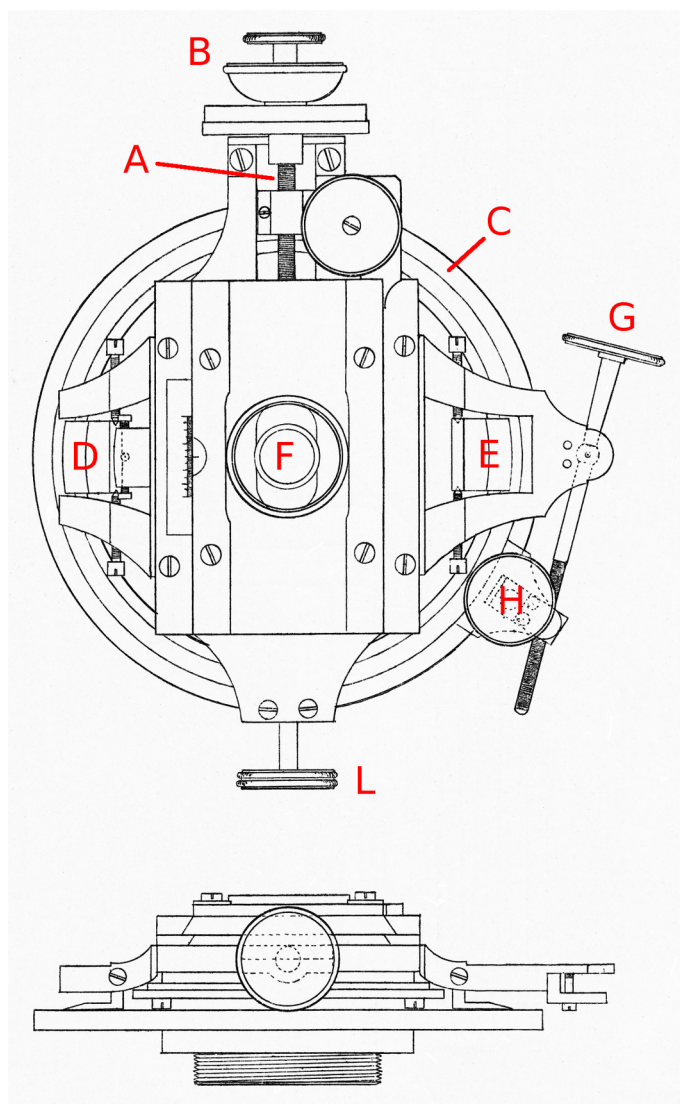


Figura 19: Il micrometro progettato nel 1820 circa da Fraunhofer. Sono evidenziati: (A) vite micrometrica; (B) manopola e tamburo graduato per la lettura dell'angolo di rotazione della vite micrometrica; (C) cerchio graduato per la rotazione del micrometro attorno all'asse del telescopio; (D, E) nonii per la lettura dell'angolo di posizione; (F) oculare; (G) manopola per azionare la vite senza fine di regolazione dell'angolo di posizione; (H) manopola di sblocco del morsetto del meccanismo a cremagliera per la regolazione fine dell'angolo di posizione; (L) manopola della vite senza fine per lo spostamento del filo "fisso".

29 La prima misura di una distanza stellare è stata eseguita nel 1838 da Friedrich Bessel (vedi più sotto, p. 31). La prima determinazione dell'orbita di un sistema stellare binario è stata effettuata da Félix Savary nel 1827.

30 Joseph von Fraunhofer (1787-1826) è stato uno degli scienziati che, agli inizi dell'Ottocento, hanno rivoluzionato le tecniche di progettazione e di costruzione della strumentazione ottica, di misurazione delle proprietà ottiche dei vetri, dei procedimenti di fusione e di mescolamento del vetro, della lucidatura e rettifica delle lenti, della meccanica di movimentazione del telescopio, determinando quella supremazia della tecnologia tedesca in questo campo che dura fino ai nostri giorni. Fraunhofer è stato l'inventore del tipo di montatura equatoriale che in seguito sarà chiamata montatura tedesca, e il primo ad applicare ai telescopi un sistema automatico (meccanico) di moto orario: queste innovazioni sono state introdotte per la prima volta nel rifrattore da 9½ pollici che egli costruì per l'Osservatorio di Dorpat (oggi Tartu, in Estonia) e che è considerato il suo capolavoro. Fraunhofer è stato anche l'inventore dello spettroscopio.

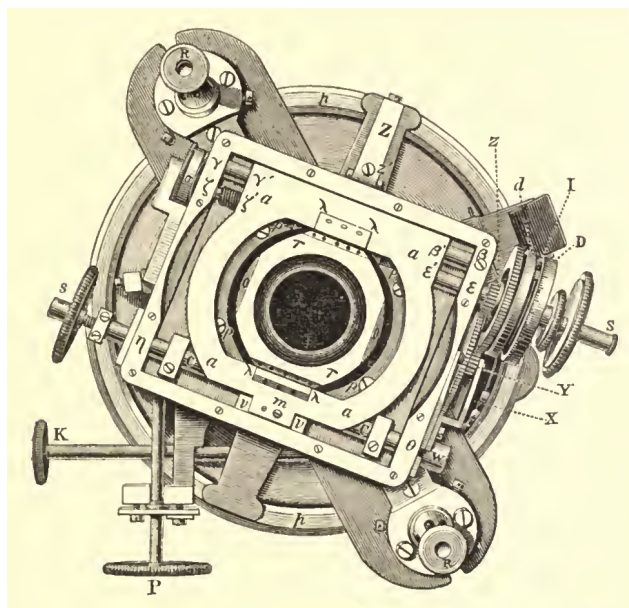
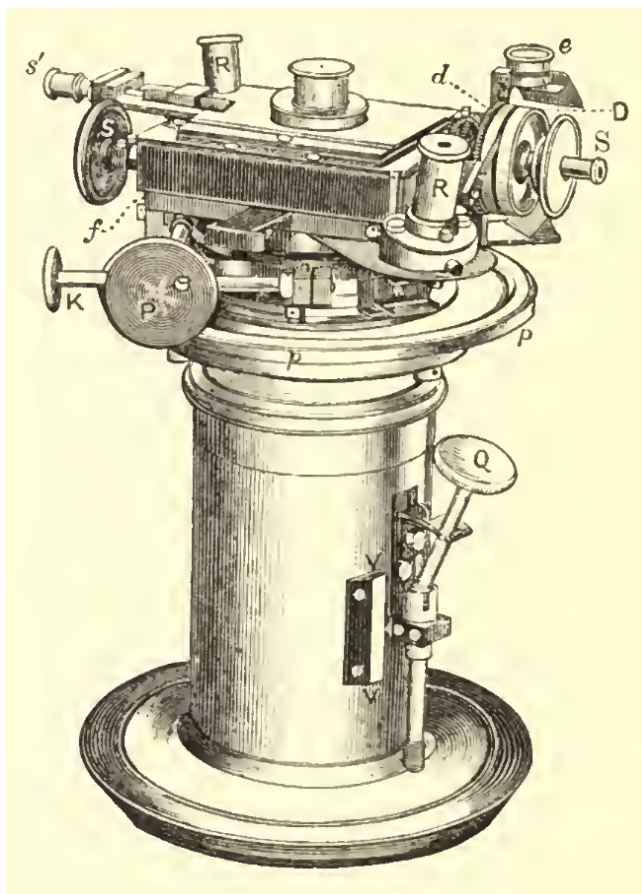


Figura 20: Il micrometro costruito da Repsold (1878 circa) per l'Osservatorio di Città del Capo: a sinistra è mostrata una vista laterale dello strumento completo; a destra una vista dall'alto, dopo aver tolto il coperchio con la slitta portaoculare per rendere visibile il meccanismo interno; le lettere usate nella descrizione si riferiscono a entrambe le figure. La manopola **S** permette di far ruotare la vite micrometrica, la cui posizione angolare è indicata da un doppio sistema di lettura: il tamburo **D** è soli-

dale con l'asse della vite: sulla sua scala graduata si leggono le frazioni di rivoluzione; il tamburo **d** è imperniato sull'asse della vite ma è libero di ruotare attorno ad esso; è posto in movimento da una serie di ingranaggi (**Y**) che gli trasmettono, demoltiplicato, il moto di rotazione della vite, cosicché compie una rivoluzione ogni 24 giri della vite: sulla sua scala graduata, divisa in 24 tacche, si legge il numero di rivoluzioni complete. Le gradazioni di entrambi i tamburi si leggono attraverso il microscopio **e**. Il telaio **aaaa** porta i fili mobili (in numero di 3) che sono montati nelle scanalature **λλλλ**; il telaio, mosso dalla vite micrometrica **S**, scorre lungo l'albero **βγ**, che è dotato di una molla (non visibile in figura perché posta sotto il piano del telaio) che lo tiene premuto contro la vite micrometrica, in modo da eliminarne il gioco. I fili fissi (cinque) sono inseriti nelle scanalature della placca **ττ**. La vite **s** muove tutto il micrometro rispetto alla piastra di base **f**, mentre la vite **s'** muove la placca su cui è montato l'oculare rispetto al micrometro. **pp** è il cerchio graduato per l'angolo di posizione, che viene letto attraverso i due microscopi **RR**, dotati di nonii. Il posizionamento di precisione del cerchio avviene attraverso una vite senza fine che è comandata dalla manopola **P**. La vite senza fine può essere staccata dal cerchio aprendo un morsetto per mezzo della manopola **K**: in questo modo il cerchio risulta libero e può essere ruotato manualmente.

fuocheggiamento; il vantaggio era che il fissaggio sul telescopio risultava molto più stabile, migliorando l'accuratezza della misura degli angoli di posizione. Anche in questo strumento (come in quello di Troughton) il filo cosiddetto "fisso" poteva essere spostato per mezzo di una vite senza fine, anche se priva di scala graduata; ciò serviva per poter posizionare il filo di riferimento (che costituisce lo "zero" della misura) in punti diversi del campo di vista, in modo da usare tratti diversi della vite micrometrica del secondo filo (quello che esegue la misura). Un grande cerchio graduato posto alla base dello strumento, sulla flangia di raccordo al telescopio, permette di leggere l'angolo di posizione; la lettura è fatta con due nonii collocati in posizioni diametralmente opposte (la doppia lettura permette di eliminare gli errori dovuti a un'eventuale eccentricità della scala graduata rispetto all'asse di rotazione). L'angolo di posizione può essere regolato con precisione per mezzo di una vite senza fine che si ingrana su un tratto di cremagliera tangente al bordo del cerchio graduato. La

cremagliera non forma un pezzo unico con il cerchio graduato, ma è bloccata su di esso per mezzo di un morsetto che può essere aperto con un'apposita manopola: in questo modo il cerchio graduato può essere ruotato a mano in modo veloce fino a portarlo approssimativamente nella posizione voluta, prima di stringere il morsetto per effettuare la regolazione fine.

Il micrometro di Fraunhofer venne adottato con qualche modifica dalle due maggiori ditte tedesche di strumenti astronomici del XIX secolo, cioè la Merz³¹ e la Repsold³², e divenne lo strumento di riferimento per tutto il corso del secolo: si è valutato che i tre quarti di tutte le osservazioni micrometriche effettuate tra il 1825 e il 1875 siano state fatte usando strumenti Fraunhofer o Merz. Uno degli esempi più perfezionati di questa linea evolutiva è il micrometro costruito da Repsold (nel 1878 circa) per l'Osservatorio Astronomico di Città del Capo in Sudafrica, che incorpora tutte le tecniche più avanzate conosciute all'epoca per questo tipo di strumenti (figura 20).

Alcuni aspetti tecnici del micrometro filare

Uno degli elementi più critici per la precisione di un micrometro filare è la regolarità del passo della vite. Abbiamo già notato che, se si usa una vite con un passo abbastanza fine (ad esempio un millimetro) e una scala graduata che permetta di leggere il suo angolo di rotazione con una risoluzione sufficiente (un centesimo o anche un millesimo di angolo giro) è possibile costruire un micrometro che restituisca la distanza tra la posizione dei fili con una *precisione* dell'ordine del millesimo di millimetro. Tuttavia, perché anche l'*accuratezza* della misura sia dello stesso ordine di grandezza, occorre che il filetto della vite sia lavorato entro lo stesso margine di errore³³: occorre cioè che l'inclinazione del filetto rispetto all'asse della vite sia assolutamente costante, in modo che i passi della vite siano perfettamente equidistanti tra di loro, e inoltre che, entro ogni singolo passo, l'avanzamento del filetto sia esattamente proporzionale all'angolo di rotazione. Uno dei fattori principali che ha determinato l'aumento di accuratezza dei micrometri dai primi strumenti del XVII secolo a quelli del XIX secolo è stato appunto il progresso della tecnologia meccanica di produzione di viti verso tolleranze di lavorazione sempre più piccole. Un metodo complementare per aumentare l'accuratezza, che fu sviluppato a partire dalla metà del XVIII secolo, è quello di misurare le irregolarità del passo della vite in funzione del suo avanzamento nella madre vite, e compilare una tabella di correzioni che poi possono venire applicate alle misure.

Un altro particolare tecnico importante è il materiale e il modo in cui vengono costruite le mire. Le lamine o lancette di metallo che erano usate nei primi micrometri verso la metà del XVII secolo funzionavano bene per misurare il diametro del Sole, della Luna o dei pianeti (bastava disporre i bordi delle lamine in modo che fossero tangenti al disco dell'astro) ma non erano adatte per misurare la distanza tra due stelle, perché era difficile posizionare accuratamente il bordo della lamina in

31 Ditta fondata da Georg Merz (1793-1867), che era stato prima allievo di Fraunhofer e poi direttore della sua fabbrica; l'attività di Georg Merz fu poi proseguita dai figli Sigmund e Ludwig. La ditta Merz fu uno dei più importanti produttori di telescopi astronomici fino alla fine del XIX secolo.

32 Casa costruttrice di strumenti astronomici e geodetici fondata ad Amburgo dall'astronomo Johann Georg Repsold (1771-1830) e poi diretta dai suoi figli Georg (1804-1885) e Adolf (1806-1871).

33 Facciamo qui riferimento alla distinzione che si fa in fisica tra *precisione* e *accuratezza* di una misura: per *precisione* si intende il grado di ripetibilità della stessa misura, cioè la differenza tra misure successive della stessa grandezza eseguite nelle stesse condizioni; per *accuratezza* si intende quanto il valore medio di misure ripetute si discosta dal valore "vero" della grandezza che si intende misurare (supponendo che tale valore esista indipendentemente dalla misura stessa). Ad esempio, se misurando la temperatura con un termometro digitale che abbia una risoluzione di un decimo di grado (che cioè visualizzi i valori della misura con una cifra decimale) trovo una variazione tra misure ripetute di 20.3 ± 0.3 , la *precisione* dello strumento è 0.3 gradi. Tuttavia, se la temperatura dell'ambiente che sto misurando è in realtà 21.6 gradi, l'*accuratezza* dello strumento è 1.3 gradi. Da quanto detto risulta che la precisione di uno strumento non può essere migliore della risoluzione di lettura, e che un'elevata precisione di per sé non comporta un'elevata accuratezza.

modo che passasse esattamente al centro del disco dell'astro. Perciò le mire a lamina vennero ben presto sostituite da fili sottili, che più facilmente potevano essere disposti in modo che dividessero in due parti simmetriche l'immagine della stella. Inizialmente i fili dei micrometri erano costituiti da fibre vegetali, seta o capelli umani. Questi materiali hanno tuttavia il difetto di essere igroscopici: quando assorbono umidità (evento che durante una notte di osservazione è praticamente inevitabile) si allungano e si spostano, compromettendo il risultato della misura. Per evitare questo difetto si cercò anche di usare fili metallici (soprattutto argento, oro e platino) opportunamente trafilati³⁴. Un altro problema di questi materiali era costituito dal loro spessore: un capello ha uno spessore che varia da 20 a 180 μm ³⁵, a seconda del colore del capello e dell'etnia della persona da cui è prelevato; un filo di seta ha uno spessore tipico di circa 10 μm ; e anche i fili di metallo nel XVII e XVIII secolo non potevano essere trafilati a diametri inferiori a 20-30 μm . Inizialmente spessori simili erano adeguati all'uso, ma in seguito, con l'aumento del potere di ingrandimento dei telescopi, l'immagine del filo all'oculare

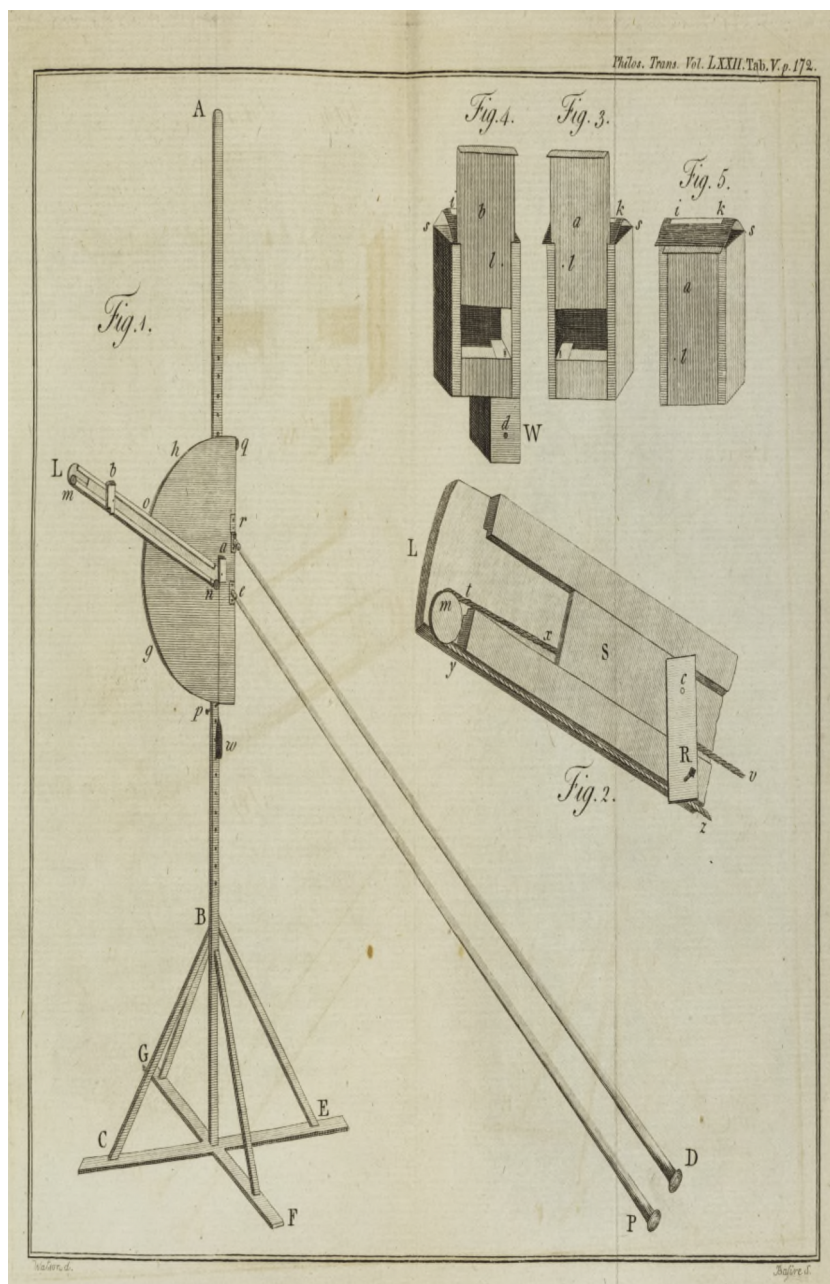


Figura 21: Il micrometro a lampade di Herschel. Le diverse figure mostrano: Fig. 1: il palo di sostegno delle lampade, alto circa tre metri, con il meccanismo che permette di variarne la posizione e distanza reciproca, per mezzo delle due lunghe aste P e D; Fig. 2: particolare del meccanismo che fa scorrere una delle lampade lungo il braccio mobile L; Figg. 3-5: struttura delle lampade, alte circa 5 cm.

34 Uno dei metodi per ottenere un filo d'oro molto sottile era quello di rivestirlo d'argento e trafilare il filo composito, cioè stirarlo facendolo passare attraverso un foro del diametro voluto, assottigliando contemporaneamente l'anima d'oro e il rivestimento d'argento; la parte esterna d'argento veniva poi sciolta in acido nitrico, liberando l'anima d'oro (che invece non viene intaccato dall'acido).

35 Il micrometro, inteso come unità di misura (con simbolo μm), equivale alla millesima parte di un millimetro. In italiano la parola micrometro può avere i due diversi significati di "strumento per misurare piccole lunghezze" (dal greco *micro*, piccolo, e *metreo*, misurare, verbo da cui deriva il suffisso *-metro* che indica uno strumento di misura, come nei termini *termometro*, *barometro*, ecc.) oppure di "millesima parte di un metro" (in cui il prefisso *micro* indica la milionesima parte, come in *microsecondo*, e il termine *metro* è usato nel significato di unità di misura delle lunghezze).

risultava più grande di quella della stella e la copriva completamente, rendendo impossibile centrare correttamente la mira. Si consideri che verso la metà del XVII secolo, ai tempi di Gascoigne, l'ingrandimento tipico di un telescopio astronomico era attorno alle 30-50 volte, mentre alla fine del XVIII secolo William Herschel usava abbastanza spesso ingrandimenti superiori a 1000, anche se il caso di Herschel è piuttosto atipico, perché nessuno dei suoi contemporanei aveva telescopi così potenti. Herschel riferisce che quando usava micrometri filari era spesso costretto, per non occultare la stella con la mira, a posizionare il filo *di fianco* alla stella invece che *sopra* di essa: in questo modo l'astro risultava visibile, ma naturalmente occorreva correggere la misura tenendo conto del raggio apparente della stella, operazione questa piuttosto incerta e imprecisa³⁶. Per questo motivo Herschel si costruì un micrometro che si basava sullo stesso principio della doppia visione del micrometro di Galileo, e che egli chiamava *micrometro a lampade* (*lamp-micrometer*). Consisteva in due piccole lampade racchiuse in due scatolette di metallo completamente chiuse, da cui la luce fuoriusciva solo attraverso un sottilissimo foro, creando l'effetto di una specie di "stella artificiale". Le lampade erano montate su un sostegno che permetteva di variarne la posizione e la distanza reciproca (figura 21). Durante l'osservazione l'astronomo guardava con un occhio attraverso l'oculare del telescopio e con l'altro le due stelle artificiali, che vedeva sovrapposte al campo stellare; quindi manovrava i comandi del micrometro spostando le stelle artificiali fino a farne coincidere le immagini con quelle dei due astri di cui voleva misurare la posizione. Ottenuta la coincidenza, misurava la posizione reciproca delle lampade che, con opportuni calcoli (tenendo conto della distanza delle lampade dall'occhio, dall'ingrandimento del telescopio, ecc.) poteva essere trasformata nella separazione angolare e angolo di posizione delle stelle. Il micrometro a lampade risolveva il problema del mascheramento delle stelle da parte delle mire, perché naturalmente le stelle artificiali, essendo viste con l'altro occhio, non potevano nascondere quelle vere, e aveva anche il vantaggio di non richiedere la grande precisione meccanica necessaria per un micrometro filare, perché la distanza tra le stelle artificiali era dell'ordine di parecchi centimetri. Tuttavia non risulta che lo strumento abbia avuto seguito, forse perché la sua precisione era inferiore a quella dei micrometri convenzionali.

Un miglioramento significativo nei micrometri filari fu l'introduzione dell'uso dei fili di ragnatela. La seta prodotta dal ragno è un materiale ideale per i fili dei micrometri, perché è molto sottile (3-4 μm)³⁷ ma estremamente resistente ed elastica. Nonostante sia stato un ragno ad aver suggerito a Gascoigne l'idea di costruire un micrometro, la possibilità di utilizzare effettivamente la ragnatela in questo tipo di strumenti fu presa in considerazione solo molto più tardi: il primo micrometro che ne ha fatto uso è stato quello di Troughton (attorno al 1795), ma da quel momento in poi il filo di ragno è stato estremamente comune. Vale la pena di citare per esteso le istruzioni che, nel 1883, l'astronomo David Gill (1843-1914) dava circa la preparazione e il montaggio dei fili di ragnatela sul micrometro, perché danno un'idea del tipo di abilità e di cognizioni che erano richieste agli astronomi osservativi ancora alla fine del XIX secolo:

L'installazione del filo di ragnatela (webbing) è un procedimento che dovrebbe es-

36 Il raggio apparente del disco di una stella, come è visto attraverso un telescopio dalla superficie terrestre, non ha nulla a che fare con il raggio fisico dell'oggetto, ma è prodotto esclusivamente dal deterioramento dell'immagine dovuto alla turbolenza atmosferica, cioè alla deviazione caotica della traiettoria dei fotoni prodotta dalle rapide fluttuazioni degli strati alti dell'atmosfera, fenomeno che in astronomia viene indicato tecnicamente con il nome di *seeing*. Per dare un'idea di ordine di grandezza, si consideri che anche le stelle più vicine al Sole (a pochi anni luce di distanza) hanno un diametro apparente geometrico (cioè trascurando l'effetto del *seeing*) dell'ordine del millesimo di secondo d'arco, mentre il loro diametro osservato attraverso l'atmosfera può variare da 0".3-0".4 (per i siti più favorevoli, e solo nelle notti migliori) fino a 2-3" e anche più. Anche in uno stesso luogo il diametro apparente di una stella può variare considerevolmente nel corso della notte in relazione alle condizioni atmosferiche.

37 In realtà i ragni secernono tipi diversi di seta, adatti a usi diversi (per sostenere le ragnatele, per catturare le prede, per calarsi dall'alto, per costruire bozzoli per avvolgere le uova, ecc.).

sere familiare a tutti gli astronomi pratici³⁸. Solitamente gli ottici inglesi procedono nel modo seguente. Si cattura un ragno (la varietà è contraddistinta da una croce sul dorso, e nei giardini inglesi si trova nei pressi degli alberi marciti) e lo si mette su una forcina per filati. Immediatamente l'insetto (sic!) attacca una ragnatela alla forcina e comincia a calarsi con il filo verso terra. Questo filo viene avvolto sulla forcina finché non si siano ottenute dieci o dodici spire, separate da uno spazio adeguato. Quindi si passa un pennello con vernice lungo i rebbi; in questo modo i fili di ragnatela sono fissati saldamente alla forcina. I rebbi paralleli della forcina devono essere sufficientemente distanziati in modo da permettere di inserire tra di essi il telaio portafili del micrometro. Il telaio su cui deve essere montato il filo è posto su una superficie piatta, di colore nero opaco, tra i rebbi della forcina, e questa è posizionata con cura in modo che uno dei fili di ragno si trovi approssimativamente nel solco inciso nel telaio per riceverlo. Poiché in genere il telaio è più spesso della forcina, il filo di ragno risulterà teso su di esso, con un certo grado di tensione, ed è inserito nel solco con un pezzo di legno morbido dalla punta sottile. Se la superficie del telaio è ben levigata, e i solchi sono incisi in modo netto, senza sbavature, il filo dovrebbe infilarci prontamente e precisamente nella propria sede. Quindi si procederà a fissare le due estremità del filo con una goccia di vernice di gommalacca, che si deve lasciar solidificare completamente prima di toccare il telaio. È molto facile maneggiare i fili nel modo descritto, su uno sfondo nero e con l'aiuto di una lente di ingrandimento con distanza focale di 2 o 3 pollici. Se eseguito da mani esperte questo metodo dà buoni risultati; tuttavia è preferibile il seguente procedimento, che di solito è seguito sul Continente.

Si svolge da un bozzolo⁽¹⁾ un filo, più lungo della larghezza del telaio di circa 2 pollici, e si attaccano due pezzetti di piombo alle sue estremità con della cera d'api. Si posa un'estremità del filo, con il suo peso attaccato, su un pezzo di sughero che galleggia in un bicchiere d'acqua; si lascia pendere l'altra estremità giù nell'acqua, dove si impregnerà e si distenderà completamente. Quindi lo si appoggerà sopra la forcina e lo si inserirà nei suoi solchi nel modo sopra descritto, mentre i piccoli pesi di piombo esercitano una certa tensione. Si applica subito vernice⁽²⁾ per fissare il filo, e non si deve toccare il telaio finché questa non sarà asciugata.

- (1) Si dice che i fili di ragno provenienti dai bozzoli siano più elastici, abbiano forma migliore e durata maggiore rispetto a quelli ottenuti mentre l'insetto tenta di fuggire. I fili migliori che abbiamo visto erano stati ottenuti da un bozzolo in Olanda, ma non ci è stato possibile accertare il nome della varietà di ragno [NdA].
- (2) Argelander di solito applicava due gocce di vernice a ciascuna estremità dei suoi fili. Prima fissava ogni estremità con una goccia di vernice di gommalacca, e dopo che questa si era asciugata applicava una goccia di vernice di copale più vicino al centro del telaio; la seconda impiegava più tempo a solidificare, ma alla fine assicurava una tenuta molto più salda [NdA].³⁹

In un micrometro deve poter essere possibile spostare il filo mobile fino a farlo coincidere esattamente con quello fisso (questa manovra serve a “fare lo zero” della misura, cioè a determinare la lettura della scala graduata che corrisponde a un angolo nullo) oppure a scavalcarlo, in modo da poter eseguire la misura da entrambi i lati del filo fisso, per eliminare eventuali asimmetrie del dispositivo. Nel corso di questa operazione i fili non devono venire in contatto, altrimenti si potrebbero spostare o deformare, compromettendo l'accuratezza delle misure. Perciò è necessario che il filo mobile si muova su un piano differente da quello su cui sono tesi i fili fissi; se esiste un filo fisso or-

38 Questa affermazione può sembrare eccessiva, se non si considera che i fili di ragnatela erano comunque molto fragili e soggetti a rotture, e la necessità di sostituirli doveva presentarsi piuttosto frequentemente.

39 Da Gill (1883), p. 248.

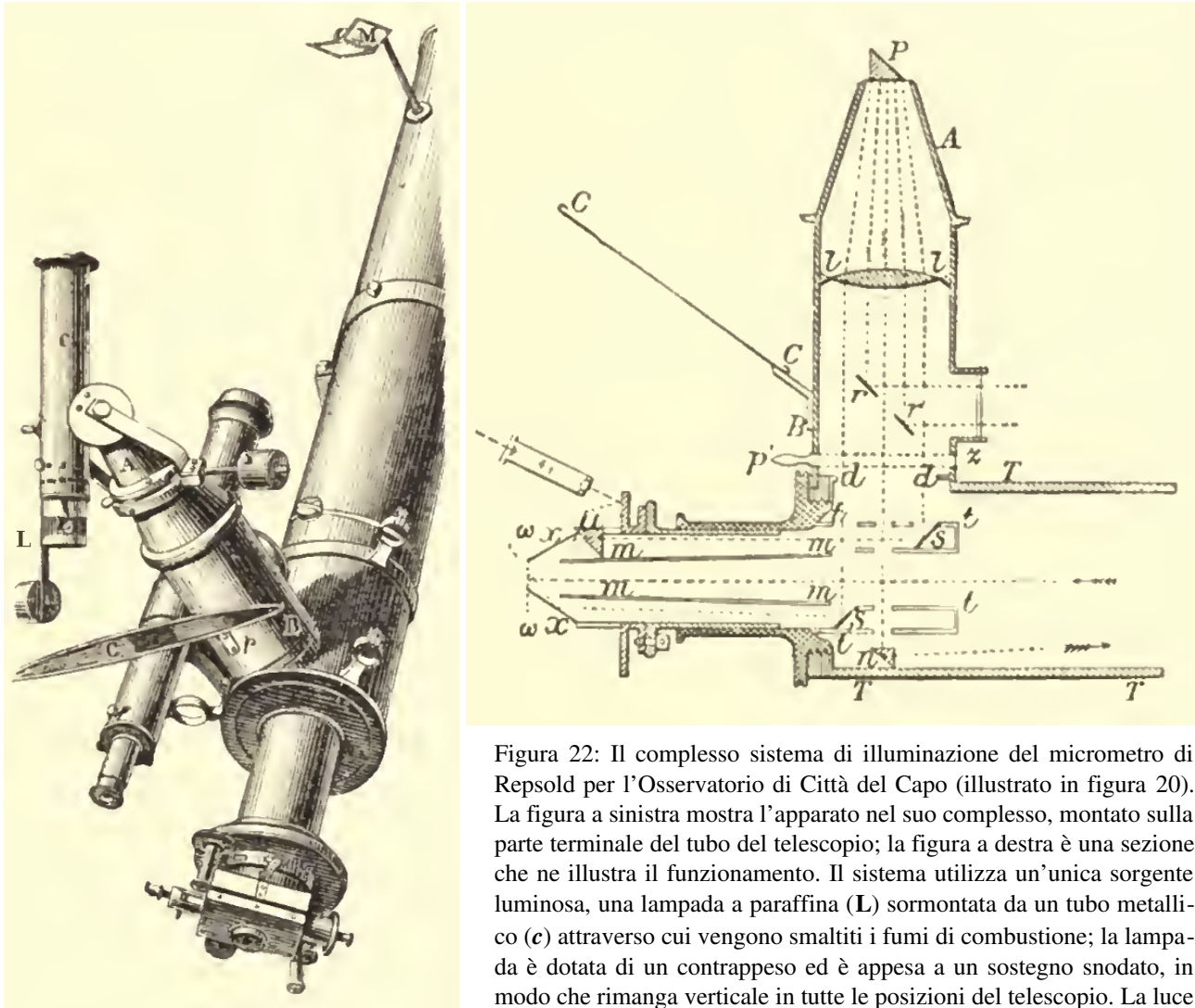


Figura 22: Il complesso sistema di illuminazione del micrometro di Repsold per l'Osservatorio di Città del Capo (illustrato in figura 20). La figura a sinistra mostra l'apparato nel suo complesso, montato sulla parte terminale del tubo del telescopio; la figura a destra è una sezione che ne illustra il funzionamento. Il sistema utilizza un'unica sorgente luminosa, una lampada a paraffina (L) sormontata da un tubo metallico (c) attraverso cui vengono smaltiti i fumi di combustione; la lampada è dotata di un contrappeso ed è appesa a un sostegno snodato, in modo che rimanga verticale in tutte le posizioni del telescopio. La luce della lampada passa attraverso un prisma girevole (P) che la deflette

all'interno del tubo AB. La lente II ha lunghezza focale pari alla sua distanza dalla fiammella della lampada: passando attraverso di essa la luce viene quindi collimata in un fascio di raggi paralleli; un meccanismo a scorrimento permette di regolare la collimazione. Una parte del fascio è deviata dallo specchio anulare rr verso la parte superiore del telescopio, dove i due specchietti M indirizzano la luce verso i nonii per la lettura del cerchio graduato dell'asse di declinazione. La parte più interna del fascio passa attraverso il foro centrale dello specchio rr e raggiunge il prisma n, che la devia lungo il tubo del telescopio verso l'obiettivo; da qui è riflessa indietro verso l'oculare da un riflettore argentato incollato al centro della superficie interna dell'obiettivo; questa frazione di luce cade frontalmente sull'oculare e illumina dal retro i fili del micrometro posti in $\omega\omega$, generando l'illuminazione del tipo "filo nero in campo chiaro". La parte più esterna del fascio che giunge dalla lente II passa attorno ai bordi dello specchio rr e giunge sui due specchietti ss, dai quali è riflessa verso la superficie interna del tronco di cono xx, che è ricoperta di cartapesta bianca; questa porzione di luce quindi illumina di lato i fili del micrometro $\omega\omega$, mentre il tubo nero mm impedisce alla luce di giungere direttamente sull'oculare; questa parte del fascio luminoso genera quindi l'illuminazione del tipo "filo chiaro in campo nero". Una parte della luce proveniente dagli specchietti ss viene anche deviata da tre prismi μ (di cui solo uno è rappresentato nella figura) fino a illuminare il tamburo graduato della vite micrometrica e i due nonii di lettura dell'angolo di posizione. Nel piano p'z si trova una specie di diaframma a iride formato da lamelle mobili; per mezzo della leva p' esse possono essere ruotate in diverse posizioni: in modo da ostruire solo la parte centrale del fascio di luce, producendo l'effetto "filo chiaro in campo nero"; oppure in modo da ostruirne la parte più esterna, producendo l'effetto "filo nero in campo chiaro"; oppure in modo da ostruire completamente il fascio, eliminando qualsiasi forma di illuminazione del micrometro. Il disco C è uno schermo in lamiera di rame che ha lo scopo di schermare l'occhio dell'osservatore dalla luce diretta della lampada.

togonale ai fili di misura (per determinare l'angolo orario), deve trovarsi su un altro piano ancora. Tuttavia, per essere visibili distintamente, tutti i fili devono trovarsi il più vicino possibile al piano focale dell'obiettivo del telescopio, e quindi vicini tra di loro. Ne consegue che la geometria degli elementi su cui i fili sono montati deve essere estremamente precisa: le superfici dei telai devono essere perfettamente rettificata e parallele, e il movimento del telaio mobile deve essere preciso e privo di giochi.

Un altro problema tecnico, meno banale di quanto potrebbe sembrare a prima vista, è quello dell'illuminazione, perché un filo non illuminato contro un cielo nero risulterebbe invisibile. Il contrasto tra campo osservato e fili di misura può essere effettuato in due modi: con fili chiari su campo nero, oppure con fili neri su campo chiaro. La prima condizione si produce illuminando lateralmente i fili del micrometro, in modo che la luce non si rifletta nell'oculare; per ottenere la seconda si deve illuminare l'oculare con una sorgente luminosa posta dietro i fili del micrometro, cioè con un fascio luminoso diretto approssimativamente lungo l'asse del telescopio. I micrometri più antichi adottavano la prima soluzione, e solitamente avevano una finestrella laterale per illuminare i fili per mezzo di una piccola lampada, che spesso veniva semplicemente tenuta in mano dall'astronomo o da un suo assistente (anche il micrometro di Gascoigne usava questo sistema); ma in realtà l'uno o l'altro metodo può risultare più conveniente a seconda delle condizioni osservative, e in particolare della luminosità degli oggetti osservati. In ogni caso occorre che la sorgente luminosa sia debole e regolabile in intensità, in modo da illuminare i fili solo quel tanto che basta per poterli distinguere, perché l'occhio ha bisogno di circa mezz'ora per acquisire la sensibilità necessaria alla visione notturna, e la perde immediatamente in presenza di luci intense. I telescopi della seconda metà dell'Ottocento avevano sistemi di illuminazione piuttosto sofisticati, che spesso illuminavano non solo i fili dei micrometri, ma anche i tamburi di lettura della vite micrometrica e i cerchi graduati di declinazione e ascensione retta per il puntamento del telescopio (figura 22).

L'eliometro

L'eliometro è un tipo di micrometro che si basa sullo sdoppiamento dell'immagine degli oggetti osservati per mezzo di due lenti o di una lente divisa in due. Il nome deriva dal fatto che i primi micrometri di questo tipo furono costruiti per misurare il diametro del Sole, e la denominazione venne mantenuta anche quando in seguito gli strumenti furono costruiti in modo da essere adatti a usi più generali.

L'idea dell'eliometro fu proposta per la prima volta da Servington Savary nel 1743. Non ci si deve stupire del fatto che la misura del diametro apparente del Sole fosse considerata così importante da valere la pena di costruire uno strumento appositamente per questo scopo. Infatti attraverso le variazioni del diametro solare si possono calcolare le variazioni della distanza tra il Sole e la Terra e migliorare la conoscenza dell'orbita terrestre (ad esempio determinarne l'eccentricità⁴⁰), una conoscenza che non solo è essenziale in

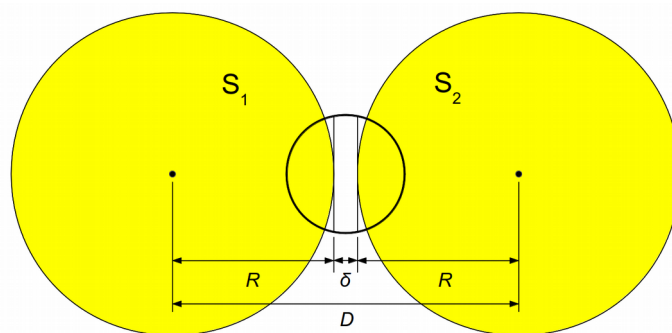


Figura 23: Schema di funzionamento dell'eliometro di Savary. S_1 ed S_2 sono le immagini del Sole prodotte dai due obiettivi; il cerchio al centro è il campo di vista dell'oculare, con i fili del micrometro che misurano la distanza δ tra i bordi delle due immagini. Indicando con D la distanza tra i punti centrali dei due obiettivi (trasformata in distanza angolare usando la lunghezza focale degli obiettivi stessi) e con R il raggio delle immagini del Sole, il diametro angolare del Sole risulta uguale a $2R = D - \delta$.

40 La distanza della Terra dal Sole varia da un minimo di 147.10 (quando la Terra si trova al *perielio*, cioè nel punto

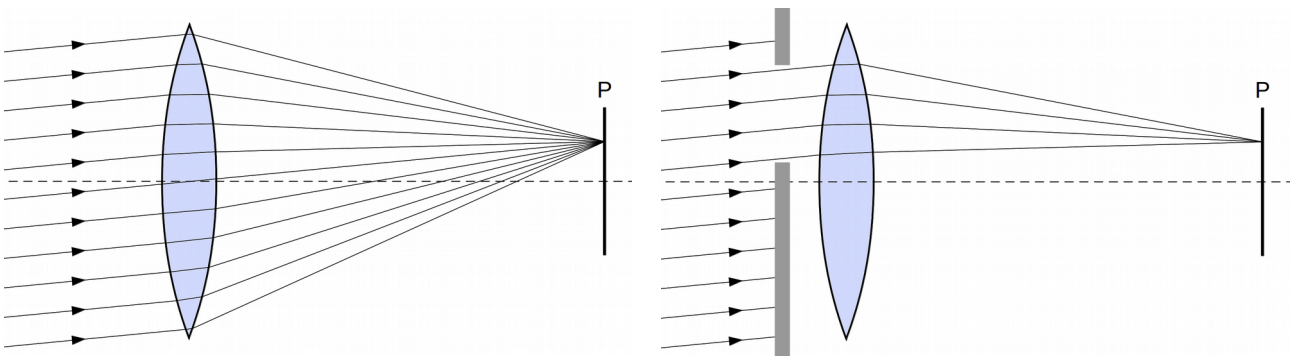


Figura 24: Meccanismo di produzione dell'immagine da parte di una lente. (A sinistra) I raggi luminosi che provengono da una sorgente puntiforme vengono deflessi da una lente in modo da convergere tutti in uno stesso punto, posto sul piano focale P, indipendentemente dal punto della lente attraverso cui passano. (A destra) Se si utilizza solo una parte della lente (ad esempio coprendo con uno schermo opaco il resto della sua superficie), l'immagine che si ottiene è la stessa che sarebbe prodotta da tutta la lente, tranne per il fatto che la sua luminosità sarà minore, in ragione della minor superficie di raccolta della luce.

astronomia, ma è utile anche per diversi scopi pratici (misura del tempo e determinazione della posizione di una nave). Tuttavia il diametro solare è di circa mezzo grado, e per misurarlo con un micrometro convenzionale (ad esempio un micrometro filare), che richiede che l'intera immagine del Sole sia contenuta nel campo di vista, è necessario usare un telescopio con un basso potere di ingrandimento, e ciò naturalmente limita la precisione raggiungibile. L'idea da cui Savary parte è la seguente: se si costruisce un telescopio dotato, invece che di un singolo obiettivo come al solito, di due obiettivi affiancati (aventi la medesima distanza focale), questi produrranno sul piano focale due immagini distinte del Sole. Calcolando opportunamente la distanza tra gli obiettivi si può fare in modo che la distanza tra i centri delle due immagini sia leggermente superiore al diametro massimo dell'immagine del Sole, cioè al diametro che essa ha quando la Terra si trova al perielio: in questo modo i bordi delle due immagini saranno sempre molto vicini, senza mai toccarsi o sovrapporsi. In uno strumento del genere si può porre un oculare in modo che mostri con forte ingrandimento solo la zona in cui le due immagini sono vicine, e misurare la distanza tra i due bordi con un normale micrometro filare (figura 23); da questa misura si può poi facilmente calcolare il diametro del disco solare. Per ottenere questo risultato non è neppure necessario usare due lenti complete; poiché anche una parte di una lente produce la stessa immagine della lente intera⁴¹ (figura 24), Sa-

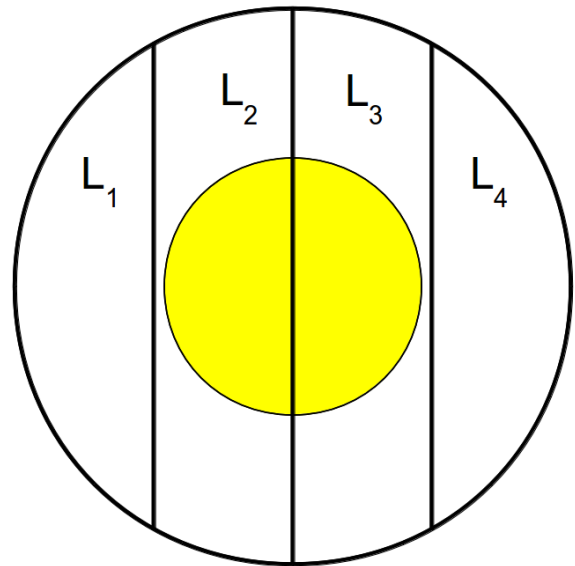


Figura 25: Per la costruzione del suo eliometro Savary proponeva di usare una lente di diametro e lunghezza focali tali che il diametro dell'immagine del Sole che essa produceva sul piano focale (rappresentata dal cerchio giallo al centro della figura) fosse leggermente inferiore alla metà del diametro della lente, e di tagliarla in quattro parti di uguale larghezza (L_1 , L_2 , L_3 ed L_4); ognuna delle quattro parti, anche se usata separatamente, è in grado di produrre la stessa immagine completa del Sole.

della sua orbita più vicino al Sole) a un massimo di 152.10 milioni di chilometri (quando la Terra è all'*afelio*); di conseguenza il diametro apparente del Sole varia da $32'.38$ a $31'.45$.

41 Ciò è vero solo nel caso di una lente ideale, cioè in quell'approssimazione del comportamento di una lente (chiamata

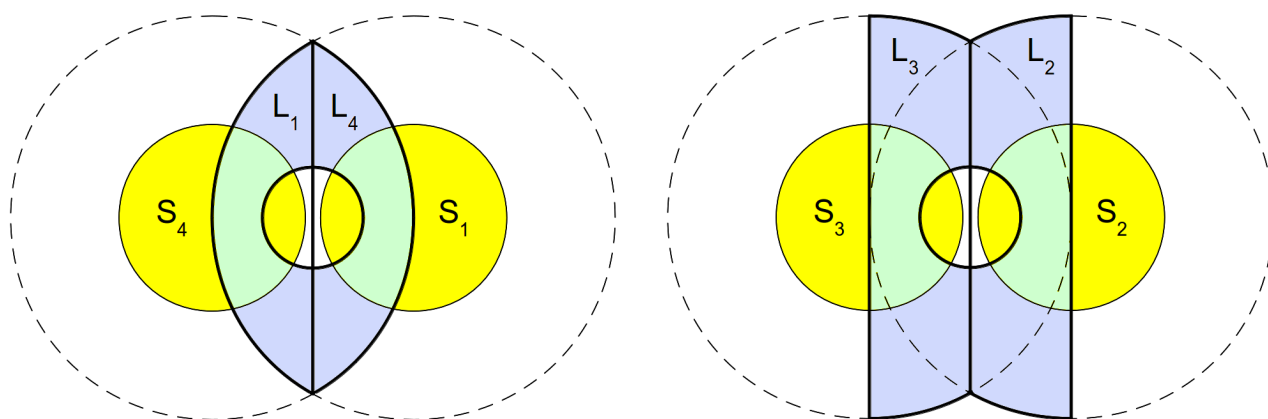


Figura 26: Due modi in cui si può costruire un eliometro usando parti di una lente secondo Savary: usando le sezioni laterali della lente (*a sinistra*) oppure quelle centrali (*a destra*). In entrambe le figure le diciture L_1 , L_2 , L_3 ed L_4 indicano le parti ottenute tagliando una lente come descritto nella figura 25, mentre S_1 , S_2 , S_3 ed S_4 sono le corrispondenti immagini del Sole che esse producono. I cerchi tratteggiati mostrano i contorni della lente completa da cui le sezioni sono tratte: l'immagine del Sole che ogni sezione produce si trova sempre al centro di tali cerchi. Il cerchio piccolo al centro di ogni figura rappresenta il campo di vista dell'oculare dello strumento.

vary proposte di tagliare una lente in quattro “fette” (figura 25): assemblando assieme a due a due i pezzi e usando l'elemento di vetro così ottenuto come obiettivo, si possono costruire dispositivi che funzionano in modo equivalente all'eliometro a due lenti (figura 26).

L'idea di Savary fu successivamente sviluppata da John Dollond⁴² nel 1754; egli propose di tagliare una lente in due parti uguali lungo un suo diametro e di montare i due pezzi risultanti su un meccanismo che permetteva di farli scorrere lungo la linea di taglio, in modo che la distanza tra i centri ottici delle due metà potesse essere variata a piacere. Ciò era ottenuto per mezzo di due telai metallici dotati di cremagliere che potevano essere mosse in direzioni opposte per mezzo di un unico pignone (figura 27); lo spostamento relativo dei telai era misurato per mezzo di una scala lineare graduata dotata di nonio. Il vantaggio di questa configurazione è che rende inutile l'uso di un micrometro filare, in quanto la posizione relati-

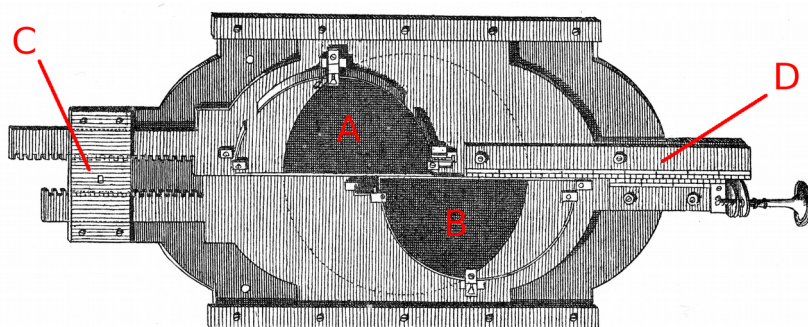


Figura 27: La “testa” dell'eliometro proposto da John Dollond nel 1754, vista dalla sua faccia esterna (cioè quella che viene diretta verso il cielo). A e B sono le intelaiature in cui sono montate le due metà della lente. A sinistra sono visibili le due cremagliere che fanno scorrere i due pezzi di lente uno rispetto all'altro, in senso orizzontale; esse sono azionate da un unico pignone (non visibile nel disegno perché situato dall'altra parte della piastra) il cui perno è inserito nel foro C, ruotando il quale le due cremagliere si muovono in direzione opposta, una verso sinistra e l'altra verso destra. Sulla destra è visibile la scala graduata D su cui si legge lo spostamento relativo delle sue semi-lenti: essa è dotata di nonio e di una vite di regolazione che permette di tarare la posizione dello zero.

ta *approssimazione di lente sottile*) in cui si trascurano le varie forme di aberrazione (per una spiegazione di questo punto vedi la scheda MusAB: [Come funzionano i telescopi?](#)).

42 John Dollond (1706-1761) fu uno dei più importanti ottici del Settecento; a lui si deve tra l'altro la produzione dei primi telescopi con ottiche acromatiche, cioè dotati di una lente obbiettivo composta da due elementi fatti con vetro di differente indice di rifrazione, combinazione che permetteva di ridurre sensibilmente l'*aberrazione cromatica* dello strumento, cioè quel difetto per cui i contorni delle immagini appaiono circondati da aloni colorati.

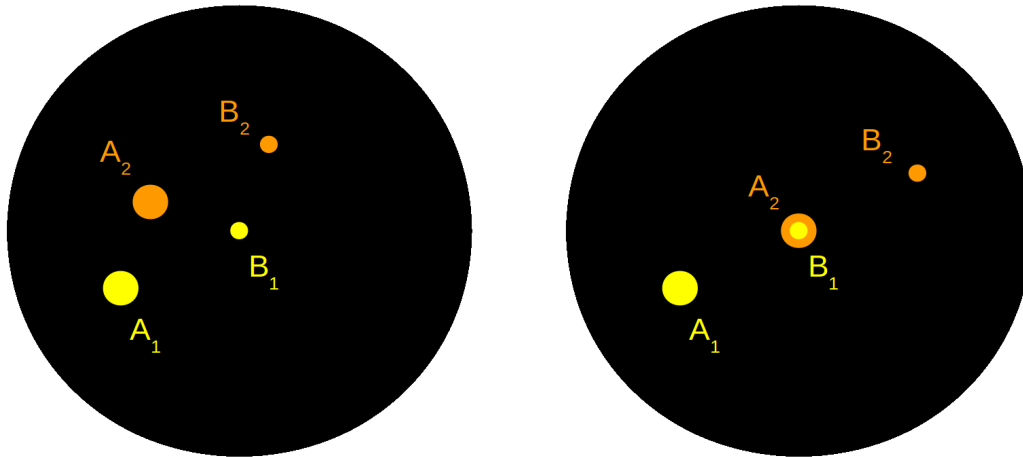


Figura 28: Procedimento per misurare la posizione relativa della componenti di una stella doppia usando un micrometro a doppia immagine (eliometro). (A sinistra) Le due componenti della stella doppia A e B sono visibili sdoppiate, attraverso la prima (A_1 e B_1) e la seconda semi-lente (A_2 e B_2); per chiarezza espositiva le immagini prodotte dalle due semi-lenti sono rappresentate in colori diversi (nella visione telescopica ovviamente hanno lo stesso colore). (A destra) Regolando opportunamente la separazione e l'orientamento delle due semi-lenti, la posizione della stella A della seconda immagine (A_2) viene fatta coincidere con la stella B della prima immagine (B_1): la lettura della posizione relativa (orientamento e separazione) delle due semi-lenti fornisce l'angolo di posizione e la separazione delle due stelle.

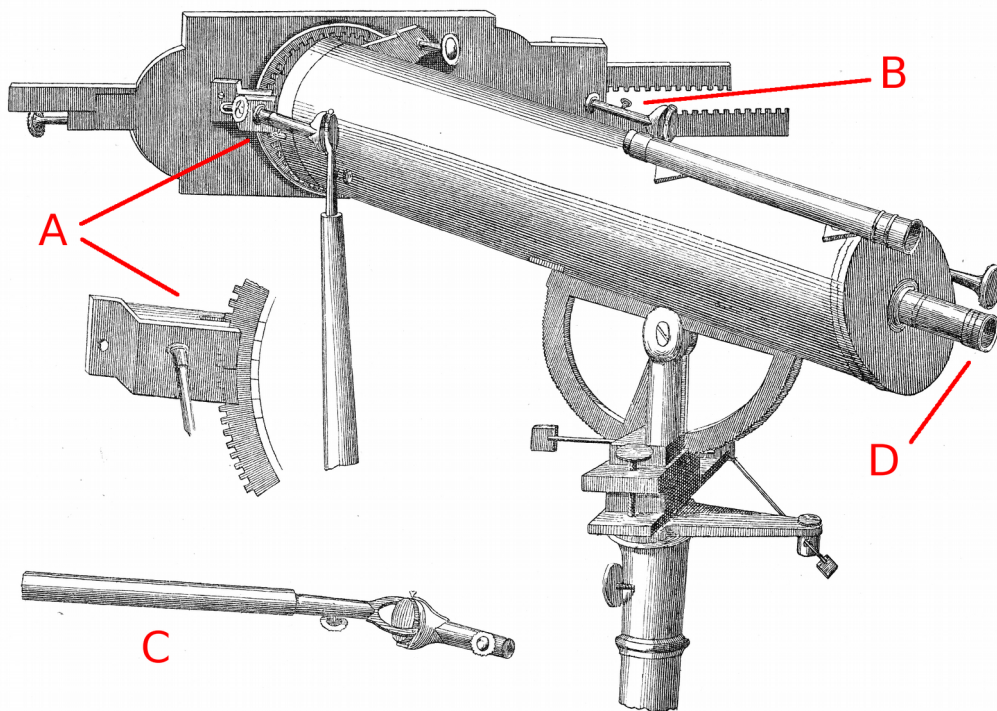


Figura 29: Veduta d'insieme dell'eliometro di Dollond (1754) montato sul tubo del telescopio; in questa immagine la piastra che porta la lente divisa è vista dalla sua faccia posteriore, cioè dal lato opposto rispetto alla figura 27. La ruota dentata A permette di ruotare l'intero strumento attorno all'asse del telescopio, in modo da poter orientare la direzione di sdoppiamento dell'immagine in angolo di posizione; la ruota dentata è comandata da un pignone collegato a un'asta dotata di giunto cardanico (C), che permette di agire sulla regolazione dalla posizione da cui si esegue l'osservazione, dietro all'oculare (D). Sul lato destro si vede la parte posteriore delle cremagliere che regolano lo scorrimento trasversale delle due semi-lenti (B); anche il pignone che le comanda è dotato di un'asta con giunto cardanico.

va dei corpi celesti può essere misurata direttamente dalla posizione delle due mezze lenti, utilizzando la coincidenza delle immagini prodotte (figura 28); in questo modo si evita anche il problema del mascheramento delle stelle più piccole da parte dei fili (l'inconveniente che aveva portato Herschel a rinunciare al micrometro filare). Il dispositivo di Dollond viene solitamente indicato con il nome di *eliometro*, ma in effetti si tratta di uno strumento adatto a un uso molto più generale che la misura del diametro del Sole, in grado di determinare separazioni angolari anche molto piccole (come quelle tra le componenti di sistemi binari stretti); rispetto all'*eliometro* di Savary esso ha il vantaggio di permettere di "fare lo zero", cioè di portare le due parti della lente nella loro posizione "neutra" in cui si comportano come una lente non spezzata (in cui cioè le due immagini da esse prodotte si sovrappongono esattamente) e di verificare qual è la lettura della scala graduata in questa condizione. Dollond suggeriva che il dispositivo potesse essere usato sia come elemento da aggiungere nel cammino ottico di un telescopio completo, rifrattore o riflettore (di cui naturalmente avrebbe modificato la lunghezza focale), oppure come obiettivo di un telescopio appositamente costruito; fu appunto in questa seconda configurazione che l'*eliometro* di Dollond venne utilizzato più frequentemente (figura 29).

L'*eliometro* fu ulteriormente perfezionato da Fraunhofer, quindi da Merz e da Repsold: nelle loro mani esso divenne lo strumento più preciso che gli astronomi del XIX secolo avevano a disposizione per la misura di piccoli angoli. È proprio utilizzando un eliografo prodotto da Fraunhofer (il cosiddetto *grande eliografo di Königsberg*, figura 30) che nel 1838 Friedrich Bessel ha potuto determinare per la prima volta la parallasse di una stella fissa: misurando ripetutamente la distanza angolare tra la stella *61 Cygni* e due stelle molto più deboli (e quindi, presumibilmente, molto più distanti) vicine ad essa⁴³, Bessel evidenziò che la stella esibiva una parallasse annua di $0''.3136$, che

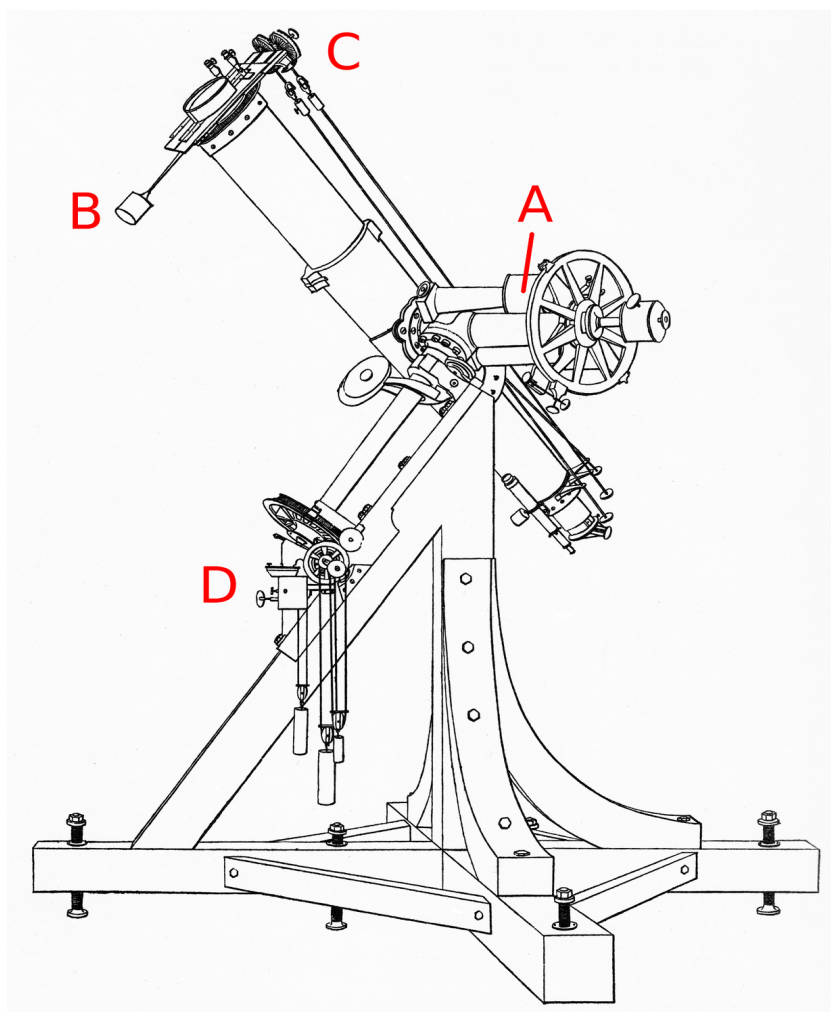


Figura 30: L'*eliometro* costruito per l'osservatorio di Königsberg (1829) incorpora alcune delle caratteristiche tipiche della produzione di Fraunhofer: l'uso della montatura cosiddetta "tedesca", in cui l'asse di declinazione è inserito sulla testa dell'asse orario, creando una struttura a forma di T, e in cui il peso del tubo è bilanciato perfettamente da un contrappeso (A); l'uso di un contrappeso (B) anche per bilanciare il peso dei meccanismi di comando e di lettura della posizione delle semi-lenti dell'*eliometro* (C); il dispositivo meccanico automatico (D) che fa ruotare l'asse orario in sincrono con la volta celeste, mantenendo immobile l'oggetto osservato nel campo di vista.

43 Bessel osservò le tre stelle per un totale di 90 notti, tra il 16 agosto 1837 e il 2 ottobre 1838, eseguendo ogni notte

corrisponde a una distanza dal Sole di 10.3 anni luce⁴⁴. A quasi tre secoli di distanza dalla pubblicazione del *De revolutionibus orbium coelestium* di Copernico (1543), la misura di Bessel è stata la risposta definitiva a una delle obiezioni più serie che fin dagli inizi era stata fatta al sistema copernicano e cioè che, se la Terra non era ferma al centro dell'Universo ma si muoveva attorno al Sole, le posizioni apparenti delle stelle fisse avrebbero dovuto cambiare nel corso dell'anno. La risposta dei sostenitori della teoria eliocentrica, che questo effetto è così piccolo da non essere osservabile, richiedeva di porre le stelle a distanze che all'epoca sembravano assurde, perché incredibilmente maggiori delle dimensioni stimate per il Sistema Solare⁴⁵. La misura di Bessel ha dimostrato che le cose stavano effettivamente in questi termini, e ha costituito un importante passo avanti per la conoscenza della struttura dell'Universo. Nel corso dell'Ottocento l'astronomia ha avuto una rapida evoluzione: verso la metà del secolo all'astronomia che oggi consideriamo classica, e che si occupava principalmente della posizione e del movimento dei corpi celesti, si è aggiunta l'astrofisica, che studia la loro struttura, condizioni fisiche, evoluzione, ecc. Giustamente si dà grande risalto all'importanza che in questa transizione ha avuto lo spettroscopio, lo strumento che, attraverso l'analisi della composizione della luce che riceviamo dalle stelle, permette di misurarne la temperatura, la composizione chimica, la presenza di campi magnetici, la velocità di avvicinamento o di allontanamento e di rotazione. Tuttavia un ruolo altrettanto importante è stato svolto dal micrometro e dall'eliometro, gli strumenti che hanno permesso di calcolare le luminosità⁴⁶ e le masse⁴⁷ stellari, due grandezze fisiche che sono essenziali per la comprensione dei processi che determinano l'equilibrio e la produzione di energia delle stelle⁴⁸.

un minimo di 16 misure indipendenti. Quasi contemporaneamente a Bessel altri astronomi determinarono con successo le parallassi di altre stelle: α *Lyræ* (Friedrich von Struve, Osservatorio di Dorpat) e α *Centauri* (Thomas James Henderson, Osservatorio del Capo di Buona Speranza).

- 44 Il valore oggi accettato è $0''.286$ (11.4 anni luce): la misura di Bessel aveva quindi un errore di $0''.028$, pari al 10%. Poiché la lunghezza focale dello strumento era di 2.56 m, questo errore corrisponde a uno spostamento tra le due semi-lenti di $0.35 \mu\text{m}$!
- 45 Le distanze all'interno del Sistema Solare si misurano in *unità astronomiche* (AU), un'unità di lunghezza che è pari alla distanza media della Terra dal Sole (circa 150 milioni di chilometri); ad esempio la distanza dal Sole di Nettuno, il pianeta più esterno del Sistema Solare, è pari a circa 30 AU. Le distanze reciproche tra le stelle sono così grandi da richiedere una diversa unità di misura: l'*anno luce*, che è uguale alla distanza che la luce (alla velocità di circa 300 mila chilometri al secondo) percorre nel tempo di un anno. Un anno luce equivale a 63241 AU. La distanza della stella più vicina al Sole, Proxima Centauri, è di 4.25 anni luce; il diametro della nostra Galassia è di circa 100 mila anni luce, mentre la distanza delle galassie più vicine si misura in milioni di anni luce. Un'altra unità di lunghezza usata per misurare le distanze stellari è il *parsec* (pc), pari alla distanza di una stella che ha un parallasse annuo di un secondo d'arco ($1 \text{ pc} = 3.26 \text{ anni luce}$). L'uso del parsec è molto comodo per indicare le distanze stellari determinate con il metodo della parallasse, la cui misura angolare è inversamente proporzionale alla distanza; ad esempio, poiché la parallasse di *61 Cygni* è pari a $0''.286$, la sua distanza è uguale a $1/0.286 = 3.50 \text{ pc}$.
- 46 Più precisamente la quantità che occorre conoscere è la *luminosità assoluta* di una stella, cioè la quantità totale di energia luminosa che essa emette; questa può essere calcolata dalla sua *luminosità apparente* (la quantità di luce che noi riceviamo, che può essere misurata con appositi strumenti) solo se si conosce la distanza dell'astro (la luminosità apparente è inversamente proporzionale al quadrato della distanza).
- 47 La massa di un sistema stellare binario può essere calcolata conoscendo il suo periodo orbitale, determinato per mezzo di osservazioni micrometriche ripetute, e la sua distanza, determinata con la misura della parallasse (vedi nota 28). Una stima del limite inferiore della massa di un sistema binario può essere ricavata anche per via spettroscopica, misurando la componente radiale della velocità orbitale per mezzo dell'effetto Doppler. Bisogna peraltro notare che per la determinazione del periodo orbitale il metodo micrometrico e quello spettroscopico sono complementari, in quanto il primo può essere applicato alle coppie più larghe, le cui componenti sono abbastanza distanti da essere visibili separatamente; mentre il metodo spettroscopico dà i risultati migliori per le coppie più strette che, in base alla terza legge di Keplero, hanno velocità orbitali più elevate.
- 48 La base della conoscenza attuale del funzionamento di una stella è costituito dal cosiddetto *modello standard*, un modello matematico basato sulle leggi fondamentali della fisica che permette di prevedere tutte le caratteristiche osservabili dell'astro partendo essenzialmente dal valore della sua massa (la composizione chimica ha un'influenza molto minore): infatti la massa determina, per effetto della forza gravitazionale, la pressione delle regioni centrali, il

Il problema della stima delle dimensioni dell'Universo ha costituito una sfida per gli astronomi di tutti i tempi ed è stato risolto solo nel XX secolo attraverso una serie di metodi diversi ma interdipendenti, che nel loro insieme costituiscono la cosiddetta *scala di distanze cosmiche*. In essenza, ogni metodo si basa sull'identificazione di oggetti astronomici particolari (le cosiddette *candele standard*) la cui luminosità assoluta sia costante, oppure calcolabile sulla base di altre caratteristiche osservabili direttamente: confrontando la luminosità assoluta prevista con la luminosità apparente misurata è possibile stimare la distanza della "candela" e quindi del sistema (ammasso stellare, galassia) a cui appartiene. Le candele cosmiche formano una scala perché sono oggetti di luminosità crescente (stelle Cefeidi⁴⁹, supernove, popolazioni di ammassi stellari) e che quindi risultano visibili a distanze sempre più grandi; tuttavia ogni gradino della scala può essere utilizzato solo dopo essere stato "tarato" con il precedente: ad esempio, la luminosità assoluta delle supernove è stata determinata osservando alcuni di questi oggetti che facevano parte di galassie la cui distanza era stata determinata con il metodo delle Cefeidi. Ebbene, in questa scala le misure di parallasse costituiscono il primo gradino, e il metodo più diretto e più certo, perché basato su una semplice relazione geometrica; esse possono essere effettuate solo per le stelle più vicine al Sole⁵⁰, tra cui però ci sono anche alcune Cefeidi: è appunto la misura di distanza di queste, per mezzo della loro parallasse, che ha permesso di tarare la relazione periodo-luminosità delle Cefeidi e dare inizio a tutto il processo⁵¹.

Un modo alternativo per ottenere un micrometro a sdoppiamento di immagine senza usare lenti divise è quello di sfruttare la birifrangenza, la proprietà posseduta da alcuni cristalli, come ad esempio la calcite (spato d'Islanda), di sdoppiare i raggi di luce incidenti e di rifrangerli secondo due direzioni differenti. Il primo strumento di questo tipo è stato ideato dall'astronomo francese Alexis-Marie de Rochon (1741-1817): faceva uso di un doppio prisma di calcite (*prisma di Rochon*) che, inserito nel tubo di un telescopio, sdoppiava l'immagine da esso prodotta. Muovendo il prisma lungo il tubo si poteva variare la separazione tra le due immagini; la misura della posizione del prisma forniva il valore della separazione angolare.

tasso di produzione di energia da parte delle reazioni di fusione termonucleare, la temperatura, la luminosità, la durata della vita, ecc. In particolare sappiamo oggi che le classi in cui i primi astrofisici hanno suddiviso le stelle sulla base delle loro caratteristiche osservabili spettroscopicamente (temperatura superficiale e righe di assorbimento e di emissione) corrispondono essenzialmente a differenti valori di massa, dalle stelle più piccole (più fredde, di colore rossastro) a quelle più grandi (più calde, di colore bianco o blu).

- 49 Le Cefeidi sono una classe di stelle pulsanti la cui luminosità varia secondo un ciclo che ha un periodo costante e ben definito. Per queste stelle esiste una relazione precisa tra il periodo di variazione della luminosità (che può essere facilmente determinato con una serie di misure fotometriche) e la luminosità assoluta: è questa caratteristica che permette di utilizzarle come candele standard.
- 50 Con le tecnologie osservative attuali dalla superficie terrestre è possibile misurare con una certa precisione parallassi fino a $0''.01$ (corrispondenti a circa 300 anni luce). Tuttavia negli ultimi decenni è stato possibile eseguire misure di parallasse molto più precise al di fuori dell'atmosfera, utilizzando satelliti artificiali progettati espressamente per misure astrometriche. La missione *Hipparcos* (1989-1993) ha misurato parallassi fino a $0''.001$ (3000 anni luce); il satellite *Gaia*, lanciato nel 2013 e ancora operativo (nel 2018), fornirà parallassi fino a 20 microsecondi d'arco (150 mila anni luce).
- 51 Esiste un'altra connessione, meno evidente ma non per questo meno importante, tra queste prime misure di distanze stellari e le misure astrometriche e quindi, se vogliamo metterla in questi termini, un altro debito dell'astrofisica nei confronti dell'astronomia classica. Le stelle scelte come candidati per i primi tentativi di misura di parallassi non furono prese a caso, ma furono selezionate tra le stelle che esibivano un elevato *moto proprio*, cioè la cui posizione angolare sulla volta celeste cambiava con maggior velocità nel corso del tempo (si tratta comunque di cambiamenti molto piccoli, che arrivano al massimo a pochi secondi d'arco all'anno): infatti, a parità di velocità, il moto proprio è inversamente proporzionale alla distanza della stella. Questo procedimento di selezione presuppone quindi che una lunga tradizione di misure astrometriche abbia prodotto cataloghi stellari che includessero le determinazioni dei moti propri.

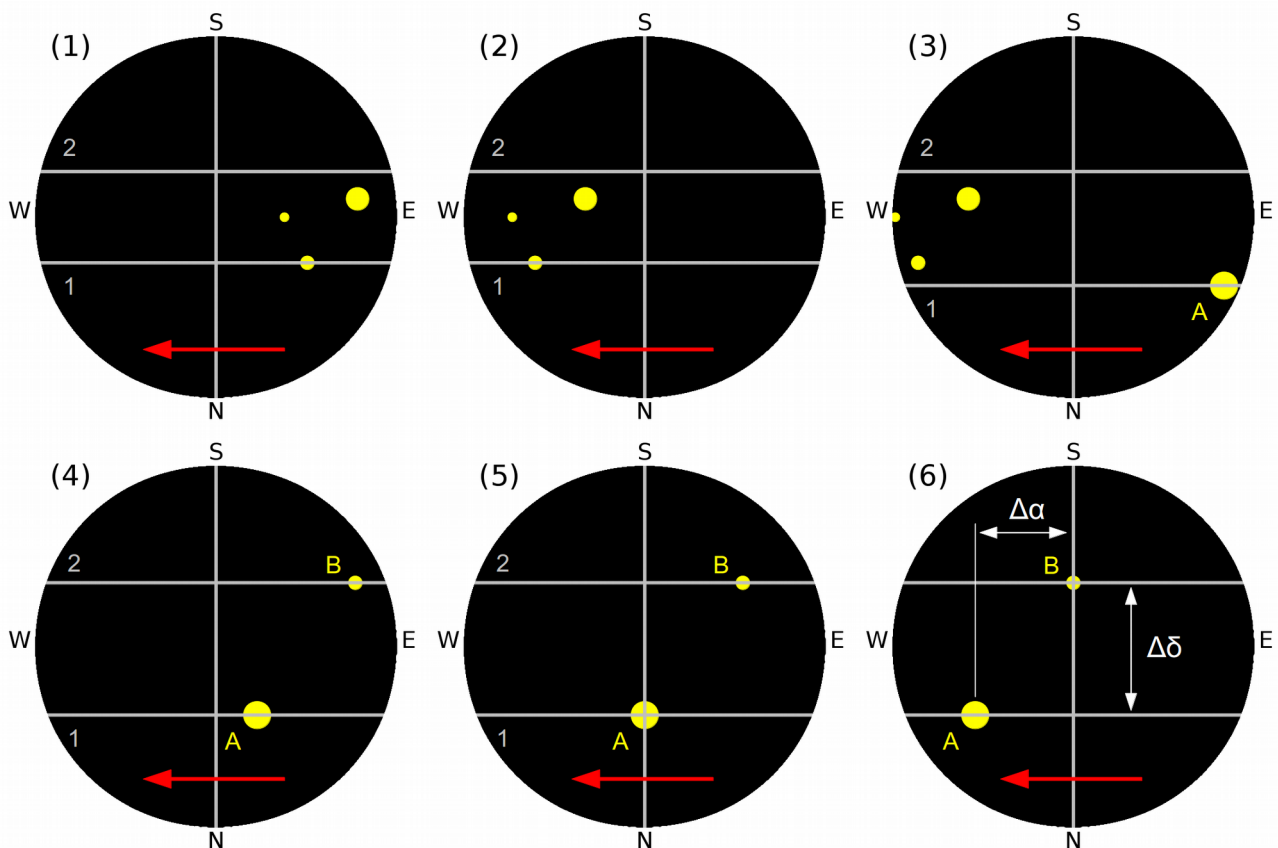


Figura 31: Procedimento per misurare la differenza di posizione tra due astri usando un micrometro a due fili mobili: (1) Si ruota il micrometro in modo che il filo fisso sia orientato in direzione nord-sud. A causa della rotazione diurna della volta celeste, se si tiene puntato il telescopio in una direzione fissa si vedono le stelle scorrere da est verso ovest, in direzione ortogonale rispetto al filo fisso, cioè parallelamente ai due fili mobili 1 e 2. (2) Il moto apparente delle stelle fisse può essere usato per verificare che i fili mobili siano orientati esattamente in direzione est-ovest. (3) Quando compare nel campo di vista la prima delle due stelle da misurare (A), si allinea su di essa uno dei fili mobili del micrometro. (4) Quando compare anche la seconda stella (B), si allinea su di essa l'altro filo mobile del micrometro. (5) Si misura il tempo del passaggio della prima stella attraverso il filo fisso (verticale). (6) Si misura il tempo del passaggio della seconda stella attraverso il filo fisso; la differenza tra i tempi di passaggio fornisce la differenza di ascensione retta $\Delta\alpha$ tra le due stelle, mentre la distanza tra i due fili mobili fornisce la differenza di declinazione $\Delta\delta$.

Micrometri che sfruttano il moto diurno

Sfruttando il movimento apparente della volta celeste dovuto alla rotazione della Terra attorno al proprio asse (il cosiddetto *moto diurno* del cielo) è possibile costruire dispositivi che misurano piccole distanze angolari senza utilizzare alcun elemento mobile (come fili, viti micrometriche o semi-lenti). La rotazione della volta celeste avviene con velocità così costante che è stata usata fin dall'antichità per la definizione del tempo; in realtà essa ha costituito l'orologio più preciso che l'uomo avesse a disposizione fino al 1935-40, cioè fino a quando l'introduzione degli orologi elettronici (prima al quarzo e poi atomici) ha permesso di evidenziare nel suo moto anomalie dell'ordine del millesimo di secondo. Questa regolarità offre la possibilità di usare una misura di tempo come sostituto di una misura angolare: se si mantiene un orologio regolato sul *tempo siderale locale*, cioè su una scala di tempo in cui la durata del giorno è pari al periodo di rotazione della Terra ri-

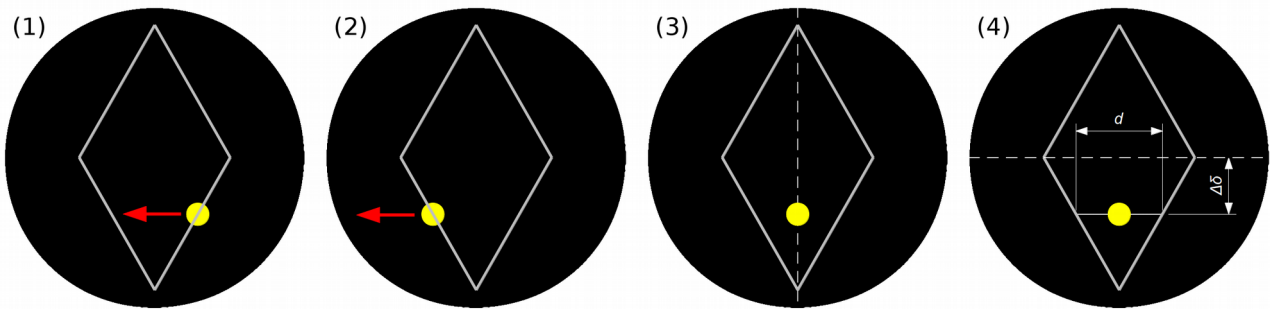


Figura 32: Procedimento per misurare la differenza di posizione tra due astri usando un reticolo a rombo: (1) Si misura il tempo t_1 del passaggio della stella attraverso il lato orientale (di ingresso) del rombo. (2) Si misura il tempo t_2 del passaggio della stella attraverso il lato di uscita dal rombo. (3) Il valore medio tra i tempi t_1 e t_2 è il tempo del passaggio attraverso la diagonale verticale del rombo, a cui fisicamente non corrisponde alcun filo, ma che svolge la funzione di linea di riferimento per la misura delle ascensioni rette, come il filo verticale del micrometro di figura 31. (4) Dalla differenza tra i tempi t_1 e t_2 si ottiene la larghezza d del rombo all’altezza a cui la stella lo ha attraversato; da questa, con un semplice calcolo, si ottiene la differenza di declinazione $\Delta\delta$ tra la stella e la diagonale orizzontale del rombo. Ripetendo la misura per stelle diverse (tenendo nel frattempo fisso il telescopio), si ottiene la loro differenza di coordinate.

petto alle stelle fisse⁵², e l’ora “zero” è l’istante del passaggio al meridiano locale del punto vernale⁵³, l’ora segnata dall’orologio nell’istante in cui un astro passa al meridiano è uguale alla sua ascensione retta. Come abbiamo già visto, questo è il modo in cui funziona lo strumento più importante dell’astrometria del Settecento, cioè il quadrante murale (figura 7), a cui in larga misura si devono i cataloghi stellari dell’epoca; tuttavia lo stesso principio può essere usato anche per la misura di piccoli angoli, cioè per la determinazione della posizione relativa di astri abbastanza vicini sulla volta celeste. Per questo scopo si può usare un micrometro filare, ruotando lo strumento in modo che il filo fisso ortogonale ai fili mobili (cioè quello che, nelle misurazioni di stelle doppie, serve a determinare l’angolo di posizione) sia orientato in direzione nord-sud, lungo un meridiano celeste. Tenendo fermo il telescopio nel corso della misura, per effetto della rotazione terrestre si vedono le stelle che attraversano il campo del telescopio in senso ortogonale a tale filo: le differenze tra i tempi con cui lo attraversano forniscono allora le differenze tra le loro ascensioni rette, mentre le differenze di declinazione possono essere determinate per mezzo dei fili mobili (figura 31).

Usando reticoli di forma opportuna è possibile anche eseguire misure di posizione relativa senza bisogno di alcun filo mobile. Ad esempio si può usare un reticolo a forma di rombo, con le diagonali orientate secondo la direzioni nord-sud ed est-ovest, e registrare i separatamente i tempi t_1 e t_2 del passaggio di una stella attraverso i due lati opposti del rombo (figura 32). Il valore medio tra i due

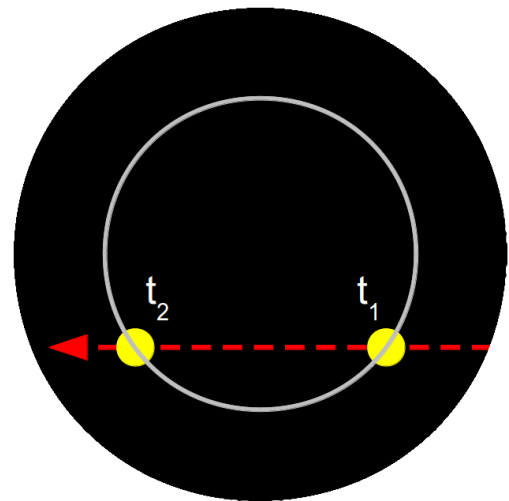


Figura 33: Schema di funzionamento di un micrometro anulare: le differenze di ascensione retta e declinazione tra stelle vicine si ricavano dai tempi di passaggio (t_1 e t_2) per il bordo del cerchio, con un procedimento simile a quello del micrometro a rombo.

52 A differenza del *giorno solare* usato per scopi civili, che dura per definizione 24 ore, la durata del giorno siderale è di $23^h 56^m 4^s.1$; la differenza tra i due periodi è dovuta al fatto che la posizione apparente del Sole varia per effetto del moto orbitale della Terra.

53 Vedi nota 5.

tempi $t_{\text{med}} = (t_1 + t_2)/2$ darà allora il tempo del passaggio attraverso la diagonale verticale del rombo (l'equivalente del tempo del passaggio attraverso il filo fisso verticale di figura 31): la differenza tra questi tempi t_{med} per stelle diverse darà quindi la differenza tra le loro ascensioni rette. Inoltre dalle differenze tra i tempi $\Delta t = t_2 - t_1$ per le due stelle si può ricavare la loro differenza di declinazione. Perché il sistema funzioni occorre che le diagonali del rombo siano orientate esattamente in direzione nord-sud ed est-ovest, un problema che non si pone se si usa un reticolo di forma circolare (figura 33). Per semplicità di costruzione, i reticoli romboidali o circolari erano solitamente realizzati incidendo con una sottile punta di diamante una lastra di vetro, piuttosto che con fili.

La velocità di rotazione della volta celeste è tale che una stella posta all'equatore si muove di 15" in un secondo. Anche se osservatori allenati potevano registrare i tempi dei passaggi con un'incertezza dell'ordine di 2-3 decimi di secondo, i micrometri romboidali e anulari non potevano competere in precisione con i micrometri filari o gli eliometri. D'altra parte essi erano in grado di misurare velocemente le posizioni di tutti gli oggetti contenuti in una certa regione del cielo, lasciandola scorrere davanti al telescopio mantenuto in posizione fissa; erano quindi utilizzati soprattutto per ricerche in cui la quantità di dati e l'efficienza erano più importanti della precisione, come nella compilazione di cataloghi stellari.

Il moto diurno delle stelle può anche essere usato per calibrare i micrometri filari: allontanando i due fili mobili di un certo numero di giri della vite micrometrica si può verificare a quale valore di separazione angolare corrispondono in base al tempo impiegato da una stella per passare da uno all'altro, mentre la direzione del moto della stella in direzione est-ovest fornisce un riferimento per la misura degli angoli di posizione.

Per una descrizione dei micrometri esposti nella galleria del Museo Astronomico rimandiamo alla scheda MusAB: [I micrometri dell'Osservatorio Astronomico di Brera](#).

Riferimenti bibliografici

- Enrico Bellone, *Galileo. Le opere e i giorni di una mente inquieta*, Le Scienze, Roma (2013; prima edizione 1998)
- Friedrich Wilhelm Bessel, [On the parallax of 61 Cygni](#), Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol. 4, 152-161 (1838)
- Giovanni Alfonso Borelli, [Theoricæ medicæ planetarum ex causis physicis deducta](#), Florentiæ, ex Typographia S. M. D. (1666)
- Tycho Brahe, [Astronomiæ instauratæ mechanica](#), Noribergæ, apud Levinum Hulsium (1602)
- Massimo Bucciattini, Michele Camerota, Franco Giudice, *Il telescopio di Galileo. Una storia europea*, Einaudi, Torino (2012)
- Allan Chapman, *Dividing the circle: the development of critical angular measurement in astronomy 1500-1850*, Ellis Horwood Limited (1990)
- Allan Chapman, [Jeremiah Horrocks, William Crabtree, and the Lancashire observations of the transit of Venus of 1639](#), in D. W. Kurtz (ed.), *Transits of Venus: New Views of the Solar System and Galaxy*, Proceedings of IAU Colloquium No. 196, Cambridge University Press, pp. 3-26 (2004)
- Albert Curtz, [Historia coelestis ex libris commentariis manuscriptis observationum vicennialium viri generosi Tichonis Brahe Dani](#), Augustæ Vindelicorum (Augsburg), apud Simonem Utzschneiderum (1666)
- Galileo Galilei, *Discorso al Serenissimo Don Cosimo II Gran Duca di Toscana intorno alle cose, che stanno in su l'acqua, o che in quella si muovono*, in [Edizione Nazionale delle opere di Galileo Galilei diretta da Antonio Favaro, vol. IV](#) (1894)

- Galileo Galilei, *Sidereus Nuncius*, edizione originale, Venetiis, apud Thomam Baglionum (1610)
- Galileo Galilei, *Sidereus Nuncius*, a cura di Andrea Battistini, traduzione di Maria Timpanaro Cardini, Marsilio, Venezia (1993)
- David Gill, voce *Micrometer* in *Encyclopædia Britannica. A dictionary of arts, sciences, and general literature, Ninth Edition, Vol. XVI*, Charles Scribner's Sons, New York, pp. 242-256 (1883)
- Gilberto Govi, *Della invenzione del micrometro per gli strumenti astronomici*, in *Bullettino di Bibliografia e di Storia delle Scienze Matematiche e Fisiche* pubblicato da B. Boncompagni, Roma, Tomo XX, pp. 607-622 (1887)
- Alfred Rupert Hall, *La Rivoluzione scientifica 1500/1800. La formazione dell'atteggiamento scientifico moderno*, Feltrinelli, Milano (1976)
- William Herschel, *Description of a Lamp-Micrometer, and the Method of using it*, Philosophical Transactions, No. 72, 163-172 (1782)
- Edward Singleton Holden, *Sir William Herschel: His Life and Works*, Scribner's, New York (1880)
- Robert Hooke, *A Description of an Instrument for dividing a Foot into many thousand parts, and thereby measuring the Diameters of Planets to a great exactness, &c. as it was promised*, Philosophical Transactions, No. 29, 541-544 (1667)
- Henry C. King, *The History of the Telescope*, Dover Publications, New York (2014; prima edizione 1955)
- Arthur Koestler, *I sonnambuli. Storia delle concezioni dell'universo*, Jaca Book, Milano (1982)
- Joseph-Jérôme Lefrançois de Lalande, *Astronomie, Tome Second*, chez Desaint & Saillant, Paris (1764)
- James Lequeux, *From Flamsteed to Piazzzi and Lalande: new standards in 18th century astrometry*, Astronomy & Astrophysics, vol. 567, A26 (2014)
- Francesco Ongaro, *L'ottica di Keplero: esattamente quattro secoli fa Keplero pubblicò la sua rivoluzionaria Dioptrice* (2011)
- William Pearson, *An introduction to practical astronomy: containing descriptions of the various instruments, that have been usefully employed in determining the places of the heavenly bodies, with an account of the methods of adjusting and using them*, Volume II, London (1829)
- Johann Adolf Repsold, *Zur Geschichte der astronomischen Messwerkzeuge von Purbach bis Reichenbach, 1450 bis 1830*, W. Engelmann, Leipzig (1908)
- Pietro Romano, *Le misure angolari di Galileo dei satelliti di Giove: analisi statistica e considerazioni didattiche*, in Atti del XLIX Congresso Nazionale AIF, pp. 58-69 (2010)
- Voula Saridakis, *Converging Elements in the Development of Late Seventeenth-Century Disciplinary Astronomy: Instrumentation, Education, Networks, and the Hevelius-Hooke Controversy*, PHD Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia (2001)
- James Short, *A Letter from Mr. James Short, F. R. S. to the right honourable the Earl of Macclesfield, President, concerning a Paper of the late Servington Savery, Esq; relating to his Invention of a new Micrometer*, Philosophical Transactions, No. 48, 165-178 (1753)
- Victor E. Thoren, *New Light on Tycho's Instruments*, Journal for the History of Astronomy, vol. 4, 25-45 (1973)
- Albert van Helden, *Galileo and the telescope*, in Albert Van Helden, Sven Dupré, Rob van Gent and Huib Zuidervaart (eds.), *The origins of the telescope*, KNAW Press, Amsterdam, pp. 182-201 (2010)

Frank Verbunt, Robert H. van Gent, *The Star Catalogue of Hevelius. Machine-readable version and comparison with the modern Hipparcos Catalogue*, Astronomy & Astrophysics, vol. 516, A29 (2010)

Fonti delle figure:

- (1) Brahe (1602), p. 24 del file PDF
- (2) Curtz (1666), Προλεγόμενος p. CXI (p. 140 del file PDF)
- (3) Brahe (1602), p. 12 del file PDF
- (4) Curtz (1666), Προλεγόμενος p. CXI (p. 140 del file PDF)
- (9) Galilei (1610), p. 19
- (10) <http://www.webalice.it/alessiacontarino/riv%20astro.htm>
- (12) Hooke (1667)
- (13) Repsold (1908), fig. 59 (p. 47)
- (14) Lalande (1764), pl. XVII, p. 870
- (16) <http://stars.astro.illinois.edu/sow/70oph.html>
- (17) Repsold (1908), fig. 106 (p. 71)
- (19) Repsold (1908), fig. 153 (p. 109)
- (20) Gill (1883), fig. 16 (p. 246) e fig. 17 (p. 247)
- (21) Herschel (1782)
- (22) Gill (1883), figg. 20 e 21 (p. 249)
- (27) Repsold (1908), fig. 109^a (p. 73)
- (29) Repsold (1908), fig. 109^b (p. 73)
- (30) Repsold (1908), fig. 154 (p. 110)