

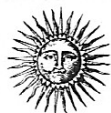
Atti del X Convegno SIA

SOCIETÀ ITALIANA DI ARCHEOASTRONOMIA

*Trinitapoli, Parco Archeologico degli Ipogei
22-23 Ottobre 2010*

a cura di

Elio Antonello



LA CITTÀ DEL SOLE

INDICE

Presentazione	p. 1
Elio Antonello, Vito F. Polcaro, Anna M. Tunzi, Mariangela Lo Zupone, <i>Buche cultuali e stelle</i>	3
Riccardo Balestrieri, <i>L'orientamento delle chiese romaniche in Liguria. I. Metodi</i>	15
Ettore A. Bianchi, <i>Storiografia e astronomia in Berosso da Babilonia (III secolo avanti Cristo)</i>	31
Enrico Calzolari, Vincenzo Di Benedetto, <i>L'allineamento equinoziale di 'Pian Brès' nel territorio di Andrate (Torino)</i>	49
Cristina Cåndito, <i>Strumenti per la misurazione della terra e del cielo tra XVI e XVII secolo</i>	59
Francesco Castaldi, <i>La precisione nelle coordinate astronomiche prima del telescopio</i>	71
Silvia Cernuti, <i>Sull'identificazione di asterismi e costellazioni</i>	85
Mario Codebò, Henry De Santis, <i>Indagine archeoastronomica relativa all'orientamento degli ingressi di alcune sepolture del periodo Hafit nel Sultanato di Oman</i>	95
Marina De Franceschini, Giuseppe Veneziano, <i>Archeoastronomia nella Villa Adriana di Tivoli</i>	105
Luciana De Rose, <i>Il volo della tartaruga</i>	121

Adriano Gaspani, <i>Criteri astronomicamente significativi nella costruzione delle cloighteach altomedioevali irlandesi</i>	133
Domenico Ienna, <i>Integrazione tra culture e apporti individuali nella denominazione mitopoietica 'globalizzata' di stelle e costellazioni</i>	155
Manuela Incerti, <i>Modelli e fonti astronomiche nel rinascimento ferrarese: la Certosa e il De Sphaera estense</i>	173
Nicoletta Lanciano, Jody Morellato, <i>Il regolo lunare di Palazzo Spada, Roma. Indagine su un errore</i>	187
Leonardo Magini, <i>The astronomical foundations of the Romulean calendar, its relationship with the Numan calendar and the slippage of the winter solstice: an hypothesis</i>	199
Vito Francesco Polcaro, <i>Alcor, la Volpe e il 'Signore che Uccide'</i>	207
Marcello Ranieri, <i>Le diagonali e gli orientamenti archeoastronomici</i>	213
Adriana Rossi, <i>Il rilievo della porta dello zodiaco</i>	227
Eva Spinazzé, <i>Spazio e luce nelle architetture sacre. L'orientazione delle chiese monastiche benedettine medioevali nel Veneto</i>	243
Maria Luisa Tuscano, <i>Riflessioni sulla valorizzazione museale degli Strumenti Astronomici extra moenia</i>	261

La precisione nelle coordinate astronomiche prima del telescopio

Francesco Castaldi

Gruppo Astrofili G. e A. Bernasconi Saronno (VA);

francesco.castaldi1@gmail.com

Abstract. Improvements in the field of star coordinates were always fundamental for any progress in astronomy, as the discovery of the equinox precession demonstrates in II century BC, when Hipparchus made some confrontations with preceding catalogues of stars. In II century AD Ptolemy in his *Almagest* built a mathematical cosmic system able to demonstrate how the movements of Sun, Moon and planets happen in the sky, having a catalogue of star's coordinates. It was updated for centuries, but not greatly improved as to accuracy, until the great works of Tycho Brahe in the final three decades of the sixteenth century. He made use of the same kind of instruments of the past, but, due to his personal contribution, improved their dimensions and mechanic reliability, so that he obtained measures of angles pushed to some minutes of arc by new alidade and goniometer. Achieving such precision, the real problem became the measurement of time, previously subject to untrustworthy mechanical clocks. The paper concludes with the construction of the first pendulum clock by C. Huygens, 1657, thanks to the application of Galileo's discovery of isochronism.

1. Introduzione

In astronomia, per qualsiasi scopo si studi la posizione di un corpo errante, occorre avere le coordinate delle stelle che fanno da sfondo ai suoi moti onde calcolarne le effemeridi. Anche una grande scoperta di due millenni fa, la precessione degli equinozi, ebbe origine da precedenti misurazioni di coordinate eclittiche di stelle. L'unico catalogo stellare giuntoci dall'antichità classica è quello di Claudio Tolomeo (II sec d.C.), inserito nel suo *Almagesto*: in totale sono definite in coordinate eclittiche (longitudine e latitudine) 1022 stelle, divise in 6 classi di magnitudine, comprese in 48 costellazioni immaginarie. Tolomeo racconta che, da un primo catalogo composto da Aristillo e Timocari nel IV secolo a.C., Ipparco, attorno al 130 a.C. grazie al riscontro (rispetto al *punto vernale* o

equinozio di primavera) delle aumentate longitudini di stelle comprese nella fascia zodiacale, percepì la precessione. Tolomeo, dopo altri 270 anni circa, attorno al 137 d.C. la calcolò pari a 1°/secolo. Dunque l'importanza dei cataloghi con le coordinate delle stelle emerge da sola.

2. Le misure degli antichi

Diversi studiosi affermano che Tolomeo si limitò ad aggiornare, in base alla sua precessione, il precedente catalogo di Ipparco (Evans 1987). Ricordiamo alcuni dei successivi cataloghi stellari. Il catalogo di al-Battani ridotto all'anno 882 d.C. soltanto per una parte delle stelle di ogni costellazione fra quelle di Tolomeo (Albategno [1903], Parte II, pp. 144-186); che fosse frutto di nuove osservazioni, è attestato anche dal più preciso valore di precessione che lui stesso calcolò in 1°/66 anni¹. Quello di Al-Sufi [1874], con coordinate ridotte a circa il 964 d.C., noto perché su una delle figure che lo accompagnano vi è indicata la *nebulosa* di Andromeda; ma non mancano riserve se verificò davvero le coordinate di tutte le stelle del suo catalogo. Strano a dirsi, al-Sufi muoveva le stesse critiche ad al-Battani. La precisione indicata si ferma ancora a 10', come per Tolomeo. A epoca 1251+ 5 mesi, data di ascesa al trono di Alfonso X di Castiglia, sono le *Tavole Alfonsine*. Dreyer (1980, p. 227) aggiunge: "Ulug Beg nipote di Tamerlano, attrasse numerosi dotti a Samarcanda e ivi costruì, attorno al 1420, un osservatorio dove furono preparate nuove tavole planetarie e un nuovo catalogo stellare, il primo dall'epoca di Tolomeo"; si tratta di 1017 stelle. Altri cataloghi riportarono solo correzioni precessionarie a quello di Tolomeo (Neugebauer 1975, p. 280), fino a Giorgio Valla, un erudito traduttore dal greco, che lo ricopiò senza correzioni "in quanto ciò ci avrebbe richiesto un tempo più lungo di quanto le nostre occupazioni potessero permettere" (Valla 1501). Copernico, per sua stessa ammissione, si limitò a sporadici controlli di stelle, affidandosi per il resto ai dati di Tolomeo con un'aggiunta precessionaria per il 1525.

Del sospetto su queste correzioni si era fatto portavoce Tycho Brahe in *Progymnasmata* (Brahe 1601; p. 273): "...Tolomeo, infatti, successore d'Ipparco, aggiunse solamente alle singole stelle l'avanzamento corrispondente al tempo trascorso fra lui e Ipparco, conservando il resto in tutte le misure d'Ipparco. Il ché è quanto parimenti fece Albategno dopo di lui. Anche quel grande riformatore della precedente generazione, Copernico, soddisfatto della descrizione delle stelle di Ipparco e Tolomeo,

¹ Neugebauer (1975), p. 288: "Ciò rese possibile un essenziale miglioramento nella determinazione della costante di precessione".

attribuì a esse indistintamente, in una sua prestabilita maniera, la precessione degli equinozi...” Quest’affermazione fu un punto di partenza per le polemiche, anche se Tolomeo era in grado, per capacità e disposizione di mezzi, di elaborare un catalogo da solo.

3. Tycho e la precisione

Sulle fortune del catalogo di Tycho Brahe, è interessante un commento del Dreyer (1913, p. XLVI): “Quasi per tutto il secolo XVII non ci fu, rispetto a quello di Tycho, un catalogo di stelle in cui trovarle indicate con maggiore accuratezza. In verità nel 1690 prese il suo posto il catalogo di Hevelius, un poco più accurato ed eseguito quasi con strumenti simili... Poi all’inizio del sec. XVIII, quando apparve il catalogo di Flamsteed, entrambi chiaramente furono messi da parte...” Nell’*Opera Omnia* curata dal Dreyer troviamo tre raccolte di Tycho: 1) Vol. 12, pp. 231-265: circa 750 stelle con le coordinate equatoriali ed eclittiche ridotte all’anno 1588 completo; tale raccolta vide la stampa solo in questa occasione, 1925; 2) Vol. 2, pp. 258-286; da *Progymnasmata*, pubblicata nel 1598, 777 stelle in coordinate eclittiche, ridotte all’anno 1600; la preparazione di questa opera, continuazione della precedente, era proseguita fino ai primi mesi del 1597, quando Tycho ormai stava per lasciare Uraniburgo; 3) Vol. 3, Parte 3^a, pp. 331-373; con sole coordinate eclittiche, non pubblicato Tycho vivente. Da notare che per diverse stelle sono indicate con precisione di coordinate eclittiche spinte al mezzo minuto primo (*semmissis*, ∫). Il progresso si misura su questi dettagli, anche se per le coordinate equatoriali ciò non compare.

Il lavoro di Tycho aveva dato una scossa agli astronomi di quei tempi tanto che vide la luce a Roma nel 1612 un *Catalogus* a opera del gesuita Christopher Grünberger, successore del noto padre Clavio al Collegio Romano (Grünberger 1612). Sulle 1225 stelle considerate, vi sono 767 del catalogo di Tycho, 218 di Francesco Pifféri e 240 di Clavio. Quest’ultimo inseriva nelle sue edizioni della *Sfera* del Sacrobosco il catalogo delle 1022 stelle di Tolomeo, evidenziando quelle da lui stesso ricontrollate, che già nella 3^a edizione del 1596 ammontavano a 139. Altro ragguaglio sul seguito che ebbe il catalogo di Tycho viene da un globo celeste di 676 mm di diametro, raro per la data che porta, del museo di Palazzo Spada, Roma, opera del celebre Jansoon Blaeu. Sotto un piccolo ritratto di Tycho, leggiamo una dedica: “Abbiamo qui espresso con la più ampia diligenza possibile l’organizzazione del cielo e delle stelle disposte in esso: e nel fissare i loro luoghi abbiamo seguito le tavole del celebre e veramente

nobile Tycho Brahe, un di nostro maestro; per l'indefesso lavoro e la somma preparazione, non solo i nostri contemporanei, ma tutti quanti nei secoli passati osarono ridurre a regola le stelle, a lui concedano volentieri la gloria in questa impresa... Guillelmus Jansonius. Anno 1616". Le coordinate sono fissate a epoca 1640, ogni grado dell'eclittica diviso in 3 parti, quindi con possibilità di cogliere archi di 20'. Inutile ricordare che, al termine delle sue *Tabulae Rudolphinae*, 1627, Kepler pose il *Catalogus stellarum fixarum mille*, catalogo di mille stelle fisse sulla base delle osservazioni di Tycho Brahe.

4. Strumentazione prima del cannocchiale

Grazie alle misure accurate di Brahe, Kepler ricavò le sue prime due leggi, ma non si aggiunge che le osservazioni non sarebbero bastate se Tycho non le avesse accompagnate con continui calcoli e altri riscontri, che comandava un centro di ricerca dove allenava gli osservatori e che si giovava di matematici. Questa era la sua cittadella scientifica nell'Isola di Hven, a nord di Copenhagen. Tycho, che aveva già dato dimostrazioni di costruttore e osservatore fin dagli anni trascorsi a Lipsia e ad Augusta, riorganizzò i metodi di osservazione usati fino ai suoi tempi, convinto che, senza l'incremento della precisione dei dati, l'astronomia sarebbe restata in mano ai matematici, Copernico compreso, abili a inventare nuove ipotesi pur di salvare i fenomeni. In effetti, lui stesso li imitò con il suo sistema cosmico per il mantenimento della Terra immobile al centro del tutto. Si dice che operò con più precisione degli altri perché ebbe la possibilità finanziaria di costruire strumenti più grandi di chiunque nel passato. Non basta, e non è vero: di mezzo c'è la maneggevolezza e la praticità che Tycho curò con genio e scrupolo, superando ogni altro al mondo. Quanto ai predecessori, per stabilire le coordinate delle stelle in longitudine e latitudine nell'*Almagesto*, Tolomeo descrive costruzione e uso dell'armilla eclittica (che chiama astrolabio) che era conosciuta circa dal IV sec. a.C. (Halma 1813; Libro 5, p. 284). Tycho la cita assieme alle migliorie che ne apporta, come leggiamo più avanti, ma critica in generale gli strumenti del passato perché incapaci di precisione²: "Ipparco e Tolomeo, e prima di loro Timocari, per definire i luoghi delle stelle, fecero uso innanzi tutto di due [generi di] strumenti: di certe Armille e del Parallattico o Triquetto. Misurando le altezze mediante questi ultimi, le longitudini e le latitudini mediante le armille, nessuno di questi strumenti fornisce la precisione

² Dreyer (1913) Vol. 2, p. 151, in *Progymnasmatum*, 1588.

richiesta... Se infatti erano piuttosto grandi tanto da misurare la grandezza del singolo minuto primo, risultavano meno utili a causa della loro mole, del peso e difficoltà al maneggio. Se, poi, erano piccoli e ridotti, per non essere di per sé difficoltosi, poco facendo per la divisione dei gradi, finivano in una insufficiente e minore esattezza”. Per gli stessi motivi scartava anche il *torquetum*, cioè quello che per noi è l’astrolabio degli arabi, proiezione della sfera armillare in piano.

5. Da Tycho la precisione strumentale

Così trasforma l’antico dispositivo, usato per cogliere il corpo celeste attraverso due traguardi posti all’estremità di un’asta, in un nuovo modello di alidada, descritto in *De Mundi Aetherei recentioribus phaenomenis*, 1588, e in modo più completo in *Mechanica*, 1598³. Il traguardo accanto all’occhio dell’osservatore è composto di due fessure parallele attraverso le quali cogliere l’astro in esame e portarlo, ruotando l’alidada, a sfiorare il secondo traguardo. Il progresso, che facilitò enormemente le osservazioni di Tycho e dei suoi aiutanti, consiste nella novità di questo, un cilindretto con diametro pari all’interasse e parallelo alle fessure del primo:

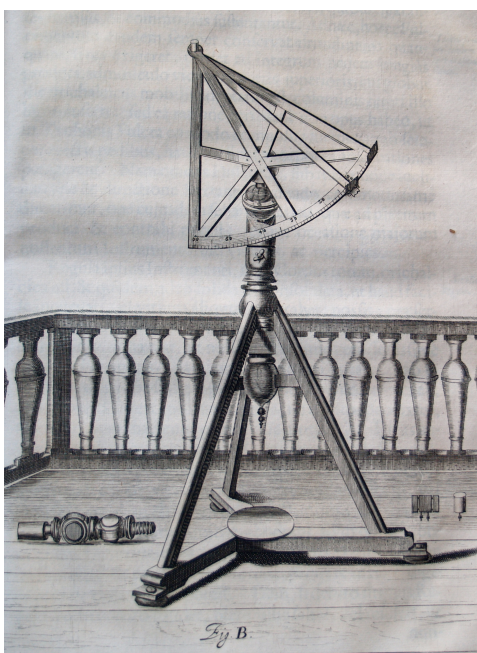


Fig. 1. Hevelius: sestante per la misura di angoli fra due astri.

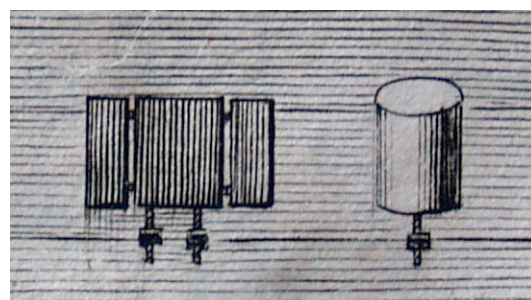


Fig. 2. Particolare da Figura 1.

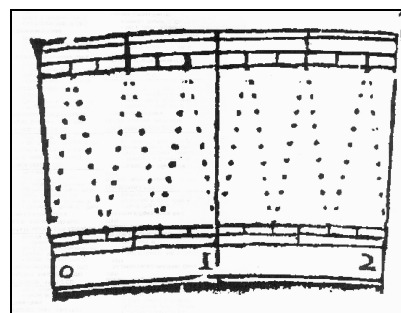


Fig. 3. Schema di goniometro.

“Da notare, inoltre, che in tutti i tipi di strumenti, quel traguardo che sta lontano dall’occhio, consta di una forma cilindrica, in modo da svolgere le

³ Dreyer (1913) Vol. 4, p. 372; Vol. 5, p. 154.

stesse funzioni [delle fenditure]... Così anche per le armille usiamo quel certo asse [di rotazione] rotondo e liscio in modo da poter fare da ogni parte la collimazione; infatti, sia i cilindretti, sia gli assi rotondi si dimostrano assai comodi...” Più avanti capiremo anche questa applicazione sulle armille. Intanto, per chiarezza vediamo in Figura 1 l’applicazione che ne fece Hevelius per misurare l’angolo fra due astri⁴. In Figura 2 abbiamo ingrandito i due traguardi visibili sul pavimento della Figura 1, da montare alle estremità dell’asta di fiducia così da completare l’alidada. Gli osservatori sono due, uno a un traguardo fissato al sestante per osservare una stella di coordinate note, l’altro al traguardo sull’alidada mobile. Entrambi hanno come secondo traguardo lo stesso cilindretto che funge anche da perno dell’alidada. I due iniziano cercando i due astri sul piano del sestante mediante spostamenti eseguiti sul suo perno baricentrico. Poi l’osservatore all’alidada fissa affina la collimazione con la stella di riferimento al modo di Tycho, mentre l’altro lo asseconda, però badando che l’astro che lo interessa rimanga sul piano del sestante. Al consenso del primo, il secondo, ruotando l’alidada, collima l’astro lungo la fessura di sinistra col profilo laterale sinistro del cilindretto; poi, spostato rapidamente l’occhio sulla fessura di destra, controlla che l’astro sfiori sulla destra il profilo del cilindretto. Ciò verificato, si legge sulla scala graduata del sestante l’angolo formato dall’alidada. Tycho scrive: “...infatti, le stelle con gran difficoltà si vedono, secondo il sistema di altri tempi, attraverso un foro, soprattutto attraverso quello che è [sul traguardo] più lontano, a meno che il foro non sia di ampiezza ragguardevole: e se si ammette ciò, si rischia di sbagliare di alquanti primi, per il fatto che si ignora se la collimazione avviene centralmente, il ché di certo mi meraviglia che non fosse avvertito dai predecessori e non fosse posto riparo a questo disagio in altro modo”. Oltre all’alidada, Tycho introduce in *Mechanica* il suo goniometro che dice derivato da quello descritto da Pedro Nunez nel *De crepusculis*, 1542, ma da lui ridotto in una forma ben più pratica⁵. Spiegazione di Tycho (Figura 3, con ogni arco 0-1, 1-2 pari a 1°): “Dunque il principio della divisione avente punti trasversali è del tipo come esprime questa figura, nella quale singoli 10’ mediante delle lineette sono marcati in dieci spazi uguali separati da punti, e così l’asta di fiducia [l’alidada] passando nell’osservazione fra uno qualunque di questi designa proprio il minuto primo come si voleva o una determinata sua parte, in

⁴ Hevelius (1673), Fig. B, dopo p. 102.

⁵ Un goniometro ticoniano di plastica si acquista nei negozi di strumenti da disegno.

funzione di questo o quel punto che si intuisce distanziarsi. In effetti imparai ciò nell'adolescenza a Lipsia..."

Il più celebre degli apparati resta il *Quadrans muralis* di Figura 4, uno strumento fisso per misure di altezze di corpi celesti in transito al meridiano di Uraniburg. Tycho dichiara la precisione entro 1/6 di primo d'arco, con possibilità di scendere ai 5 secondi d'arco. Il quarto di cerchio con raggio di quasi 5 cubiti, circa 2.2 m, (graduato secondo il goniometro ticoniano di Figura 3) è nel piano del meridiano locale. Su un muro a esso perpendicolare è ricavata una finestrella munita di un cilindretto orizzontale come traguardo. Compagno quattro personaggi: 1) Tycho stesso indica con la mano destra l'appressarsi dentro la finestrella di un astro, già annotato su un libro che tiene sotto la sinistra; 2) l'osservatore, in F, riguarda l'astro e legge l'altezza sul quarto di cerchio; 3) l'addetto agli orologi alza la candela e legge i tempi dell'osservazione; 4) uno scrivano per le registrazioni.

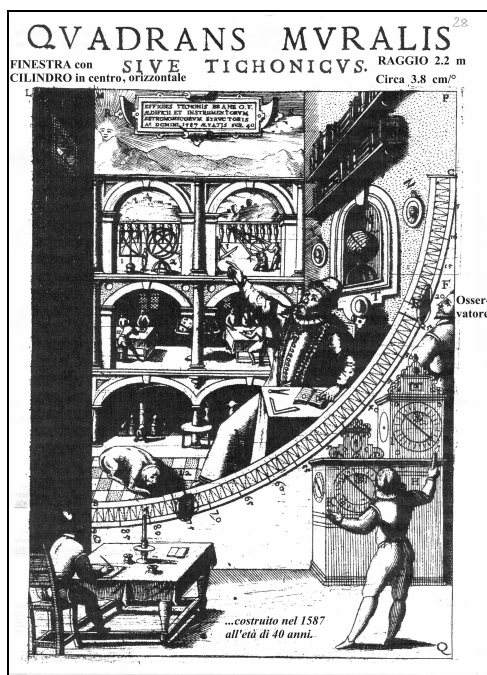


Fig. 4. Strumento dei passaggi sul meridiano locale.

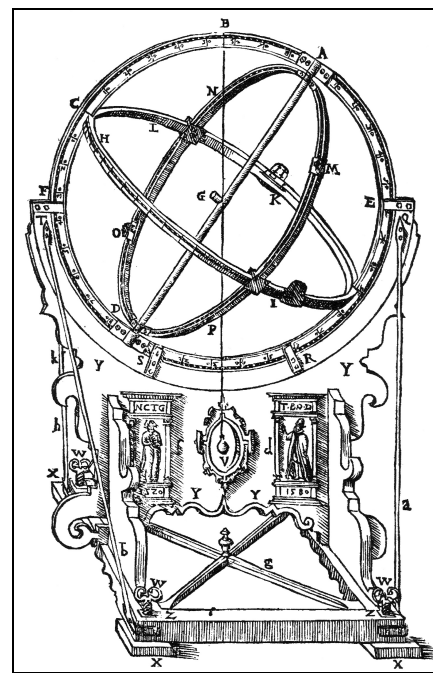


Fig. 5. Armilla equatoriale su asse rotante.

A p. 53 di *Mechanica* Tycho scrive che ad apparati quali quadranti, sestanti, ecc., fino a strumenti di parallasse spettano le misure di altezze con l'azimut. Però, con questi dati si dovevano poi fare calcoli complicati per ottenere le coordinate eclittiche ed equatoriali che, invece, apposite armille danno con lettura diretta. Così passa a schemi da lui realizzati sia per l'armilla equatoriale, sia per quella eclittica o zodiacale: proprio a

quest'ultima apportò una decisiva semplificazione perché, applicando all'osservazione i dispositivi di Figura 2 nel modo che vedremo, calò da 5 a 4 i cerchi rispetto a Tolomeo e ne rese più agevole l'uso. Come esempio più facilmente comprensibile prendiamo dei due strumenti il primo, definito *Armillae Aequatoriae*, con diametro pari a 4 cubiti $\cong 1.76$ m (Figura 5). E' composto di soli tre cerchi ovvero è un'armilla composta di tre armille, di cui soltanto una è girevole.

Scriva Tycho: “Escogitammo pertanto una certa Armilla Equatoriale che, predisposta in equilibrio sull'asse dei poli del mondo [AD], da qui in nessuna parte per effetto del suo peso o per rotazione poteva essere smossa o spostata dall'esatto tracciato fuori dal piano dei cerchi che la rappresentano”. Si inizia dall'armilla esterna fissa: “La prima e più grande AESF, che contiene e sostiene le altre, funge da Meridiano: ha diametro di 4 cubiti buoni, da cui stimare le altre interne e al cui piano si debbono disporre e mettere in regola”. Tycho spiega come ottenere le coordinate equatoriali. “Accanto ad A e, al capo opposto, presso D si ha un certo asse (come ho detto) cilindrico e ben fatto, ruotante assieme all'armilla interna [DONMP] che serve alla misura delle declinazioni; a metà dell'asse (che è anche centro di ogni armilla) porta infisso presso G in senso perpendicolare un cilindro, di pari diametro a quello dell'asse stesso”. Questa armilla scorre di 180° nei due sensi, rispetto al cerchio equatoriale fisso HLKI, fra 2 punti d'intersezione e per ogni quadrante in cui è suddivisa porta un traguardo scorrevole, come M e O, con le fenditure sempre parallele alle superfici laterali del cilindretto in G. “Poi, l'altra armilla trasversale, che dissi fatta per la funzione di Equatore, si mostra in HLKI: essa è poi fissa in due opposte posizioni nel suddetto Meridiano in C e nel punto suo diametrale e gli sta assieme formando un angolo retto e resta bloccata” [sul cerchio meridiano]. Anche il cerchio equatoriale è graduato con cura e porta dei traguardi scorrevoli, K e I, per ogni quarto di cerchio. Tycho elogia la solidità delle sue armille graduate rivestite di ottone solo all'esterno per non pesare troppo, ma con gli interni composti di legni diversi incollati insieme per darne stabilità. Poi spiega: “L'uso di questo strumento sta nell'osservazione sia di declinazioni, sia di AR degli astri, come ho detto. Infatti, sull'armilla rotante DNMP, i suoi traguardi vengono spostati avanti e indietro verso l'astro desiderato mediante il suo asse, finché in senso parallelo quella certa stella sia allineata vicino al cilindro G sia sopra che sotto: e allora proprio il traguardo mostra la richiesta declinazione sulla lamina di ottone esterna in corrispondenza delle divisioni. Sull'altra [armilla], poi, si sposta trasversalmente un

opportuno traguardo [K o I] su una qualche stella, di cui è già ben nota l'AR; e un restante traguardo [I o K], particolarmente comodo, tramite un altro osservatore (infatti occorre che siano due), viene spostato su una stella desiderata finché anch'essa si osservi ai due bordi all'asse dello strumento. Dopo si determini l'arco compreso dai due traguardi, il quale mostra fra queste stelle la differenza di AR; e questa, aggiunta o sottratta all'AR della stella nota, a seconda del caso, mostra l'AR della [stella] prima ignota. Idem può farsi se si blocca l'armilla delle declinazioni in corrispondenza dell'AR nota”.

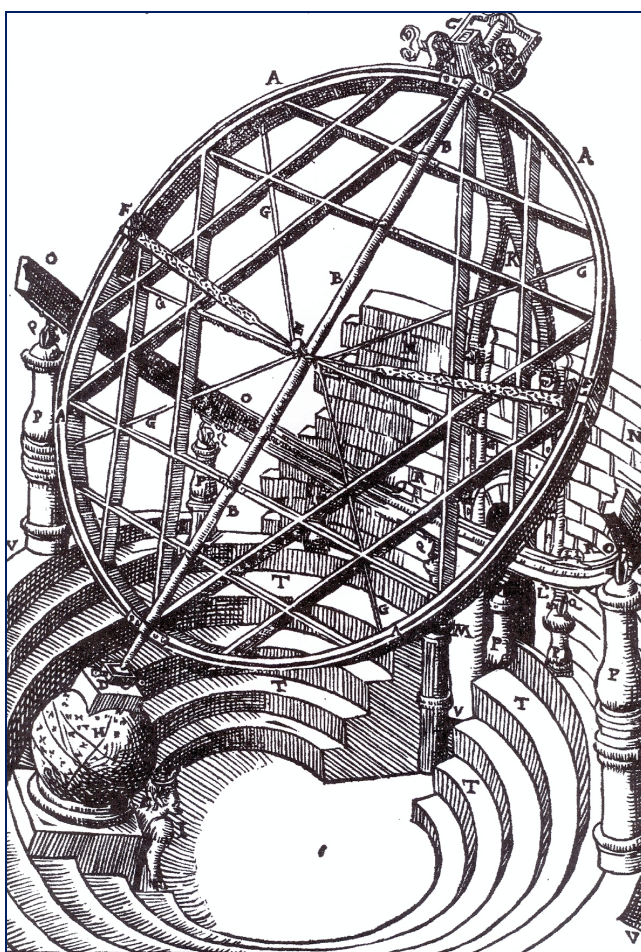


Fig. 6. *Armillae maximae*: l'appoggio inferiore D all'asse del mondo BBB fu posato l'11 dicembre 1584.

dell'asse, ruotano nei due sensi due aste di ottone EF [alidade]. Vicino a F sulla superficie le armille portano dei traguardi per alidade con fessure di osservazione parallele al cilindro stesso”. Rammenta i tiranti per tenere salda la struttura, mentre viene ruotata attorno all'asse B, e l'appoggio superiore con una grossa vite per regolare l'asse esattamente parallelo all'asse del mondo. Poi: “La seconda armilla [di AR] semicircolare

E' importante capire l'uso dell'armilla di Figura 5 (con i secondi traguardi rappresentati dal cilindretto G per la declinazione e dall'asse cilindrico intero per l'AR) perché da essa deriva lo strumento reputato più ardito, la *Armillae Aequatoriae Maximae* di Figura 6. Spiega Tycho: “Le lettere A indicano l'armilla più grande [di declinazione] che, fatta di lamine di ottone in ogni sua parte, ha un diametro di 7 cubiti [poco più di 3 m]. Pertanto il grado è così ampio che il singolo minuto si divide in 4 parti. Il suo asse [di rotazione] B fatto di acciaio è arrotondato in modo eccellente in ogni sua parte: in diametro è di circa tre digiti [8 cm?] con l'interno però cavo, affinché non danneggi per il peso; a esso circa in mezzeria è applicato un cilindretto liscio [E] di ottone, attorno al quale, in prossimità

passante per i punti O è da intendersi che sia sostenuta immobile sul piano equatoriale da 8 colonnette di pietra indicate da P mediante altrettanti adatti blocchi di ferro che la accolgano e la tengano in linea, tanto da farle descrivere un esatto semicerchio attorno al centro dell'asse e oltre a ciò la tengano inclinata immobile secondo il piano equatoriale. Essa è poi del tutto rivestita di ottone e ha 9 cubiti di diametro: pertanto è dotata di minutissime suddivisioni anche più della stessa armilla" [di declinazione]. Per agevolare le osservazioni su dei gradini si può camminare fra le due armille. La parte riguardante l'impiego è di estremo interesse. "Il suo utilizzo, come nell'armilla circolare rotante, [vista in Figura 5] consiste nel misurare le declinazioni [con una delle alidade] muovendo i traguardi in F e collimando l'astro da entrambe le parti attorno al cilindro E. ...Ma questa [misura] può essere ripetuta, cioè con l'altra alidada, ruotando l'armilla di modo che anche la parte opposta venga verso l'osservatore: così viene controllata due volte la declinazione della stella che deve essere la stessa in entrambi i casi". In diversi modi viene utile l'armilla fissa: "Sulla seconda semicircolare si muove il suo traguardo accanto a R, fino a ch  l'astro da osservare si scorge attraverso le sue fessure attorno all'asse B da ambo le parti. Allora infatti lo stesso traguardo mostra la distanza equatoriale dell'astro dal Meridiano proprio sull'armilla semicircolare, da contare sia verso est, sia verso ovest. E da qui, dal luogo noto di una stella e del Sole, si pu  conoscere con la massima esattezza l'istante del tempo". Per esempio, trovata l'AR di un pianeta, per conoscere il tempo di osservazione si controlla l'AR di una stella nota rispetto a quella gi  nota del Sole in quel giorno. "Se poi c'  da cercare l'AR di una qualche stella, un osservatore deve dirigere uno dei traguardi in una stella che gli sia nota [di coordinate]. Un secondo osservatore allora diriga il restante traguardo del pari su un'altra di cui si cerca l'AR, cosicch  entrambe le stelle vengono osservate attorno allo stesso asse [come 2  traguardo] attraverso le fessure dei traguardi proprio nello stesso istante. Infatti l'arco cos  delimitato da ciascun traguardo comprende allora la loro differenza in AR, dalla quale si ottiene l'AR cercata, come indicato in precedenza". E per maggiori spiegazioni Tycho rimanda al suo *Epistolarum Astronomicarum Libri* [1596] (p. 246ss). E, infatti, leggiamo qualche riferimento significativo per l'argomento che trattiamo di seguito⁶: "...anche il tempo equatoriale della distanza delle stelle dal Meridiano pu  essere misurato con precisione, per i cui valori si trovano gli esattissimi istanti delle

⁶ Dreyer (1913) Vol. 6, da p. 276.

osservazioni e si correggono gli orologi, quando occorre, sia in base al Sole che alle stelle, sia che stiano sul Meridiano, sia al di fuori”.

6. Precisione strumentale vs misura del tempo

L'ultima frase ci introduce alle rimanenti difficoltà: Tycho era giunto al massimo di precisione raggiungibile per osservazioni a occhio nudo, ma proprio questa capacità aveva accresciuto una nuova esigenza. Percorrendo gli appunti sulle osservazioni (*Opera Omnia*, Vol. 10, 11, 12, 13) emerge la difficoltà rappresentata dall'istante da assegnare a ciascuna operazione. Nel Vol. 2, *Progimnasmatum, Pars Prima*, p. 156, c'è il commento sulla grave mancanza di orologi abbastanza precisi. Sa bene che basta un errore di 4 secondi di tempo per sbagliare di 1 primo d'arco, per cui ne discusse a lungo col Principe d'Assia e nell'*Epistolarum Astronomicarum Libri* illustra cosa tentare, ma sa che gli orologi dei suoi tempi sono inaffidabili perché, privi di un meccanismo isocrono, sono soggetti alle variazioni di temperatura, agli attriti, nonché al peso variabile dei cavi di sostegno dei contrappesi che danno la forza motrice ai meccanismi, ecc. Nel Vol. 10 dell'*Opera Omnia* i tempi di osservazione fino al 1576 sono sempre vaghi e, da citazioni di gnomoni, traspare l'uso di orologi solari per correggere i tempi di osservazione. Poi, in occasione dell'eclissi totale di Luna del 2 aprile 1577, precisa, pag. 46: “Di sera subito dopo il tramonto del ☉ [Sole] osservai con diligenza l'eclissi di Luna sia mediante un orologio molto corretto che portava i singoli minuti, sia mediante l'altezza della Luna. Avevo in effetti corretto l'orologio in accordo all'altezza del Sole vicino al tramonto ...”, e fornisce i dati ottenuti. Da notare che Tycho era già intento a costruire Uraniborg. Le osservazioni degli anni seguenti sono un continuo di correzioni o di rifiuti dei lavori di notti precedenti. Dal 1578 Tycho comincia a correggere gli errori degli orologi con due transiti successivi del Sole in meridiano, in proporzione all'istante delle osservazioni fatte. Quasi sempre emergono molti minuti primi di divario dell'orologio, salvo pochi casi: come per il 23 ottobre che specifica “*saltem 50 secundis*”, cioè “per lo meno 50 secondi”. Quei lunghi anni per Tycho furono una lotta coronata da affinamenti e migliorie, ma senza soluzione, anche se armille e stelle giunsero in suo aiuto per fornire correzioni plausibili.

Il mondo ebbe notizia della legge di isocronismo del pendolo dal *Dialogo* di Galileo: “... il medesimo pendolo fa le sue reciprocazioni sempre sotto tempi uguali, siano quelle lunghissime o brevissime; cioè rimuovasi il pendolo assaissimo o pochissimo dal perpendicolo; e se pur

non sono del tutto eguali, son elleno insensibilmente differenti, come l'esperienza vi può mostrare..."⁷. Pubblicamente Galileo riaffermò il principio in *Discorsi e dimostrazioni matematiche*, 1638⁸. In effetti il primo biografo, Vincenzo Viviani, narra la vicenda di Galileo in altro modo⁹: "In questo mentre con la sagacità del suo ingegno inventò quella semplicissima e regolata misura del tempo per mezzo del pendulo, non prima d'alcun altro avvertita, pigliando occasione d'osservarla [1583] dal moto d'una lampada, mentr'era un giorno nel Duomo di Pisa ... e fu il primo che l'applicasse alle osservazioni celesti, con incredibile acquisto nell'astronomia e geografia". Tralasciamo di domandarci quali furono gli 'acquisti nell'astronomia' di Galileo, mentre non abbiamo dubbi sugli acquisti degli astronomi quando finalmente disposero di orologi di precisione. Una volta rivelata la scoperta, diversi si misero al lavoro e ne abbiamo notizia dall'*Almagestum Novum*, 1651, dove G.B. Riccioli racconta degli esperimenti con pendoli di diversa lunghezza e per tempi lunghi, ma senza l'automatismo dell'orologio (Riccioli 1651; Liber II, p. 84ss): "E allorché si avvicina alla quiete e descrive un arco breve, poco prima che diventi verticale, delicatamente con la mano si prende e lo si tira in su lungo lo stesso piano, e subito senza alcun indugio fra la presa e la trazione completa si lascia andare; sarà in grado di proseguire il suo movimento anche per tutto un giorno, di modo che questo diventa atto a contare il tempo con esattezza. Ma occorre grande destrezza e molto allenamento preventivo". Già Galileo aveva proposto questo esperimento nel 1639 al suo corrispondente G.B. Baliani per misurare il tempo di discesa di una sfera lungo un canale¹⁰: "Ciò otterremo dalla ammirabile proprietà del pendolo che è di fare tutte le sue vibrazioni, grandi o piccole, sotto tempi eguali. Si ricerca, pro una vice tantum, che dua, tre o quattro amici curiosi e pazienti, havendo appostata una stella fissa che risponda contro a qualche segno stabile, preso un pendolo di qualsivoglia lunghezza, si vadano numerando le sue vibrazioni per tutto il tempo del ritorno della medesima fissa al primo luogo; e questo sarà il numero delle vibrazioni delle 24 hore". Non sappiamo se Baliani trovò questi amici, sappiamo che li trovò Riccioli "... come testimoni e aiutanti, i padri F.M. Grimaldi e F. Zeno, molto esercitati allo scopo, per tre notti...".

⁷ Galilei [1890-1909] VII, p. 253, p. 257.

⁸ Galilei [1890-1909] VIII, p. 128).

⁹ Galilei [1890-1909] XIX, p. 603; *Racconto storico di V. Viviani*, Lettera a Leopoldo di Toscana 29/4/1654.

¹⁰ Galilei [1890-1909] XVIII, *Carteggio 1639-42*, Lettera 1/8/1639, p. 76.

giovandosi di transiti successivi in meridiano di Spiga e Arturo. Oltre all'isocronismo, a pag. 86 riporta che, indipendentemente dal peso applicato, pendoli di diversa lunghezza l_1 e l_2 stanno in rapporto fra loro pari al rapporto dei quadrati dei loro periodi: $l_1/l_2 = T_1^2/T_2^2$.

Nel 1656 Christiaan Huygens è all'opera per automatizzare un orologio assoggettato a un peso oscillante in capo a una verga rigida di rame, come validamente sostenuto da Galileo¹¹. E' consapevole che in Europa sono già diversi i tentativi più o meno validi e nel 1658 si decide a pubblicare a L'Aia, *Horologium*, che è la spiegazione di quanto realizzato in diversi esemplari. Così a lui si deve l'invenzione di questa macchina automatica, mentre, fra le precisazioni, dice di essersi giovato del contributo di un artigiano esperto, Salomon Coster. Grande fu la gratitudine di tutti e degli astronomi in particolare. Fra i primi Johannes Hevelius che si ritrae al lavoro con un suo quadrante (Figura 7)¹². Su una parete compaiono due orologi, uno dei quali a pendolo. La sua opinione sui precedenti orologi

meccanici era:

“Da qui è assolutamente chiaro che né per Tycho, né per noi suoi successori, in alcun modo si sono potuti confrontare orologi tali che mostrassero e mantenessero in ogni maniera l'uguaglianza del tempo ... A dire il vero, non potei mai trovare alcun orologio, qualunque fosse l'artificio di cui era fornito, cioè che anche utilizzasse un duplice bilanciere, che evitasse completamente tutte

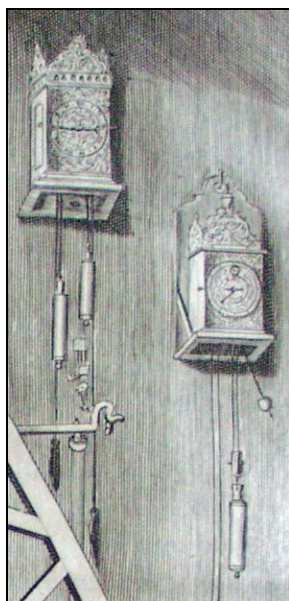
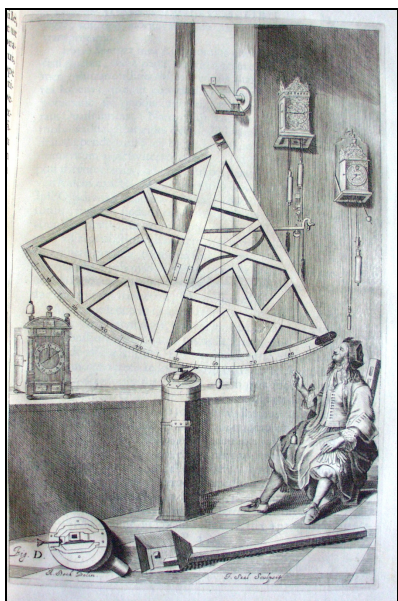


Fig. 7. Hevelius e i suoi orologi.

le anomalie. Ma accadde un evento: Dunque circa nel 1640, imparai dal Dialogo sul Sistema del Mondo [edizione in latino del 1637] dell'ingegnossissimo Galileo de' Galilei, che le oscillazioni di un corpo verticale, sia grandi che piccole, sempre accadono con uguale frequenza...” e che lo stesso fenomeno vale per pendoli di diverse lunghezze, “... cosicché si possono determinare con la massima certezza e

¹¹ Huygens (1932, Tome XVII); per i punti dove Galileo è affermato scopritore dell'isocronismo del pendolo vedere la p. 3 e 4 dell'*Avertissement*.

¹² Hevelius (1673), Fig. D p. 114.

precisione gl'intervalli di tempo"¹³. Hevelius stava facendo adattare un dispositivo a un pendolo (dove in passato aveva contato le oscillazioni) dando l'incarico a un artigiano W. Gunther che riuscì a produrre due orologi abbastanza validi, tanto che Hevelius ne aveva offerto uno al re di Polonia in sosta a Danzica; nel frattempo gli era giunta la notizia "... che il celeberrimo e veramente ingegnoso C. Huygens nel 1657 aveva inventato simili orologi con pari felicissimo ardimento e che da poco, cioè nel 1658, con grande giovamento per gli studi, lo aveva divulgato; di ciò me ne rallegro al massimo grado". Per finire, Huygens invia a settembre 1658 un suo esemplare a Hevelius e questi gli riconosce l'invenzione. Ci piace pensare che sia quello che vediamo nel particolare di Figura 7.

Bibliografia

- Albategno [1903], *Opus astronomicum (...) latine versum a C.A. Nallino*, Hoepli, Milano, 1903-1907.
- Al-Sufi [1874] *Description des étoiles fixes composée au milieu du dixième siècle de notre ère. Avec des notes par H.C.F.C. Schjellerup*, S. Pietroburgo.
- Brahe T. (1602) *Astronomiae instauratae progymnasmata*, (opera postuma).
- Dreyer J.L.E. (1913-1928) *Tychonis Brahe Dani Opera Omnia*, Copenhagen; Vol. I, *Prolegomena Editoris*.
- Dreyer J.L.E. (1980) *Storia dell'astronomia da Talete a Keplero*, traduzione di L. Sosio, Feltrinelli Ed., Milano; *Editio Princeps* 1906.
- Evans J. (1987), *On the origin of the Ptolemaic star catalogue; part 1*, Journal for the History of Astronomy 18, pp. 155-172.
- Galilei G. [1890-1909] *Le Opere. Edizione Nazionale*, dir. Antonio Favaro, Ed. Barbera, Firenze.
- Grünberger C. (1612) *Catalogus veteres affixarum longitudes ac latitudes conferens cum novis*, Roma.
- Halma N.B. (1813) *Composition mathématique de Claude Ptolémée*, Paris.
- Hevelius J. (1673) *Machinae Coelestis pars prior*, Danzica.
- Huygens C. [1932] *Œuvres complètes*, Tome XVII, La Haye.
- Neugebauer O. (1975) *A history of ancient mathematical astronomy*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Riccioli G.B. (1651) *Almagestum novum*, Bologna.
- Valla G. (1501) *De expetendis et fugiendis rebus*, vol. I, Roma.

¹³ Hevelius (1673), pp. 363ss.