ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Corso di Laurea in Fisica

L'ASTRONOMIA TOLEMAICA E GLI STRUMENTI OSSERVATIVI DESCRITTI NELL'ALMAGESTO

Relatore:
Prof. EUGENIO BERTOZZI

Presentata da:
VERONICA ILARI

Anno Accademico 2018 – 2019

Dedicato ai miei genitori

per la loro costante dedizione

nel vedermi felice

Non so nulla con certezza,

ma la vista delle stelle mi fa sognare

[Vincent Van Gogh]

Indice

Introduzione ... 1

Capitolo 1
I predecessori greci di Tolomeo ... 3

1.1 I filosofi presocratici fino ad Aristotele: le sfere celesti ... 3

1.2 L'astronomia ellenistica fino ad Apollonio: genesi dei modelli eccentrico ed epicicloidale ... 5

1.3 Ipparco ... 9

Capitolo 2
L'*Almagesto* di Tolomeo: teorie planetarie e strumenti osservativi ... 18

2.1 La vita e il lavoro di Tolomeo ... 18
- 2.1.1 La diffusione dell'astronomia tolemaica fino al XV secolo ... 19
- 2.1.2 La stampa dell'*Almagesto* ... 19

2.2 L'*Almagesto*: struttura e teorie planetarie ... 21
- 2.2.1 La struttura dell'*Almagesto* ... 22
  - 2.2.1.1 Libri I e II: la matematica e l'astronomia sferica come prerequisiti per lo studio della teoria planetaria ... 23
  - 2.2.1.2 Libri III, IV e V (capitoli 1-10): le teorie del moto del Sole e della Luna ... 24
  - 2.2.1.3 Libro V (capitoli 11-19): la teoria della parallasse ... 24
  - 2.2.1.4 Libro VI: la teoria delle eclissi ... 26
  - 2.2.1.5 Libri VII e VIII: le stelle fisse ... 27
  - 2.2.1.6 Libri IX-XIII: le teorie del moto dei cinque pianeti ... 32
- 2.2.2 Le teorie tolemaiche dei pianeti ... 32
  - 2.2.2.1 Focus Libro III: la teoria solare ... 32
  - 2.2.2.2 Focus Libri IV e V (capitoli 1-10): la teoria lunare ... 34
  - 2.2.2.3 Focus Libri IX-XIII: la teoria dei cinque pianeti minori ... 37
    - 2.2.2.3.1 Teoria del moto in longitudine dei cinque pianeti (Libri IX-XI) ... 38
    - 2.2.2.3.2 Moti retrogradi ed elongazioni massime (Libro XII) ... 41
    - 2.2.2.3.3 Teoria del moto in latitudine dei cinque pianeti (Libro XIII) ... 41

2.3 Strumenti osservativi descritti nell'*Almagesto* ... 45
- 2.3.1 Osservazione del Sole ... 46
  - 2.3.1.1 L'armilla meridiana ... 46
  - 2.3.1.2 Il plinto ... 50
  - 2.3.1.3 Parametri ricavati da Tolomeo dalle osservazioni del Sole ... 52
  - 2.3.1.4 L'armilla equatoriale ... 53
- 2.3.2 Osservazione della Luna ... 55
  - 2.3.2.1 L'astrolabio armillare ... 56
  - 2.3.2.2 Il triquetro ... 61
  - 2.3.2.3 La diottra di Ipparco ... 65
- 2.3.3 Osservazione delle stelle fisse e dei pianeti ... 66

Capitolo 3
Ancora sugli strumenti osservativi dell'*Almagesto*: descrizioni degli strumenti di autori successivi e determinazione della linea meridiana 67

3.1 Caratteristiche e metodi osservativi degli strumenti di Tolomeo descritti dai commentatori dell'*Almagesto* e da alcuni autori successivi 67
3.1.1 Armilla meridiana 67
3.1.2 Plinto 68
3.1.3 L'armilla equatoriale 71
3.1.4 L'astrolabio armillare 77
3.1.5 Il triquetro 79
3.1.6 La diottra di Ipparco 80

3.2 Determinazione della linea meridiana 82

Capitolo 4
Conclusioni 86

4.1 Osservazioni sulle teorie planetarie dell'*Almagesto* 86
4.2 Lavori astronomici minori di Tolomeo: le *Tavole Manuali* e le *Ipotesi Planetarie* 88

Appendice A 91

Appendice B 97

Bibliografia 99

Introduzione

Nel presente lavoro di tesi si parla della più importante opera astronomica di Tolomeo, l'*Almagesto*, rivolgendo una particolare attenzione agli strumenti osservativi in essa descritti e utilizzati dall'astronomo per corroborare le varie teorie planetarie. Inizialmente, sono riassunte le principali nozioni astronomiche acquisite dai predecessori greci di Tolomeo, a partire dalle speculazioni cosmologiche dei filosofi pre-socratici fino alle speculazioni più quantitative, interessate ad escogitare modelli geometrici che replicassero le osservazioni. Successivamente, vengono integrate le descrizioni degli strumenti astronomici osservativi, presentati nell'*Almagesto*, con le informazioni dei commentatori all'opera, Pappo, Teone e Proclo, e di alcuni astronomi e autori secondari successivi.
La tesi si articola in quattro capitoli.

Nel capitolo 1, dopo aver accennato al ruolo pratico dell'astronomia nell'antica Grecia, viene mostrata la sua trasformazione da una scienza teorico-descrittiva, basata sulla geometria, in una scienza di tipo predittivo, dopo la fusione dei diversi approcci greco e babilonese nel periodo ellenistico. Con la diffusione nel mondo ellenico del dogma platonico, secondo cui le irregolarità osservate dei moti planetari erano spiegabili mediante opportune combinazioni di moti circolari e uniformi, emerge il primo tentativo eseguito da Eudosso di Cnido, con il suo sistema omocentrico di sfere, su cui si basa anche il sistema aristotelico. Successivamente alle conquiste di Alessandro Magno, compaiono due modelli geometrici equivalenti, il modello eccentrico e quello epicicloidale e, spiccano le figure di Apollonio di Perga e Ipparco di Nicea. Con quest'ultimo si inizia ad utilizzare la matematica, ovvero la geometria, non più solo a scopi teorici, bensì anche per calcolare e predire i fenomeni astronomici apparentemente irregolari. Essenziali al grande lavoro di Ipparco furono le conoscenze acquisite dalla contemporanea astronomia mesopotamica, sia dei contenuti del grande archivio del materiale osservativo risalente all'VIII secolo a.C., che delle tecniche aritmetiche, come il sistema sessagesimale e la suddivisione dei cerchi in 360 gradi. Vengono, dunque, descritti i principali contributi apportati da Ipparco all'astronomia greca: le relazioni periodiche lunari e la conseguente teoria che permette di calcolare la posizione della Luna in un qualsiasi istante, la lunghezza dell'anno tropico e delle quattro stagioni associate alla teoria del Sole, la prima misura della distanza della Luna dalla Terra allo scopo di calcolare la parallasse per il calcolo delle eclissi lunari e solari, le relazioni periodiche per il moto medio dei cinque pianeti conosciuti e un grande lavoro di osservazione e registrazione delle posizioni stellari grazie al quale scopre e quantifica il fenomeno della precessione degli equinozi.

Il capitolo 2 è dedicato interamente all'*Almagesto* di Tolomeo. Si descrive la diffusione dell'astronomia tolemaica attraverso le traduzioni dell'opera, prima tra gli arabi e a partire dal XII secolo, tra gli astronomi latini. Fino alla prima metà del XV secolo i pochi manoscritti esistenti dell'*Almagesto*, in latino, erano le versioni tradotte dalla lingua araba e, solo nel 1528 venne pubblicata un'edizione latina, tradotta imprecisamente dal testo originale in greco da George di Trebizond nel 1451.
Segue una sezione in cui vengono riassunti i contenuti principali di ciascuno dei tredici Libri dell'*Almagesto* e discusse le varie teorie planetarie tolemaiche. Si osserva, come queste ultime non siano dedotte da un processo puramente induttivo a partire dalle osservazioni ma, al contrario, che Tolomeo presupponga, fin dall'inizio, un particolare modello geometrico per poi dedurre, solo successivamente, i relativi parametri numerici dai dati osservativi. Tolomeo riprende da Ipparco il modello eccentrico per il Sole, basato sulle lunghezze osservate delle stagioni e dell'anno tropico, allo scopo di riprodurre l'unica 'anomalia' conosciuta del corpo celeste: la velocità variabile nel suo moto annuale lungo l'eclittica. Anche il primo tentativo di dare una teoria del moto alla Luna si basa sull'elaborazione di Ipparco: Tolomeo rende ragione della prima anomalia lunare, ossia della velocità variabile della Luna lungo l'eclittica, causata dalla rotazione del suo perigeo, attraverso un modello epiciclico con deferente fisso i cui parametri sono dedotti unicamente da osservazioni di eclissi lunari. Questo Primo Modello Lunare, che funzionava bene alle sigizie, non riusciva a prevedere correttamente le longitudini della Luna quando questa si trovava in altre posizioni rispetto al Sole. Con l'aiuto di due strumenti, l'astrolabio armillare e il triquetro, Tolomeo scopre così una seconda anomalia (evezione), legata all'elongazione fra la Luna e il Sole, e riesce a riprodurla con un sofisticato modello geometrico che inventa lui stesso. Questo Secondo Modello Lunare presenta due importanti cambiamenti: il deferente fisso, concentrico alla Terra, viene sostituito con un deferente eccentrico il cui centro ruota su un piccolo cerchio attorno la Terra. Per quanto riguarda, invece, le teorie del moto dei cinque pianeti, si osserva che non c'è un modello geometrico comune, ma è possibile separare la trattazione dei pianeti superiori (Marte, Giove e Saturno) da quella dei pianeti inferiori (Venere e Mercurio) in quanto danno luogo a fenomeni osservabili diversi. Inizialmente, vengono descritte le teorie del moto in longitudine dei pianeti. Nel caso dei pianeti superiori, Tolomeo rappresenta la prima anomalia, correlata al moto del pianeta lungo l'eclittica, con un cerchio eccentrico mentre, spiega la seconda anomalia, che dipende dalla posizione del pianeta rispetto al Sole, con un epiciclo; ovvero, si avvale di un cerchio eccentrico su cui è trascinato un epiciclo. Dunque, viene riprodotta la prima anomalia dei pianeti mediante il moto del centro di un epiciclo con velocità angolare

costante rispetto ad un punto (il punto ‘equante’) che non coincide col centro del deferente (è la violazione del principio di uniformità dei moti circolari). La seconda anomalia viene riprodotta facendo coincidere il periodo del moto del pianeta superiore lungo l’epiciclo col periodo del Sole medio, ossia con un anno tropico. Nel caso dei pianeti inferiori, occorre invertire i ruoli del deferente eccentrico e dell’epiciclo, poiché il moto in longitudine del pianeta (ossia il moto del centro dell’epiciclo) è uguale a quello del Sole medio. Segue la descrizione delle teorie del moto in latitudine, distinguendo, ancora una volta, il comportamento dei pianeti superiori da quello dei pianeti inferiori.
Nell’ultima sezione vengono presentati tutti gli strumenti astronomici osservativi descritti e menzionati nell’*Almagesto*. L’opera di Tolomeo costituisce l’unica rassegna completa degli strumenti osservativi usati dagli astronomi alessandrini e da essa è possibile ottenere utili informazioni sui metodi di misura impiegati con sei diversi tipi di strumenti. In tutte le descrizioni, Tolomeo tralascia elementi costruttivi specifici, come la minima divisione delle scale graduate, e non spiega come tracciare la linea meridiana, essenziale per la corretta posa in opera degli strumenti (eccetto uno). Per l’osservazione del Sole, Tolomeo descrive due strumenti, l’armilla meridiana e il plinto, mediante i quali può determinare l’obliquità dell’eclittica e l’inclinazione dell’equatore celeste rispetto all’orizzonte di chi osserva, e menziona l’armilla equatoriale per determinare gli istanti degli equinozi. Mentre ci sono prove per affermare che l’armilla meridiana e l’armilla equatoriale erano note già ai tempi di Ipparco, il modo in cui Tolomeo introduce il plinto appare una rivendicazione di paternità. Per l’osservazione della Luna, nell’*Almagesto*, sono descritti due strumenti, l’astrolabio armillare, con cui si può misurare la longitudine e la latitudine eclittiche del corpo celeste, e il triquetro, mediante cui Tolomeo corregge tali coordinate a causa degli effetti prospettici dovuti alla notevole vicinanza della Luna alla Terra. L’origine del primo strumento è incerta, mentre gli storici attribuiscono a Tolomeo, l’ideazione del triquetro, in virtù della sua dichiarazione. L’ultimo strumento osservativo, solo citato nell’*Almagesto*, è la diottra di Ipparco, mediante cui è possibile misurare i diametri apparenti del Sole e della Luna. Si evidenzia, però, che, non soddisfatto delle misure ottenute con questo strumento, Tolomeo determina indirettamente il diametro apparente lunare valendosi della teoria. Per l’osservazione delle stelle fisse e dei pianeti, Tolomeo dichiara di aver, nuovamente, utilizzato l’astrolabio armillare, con il quale costruisce il suo catalogo stellare e corrobora, come nel caso lunare, la teoria dei cinque pianeti.
Per completare l’esposizione, sono state, inoltre, riportate le descrizioni degli strumenti osservativi presenti in una moderna traduzione inglese dell’*Almagesto* (G. J. Toomer, *Ptolemy’s Almagest*, Londra, 1984) e in una versione dell’opera del 1551, in latino, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna, in via Irnerio 46.

Il capitolo 3 è volto ad approfondire le descrizioni e i metodi di misura adottati con questi sei strumenti osservativi. Vengono dunque, considerate, per ognuno degli strumenti, le informazioni, tramandate, dai commentatori dell’*Almagesto*, Proclo, Teone e Pappo, ed esposte le valutazioni di alcuni autori secondari. Nel caso del plinto, si descrive una procedura di misura, leggermente diversa da quella presentata da Tolomeo, allo scopo di giustificare l’errore sul valore dell’obliquità dell’eclittica ricavato dalle osservazioni dei solstizi d’estate e d’inverno del 130 d.C. Per quanto riguarda l’armilla equatoriale è stata riportata la traduzione inglese di una parte di un trattato del 1270 circa, attribuito all’astronomo arabo Mu’ajjad Al-Din Al-‘Urdi, in cui viene descritto l’allineamento dell’anello nel piano equatoriale con il supporto di un’armilla meridiana. Segue anche la descrizione di un esperimento, eseguito con una replica dell’armilla equatoriale, tra il 1967 e il 1975, da Frans e Margaret Bruin, in cui si evidenzia il ruolo della rifrazione atmosferica nella determinazione dell’istante degli equinozi. Nell’*Almagesto* non c’è nessun riferimento alla rifrazione atmosferica ma, come riporta Abu Al-Raihan Al-Biruni, è Tolomeo stesso ad indicare, nel quinto Libro dell’*Ottica*, che i raggi di luce vengono rifratti alla superficie di separazione, sferica e concentrica con la Terra, fra l’aria atmosferica e l’etere cosmico a causa della diversa densità dei due elementi. Viene, dunque, riportata la parte dell’*Ottica* sulla rifrazione atmosferica, tradotta in inglese da F. e M. Bruin. In seguito, si illustrano brevemente le discussioni di alcuni autori secondari sulla precisione delle misure condotte da Tolomeo con l’astrolabio armillare e si accenna al problema della derivazione del catalogo stellare dell’*Almagesto* dal lavoro di Ipparco. Si parla anche del ruolo giocato dall’astrolabio armillare e dal triquetro nelle osservazioni condotte da Tycho Brahe e Niccolò Copernico. Per quanto riguarda la diottra di quattro cubiti, viene evidenziata la somiglianza dello strumento con quello descritto da Archimede nell’*Arenario* e si illustrano le varianti registrate nel passaggio da un autore all’altro.
Infine, sono descritti in una sezione due metodi, basati sulle ombre di uno gnomone, per determinare la linea meridiana, che costituisce l’elemento caratteristico, fondamentale, di ogni osservazione realizzata con gli strumenti osservativi presentati da Tolomeo, esclusa la diottra di Ipparco: il metodo del Cerchio Indiano e il metodo delle tre ombre di Diodoro di Alessandria.

Nel capitolo 4 vengono esposte alcune considerazioni finali sui risultati ottenuti dall’elaborazione delle varie teorie presentate dell’*Almagesto* e si completa l’esposizione dell’astronomia tolemaica dando una breve descrizione delle opere astronomiche minori di Tolomeo che esercitarono una grande influenza sull’astronomia del Medioevo: le *Tavole Astronomiche Manuali* e le *Ipotesi Planetarie*.

Capitolo 1
I predecessori greci di Tolomeo

Per gli antichi Greci l'astronomia era un problema pratico, un mezzo per stabilire i momenti propizi alle attività agricole o ai rituali religiosi, in un periodo in cui non disponevano di un calendario adeguato. Ciò si evince, ad esempio, nel poema *Le Opere e i Giorni* di Esiodo dell'VIII secolo a.C., dove si legge che il sorgere del gruppo di stelle delle Pleiadi appena prima dell'alba (la sua levata eliaca, che avveniva circa alla metà di maggio nel tempo e nei luoghi di Esiodo), dopo essere rimaste invisibili per i 40 giorni precedenti circa, rappresenta il segnale che dà inizio alla raccolta delle messi. Analogamente, il tramonto delle Pleiadi appena prima dell'alba (il tramonto eliaco, alla fine di ottobre in Grecia) avverte che è tempo di cominciare l'aratura e la semina autunnali. Questo "calendario agricolo" si basava essenzialmente sul sorgere e sul tramontare di stelle importanti (Sirio, Arturo) o di gruppi di stelle (Orione, le Pleiadi, le Iadi) e anche sui solstizi d'estate e d'inverno. In epoca successiva furono proposte interpretazioni formali di tale calendario che elencavano gli eventi significativi dell'intero anno astronomico. Alcuni di questi testi erano redatti da astronomi di fama riconosciuta fra i quali Metone, Callippo, Ipparco, e Tolomeo.
Nonostante gli antichi Greci avessero identificato un gran numero di stelle e gruppi di stelle, non avevano concepito la possibilità di suddividere il cielo visibile in costellazioni. Era nota l'esistenza di pianeti, e Venere era infatti chiamata "stella della sera" e "stella del mattino", ma non era stato ancora compreso che si trattava dello stesso oggetto celeste. Man a mano che si svilupparono le città-stato, furono stabiliti calendari formali fondati sul mese lunare e ciò comportò grandi difficoltà pratiche, dal momento che i mesi potevano avere 29 o 30 giorni (chiamati "vuoti" e "pieni" rispettivamente), e mentre 12 di questi mesi ammontavano a meno di un anno solare (348 o 360 giorni), 13 al contrario ammontavano a più di un anno solare (377 o 390 giorni). Il problema di determinare se un certo mese dovesse essere pieno o vuoto, e di riconciliare gli anni con i mesi introducendo, all'occorrenza, un tredicesimo mese supplementare fu affrontato arbitrariamente da funzionari di competenza assai varia, il che spesso produsse grandi e allarmanti deviazioni del calendario dal vero anno solare o mese lunare. Quando cominciò a svilupparsi l'astronomia scientifica, il problema suscitò l'interesse degli astronomi professionali ma, per quanto ne sappiamo, nessuna delle soluzioni da essi proposte fu mai accettata e introdotta in un calendario civile greco.

1.1 I filosofi presocratici fino ad Aristotele: le sfere celesti

All'inizio del VI secolo a.C., dapprima nelle città greche dell'Asia Minore, e in seguito nelle altre zone del mondo greco (la Magna Grecia), nacque il movimento intellettuale che va sotto il nome di "filosofia pre-socratica". Le speculazioni di tali filosofi comprendevano un'ampia gamma di questioni fisiche e cosmologiche, inclusa la natura dei corpi celesti visibili, le loro relazioni con la Terra e le cause del loro apparente comportamento. Un esempio di tali dissertazioni è fornito dalle dichiarazioni attribuite ad Anassimandro (Mileto, prima metà del VI secolo a.C.): egli avrebbe concepito le stelle (cioè tutti i corpi celesti, inclusi i pianeti, il Sole e la Luna) come cerchi di fuoco racchiusi dall'aria, con aperture attraverso le quali trasparivano le fiamme; le eclissi avevano, così, luogo quando si verificava un'occlusione dell'apertura. Anassimandro credeva che la Terra fosse un cilindro, su una delle cui facce viveva l'umanità; essa era in quiete al centro dell'universo e vi restava perché si trovava a ugual distanza da qualsiasi cosa.[1]
I limiti di questa cosmologia sono evidenti. Tuttavia, nel corso del secolo successivo, alcuni concetti, che acquistarono un'importanza centrale per l'astronomia greca, furono enunciati da uno o più filosofi greci che abitavano nell'Italia meridionale. Qui, per prima, incontriamo la figura rilevante di Pitagora di Samo (580 circa - 500 a.C.). A lui è attribuita generalmente la conoscenza della sfericità della Terra, così come ai posteriori Alcmeone di Crotone (VI - V secolo a.C.) e Parmenide di Elea (inizio del V secolo). Si dice che Pitagora sia stato il primo a riconoscere la stessa identità per la Stella del Mattino e la Stella della Sera. Alcmeone e i Pitagorici riconobbero il corso dei pianeti (intesi come Sole, Luna e i cinque pianeti, Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno) lungo il cerchio dell'eclittica (ovvero la traiettoria seguita dal Sole nel suo moto annuale) e misero in rilievo il fatto che, contrariamente a quanto pensavano gli altri filosofi antichi, i pianeti non vanno da est a ovest, con moto un po' più lento di quello delle stelle fisse, ma percorrono una via opposta, ossia da ovest a est. Parmenide dichiarava che la Luna riceve la sua luce dal Sole ed Empedocle di Agrigento arguì che le eclissi solari fossero causate dal passaggio della Luna davanti al Sole.

[1] L'astronomia greca ed ellenistica antecedenti l'attività di Ipparco, sintetizzate nei paragrafi 1.1 e 1.2, sono ampiamente trattate dagli autori J. L. E. Dreyer, *Storia dell'Astronomia da Talete a Keplero*, 2016; M. Hoskin, *Storia dell'Astronomia*, 2017; A. Pannekoek, *Una storia dell'astronomia* (traduzione italiana disponibile nel materiale didattico del corso di "Storia della Cosmologia" tenuto dal Prof. F. Bonoli dell'Università di Bologna); G. J. Toomer, *Tolomeo e i suoi predecessori greci*, in *L'astronomia prima del telescopio* a cura di C. Walker. Per quanto riguarda il lavoro astronomico di Ipparco, riassunto nel paragrafo 1.3, si è consultato anche l'autore O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974.

Uno sviluppo di grande rilievo per il futuro dell'astronomia in Grecia fu il contatto con le conoscenze scientifiche provenienti dalla Mesopotamia, che nel V secolo a.C. erano molto più avanzate da questo punto di vista. Non sappiamo come o esattamente quando ciò accadde. È possibile che i dodici segni dello zodiaco, di origine mesopotamica, fossero noti nel mondo greco addirittura nel VI secolo a.C. Si evidenziano influenze babilonesi nell'opera di Metone di Atene, di sicura identificazione cronologica grazie alla sua osservazione del solstizio d'estate nel 432 a.C. Metone può essere considerato il primo astronomo "scientifico" in Grecia: prima di tutto, perché eseguì osservazioni reali (il momento del solstizio fu determinato attraverso uno strumento costruito allo scopo, forse non più di una colonna fissata ad una piattaforma per permettere una misura della lunghezza dell'ombra a mezzogiorno); in secondo luogo, perché cercò di adattare il tradizionale calendario agricolo ad un calendario civile in cui la successione dei mesi pieni e vuoti, e la sequenza degli anni nei quali veniva inserito un tredicesimo mese supplementare fossero determinate non arbitrariamente da un funzionario, ma da precise regole che lui stesso specificava dettagliatamente. Di fondamentale importanza per il suo sistema fu l'adozione di un ciclo, utilizzato in precedenza a Babilonia, per cui 19 anni solari erano precisamente equivalenti a 235 mesi lunari.

Il V secolo a.C. in Grecia, e soprattutto ad Atene, fu segnato dal rapido sviluppo della geometria come sistema deduttivo. Il successo di questa disciplina come strumento per scoprire quelle che erano considerate verità indiscutibili portò probabilmente all'uso dei modelli geometrici per descrivere e spiegare eventi astronomici.

Dall'inizio del IV secolo a.C., sembra di poter riscontrare un accordo generale fra i filosofi greci riguardo alla descrizione dell'universo, che si basa sul seguente semplice modello. Al centro si trova la Terra, sferica e immobile. Al limite esterno si trova la sfera in cui sono inserite le stelle fisse, che ruota una volta al giorno intorno alla Terra da est a ovest, trascinando con sé in questa rotazione tutti i corpi intermedi. Questi corpi (il Sole, la Luna e i cinque pianeti) compiono i loro moti sferici nella direzione opposta; il Sole, per esempio, compie una rotazione completa in un anno circa, e la Luna in un mese circa. Sorsero, tuttavia, numerose difficoltà, dal momento che persino un'osservazione grossolana rivelava che tali moti non potevano essere spiegati supponendo semplicemente che ogni corpo fosse trascinato dalla propria sfera: i pianeti, per esempio, benché mantenessero in generale un moto da ovest verso est rispetto allo sfondo delle stelle fisse, frequentemente sembravano invertire la direzione di moto e spostarsi da est verso ovest (moto "retrogrado"). Inoltre, sebbene la Luna e i pianeti si muovessero approssimativamente lungo l'eclittica, essi deviavano anche da nord a sud (presentavano cioè un moto in "latitudine").

Secondo il commentatore tardo Simplicio (490 circa – 560 circa d.C.), Platone (427 – 348/347 a.C.) avrebbe assegnato ai suoi contemporanei il compito di mostrare che i moti planetari, apparentemente irregolari, erano regolari come i moti, circolari e uniformi, stellari. Dunque, occorreva dimostrare che i moti dei pianeti erano spiegabili mediante combinazioni di moti circolari e uniformi. A prescindere dall'autenticità di questa attribuzione, tale richiesta è caratteristica dell'astronomia greca da questo momento in poi, e il primo tentativo di costruire un sistema che la tenesse in considerazione fu eseguito da Eudosso di Cnido (400 circa – 347 circa a.C.), contemporaneo più giovane di Platone.

Eudosso, che fu anche uno fra i migliori matematici dell'antichità, propose un modello che combinava semplicità e grande ingegnosità: ogni corpo celeste era trascinato da una o più sfere che ruotavano uniformemente intorno alla Terra come loro centro comune (per questa ragione è noto come sistema "omocentrico"), ma con assi differenti, essendo tutte queste sfere connesse le une alle altre in modo tale che il moto della più esterna fosse trasmesso a quello della più interna. Gli occasionali periodi di moto retrogrado osservabili nei cinque pianeti erano gli esempi più vistosi di non-uniformità, ed Eudosso riuscì a rappresentarli per mezzo di un paio di sfere concentriche. Si trattava di immaginare che il pianeta fosse situato sull'equatore di una sfera che ruotava con velocità uniforme; questa sfera partecipava al moto di una seconda sfera, esterna alla prima e concentrica con essa, la quale ruotava però intorno a un asse diverso. Di conseguenza, il moto del pianeta combinava le rotazioni di entrambe le sfere. Eudosso si rese conto che, se le due rotazioni avessero avuto velocità uguale ma direzione opposta, e se i due assi non fossero stati molto diversi, il pianeta si sarebbe mosso avanti e indietro descrivendo una traiettoria simile al numero otto che i Greci chiamavano "ippòpeda", dalla cordicella legata intorno alle zampe anteriori di un cavallo per impedirgli di deviare dal suo cammino (Fig. 1).

Nei modelli di Eudosso dei cinque pianeti inferiori, la più esterna delle due sfere era trasportata in cerchio da una terza sfera situata al suo esterno, la cui rotazione era scelta in modo da riprodurre il moto medio da ovest verso est del pianeta lungo l'eclittica; e tale sfera era a sua volta trasportata in cerchio da una quarta sfera, più esterna, che generava il moto diurno (da est a ovest) del pianeta intorno alla Terra. Per la Luna Eudosso propose un sistema di tre sfere racchiuse l'una nell'altra. Anche qui è quella più esterna a generare il moto il moto da est a ovest del pianeta intorno alla Terra. Meno soddisfacenti furono invece le tre sfere proposte da Eudosso per il Sole.

Avendo usato quattro sfere per ognuno dei cinque pianeti minori, tre per il Sole e per la Luna e una per le stelle fisse (che ruota intorno alla Terra, una volta al giorno, rispetto ai poli dell'equatore), Eudosso impiegò ventisette sfere in tutto. Otto di queste, una per ciascun pianeta e una per le stelle fisse, fornivano semplicemente l'identico moto diurno, cosicché la complessità era tutt'altro che eccessiva.

Non possediamo alcuna testimonianza sulla natura attribuita da Eudosso alle sue sfere, ma è probabile che esse fossero semplicemente un espediente matematico per descrivere i moti planetari.

Nel lavoro di Eudosso si trova un'influenza babilonese; in particolare, in una descrizione del cielo, visibile dalla Grecia, in cui egli raggruppava tutte le stelle fisse in costellazioni che sono in uso ancora oggi. Tale opera è una combinazione della nomenclatura e della mitologia tradizionali greche, contaminate da elementi di origine babilonese (più chiaramente nelle dodici costellazioni dello zodiaco).
Callippo, nella generazione successiva, diede al sistema di Eudosso una maggiore flessibilità accrescendo il numero delle sfere, e questa versione fu adottata da Aristotele (384 – 322 a.C.), che considerò le sfere fisicamente reali e le combinò in un tutto integrato (il sistema aristotelico di sfere concentriche).
Tuttavia, il sistema omocentrico di sfere, a prescindere dal fatto che fossero considerate concezioni matematiche o fisicamente reali, presentava numerosi difetti. In particolare, non era possibile aggiungere nuove sfere al sistema di sfere di un pianeta in modo da far variare la sua distanza dal centro della Terra. Infatti, alcuni fra i pianeti minori variavano la loro luminosità suggerendo grandi mutamenti nella loro distanza dalla Terra, mentre il Sole e la Luna dimostravano il variare delle loro distanze col variare delle loro dimensioni apparenti.

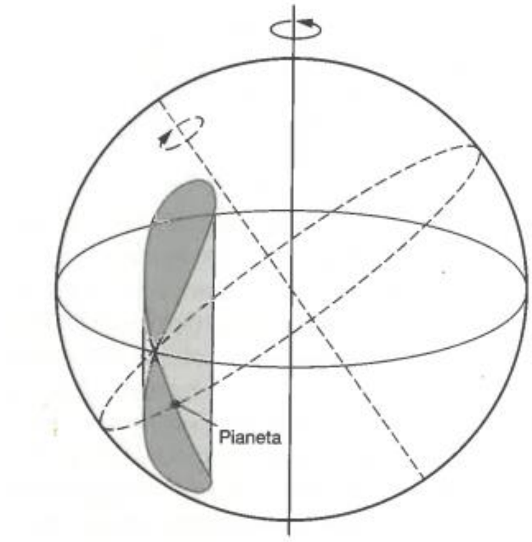


Fig. 1 – Generazione dell'ippopeda, artificio introdotto da Eudosso per produrre la retrogradazione nel suo modello planetario. Il pianeta è situato sull'equatore della sfera che ha l'asse inclinato, i cui poli sono fissati alla sfera dall'asse verticale e trasportati dalla sua rotazione. Le due sfere ruotano con velocità uguale e opposta. In conseguenza dei moti combinati, il pianeta si muove su una figura a otto (che in realtà è l'intersezione delle sfere con un cilindro tangente a esse internamente).[2]
(Immagine presa dal libro di M. Hoskin, *Storia dell'astronomia*, 2017, p. 51)

1.2 L'astronomia ellenistica fino ad Apollonio: genesi dei modelli eccentrico ed epicicloidale

Grazie alle conquiste di Alessandro Magno (356 - 323 a.C.), nella seconda metà del IV secolo, la cultura greca si diffuse in nuove regioni del Vicino Oriente. Fra queste la Mesopotamia e l'Egitto, dove Alessandria, la città da lui fondata, divenne un grande centro di impegno intellettuale.
Ad Alessandria i re macedoni, i Tolomei, dedicarono un tempio alle Muse, il Museo, famoso per la sua Biblioteca che raccoglieva manoscritti provenienti da ogni parte del mondo: questi invitarono gli studiosi più famosi affinché facessero da guida e costituissero una sorta di moderna Accademia. Accanto alla filologia fiorì la medicina e vennero coltivate anche la matematica e l'astronomia.
La forza della cultura ellenistica sta nella grande estensione del mondo ellenico e nella mescolanza tra gli elementi greci e quelli orientali. Soprattutto in astronomia, possiamo vedere come la grande abbondanza dei dati osservativi babilonesi e l'indipendenza del pensiero greco si combinarono con la forza teorica dell'astrazione. La conoscenza dei metodi e degli strumenti usati dai Babilonesi, poi, incitò gli studiosi greci a divenire loro stessi osservatori di stelle. I dati che i Babilonesi possedevano sui periodi e sulle irregolarità, che avevano un semplice carattere numerico, divennero, nelle mani dei Greci, la base per costruzioni geometriche.
Pochissimi scritti greci di argomento astronomico risalenti al periodo compreso fra Aristotele e Ipparco (metà del II secolo a.C.) sono sopravvissuti fino a noi. La fede nel moto circolare uniforme come chiave ai segreti del cosmo rimase forte nella mente dei greci; sembrava che il modo per progredire fosse quello di rimanere fedeli alla tradizione dei moti

[2] Un'animazione molto dettagliata sul sistema di Eudosso si trova nella sezione Museo Virtuale della pagina web del Museo Galileo di Firenze: https://catalogo.museogalileo.it/multimedia/SistemaEudosso.html.

circolari, ma di usarli in modo più flessibile, e con parametri tratti da fonti babilonesi o calcolati sulla base di osservazioni dei babilonesi. Non abbiamo informazioni sulla genesi delle due forme alternative e versatili di moti circolari che avrebbero dominato l'astronomia classica greca, ossia il modello eccentrico e il modello epicicloidale, eccetto il fatto che si diffusero nell'epoca a cavallo fra Callippo (330 a.C.) e Apollonio di Pergamo o di Perga[3] (200 a.C.).
Nel modello eccentrico, il pianeta o il corpo celeste in esame si muovono di moto uniforme su un cerchio intorno alla Terra che è immobile al centro dell'universo. La Terra non è però al centro del cerchio, ma è spostata da un lato. Di conseguenza, muovendosi su questo cerchio *eccentrico*, il corpo varia la sua distanza da essa, e perciò anche la sua velocità apparente in cielo (Fig. 2).

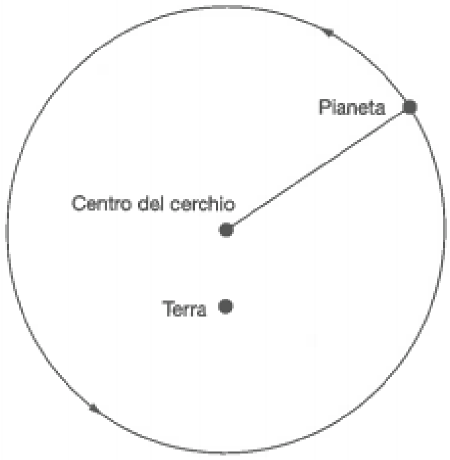


Fig. 2 – In un cerchio eccentrico, il pianeta si muoveva come al solito con velocità uniforme intorno al centro; ma, poiché la Terra non si trovava al centro del cerchio, il pianeta visto dalla Terra sembrava muoversi con velocità variabile (più lento nella parte superiore del cerchio e più veloce nella parte inferiore).
(Immagine presa dal libro di M. Hoskin, *Storia dell'astronomia*, 2017, p. 57)

Nel modello epicicloidale, il pianeta si muove di moto uniforme su un piccolo cerchio, detto *epiciclo*, il cui centro è trascinato con moto uniforme[4] su un cerchio più grande, o *deferente,* che ha la Terra al suo centro. Anche questo modello produce una variazione nella distanza del corpo dalla Terra (Fig. 3). Inoltre, se il moto del pianeta sull'epiciclo è abbastanza veloce relativamente al moto del centro dell'epiciclo sul deferente, il pianeta sembrerà di tanto in tanto invertire la direzione del suo moto in cielo e muoversi all'indietro, di moto *retrogrado* (Fig. 3).

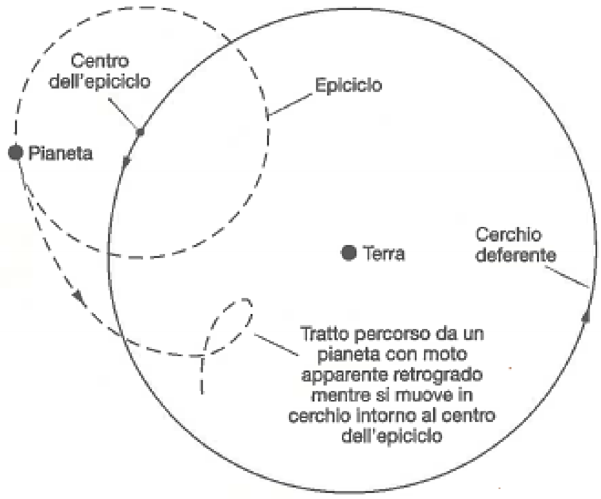


Fig. 3 – La figura mostra in che modo un epiciclo potrebbe spiegare il moto apparente di retrogradazione di un pianeta. Si suppone che la Terra sia al centro del cerchio grande, o *deferente*, sulla cui circonferenza si sposta il centro del cerchio minore, o *epiciclo*, che trasporta il pianeta. Ognuno dei due cerchi ruota con velocità uniforme. La traiettoria del pianeta qual è visto dalla Terra dipende dai valori scelti per i vari parametri, ma la figura indica come possa prodursi il moto retrogrado di un pianeta.[5]
(Immagine presa dal libro di M. Hoskin, *Storia dell'astronomia*, 2017, p. 58)

[3] Apollonio di Perga fu un matematico vissuto nella prima metà del III secolo a.C. famoso per la sua padronanza della geometria delle coniche. Sappiamo che visse per qualche tempo ad Alessandria.
[4] Il moto del centro dell'epiciclo rappresenta il moto medio del pianeta lungo lo Zodiaco.
[5] Un'animazione molto dettagliata sulla teoria epiciclica si trova nella sezione Museo Virtuale della pagina web del Museo Galileo di Firenze (https://catalogo.museogalileo.it/multimedia/TeoriaEpiciclica.html). Questo video mostra anche che il modello epiciclico, a differenza del sistema di Eudosso, riesce a spiegare la mutevole luminosità dei pianeti, che è massima in corrispondenza del moto retrogrado, proprio dove, secondo il modello, essi si trovano alla distanza minima dalla Terra.

Il modello eccentrico genera, sotto opportune assunzioni (che includono la rotazione del centro dell'eccentrico rispetto alla Terra), un moto retrogrado planetario. Si può dimostrare che i due modelli, eccentrico ed epiciclico, sono completamente equivalenti dal punto di vista matematico (e anche da quello dell'osservazione); il caso più semplice, relativo al moto del Sole, è illustrato nella Figura 4. In tale illustrazione, il raggio dell'epiciclo è pari all'eccentricità dell'eccentrico, e la velocità dell'epiciclo nella sua rotazione intorno alla Terra è la stessa, anche come direzione, di quella del corpo che ruota intorno al centro dell'eccentrico, mentre la velocità del corpo in moto sull'epiciclo è anch'essa la stessa in valore assoluto, ma opposta come direzione (Questo semplice modello fu utilizzato da Ipparco e Tolomeo per rappresentare il moto del Sole; vedere le sezioni 1.3 e 2.2.2.1).

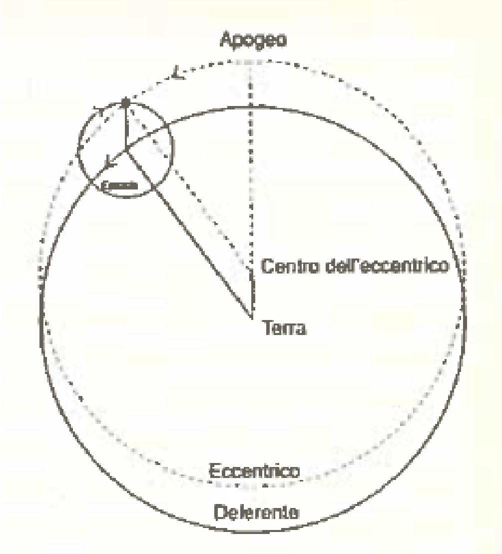


Fig. 4 - Equivalenza geometrica delle ipotesi epicicloidale ed eccentrica. Nella situazione illustrata (per il Sole) il deferente ha la stessa dimensione dell'eccentrico ed il raggio dell'epiciclo è pari all'eccentricità dell'eccentrico. La velocità angolare del centro dell'epiciclo intorno al deferente è pari alla velocità del Sole sull'eccentrico, mentre la velocità del Sole in moto sull'epiciclo è la stessa, ma diretta in senso opposto. Il raggio vettore che va dal centro dell'epiciclo al Sole rimane sempre parallelo alla direzione Terra-Apogeo.
(Immagine presa dal capitolo di G. J. Toomer, *Tolomeo e i suoi predecessori greci*, in *L'astronomia prima del telescopio* a cura di C. Walker, p. 95)

Nonostante l'astronomia come disciplina sperimentale fosse praticata assiduamente nel mondo greco durante il III secolo a.C., sembra sia stata confinata entro vie tradizionali: così abbiamo notizie delle osservazioni dei solstizi da parte di Aristarco (di cui parliamo tra poco) e Archimede, e di osservazioni delle declinazioni delle stelle fisse da parte di Timocari (astronomo alessandrino) e dei suoi collaboratori. Tali osservazioni contribuirono a realizzare rispettivamente il calendario astronomico e il globo stellare. I potenti strumenti matematici impiegati nelle ipotesi eccentrica e epicicloidale erano utilizzati semplicemente a scopi teorici, per spiegare in che modo, in linea di principio, i fenomeni apparentemente irregolari si potevano produrre per combinazioni di moti circolari uniformi. Fino a quel momento, non erano utilizzati per calcolare o predire tali fenomeni, e in effetti una parte della struttura matematica necessaria a questo scopo non era ancora stata introdotta.

La più antica prova esistente relativa ad un utilizzo teorico di un modello risale ad Apollonio di Pergamo, in un teorema che è conservato da Tolomeo nel Libro XII dell'*Almagesto.* Apollonio, assumendo il modello epicicloidale o eccentrico per un pianeta, pose la seguente questione: in che modo si può determinare matematicamente dove si troverà un suo punto stazionario (il luogo in cui comincia o finisce il suo moto retrogrado)? La risposta non è difficile, sebbene la dimostrazione affrontata con gli antichi metodi sia tutt'altro che semplice. Nel modello epicicloidale (Fig. 5), se il pianeta P si trova in un punto stazionario e viene tracciata una linea OPT, a partire dalla Terra O attraverso P in modo da intersecare l'epiciclo, allora il rapporto fra la distanza del pianeta e la metà della corda intercettata sull'epiciclo dalla linea intersecante è pari al rapporto fra la velocità angolare del pianeta intorno al centro dell'epiciclo e la velocità dell'epiciclo intorno alla Terra, cioè:

$$\frac{\mathrm{OP}}{\mathrm{PT}} = \frac{\text{velocità del pianeta}}{\text{velocità dell'epiciclo}}$$

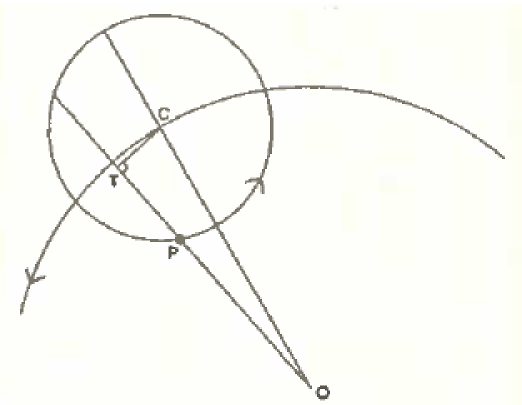


Fig. 5 – Teorema di Apollonio per il punto stazionario di un pianeta nell'ipotesi epicicloidale. Se tale punto coincide con P, allora si ha che $\frac{\mathrm{OP}}{\mathrm{PT}} = \frac{\text{velocità angolare di P sull'epiciclo}}{\text{velocità angolare di C sul deferente}}$.
(Immagine presa dal capitolo di G. J. Toomer, *Tolomeo e i suoi predecessori greci*, in *L'astronomia prima del telescopio* a cura di C. Walker, p. 97)

La velocità del pianeta sull'epiciclo e la velocità del centro dell'epiciclo sul deferente sono derivate con facilità dai periodi sinodico[6] e tropico[7]. Ma il problema non può essere risolto per un pianeta reale senza conoscere la dimensione relativa dell'epiciclo e del deferente per quel pianeta, e non esistono prove a sostegno del fatto che Apollonio avesse determinato tali quantità o che avesse interesse a determinarle: era unicamente interessato al problema matematico nella sua dimensione astratta. Lo stesso atteggiamento si riscontra nell'unica opera a carattere astronomico sopravvissuta in questa epoca, il trattato di Aristarco di Samo (310 circa - 230 a.C.) *Sulla grandezza e la distanza del Sole e della Luna*. Si tratta di un esercizio matematico che mostra in che modo possono essere derivati i limiti per le distanze relative della Luna e del Sole da certe assunzioni numeriche, della cui evidente inaccuratezza l'autore sembra non curarsi: per esempio, il diametro apparente della Luna è assunto pari a 1/45 di un angolo retto (2°, circa quattro volte troppo grande). Quando la Luna è al Primo o all'Ultimo Quarto («in quadratura»), l'angolo Terra-Luna-Sole è retto. Misurando l'angolo Luna-Terra-Sole, siamo in grado di apprendere la forma del triangolo che unisce i due corpi, e quindi il rapporto fra due suoi lati scelti a piacere (Fig. 6).

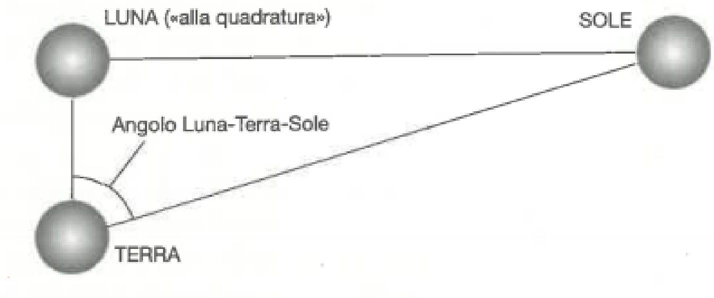


Fig. 6 – Il metodo di Aristarco per calcolare le distanze relative della Luna e del Sole.
(Immagine presa dal libro di M. Hoskin, *Storia dell'astronomia*, 2017, p. 56)

In pratica, il tempo della quadratura della Luna è molto difficile da determinare esattamente, così come è difficile misurare la piccola differenza che esiste allora fra l'angolo Luna-Terra-Sole e un angolo retto. Aristarco suppone che l'angolo sia minore di un angolo retto di 3° circa, mentre la vera differenza è di solo 1/18 di questo valore ($10'$). Di conseguenza, la sua conclusione che il Sole è 19 volte più lontano della Luna equivale a meno di 1/20 del valore vero. Questo trattato si fonda però su ricerche di matematica pura, e il valore di 3° adottato da Aristarco potrebbe essere stato non più di un valore comodo con cui illustrare il suo metodo: alcuni astronomi greci erano affascinati più dal modo in cui si poteva risolvere un problema che dalla vera soluzione.
Aristarco osò anche esaminare la possibilità del moto della Terra. Egli non fu il primo greco a farlo. Nella seconda metà del V secolo a.C. il pitagorico Filolao, vissuto nell'Italia meridionale, avrebbe insegnato che la Terra, insieme a un'Antiterra, il Sole e la Luna, e i cinque pianeti minori, orbitavano intorno a un fuoco centrale, il «cuore

[6] Il periodo sinodico di un pianeta è il tempo impiegato dal pianeta per ritornare nella stessa posizione rispetto al Sole.
[7] Il periodo tropico di un pianeta è il tempo impiegato dal pianeta per fare ritorno allo stesso punto sull'eclittica.

dell'universo». Secondo un'altra tradizione, il contemporaneo di Filolao Iceta di Siracusa avrebbe attribuito alla Terra la rotazione giornaliera sul suo asse, e la stessa opinione è attribuita anche all'allievo di Platone Eraclide Pontico (390 circa - post 339 a.C.). Aristarco anticipò invece Copernico insegnando che la Terra orbita intorno al Sole. Secondo Archimede di Siracusa (287 circa - 212 a.C.), Aristarco «suppone…che le stelle fisse e il Sole rimangano immobili, e che la Terra giri, seguendo la circonferenza di un cerchio, attorno al Sole, che sta nel mezzo dell'orbita…» (*Arenario*, I).
Ma se la Terra si muoveva, come mai le stelle non sembravano muoversi di moto apparente in conseguenza del moto della Terra? La ragione di ciò, secondo Aristarco, risiedeva nel fatto che il raggio dell'orbita terrestre era trascurabile rispetto alla grandissima distanza delle stelle, i cui moti apparenti erano quindi troppo piccoli perché gli astronomi potessero scoprirli (questa tesi sarebbe stata ripresa in seguito dai copernicani).
Sappiamo solo di una persona che nell'antichità fu convinta dalle idee di Aristarco: il babilonese Seleuco di Seleucia, vissuto alla metà del II secolo a.C., che tentò di dimostrare la verità dell'ipotesi eliocentrica. L'incredulità con cui fu accolta la tesi di Aristarco non è sorprendente: la sua proposta, per quanto possa sembrarci acuta oggi, apparteneva a una tradizione di cosmologia speculativa che stava cedendo il passo a un'astronomia più interessata a speculazioni quantitative, ed era interessata soprattutto a escogitare modelli geometrici che replicassero le osservazioni.

Sappiamo ben poco dell'uso che Apollonio di Perga potrebbe aver tentato di fare dei modelli epiciclico ed eccentrico, dato che tutte le sue opere astronomiche sono andate perdute. Lo stesso vale anche per tutti gli scritti, tranne uno, di Ipparco. Quasi tutto quello che conosciamo di Apollonio e la maggior parte di ciò che sappiamo di Ipparco (per quanto riguarda i loro contributi all'astronomia) lo dobbiamo ai molti riferimenti contenuti nell'*Almagesto* di Tolomeo.

1.3 Ipparco

La trasformazione dell'astronomia matematica greca da scienza descrittiva a scienza predittiva si realizzò con l'opera di Ipparco, nato a Nicea in Asia Minore, ma vissuto per lo più a Rodi (dal 150 al 125 circa a.C.) che era ancora uno degli stati più fiorenti del mondo greco. Negli ultimi centocinquant'anni prima dell'era cristiana Rodi rivaleggiava con Alessandria come centro di vita letteraria e intellettuale, e tra gli uomini le cui opere diedero lustro all'isola il primo posto spetta senza dubbio a Ipparco.
Si trattò di un vero genio, un innovatore sia per quanto riguarda le tecniche matematiche che per quelle osservative, con una capacità di giudizio sufficientemente distaccata per diffidare dei propri come degli altri risultati, e con una operosità tale da sottoporli continuamente a verifica e a correzione. Ma nonostante tutte le sue straordinarie capacità, non avrebbe potuto compiere ciò che fece senza l'ausilio fornitogli dalla contemporanea astronomia mesopotamica. Abbiamo già riscontrato elementi che denunciano le influenze mesopotamiche nell'opera di Metone e di Eudosso, ma Ipparco fu il primo greco (e forse da un certo punto di vista l'unico) ad avere acquisito una conoscenza dettagliata sia dei contenuti del grande archivio del materiale osservativo babilonese risalente all'VIII secolo a.C., sia delle potenti tecniche aritmetiche per calcolare e predire fenomeni di natura lunare o planetaria che erano state sviluppate in secoli più recenti dagli scriba astronomi, e che erano ancora in uso nella sua epoca. Non disponiamo di informazioni sulle modalità grazie alle quali Ipparco acquistò queste conoscenze in quanto tutti i suoi numerosi scritti, eccetto uno, sono andati perduti (possediamo solo un libro scritto nel 140 a.C., anteriormente alla sua grande scoperta della precessione degli equinozi, mentre il suo catalogo di stelle fu compiuto nel 129 a.C.) e la maggior parte delle nostre informazioni su di lui ci vengono dall'*Almagesto* di Tolomeo e da altre fonti secondarie. Tuttavia, la sua dovizia di dettagli e la precisione dei suoi riferimenti ci inducono a pensare che avesse un alto livello di istruzione personale, e disponesse di traduzioni di testi babilonesi. Benché Babilonia fosse stata conquistata dalla dinastia iraniana dei Parti nel corso della vita di Ipparco, era quantomeno rimasta accessibile e familiare ai Greci fin dall'epoca delle conquiste di Alessandro Magno.
Comunque avesse acquisito tali informazioni, Ipparco fu il principale canale di trasmissione di tali dati scientifici al mondo greco, a costo di un grande e intenso impegno. Per esempio, compilò una lista completa delle eclissi lunari osservate a Babilonia a partire dall'VIII secolo a.C. che non consisteva semplicemente in una traduzione dei relativi archivi babilonesi, ma nella conversione delle date riferite al regno babilonese in un opportuno calendario fruibile da parte degli astronomi greci (Ipparco utilizzò, e presumibilmente introdusse nella pratica astronomica, l'anno egiziano invariabile composto da 365 giorni). Questa ricchezza e abbondanza di dati fu essenziale non solo per lo stesso Ipparco ma anche per il suo successore Tolomeo alle prese con la riforma dell'astronomia greca.
Tuttavia, questo materiale osservativo non fu l'elemento più importante che Ipparco mutuò dalla Mesopotamia: egli fu infatti sommamente debitore alla teoria matematica che era stata sviluppata in quella terra. Uno dei grandi vantaggi degli astronomi babilonesi nell'affrontare i calcoli matematici era il sistema sessagesimale (una notazione posizionale delle cifre che componevano il numero, simile al nostro sistema decimale, ma la cui base è 60). Ipparco adottò una versione di tale sistema (servendosi dei numeri greci) per rimpiazzare l'esistente e pesante struttura di unità frazionarie;

senza tale innovazione è difficile immaginare in che modo avrebbe potuto costruire le tavole astronomiche. Suddivise inoltre l'eclittica e i cerchi in genere in 360 gradi. Soprattutto, sembra che Ipparco abbia mutuato dai Babilonesi, trasferendola alla teoria greca, l'idea dell'astronomia come scienza predittiva, basata su tecniche matematiche e precise relazioni periodiche.

I risultati raggiunti da Ipparco sono ben illustrati dall'esempio della sua teoria lunare, di cui conosciamo molti dettagli grazie alla discussione di Tolomeo. Quest'ultimo, infatti, attribuisce ad Ipparco alcune relazioni periodiche che costituiscono un elemento fondamentale della sua teoria lunare. Osserviamo, però, che gli stessi valori sono stati trovati nel XIX secolo, in forma esplicita o implicita, nelle effemeridi lunari cuneiformi rinvenute nel sito archeologico di Babilonia; questa scoperta diede inizio ad una nuova fase nella comprensione dell'astronomia greca, così come babilonese. Per meglio comprendere il significato di queste relazioni periodiche, definiamo i periodi caratteristici del moto lunare:

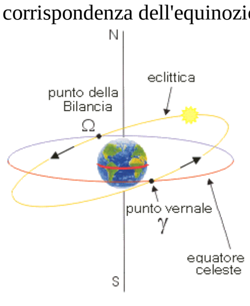
1) Mese tropico T_t: periodo di tempo impiegato dalla Luna per ritornare nello stesso punto dell'eclittica, ossia all'equinozio vernale ϒ[8].
2) Mese siderale: periodo di tempo che impiega la Luna a compiere un giro completo intorno alla Terra (= 360°), avendo come riferimento una stella fissa (questo periodo non compare nelle relazioni periodiche di Ipparco).
3) Mese sinodico T_s: tempo impiegato dalla Luna per fare un giro intorno alla Terra e trovarsi, alla fine di questo giro, nella stessa posizione di partenza sia rispetto alla Terra che rispetto al Sole, ovvero intervallo di tempo compreso tra due fasi lunari uguali successive (per esempio tra due lune piene).

Nessuno dei tre periodi definiti è costante; pertanto, consideriamo T_t e T_s come i valori medi dei mesi tropico e sinodico.

4) Mese anomalistico medio T_a: tempo impiegato dalla Luna per ritornare alla stessa velocità (ad esempio, intervallo di tempo compreso tra due passaggi consecutivi della Luna al perigeo). La Luna ha un moto in longitudine (eclittica) molto irregolare, con una velocità angolare che varia da 10° a 14° al giorno.
5) Mese draconico medio T_d: tempo impiegato dalla Luna per ritornare alla stessa latitudine eclittica, ovvero allo stesso nodo (ascendente o discendente). A differenza del Sole, la Luna non si muove lungo l'eclittica, ma varia la sua latitudine a nord e a sud fino ad un massimo di 5° circa. In prima approssimazione, il percorso apparente della Luna può essere descritto con un grande cerchio che interseca l'eclittica in due punti diametralmente opposti, chiamati nodo ascendente e nodo discendente.[9]

---

[8] Il punto vernale, noto anche come primo punto d'Ariete o punto gamma ϒ, è uno dei due punti equinoziali in cui l'equatore celeste interseca l'eclittica.
Quando il Sole, nel suo apparente moto annuo, transita per tale punto, la Terra viene a trovarsi in corrispondenza dell'equinozio di primavera: il Sole passa "salendo" dall'emisfero celeste australe a quello boreale e ha inizio la primavera astronomica.
In posizione diametralmente opposta al punto vernale si trova il punto della Bilancia o punto Ω: il Sole transita per il punto della Bilancia in corrispondenza dell'equinozio autunnale "scendendo" dall'emisfero celeste boreale a quello australe.



(Immagine presa dalla rete)

Il punto vernale è molto importante per determinare la posizione degli astri nel cielo in quanto è il punto di riferimento utilizzato da vari sistemi di coordinate celesti (ad esempio orizzontali, equatoriali ed eclittiche).
[9] Per chiarire il significato di questi periodi, vediamo, brevemente, le principali conoscenze (moderne) del moto lunare. Oggi sappiamo che la Luna orbita intorno alla Terra seguendo una traiettoria ellittica. Il piano dell'orbita lunare è inclinato di 5° 9′ rispetto al piano dell'eclittica, ovvero dell'orbita della Terra, e la linea che ne costituisce la loro intersezione è chiamata linea dei nodi (nodo ascendente e nodo discendente). La Luna ruota in senso antiorario attorno alla Terra come si verifica per la Terra attorno al Sole (segue che vista dalla Terra, la Luna si muove tra le stelle fisse da ovest verso est).
Durante un giro completo, la Luna si trova in diverse posizioni relative al Sole e perciò mostra ad un osservatore sulla Terra una conformazione della parte illuminata variabile ogni giorno. Le fasi lunari si contano a partire dal novilunio (o fase di Luna Nuova), ossia quando la Luna si trova tra la Terra ed il Sole: in questa fase la Luna sorge insieme al Sole ed è in congiunzione con esso, ossia ha la stessa longitudine. La Luna di Primo Quarto si ha quando si vede metà superficie lunare illuminata (vale il detto gobba a ponente Luna crescente): in questa fase la Luna è a 90° di longitudine est rispetto al Sole. Nel plenilunio (o fase Luna Piena) la Luna si trova in opposizione col Sole: in questa fase la Luna sorge al tramonto del Sole e perciò ha una longitudine di 180° di differenza rispetto a quella del Sole. La Luna di Ultimo Quarto si ha quando si ha quando è illuminata la metà orientale (anche qui vale il detto gobba a levante Luna calante): in questa fase la Luna è a 90° di longitudine ovest rispetto al Sole. L'intero ciclo delle fasi lunari dura 29,5 giorni (mese sinodico), perciò tra una fase e l'altra intercorrono poco più di sette giorni.
La Luna ha una velocità angolare media lungo l'eclittica di circa 360° in 27,2 giorni (mese siderale), per cui ogni giorno (24h) si muove in cielo in media di circa 13°, cioè ogni giorno la troviamo in cielo spostata verso est di 13° rispetto alla posizione che aveva il giorno prima alla stessa ora.

Le relazioni periodiche che Tolomeo attribuisce ad Ipparco sono le seguenti:

- $251\ T_s = 269\ T_a$;
- $5458\ T_s = 5923\ T_d$;
- $T_s = 29^d\ 12^h\ 44^m\ 3{,}3^s$ (più grande solo di 0,4 secondi).

Gli astronomi babilonesi conoscevano il periodo di Saros S, ossia un insieme di relazioni periodiche che legavano tra loro i quattro periodi fondamentali del moto lunare nel seguente modo:

$S = 6585\frac{1}{3}^d$ = 18 anni siderali + $10\frac{5}{6}^d$
$= 223\ T_s$
$= 239\ T_a$
$= 242\ T_d$
$\approx 241\ T_t$

Tolomeo afferma che Ipparco non riteneva sufficientemente accurato né il periodo di Saros né il triplo periodo di Saros, o periodo di Exeligmos E, che i greci sembravano preferire, e introdusse un intervallo di tempo ancora più lungo ottenuto confrontando le proprie osservazioni di eclissi con quelle dei Caldei. Il periodo Ipparchiano H è:

$H = 126007^d\ 1^h$ = 345 anni egiziani + $82^d\ 1^h$
$= 4267\ T_s$
$= 4573\ T_a$
$\approx 4612\ T_t$

Dal periodo H è possibile ricavare la lunghezza di Ipparco del mese sinodico medio ($T_s = \frac{126007^d 1^h}{4267} = 29^d\ 12^h\ 44^m\ 3{,}3^s$) e la prima relazione periodica scritta sopra (dividendo H per 17 si trova che $251\ T_s = 269\ T_a$). Invece, per quanto riguarda la seconda relazione ($5458\ T_s = 5923\ T_d$), oggi sappiamo che sia di origine babilonese, nonostante Ipparco affermi di esserne stato lo scopritore.

La teoria lunare di Ipparco si fonda su due considerazioni qualitative ricavate dalle osservazioni:

A. La Luna può avere la sua velocità massima (o media, o minima) in qualsiasi punto dell'eclittica. (Questo è in contrasto con la teoria solare secondo la quale la velocità minima del Sole appare sempre nello stesso punto dell'eclittica, poiché l'apogeo è ritenuto fisso rispetto all'eclittica.)
B. La Luna può avere la sua latitudine nord (o sud) massima in qualsiasi punto dell'eclittica. Lo stesso vale, ovviamente, per la latitudine media $\beta = 0°$ (ossia ai nodi) come si deduce dal fatto che le eclissi possono avvenire ovunque sull'eclittica.

Ipparco era a conoscenza di una irregolarità o 'anomalia' della Luna, ovvero di una deviazione del moto lunare da quello circolare uniforme, che riguardava il suo moto lungo l'eclittica (cioè in longitudine) con un periodo di un mese anomalistico T_a. Egli diede per scontato il fatto che il moto lunare potesse essere spiegato da un semplice modello epicicloidale o eccentrico, come avevano fatto i suoi predecessori. Nell'*Almagesto*, Tolomeo descrive le caratteristiche generali del modello epicicloidale di Ipparco, che adatta e rivede nell'elaborazione iniziale della sua teoria lunare (vedere sezione 2.2.2.2). Il centro T della Terra si trova al centro di un cerchio situato sul piano dell'eclittica e all'interno della sfera della Luna[10] (Fig. 7). Un altro cerchio della stessa dimensione e concentrico al precedente è situato in un piano che forma con l'eclittica un angolo di 5° (latitudine massima della Luna). Il diametro comune dei due cerchi è la linea dei nodi che ruota attorno il centro T da est verso ovest con un moto retrogrado giornaliero di circa 3′; questo fatto tiene conto dell'osservazione B, poiché le eclissi si verificano quando la Luna, alle sigizie, si trova in uno dei nodi, ascendente o discendente. Il cerchio inclinato è il deferente (concentrico) lunare su cui il centro C dell'epiciclo ruota da ovest verso est con la velocità angolare media $\omega_t = \frac{360°}{T_t}$. L'epiciclo è una piccola circonferenza nel piano inclinato in cui la Luna ruota da est verso ovest con una velocità angolare media $\omega_a = \frac{360°}{T_a}$. Poiché le due velocità angolari sono differenti, il punto di velocità massima (perigeo) cambierà da una lunazione all'altra; questo fatto tiene conto dell'osservazione A.

Inoltre, poiché l'orbita della Luna attorno alla Terra ha un'eccentricità piuttosto accentuata, il diametro apparente della Luna per un osservatore terrestre varia molto a seconda che essa si trovi al perigeo o all'apogeo. La Luna ha mediamente una dimensione angolare di circa 30′, come il Sole, ma all'apogeo il suo diametro apparente è inferiore a quello del Sole

Le perturbazioni secolari influiscono sulla longitudine del perigeo dell'orbita lunare e sulla longitudine del nodo ascendente. In conseguenza di ciò il perigeo dell'orbita lunare si sposta verso est (cioè nella stessa direzione del moto della Luna) ed effettua un giro completo in circa nove anni. È lo spostamento della linea degli apsidi (perigeo-apogeo) e per questo il mese anomalistico dura un po' di più di quello siderale.

La linea dei nodi ruota sull'eclittica in senso orario (opposto al moto lunare) e compie un giro completo in 18 anni e 7 mesi. È la retrogradazione dei nodi (circa 1,6° gradi al mese) e per questo il mese draconico dura meno degli altri periodi lunari.

Il mese sinodico e draconico permettono di calcolare il verificarsi delle eclissi dato che esse si verificano solo in Luna piena (eclisse di Luna) o nuova (eclisse di Sole), cioè «alle sigizie», purché nel contempo la Luna si trovi in uno dei nodi e dunque allineata col Sole e la Terra.

[10] Questo è uno dei pochi casi in cui Tolomeo ricorre alle sfere celesti nell'*Almagesto* (vedere sezione 2.2).

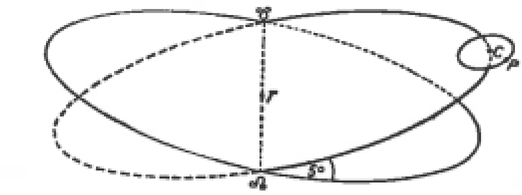


Fig. 7 – Caratteristiche generali del modello lunare di Ipparco (e del Primo Modello Lunare di Tolomeo; vedere sezione 2.2.2.2). (Immagine presa dal libro di O. Pedersen *A survey of the Almagest*, 1974)

Questo modello riesce a simulare la maggior parte dei fenomeni lunari osservabili, almeno in modo qualitativo: produce un moto diretto (ossia da ovest verso est) in longitudine (a causa del moto di C) con velocità apparente variabile (a causa del moto della Luna sull'epiciclo[11]), ma anche un moto in latitudine (a causa del piano inclinato) con il punto di latitudine massima mobile (per via della rotazione della linea dei nodi) e il punto di velocità massima mobile (perché $\omega_t \neq \omega_a$).
Per poter utilizzare tale modello e, in particolare, per calcolare la longitudine lunare in un determinato momento (ossia il moto lungo l'eclittica), era necessario conoscere la dimensione dell'epiciclo (o, in altre parole, l'ammontare dell'eccentricità), e anche alcune posizioni "medie" della Luna (cioè la sua ubicazione nel momento in cui l'epiciclo o l'eccentrico non ne influenzavano la posizione, per esempio all'apogeo). Per determinare l'eccentricità *e* dell'orbita lunare, Ipparco elaborò un metodo ingegnoso servendosi di tre eclissi lunari. La Luna durante queste tre eclissi è rappresentata da tre punti M, N, Q sul cerchio eccentrico (Fig. 8).

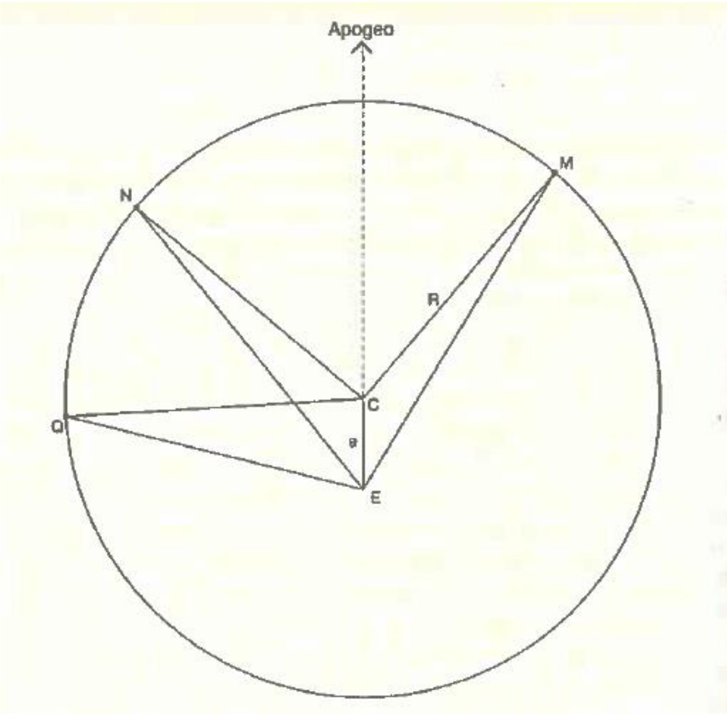


Fig. 8 – Determinazione di Ipparco dell'eccentricità *e* lunare e della posizione dell'apogeo in base a tre eclissi lunari. A partire dagli angoli formati dalla luna nelle tre posizioni M, N, Q, rispetto al centro C e alla terra E, si possono calcolare il rapporto $\frac{e}{R}$, dove R è il raggio del cerchio eccentrico, e la direzione di EC.
(Immagine presa dal capitolo di G. J. Toomer, *Tolomeo e i suoi predecessori greci*, in *L'astronomia prima del telescopio* a cura di C. Walker, p. 100)

Gli angoli al centro formati da questi tre punti in C, centro dell'eccentrico, e in E, (Terra o osservatore) sono noti. Quindi, secondo la geometria euclidea, si può trovare il rapporto $\frac{e}{R}$ fra l'eccentricità EC e il raggio dell'eccentrico, e anche la direzione dell'apogeo relativamente ad una delle tre eclissi. Gli angoli in E sono dati dalla vera posizione della Luna durante le tre eclissi, ma non sono direttamente osservati: ciò che Ipparco trovò negli archivi babilonesi o in altre testimonianze di eclissi fu soltanto il tempo a metà dell'eclisse. Ciò nonostante, in quel momento la Luna è direttamente opposta al Sole; così egli calcolò la posizione solare (probabilmente utilizzando i metodi aritmetici di origine babilonese

[11] Questo moto retrogrado spiega la velocità apparente lunare maggiore al perigeo dell'epiciclo e minore all'apogeo.

piuttosto che il modello solare eccentrico che sviluppò in epoca successiva) in questi tre momenti, e aggiunse 180° per ricavare la posizione della Luna. Gli angoli in C sono ricavati dal moto medio della Luna fra le eclissi, che Ipparco derivò dalle relazioni periodiche viste sopra.

Con procedure analoghe, Ipparco stabilì inoltre un modello epicicloidale/eccentrico per il Sole, basato sulle lunghezze osservate delle stagioni e dell'anno solare (a questo scopo, dedicò molta attenzione all'osservazione degli equinozi).
Nel Libro III dell'*Almagesto*, Tolomeo afferma che Ipparco nel suo trattato *Sulla Lunghezza dell'Anno* chiarì che bisognava distinguere tra due definizioni di anno: l'anno solare (o tropico) dato dal ritorno dello stesso equinozio o solstizio e l'anno siderale dato dal ritorno delle stesse stelle. Inoltre, in un altro trattato, *Sull'Intercalare dei Mesi e dei Giorni*, Ipparco riporta che la durata di un anno tropico è di circa $\frac{1}{300}$ di giorno più piccola rispetto al valore della lunghezza dell'anno trovato da Callippo e accettato tra i matematici del suo tempo, ovvero:

$$1 \text{ anno tropico} = 365 + \frac{1}{4} - \frac{1}{300} \text{giorni} = 365^{\mathrm{d}}\ 5^{\mathrm{h}}\ 55^{\mathrm{m}}\ 12^{\mathrm{s}}$$

Confrontato col valore reale dell'epoca, $365^{\mathrm{d}}\ 5^{\mathrm{h}}\ 48^{\mathrm{m}}\ 46^{\mathrm{s}}$, la lunghezza dell'anno di Ipparco è di soli 7 minuti circa maggiore. L'errore è in parte dovuto all'imperfezione degli strumenti di misura usati da Ipparco e in parte all'influenza della rifrazione atmosferica (come vedremo più in dettaglio nelle sezioni 2.3.1.4 e 3.1.3).
Essendo l'anno siderale, invece, più lungo di $365\frac{1}{4}$ giorni, Ipparco giunse alla sua più importante scoperta: la precessione degli equinozi (ritorneremo tra poco su questo risultato).
Nel caso del Sole era relativamente facile trovare un'orbita che concordasse con le osservazioni, poiché l'unica irregolarità di cui si dovesse render ragione era la diversa durata delle quattro stagioni. Il fatto empirico sottostante l'intera questione è che le quattro stagioni sono connesse col moto annuale (apparente) del Sole lungo l'eclittica. Descrivendo questo moto con la longitudine eclittica $\lambda(t)$ del centro del Sole, calcolata dal punto vernale ♈, si ha l'inizio di:

Primavera quando $\lambda(t) = 0°$ (equinozio Vernale o di Primavera)
Estate quando $\lambda(t) = 90°$ (solstizio d'Estate)
Autunno quando $\lambda(t) = 180°$ (equinozio d'Autunno)
Inverno quando $\lambda(t) = 270°$ (solstizio d'Inverno)

Le stagioni così definite sono le stagioni astronomiche e corrispondono piuttosto bene con le stagioni climatiche nell'emisfero nord. Dal punto di vista astronomico, la caratteristica essenziale è che il Sole si muove lungo l'eclittica di 90° durante ogni stagione. Dato però, che impiega un diverso numero di giorni per completare i quadranti del suo circolo, ossia gli archi di 90° lungo l'eclittica, si ha che la velocità del Sole appare alternativamente più grande e più piccola.
L'ineguaglianza delle 4 stagioni fu evidenziata da Euctemone (V secolo a.C.) che determinò la loro lunghezza: 93 giorni per la primavera (contati dall'equinozio di primavera al solstizio d'estate), 90 giorni per l'estate, 90 giorni per l'autunno e 92 giorni per l'inverno. Questi valori erano considerevolmente lontani da quelli veri: 94,1 giorni per la primavera, 92,2 per l'estate, 88,6 per l'autunno e 90,4 per l'inverno. Valori più accurati furono trovati, un secolo dopo, dall'abile astronomo Callippo; la durata delle sue stagioni era 94, 92, 89 e 90 giorni (osserviamo che sono le cifre arrotondate delle lunghezze corrette).
Tolomeo attribuisce a Ipparco valori più accurati di quelli di Callippo: 94½ giorni per la primavera e 92½ giorni per l'estate, di modo che, assumendo la lunghezza dell'anno di 365¼ giorni, restavano 178¼ giorni per l'altro mezzo anno, compresi tra l'equinozio di autunno e quello di primavera. Questi valori sono molto vicini a quelli delle tavole caldee: 94,50; 92,73; 178,03. Non è chiaro se Ipparco avesse derivato questi dati dai Babilonesi o da sue proprie osservazioni.
Il suo grande merito risiede, invece, nella spiegazione teorica di questa ineguaglianza per mezzo di un cerchio eccentrico che il Sole descrive attorno alla Terra. In accordo con la loro natura e con il bisogno di armonia, si assume che i corpi celesti descrivano orbite circolari secondo un moto uniforme. È perché la Terra non si trova al centro dell'orbita ma in una posizione eccentrica che noi vediamo la velocità del Sole non uniforme, ma gradatamente crescente o decrescente tra il valore massimo al perigeo e minimo all'apogeo. Quanto effettivamente la Terra si trovi lontano dal centro e in che direzione, Ipparco può facilmente ricavarlo dalle differenze osservate nella durata delle stagioni, attraverso semplici relazioni tra linee e archi di circonferenza che sono un inizio di trigonometria. Una prima tabella di corde è attribuita proprio a Ipparco.
Tolomeo riporta nell'*Almagesto* il risultato ottenuto da Ipparco. In un anno tropico il Sole descrive un cerchio eccentrico di raggio R in direzione ovest-est (o verso antiorario) e il centro del cerchio ha una distanza dalla Terra pari all'eccentricità *e* che rappresenta una certa frazione del raggio; il rapporto $\frac{e}{\mathrm{R}}$ è pari a $\frac{1}{24}$ (cioè la Terra dista dal centro $\frac{1}{24}$ del raggio dell'eccentrico) e la longitudine eclittica dell'apogeo è pari a $65°\ 30'$ (Fig. 9).

Entrambi i valori sono abbastanza precisi: la longitudine è inferiore di circa 35′ al valore reale, mentre la lunghezza del raggio R è ovviamente indifferente.

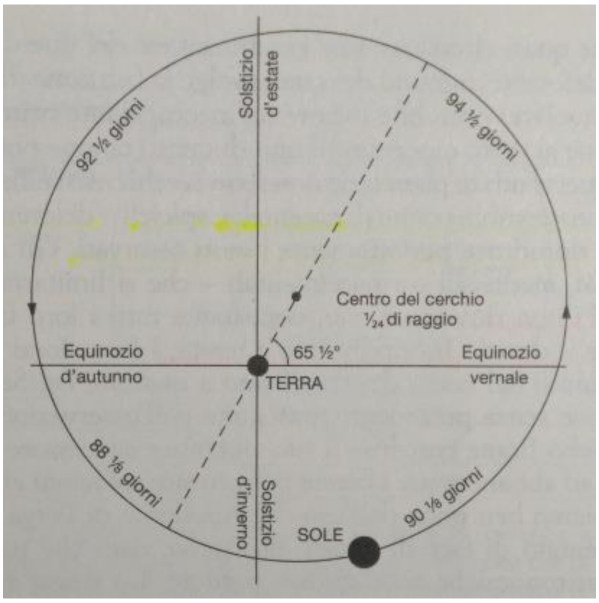
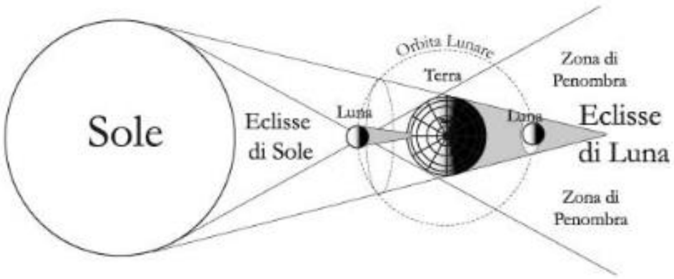


Fig. 9 – Il modello del moto del Sole di Ipparco (e di Tolomeo, vedere sezione 2.2.2.1)
(Immagine presa da M. Hoskin, *Storia dell'astronomia*, 2017, p. 60)

Ipparco dimostrò che si poteva giungere allo stesso risultato, e quindi render ragione della diversa durata delle quattro stagioni, ipotizzando che durante l'anno tropico il Sole si muove lungo un epiciclo di raggio *e*[12] in direzione est-ovest (o verso orario), mentre il centro di quest'epiciclo descrive nello stesso periodo, ma in direzione opposta (ovest-est), un cerchio di raggio R[13] intorno alla Terra situata in centro. Ipparco, dunque, dimostrò che il moto attorno a un cerchio eccentrico è identico al moto in un epiciclo (vedere Fig. 4).
Entrambe le ipotesi, epicicloidale ed eccentrica, erano in grado di rappresentare il moto apparente del Sole, e quindi la velocità variabile lungo l'eclittica, con un errore di meno di un minuto d'arco, una quantità del tutto insensibile non solo al tempo di Ipparco, ma per altri 1700 anni.

In seguito Ipparco passò ad analizzare il problema della predizione delle eclissi lunari e solari[14]. Ma tale problema comprendeva, a sua volta, la questione della parallasse che poteva essere risolta solo a patto di trovare le distanze della Luna e del Sole dal nostro pianeta[15]. Molti studiosi greci avevano a lungo discusso prima di Ipparco su questo

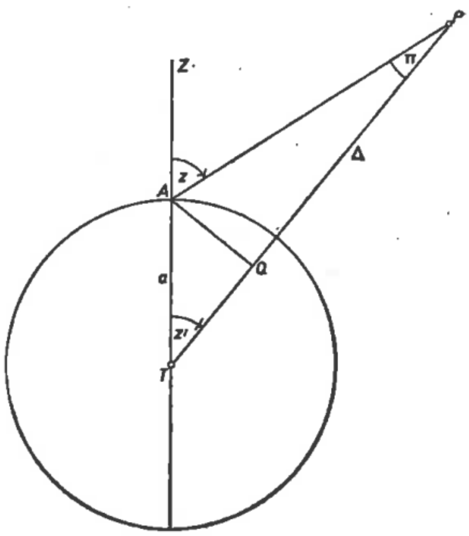
[12] Ovvero il raggio dell'epiciclo è pari alla distanza del centro dell'eccentrico dalla Terra, cioè all'eccentricità *e*.
[13] Ossia il deferente ha la stessa dimensione del cerchio eccentrico.
[14] Sappiamo che quando la Luna, nella sua rotazione intorno alla Terra, passa attraverso uno dei nodi si ha un'eclissi (da ciò deriva il nome di eclittica: luogo ove si verificano le eclissi). Si ha un'eclissi di Sole quando la Luna si frappone tra il Sole e la Terra (ossia in congiunzione col Sole) e un'eclissi di Luna quando la Luna è in opposizione col Sole.



(Immagine presa dalla rete)

Oggi sappiamo che l'inclinazione del piano orbitale della Luna rispetto al piano dell'eclittica evita che ogni 15 giorni circa ci sia un'eclissi di Sole o un'eclissi di Luna, poiché la Luna è periodicamente in congiunzione col Sole, al novilunio, e in opposizione col Sole, al plenilunio. Se la linea dei nodi fosse fissa nello spazio, si avrebbe un'eclissi ogni sei mesi precisi ma, per via della sua rotazione oraria, tra un'eclissi e la successiva passa un periodo inferiore a sei mesi.
[15] Vediamo in termini moderni come la parallasse (diurna) π è legata alla distanza Δ di un astro P dal centro della Terra.
Fra le molteplici direzioni lungo le quali è possibile osservare un astro da punti diversi della superficie terrestre, la direzione principale è quella con origine nel centro T della Terra.

problema, e Aristarco aveva persino ideato un metodo teorico per calcolare le distanze, che, come abbiamo visto, era però inutile da un punto di vista pratico. La procedura adottata da Ipparco era la prima in grado di fornire un valore ragionevolmente corretto per la distanza lunare quando la Luna presenta lo stesso «diametro apparente» del Sole[16].
Infatti, il Sole e la Luna appaiono sotto lo stesso angolo in una determinata posizione della Luna nella sua orbita, ovvero durante un'eclissi solare totale (Fig. 10). Le misure di questo angolo possono essere eseguite per via sperimentale, ma possono essere ricavate da osservazioni durante le eclissi lunari e, quindi, dedotte valendosi della teoria. Si dice che Ipparco abbia misurato i diametri apparenti del Sole e della Luna con la *diottra a quattro cubiti*, uno strumento osservativo di cui parleremo nelle sezioni 2.3.2.3 e 3.1.6. Necessario ai calcoli era anche il diametro dell'ombra della Terra durante un'eclissi lunare[17] alla distanza in cui la Luna presenta lo stesso diametro apparente del Sole. Si può mostrare che, dati questi due angoli nella configurazione rappresentata, se è nota la distanza della Luna EM, si può calcolare la distanza ES del Sole, o viceversa.



(Immagine presa dal libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974)

L'angolo secondo cui l'astro P sarebbe visibile dal centro T della Terra e da un punto A sulla superficie della Terra prende il nome di *parallasse diurna* di P ed è la differenza $\pi = z - z'$ tra le distanze zenitali di P osservate rispettivamente dal punto A e da T. Osserviamo che la parallasse diurna di un astro P allo zenit di A è nulla (angolo $\pi = 0°$). La figura mostra la sezione della Terra lungo il piano meridiano passante per il punto di osservazione A. La distanza zenitale osservata z è l'angolo ZAP e, la distanza zenitale geocentrica e teorica z' è l'angolo ZTP. La linea QA è perpendicolare alla direzione TP. Indicando con a il raggio della Terra, semplici considerazioni di trigonometria mostrano che:
$\mathrm{TQ} = a \cdot \cos z'$
$\mathrm{QA} = a \cdot \sin z' = \mathrm{AP} \cdot \sin \pi$
$\mathrm{QP} = \mathrm{AP} \cdot \cos \pi = a \cdot \sin z' \cdot \cot \pi$.
Pertanto, la distanza Δ tra i centri della Terra T e dell'astro P è $\Delta = \mathrm{TP} = \mathrm{TQ} + \mathrm{QP} = a[\cos z' + \sin z' \cdot \cot \pi]$
oppure, in termini della distanza zenitale osservata z, $\Delta = \frac{a \sin z}{\sin \pi}$. Dunque, misurando la distanza zenitale z di un astro P e conoscendo la sua parallasse diurna π, siamo in grado di calcolare la distanza di P dal centro della Terra misurata in raggi terrestri e, viceversa, noto il rapporto $\frac{\Delta}{a}$ siamo in grado di calcolare la parallasse diurna π di P.
[16] La Luna ha lo stesso diametro apparente del Sole (circa $30'$) durante un'eclissi totale di Sole in quanto, passando tra la Terra e il Sole, nasconde completamente il disco solare. Oggi sappiamo che ciò si verifica se la Luna, durante l'eclissi, si trova vicina al perigeo e, quindi, è piuttosto vicina alla Terra (356.000 km). Quando, invece, la Luna, passando tra la Terra e il Sole, si trova vicina all'apogeo (406.000 km), il suo diametro apparente è inferiore a quello del Sole in quanto non riesce a coprire completamente il disco solare. In questo caso si ha un'eclissi anulare di Sole.
[17] L'eclissi di Luna avviene perché la Luna si trova ad attraversare la zona della Terra opposta al Sole, e per questo in ombra. L'ombra della Terra si estende nello spazio come un cono e alla distanza della Luna la sezione di questo cono è un po' meno di tre diametri lunari. Quando la Luna transita completamente nella zona d'ombra si verifica l'eclissi totale di Luna (durata massima un'ora e mezza). Se la Luna entra solo in parte nella zona d'ombra, si dice eclissi parziale di Luna.

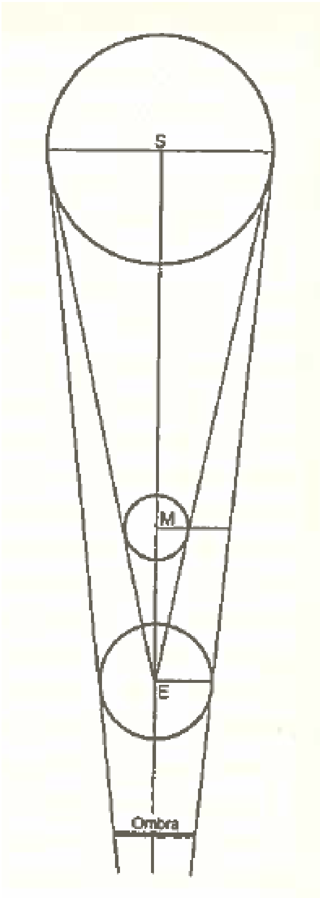


Fig. 10 – Determinazione di Ipparco delle distanze del Sole e della Luna dai diametri apparenti del Sole, della Luna e dell'ombra. Nella situazione rappresentata (eclissi di Sole totale), i dischi della Luna (di centro M) e del Sole (di centro S) sono visti sotto lo stesso angolo dal centro della Terra E. Conoscendo sia questo angolo che l'angolo sotto cui è vista l'ombra della Terra durante un'eclissi lunare alla stessa distanza della Luna, a partire dalla distanza ES del Sole (in termini del raggio della Terra) si può calcolare la distanza EM della Luna, e viceversa.
(Immagine presa dal capitolo di G. J. Toomer, *Tolomeo e i suoi predecessori greci*, in *L'astronomia prima del telescopio* a cura di C. Walker, p. 103)

Stimando la distanza ES del Sole pari a 490 raggi terrestri, Ipparco ricavò il valore di $67\frac{1}{3}$ raggi terrestri per la distanza EM della Luna. Benché l'assunzione di un valore così piccolo per la distanza del Sole possa apparire contraddittoria, in realtà, essa trova la sua giustificazione osservando che 490 raggi terrestri corrispondono ad una parallasse massima di $7'$: Ipparco, non potendo trovare un valore misurabile della parallasse per il Sole, assunse che essa dovesse essere inferiore a $7'$, il che significa che il Sole deve trovarsi ad una distanza di *almeno* 490 raggi terrestri. Si tratta di una conseguenza interessante della configurazione secondo cui se la distanza del Sole cresce, quella della Luna decresce: quindi, la quantità pari a $67\frac{1}{3}$ raggi terrestri rappresenta la *massima* distanza della Luna. Per di più, se la distanza del Sole tende all'infinito (parallasse solare nulla), quella della Luna tende non a zero ma a circa 59 raggi terrestri. Ipparco era quindi in grado di fissare la distanza della Luna, quando essa presenta lo stesso diametro apparente del Sole, compresa fra 59 e 67 raggi terrestri circa. Ciò si avvicina sufficientemente alla verità così da produrre valori per la parallasse della Luna che risultano in buon accordo con l'osservazione nel calcolo delle eclissi lunari e solari.

Ipparco riuscì quindi a elaborare una teoria del Sole e della Luna che, benché non completamente soddisfacente, fu utilizzata dai suoi successori per calcolare le posizioni di tali corpi e le eclissi risultanti. Per i pianeti, tuttavia, il suo lavoro fu critico piuttosto che costruttivo. Dimostrò che le teorie che erano state proposte fino a quel momento per spiegare il loro movimento erano inadeguate. La sua principale obiezione riguardava il fatto che i modelli planetari dei suoi predecessori greci, sia quello epicicloidale che quello eccentrico, avevano indistintamente assunto la presenza di una singola 'anomalia', ovvero un fattore responsabile del moto non-uniforme, il cui periodo era pari al tempo impiegato dal pianeta per ritornare nella stessa posizione rispetto al Sole (anomalia sinodica; si tratta della seconda anomalia della teoria dei pianeti di Tolomeo, vedere sezione 2.2.2.3). Ipparco sapeva, in virtù dei suoi studi sulle effemeridi planetarie babilonesi, che i compilatori di tali tavole avevano fatto riferimento a due anomalie, quella sinodica e quella tropica (il cui periodo era pari al tempo impiegato dal pianeta per fare ritorno allo stesso punto sull'eclittica). Egli non produsse una teoria alternativa per il moto dei pianeti, ma propose relazioni periodiche per il moto medio di tutti e cinque i pianeti conosciuti (derivate, come le sue relazioni periodiche relative alla Luna, da fonti babilonesi), e compilò inoltre un elenco di tutte le osservazioni planetarie che riuscì ad estrarre dalle fonti greche e babilonesi, convertite ad un comune calendario, al servizio dei suoi successori.

Ipparco trascorse probabilmente molti anni osservando e registrando le posizioni delle stelle fisse. Apparentemente, lo scopo era quello di delineare un globo stellare, e possiamo farci un'idea dei suoi risultati attraverso l'unica sua opera sopravvissuta fino a noi, un commento (altamente critico) delle descrizioni dei cieli da parte di Eudosso e Arato. Ma nel corso di questo lavoro di confronto fra le sue osservazioni e quelle fatte ad Alessandria negli ultimi 150 anni, fece incidentalmente la scoperta per cui oggi è universalmente famoso, cioè la «precessione degli equinozi». In particolare, nell'*Almagesto*, Tolomeo racconta che Ipparco, confrontando le sue osservazioni di Spica (α Virginis) con quelle degli astronomi alessandrini Timocari e Aristillo, si accorse che *Spica was formerly 8°, in zodiacal longitude, in advance of the autumnal [equinoctial]point, but is now 6° in advance*[18] (ovvero che, mentre al tempo di Ipparco Spica precedeva l'equinozio d'autunno di 6°, al tempo di Timocari e Aristillo lo precedeva di 8°).
In termini greci, la longitudine eclittica delle stelle fisse, misurata dal punto vernale ♈ in senso antiorario (verso est), aumenta molto lentamente. Questo moto è così lento che, stando a quanto è riportato nell'*Almagesto,* Ipparco stentava a stabilirne l'entità e, inizialmente, dubitava anche del fatto che esso riguardasse tutte le stelle o soltanto quelle in prossimità dell'eclittica (la sua volontà di contemplare questa ultima ipotesi è un notevole esempio della sua libertà dai vincoli dell'antico modo di pensare ad una «sfera di stelle fisse»). Concluse alla fine che tutte le stelle si muovono parallelamente all'eclittica con un moto da ovest verso est, generato dalla rotazione della sfera celeste intorno ai poli dell'eclittica o, piuttosto che, in accordo con il titolo della sua opera (andata perduta) *Sul Variare dei Solstizi e degli Equinozi*, i punti equinoziali e solstiziali precedono (ossia si muovono da est verso ovest) regolarmente lungo l'eclittica. Inoltre, sempre nell'*Almagesto* viene riportato che nel libro *Sulla Lunghezza dell'Anno* Ipparco afferma di aver trovato un valore per la velocità di precessione pari a 1° in 100 anni (ovvero 36″ all'anno), inferiore rispetto al valore reale di 1° in 71 anni circa (ovvero 50,23″ all'anno circa)[19].

Ipparco fu innovatore anche in altre aree: nella geografia matematica, nella progettazione di strumenti (si ha ragione di credere che abbia inventato l'astrolabio piano) e nell'astrologia. Ma la sua impresa più eclatante è la rivoluzione che avviò nell'astronomia greca. Nonostante gli enormi contributi apportati a questa rivoluzione, dovettero passare più di 300 anni prima di vedere comparire sulla scena un degno successore. Parliamo di Tolomeo, il cui *Almagesto* contiene numerosi riferimenti a Ipparco, sia di ammirazione che di critica, e resta la fonte più importante per le nostre informazioni su questo grande predecessore.
Sfortunatamente Tolomeo non fa quasi parola dello sviluppo dell'astronomia nel periodo intermedio, non tanto perché non ci fosse una classe di astronomi attivi, ma perché il suo disprezzo per il loro operato era così grande da non voler dar loro neppure una parvenza di dignità menzionandoli. Dal momento che il successo dell'*Almagesto* cancella le tracce del loro lavoro (come fece quello di Ipparco), siamo male informati su questo periodo dell'astronomia greca[20].

[18] Nell'*Almagesto* Tolomeo cita testualmente Ipparco dal suo libro (andato perduto) *Sul Variare dei Solstizi e degli Equinozi*. Si veda *Ptolemy's Almagest* (trad. ingl. e note di G. J. Toomer) Londra 1984, p. 327.
[19] Oggi sappiamo che la precessione degli equinozi è dovuta alla rotazione giroscopica della Terra attorno al proprio asse. A causa dell'azione gravitazionale del Sole e della Luna sul rigonfiamento equatoriale del nostro pianeta, il prolungamento dell'asse terrestre, che indica il polo nord celeste, traccia un cerchio di 23,5° di raggio intorno al polo nord dell'eclittica. La precessione ha questo nome perché, a causa di questo moto, la fine di ogni anno solare (o tropico) precede di 20 minuti la fine dell'anno siderale.
[20] Alcune informazioni ci vengono da ritrovamenti di papiri egizi, ma l'immagine migliore ci è offerta dalle opere a carattere astronomico di origine indiana.

Capitolo 2
L’*Almagesto* di Tolomeo: teorie planetarie e strumenti osservativi

L’astronomia greca raggiunse l’apice con l’*Almagesto* di Tolomeo. Quest’opera costituì un esempio impareggiabile nell’antichità di come un ampio insieme di fenomeni naturali potesse esser descritto in termini matematici in modo da prevederne il corso futuro con una precisione ragionevole. Per molti secoli l’*Almagesto* insegnò agli scienziati come costruire i modelli geometrici e cinematici e, mediante dati empirici ottenuti da attente osservazioni, rese possibile la riproduzione dei fenomeni naturali. È vero che i Babilonesi trionfarono nello sviluppo di metodi algebrici altamente sofisticati per descrivere i fenomeni, ma, per quanto ne sappiamo, non provarono mai a riassumere i loro metodi o i loro risultati in un lavoro completo paragonabile a questa brillante esposizione delle conoscenze ottenute da Tolomeo stesso e dai più notevoli suoi predecessori astronomi greci.
Partendo da principi basilari, Tolomeo spiega, per ogni oggetto di discussione, la natura dei fenomeni, e una loro possibile giustificazione sulla base di un modello matematico. Quindi, sulla scorta di pochi dati osservativi accuratamente scelti, determina i parametri numerici del modello e fornisce le spiegazioni opportune per costruire ognuno degli strumenti che egli stesso ha utilizzato per le sue svariate osservazioni.

2.1 La vita e il lavoro di Tolomeo

Sappiamo molto poco dell’autore dell’*Almagesto*. La sua vita e la sua personalità sono sorprendentemente oscure se paragonate a quello che sappiamo di altri illustri scienziati del mondo antico. Tutto fa supporre che visse e morì pacificamente, si dedicò completamente alla composizione del lavoro scientifico senza attirare l’attenzione degli intellettuali dell’Antichità.[21]
Consideriamo per prima cosa la lista delle osservazioni riportate nell’*Almagesto*[22]. Circa un terzo del numero totale è dovuto a Tolomeo stesso; la prima è un’osservazione di un’eclissi di Luna effettuata ad Alessandria il 5 Aprile del 125 d.C. e l’ultima è un’osservazione dell’elongazione massima di Mercurio effettuata sempre ad Alessandria il 2 Febbraio del 141 d.C. Questo suggerisce che Tolomeo raggruppò i dati osservativi per le sue teorie planetarie nel periodo 125-141 d.C., e che l’*Almagesto* deve esser stato concluso dopo il 141 d.C. Tuttavia, possediamo una prova sufficiente che Tolomeo continuò il suo lavoro scientifico dopo aver completato il suo *Almagesto*: nel 147/48 d.C. eresse una stele nella città di Canopo, circa 25 km a est di Alessandria, nella quale sono incisi parametri migliorati dei modelli planetari. Ulteriormente migliorati sono i parametri trovati nelle *Tavole Astronomiche Manuali* che sembrano essere persino successive. Anche il lavoro sulle *Ipotesi Planetarie*, così come il lavoro astrologico *Tetrabiblos*, è posteriore all’*Almagesto*, come affermato esplicitamente nei testi. Infine, sembra che il grande trattato di Tolomeo sulla *Geografia* sia successivo alle *Tavole Manuali*. Se consideriamo che Tolomeo lasciò anche un significativo numero di altri lavori sull’ottica, la musica, la matematica e la filosofia, concludiamo che l’attività scientifica di Tolomeo iniziò circa nel 125 a.C. e continuò fino al regno di Marco Aurelio (161-180). Probabilmente le date della sua nascita e della sua morte sono rispettivamente circa 100 d.C. e 165 d.C.
Non sappiamo dove Tolomeo nacque. Il suo nome, Claudio, è latino, mentre il cognome, Tolomeo, è certamente greco[23] potrebbe essere un’indicazione della sua provenienza da una delle varie città egiziane chiamate come i sovrani tolemaici. Certo è il fatto che eseguì le sue osservazioni ad Alessandria come affermato in diversi punti nell’*Almagesto*. Di conseguenza, i nuovi strumenti che inventò e costruì dovevano trovarsi lì in una specie di osservatorio.
Dal regno di Tolomeo I Sotere (capostipite della dinastia tolemaica che governò l’Egitto ellenistico dal 305 a.C. al 30 a.C.) Alessandria divenne famosa per la sua scuola dove, per esempio, Euclide e Archimede studiarono ed Eratostene fece il bibliotecario. La Biblioteca di Alessandria fu insuperabile nel mondo antico e conteneva diverse centinaia di migliaia di scritti provenienti dalla Grecia e dall’Oriente. Qui Tolomeo ebbe accesso non solo ai risultati di Ipparco, Aristarco e il primo astronomo alessandrino Timocari, ma anche alle osservazioni del V secolo a.C. effettuate ad Atene

---

[21] Le teorie planetarie esposte nell’*Almagesto* e la diffusione dell’astronomia tolemaica fino al XV secolo, sintetizzate nei paragrafi 2.1 e 2.2, sono ampiamente trattate dagli autori O. Pedersen, *A survey of the Almagest,* 1974; A. Pannekoek, *Una storia dell’astronomia* (traduzione italiana disponibile nel materiale didattico del corso di “Storia della Cosmologia” tenuto dal Prof. F. Bonoli dell’Università di Bologna); G. J. Toomer, *Tolomeo e i suoi predecessori greci*, in *L’astronomia prima del telescopio* a cura di C. Walker; M. Hoskin, *Storia dell’Astronomia*, 2017.
[22] La lista completa di tutte le osservazioni riportate da Tolomeo nell’*Almagesto* si trova nel libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974, Appendice A.
[23] Precisamente di origine macedone; Tolomeo (in greco Ptolomaios) fu uno dei generali macedoni di Alessandro Magno.

da Metone e Euctemone, e persino agli antichi registri Babilonesi che gli hanno permesso di far uso dell'osservazione di eclissi lunare a Babilonia nel 721 a.C. circa. Tolomeo fa riferimento ad un solo scienziato contemporaneo, Teone di Smirne, che, probabilmente suo amico o allievo, consegnò le sue osservazioni comprese tra i 127 e il 132 d.C. direttamente a Tolomeo stesso. A differenza degli altri autori ellenistici, Tolomeo prestò molta attenzione nel citare le sue fonti e nel riconoscere il lavoro dei suoi predecessori.

2.1.1 La diffusione dell'astronomia tolemaica fino al XV secolo

Per più di un secolo dopo la morte di Tolomeo gli scienziati ellenistici non parlarono del suo lavoro astronomico. Tuttavia, c'è ragione di credere che fosse molto stimato nella scuola alessandrina dove il matematico Pappo, verso il 320 d.C., scrisse il primo di molti commentari all'*Almagesto*. Solo parte del commentario sui Libri V e VI (l'*Almagesto* è suddiviso in tredici libri) sono sopravvissuti. Nella seconda metà del IV secolo d.C. un altro matematico alessandrino, chiamato Teone, pubblicò un nuovo commentario (circa 360 d.C.); la maggior parte del suo lavoro ci è pervenuto. Secondo la tradizione, anche la famosa figlia di Teone, Ipazia, scrisse su Tolomeo. Successivamente, il matematico bizantino e filosofo neo-platonico Proclo Licio Diadoco (410 circa – 485 d.C.) scrisse l'*Hypotyposis*, un'introduzione all'astronomia di Ipparco e Tolomeo. Questo fu l'ultimo lavoro greco sull'astronomia tolemaica prima della chiusura dell'Accademia Platonica di Atene nel 529 d.C.
Già prima che la civiltà ellenistica raggiunse il suo stadio finale, la scienza greca aveva iniziato a diffondersi ad est. Dalle scuole in difficoltà di Alessandria, Antiochia e Atene gli studenti greci emigrarono in Mesopotamia, in Persia e persino in India. I dettagli della diffusione dell'astronomia greca tra i popoli orientali è tuttora oggetto di studio ma non ci sono prove che i Persiani o gli Indiani possedessero l'*Almagesto* nella loro lingua.
È un fatto curioso che Tolomeo divenne noto tra gli Arabi come un astrologo prima che si conoscessero i suoi lavori sull'astronomia. La storia dell'*Almagesto* arabo è piuttosto oscura e non sappiamo per certo quando e da chi fu eseguita la prima traduzione dal testo greco. Nella versione comparsa nell'829-30 (traduzione in arabo eseguita a Baghdad da al-Hajjâj ibn Yusuf) il lavoro prese il suo nome attuale: la *Megale Mathematiké Syntaxis* (*Grande compilazione matematica*, ossia astronomica) fu chiamata *Kitāb al-mijisti*, dove *kitāb* significa 'libro' e il superlativo greco "μεγίστη" ("megiste"), arabizzato in "*al-mijisti*", significa "la più grande". Il titolo arabo fu più tardi reso in latino come "Almagestum", da cui "Almagesto".
Nel corso del IX secolo l'*Almagesto* fu perciò salvato dall'oblio dagli studenti che parlavano arabo e il risultato fu che l'astronomia musulmana acquisì un definito carattere tolemaico.
Nel XII secolo Tolomeo era conosciuto dagli astronomi latini attraverso una lunga serie di traduzioni dei suoi lavori; anche qui l'astrologia anticipò l'astronomia essendo il *Tetrabiblos* una delle prime versioni circolate in latino (tradotte dall'arabo). Per quanto riguarda l'*Almagesto* latino, sappiamo che una traduzione fu effettuata circa nel 1160 in Sicilia direttamente dal greco e rappresenta la prima versione latina conosciuta dell'opera anche se venne usata poco. Una traduzione dall'arabo fu effettuata nel 1175 dai più operosi traduttori del XII secolo, tra i quali Gerardo di Cremona che visse e lavorò a Toledo. Questa divenne la versione standard dell'*Almagesto* ampiamente usata nei successivi tre o quattro secoli.
La tradizione letteraria dell'*Almagesto* durante il Medioevo è ancora oggetto di studio. Nonostante la grande stima degli astronomi medievali, l'opera veniva di rado studiata da cima a fondo. Il ridotto numero dei manoscritti esistenti indicano che la maggior parte degli astronomi non possedevano una copia e non potevano averne accesso alle biblioteche. La ragione risiede nel fatto che il lavoro era altamente tecnico e comportava molte difficoltà agli studenti medievali dotati di scarse conoscenze astronomiche e matematiche. Ricordiamo, per esempio, che gli *Elementi* di Euclide vennero tradotti solo poco prima l'*Almagesto*. Dal punto di vista letterario la storia dell'astronomia Medievale è la storia di come l'astronomia tolemaica fu assimilata, insegnata e modellata nella sua particolare forma latina senza far uso direttamente dell'*Almagesto* stesso. Fino al XV secolo era sconosciuto alla maggior parte degli studenti: nonostante fosse noto il nome dell'opera, l'astronomia veniva insegnata e studiata utilizzando testi secondari che riassumevano i concetti principali dei vari modelli planetari descritti nell'*Almagesto*.

2.1.2 La stampa dell'*Almagesto*

L'*Almagesto* venne salvato dall'oblio da un piccolo gruppo di scienziati appartenenti al movimento culturale dell'Umanesimo volto alla riscoperta dei classici greci, incluse le fonti greche della scienza naturale. Il ruolo centrale in questa fase è ricoperto dal giovane studente austriaco, George Peurbach (1423 - 1461), che trascorse la maggior parte della sua vita accademica all'università di Vienna. Peurbach teneva lezioni sulle teorie planetarie che furono rese pubbliche nella forma di un manuale. È interessante notare che, presumibilmente, Niccolò Copernico imparò le prime nozioni di astronomia proprio con il libro di Peurbach quando era studente a Cracovia, tra il 1491 e il 1496.
Tuttavia, il lavoro di Peurbach non presentava uno studio dettagliato dell'*Almagesto* e negli anni successivi ci fu un cambiamento radicale della situazione grazie all'attività di due studenti bizantini.

Uno di questi era il filosofo cretese George di Trebizond (1395 - 1484) che, dal 1430, visse in Italia e lavorò per il Papa Niccolò V producendo un grande numero di traduzioni dal greco. Tra queste troviamo una versione latina completa dell'*Almagesto* pubblicata nel 1451. Se si trascura la versione siciliana (menzionata nella sezione precedente), poco influente, quella di George di Trebizond costituisce la prima traduzione dal testo originale dell'opera principale di Tolomeo.
Osserviamo, però, che alcuni studenti contemporanei di George di Trebizond criticarono il suo lavoro, evidenziando traduzioni molto spesso frettolose o poco chiare. Tra l'altro, è probabile che l'autore non possedesse neanche le competenze astronomiche necessarie per produrre una versione latina dell'*Almagesto*.
L'altro personaggio chiave nella traduzione del lavoro di Tolomeo dal greco è rappresentato dal cardinale Johannes Bessarion (1403 - 1472) che fu al centro del movimento umanistico a Roma. In un suo soggiorno a Vienna nel 1460, Bessarion provò a rimediare ai difetti della traduzione dell'*Almagesto* di Trebizond convincendo Peurbach a realizzare una nuova traduzione dal greco. Peurbach iniziò a lavorare con grande entusiasmo e terminò una bozza dei primi sei libri prima della sua morte prematura, avvenuta nel 1461. Lo sostituì il suo pupillo Johannes Müller, o Regiomontano (1436 - 1476), che nello stesso anno seguì Bessarion a Roma. Sistematosi a Norimberga nel 1471, Regiomontano creò qualcosa che l'Europa latina non aveva mai visto prima: un istituto di ricerca scientifica esterna e indipendente dalle università che comprendeva un osservatorio, un laboratorio per la progettazione degli strumenti astronomici ed anche una macchina da stampa per la pubblicazione dei testi scientifici. Con questa attività inizia la storia delle edizioni stampate dell'*Almagesto*.
Abbiamo notizie della circolazione di un foglio pubblicitario, attorno il 1474, in cui Regiomontano annunciava la vendita della teoria planetaria di Peurbach (che perciò divenne il primo libro stampato di astronomia teorica) e l'intenzione di pubblicare una nuova traduzione dell'*Almagesto*. È molto probabile che Regiomontano avesse in mente la traduzione di Peurbach che pensava di portare a compimento ma, la sua morte prematura annullò il progetto.

La prima traduzione completa dell'*Almagesto*, in latino, venne pubblicata nel 1515 dallo stampatore Petrus Lichtenstein, il quale si avvalse della vecchia traduzione di Gerardo di Cremona. Dunque, si trattava della traduzione latina di una versione araba dell'opera originale, scritta in greco. Una traduzione direttamente dal greco era preferibile, e nel 1528 la famosa stamperia Giunti di Venezia pubblicò la versione latina, imprecisa, realizzata nel 1451 da George di Trebizond.
Le divergenze delle due versioni resero necessario la stampa di un'edizione dell'originale opera in greco. A tal scopo, Simon Gryneus e Joachim Camerarius si avvalsero del testo (andato perso), precedentemente posseduto da Regiomontano, e nel 1538 pubblicarono questa nuova edizione a Basilea. L'*Almagesto* venne, finalmente, resuscitato, ma le due inadeguate versioni latine restarono per diversi secoli le uniche traduzioni disponibili.

Nel presente lavoro di tesi è stata consultata una versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46. La nota tipografica alla fine del libro indica il nome della stamperia insieme al luogo e alla data di pubblicazione: officina Henrichi Petri, Basilea, Marzo 1551 (Figg. 11 e 12). Tra i vari traduttori e collaboratori della versione compaiono i nomi di George di Trebizond e Joachim Camerarius. L'edizione comprende anche l'*Hypotyposis* di Proclo Licio Diadoco (410 circa – 485 d.C.).
L'indice dell'opera e una pagina del successivo, accurato, indice dei nomi sono stati riportati in Appendice A.
Durante la consultazione sono state trovate diverse immagini di strumenti osservativi dislocate, soprattutto, in una parte iniziale che precede il testo dell'*Almagesto*. Le immagini e le descrizioni degli strumenti, presenti in questa versione, sono state riportate nel paragrafo 2.3. Nell'Appendice B sono state, invece, riportate le immagini di due strumenti osservativi non propriamente descritti da Tolomeo nell'*Almagesto*.

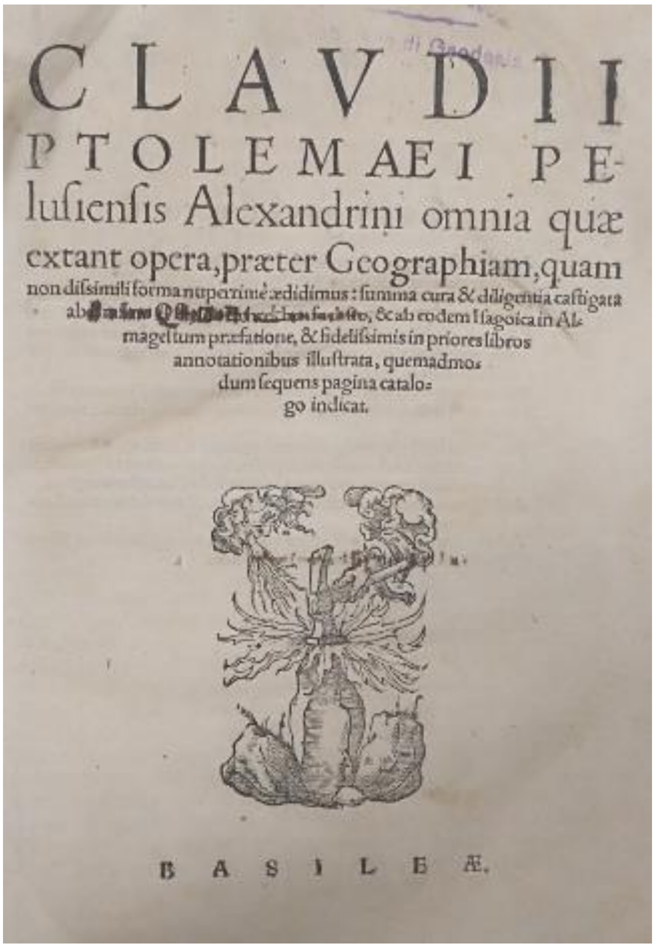


Fig. 11 - Titolo dell’edizione in latino dell’*Almagesto* conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna, in via Irnerio 46: *Claudii Ptolemaei Pelusiensis Alexandrini omnia quae extant opera, praeter Geographiam, quam non dissimili forma nuperrime aedidimus: summa cura & diligentia castigata ab Erasmo Osvaldo Schrekhenfuchsio, & ab eodem Isagoica in Almagestum praefatione, & fidelissimis in priores libros annotationibus illustrata, quemadmodum sequens pagina catalogo indicat. Basileae.*

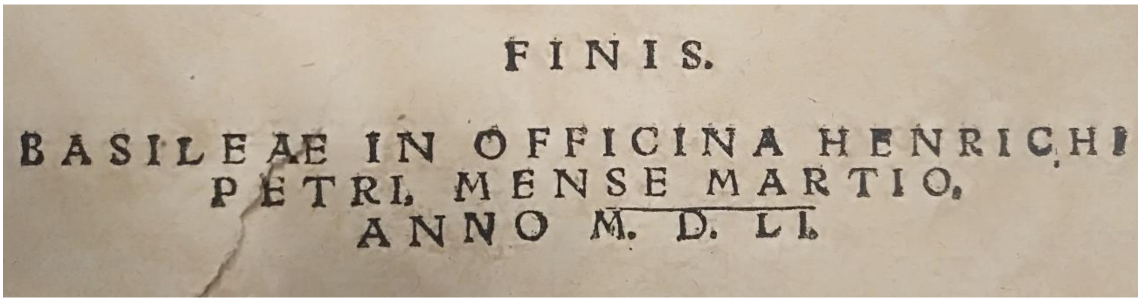


Fig. 12 – Luogo e data di pubblicazione: officina Henrichi Petri, Basileæ, Marzo 1551.

2.2 L’*Almagesto*: struttura e teorie planetarie

Nell’*Almagesto*, il metodo di esposizione inizia ovunque con le osservazioni più certe effettuate dagli osservatori precedenti o contemporanei a Tolomeo; nella fase successiva queste osservazioni vengono connesse tra loro mediante una teoria matematica, sviluppata nella forma di modelli geometrici. Questo programma è in perfetto accordo con quello che gli astronomi greci erano abituati a fare da secoli, e contrasta chiaramente con le strutture teoriche puramente algebriche applicate dai loro colleghi babilonesi. Ma Tolomeo non concepisce il suo metodo come un processo puramente induttivo in cui le teorie sono create dalle osservazioni in un modo più o meno automatico. Al contrario, egli adotta una maniera espositiva in cui le caratteristiche generali del modello finale sono presupposte o postulate già

dall'inizio. In alcune parti questo stile rende l'*Almagesto* difficile: un modello si sta sviluppando su dati empirici descritti in termini del modello stesso.
Prima di parlare del problema che lo interessa maggiormente, ovvero come fare un resoconto teorico dei moti del Sole, della Luna e dei pianeti, Tolomeo deve imbattersi in questioni metodologiche e filosofiche. La sua più profonda convinzione è che le cose non sono quello che sembrano: la struttura reale dell'Universo non può essere percepita con i nostri sensi e può rivelarsi solo agli occhi della mente. Come ogni seguace di Platone, Tolomeo deve distinguere i fenomeni osservabili dalle loro cause nascoste. La conseguenza di questa idea è che quello che realmente esiste deve essere immutabile, così che tutti i fenomeni variabili sono pure apparenze (moti apparenti dei corpi celesti). D'altra parte, la scienza si fonda sul fatto che anche gli eventi naturali più caotici sono causati da leggi immutabili.
Questo atteggiamento ha implicazioni immediate nell'astronomia. Già nella prefazione al Libro I Tolomeo richiama l'attenzione sull'ordine perfetto e sull'immutata bellezza del cielo che lo hanno portato a studiare il corso delle stelle. Un esempio di questo ordine è la perfetta regolarità con cui il cielo compie la sua rotazione diurna. Ma questo è un caso particolare, e in generale le regolarità non appartengono alla nostra esperienza: il moto diretto tra le stelle fisse dei cinque pianeti verso est viene spesso interrotto dal moto retrogrado verso ovest e anche il corpo celeste più perfetto, il Sole, non è incontaminato dal disordine in quanto, anche se non ha moto retrogrado, la diversa lunghezza delle quattro stagioni mostra che segue il suo corso lungo l'eclittica con velocità variabile. Perciò, la maggior parte dei fenomeni celesti esibisce un intrigante miscuglio di ordine e disordine costringendoci ad ammettere che ciò che percepiamo con i nostri sensi non rappresenta il moto reale, ma solo l'apparenza.
Allora, il compito dell'astronomo teorico è quello di provare a dimostrare che anche i fenomeni celesti più confusi e caotici possono essere spiegati in termini di leggi ordinate immutabili. Di conseguenza, il suo scopo deve essere per prima cosa quello di scoprire e formulare tali leggi, e poi di dimostrare che i fenomeni possono essere da queste dedotti. Per far fronte a questo problema occorre usare la matematica e nell'astronomia greca questo equivale ad esprimere le teorie astronomiche in termini geometrici.

Secondo Gemino (matematico, astronomo e commentatore che fiorì verso il 70 a.C.) furono i Pitagorici i primi ad assumere che i moti del Sole, della Luna e dei pianeti fossero circolari e uniformi. Tolomeo, nel Libro III dell'*Almagesto* considera un punto che si muove su una circonferenza descrivendo angoli uguali in tempi uguali rispetto al centro; questo equivale a dire che il moto del punto avviene con velocità angolare costante, un termine di origine più recente e sconosciuto agli astronomi antichi e medievali. Questa nozione di moto circolare uniforme è fondamentale. La storia dell'astronomia teorica greca è, in larga parte, la storia di una lunga serie di sforzi nel dare una spiegazione delle irregolarità osservate mediante un insieme di moti circolari uniformi. Aristotele si fece portavoce del fatto che i moti circolari potessero essere:

1) uniformi se visti dai centri delle loro orbite, e
2) concentrici con l'universo nel suo complesso

Sappiamo che una teoria che soddisfaceva queste richieste fu proposta da Eudosso, ma fallì perché non riuscì a spiegare le distanze variabili dei pianeti. Perciò sia Apollonio che Ipparco conservarono la prima condizione, ma furono costretti ad abbandonare la seconda, ammettendo, nelle loro teorie, circonferenze con centri diversi da quello dell'universo; ovvero, considerarono moti con velocità angolari costanti rispetto ai centri delle orbite circolari.
La posizione di Tolomeo è piuttosto complessa. Osserviamo che prima di iniziare lo studio delle sue teorie planetarie, ammette esplicitamente la validità del principio di moto circolare uniforme; nell'introduzione alla teoria solare leggiamo infatti che per dimostrare l'apparente anomalia del Sole *we must make the general point that the rearward displacements of the planets with respect to the heavens are, in every case, just like the motion of the universe in advance, by nature uniform and circular*[24]. Quest'affermazione dogmatica è puramente metafisica. D'altra parte la sua è una mera adesione di facciata al dogma tradizionale in quanto, appena trova l'opportunità di farlo, non esita ad allontanarsene. Tolomeo, dunque, fa il passo successivo ad Ipparco e agli altri astronomi precedenti ammettendo nella teoria planetaria anche i moti circolari uniformi rispetto ad un punto diverso dal centro della circonferenza, ovvero i moti circolari non uniformi rispetto al centro della circonferenza. È singolare il fatto che Tolomeo finga dappertutto di aderire alla tradizione senza commentare i punti in cui l'abbandona.

Vediamo ora la struttura dell'*Almagesto* e le varie teorie planetarie descritte da Tolomeo.

2.2.1 La struttura dell'*Almagesto*

L'*Almagesto* è un compendio sistematico di astronomia matematica suddiviso in tredici Libri. L'opera fornisce modelli geometrici e tavole correlate che permettevano di calcolare i moti del Sole, della Luna e dei cinque pianeti inferiori per un futuro indefinito. Nel seguito si andranno a riassumere i contenuti principali di ogni Libro.

[24] Si veda *Ptolemy's Almagest* (trad. ingl. e note di G. J. Toomer), Londra 1984, p. 141.

2.2.1.1 Libri I e II: la matematica e l'astronomia sferica come prerequisiti per lo studio della teoria planetaria

L'*Almagesto* inizia con una prefazione [I, 1; T84, 35][25] in cui l'intero lavoro è dedicato a un certo Syrus di cui non sappiamo niente. Sarà sicuramente stato un personaggio molto vicino a Tolomeo dato che gli dedicò anche altri lavori: le *Ipotesi Planetarie*, le *Tavole Manuali* e il *Tetrabiblos*, cioè il corpo principale dei suoi scritti astronomici e astrologici. Questo capitolo introduttivo è di notevole importanza dal punto di vista filosofico.

Dopo la prefazione segue un breve capitolo [I, 2; T84, 37] in cui viene illustrato lo schema dell'*Almagesto*:

A. Una breve parte generale in cui si parla della Terra e della sua posizione nell'universo [I, 3-11].
B. Una lunga parte speciale che comprende 3 sezioni:
   1) i problemi di astronomia sferica e le loro soluzioni matematiche [I, 12-II];
   2) la teoria del moto del Sole e della Luna [III-VI] come un'introduzione necessaria alla teoria dei pianeti;
   3) la teoria delle stelle, divisa in due sottosezioni:
      a) le stelle fisse [VII-VIII],
      b) i cinque pianeti (Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno) [IX-XIII].

La sezione B.3 costituisce il cuore dell'intero lavoro ed è molto probabile che sia in larga parte dovuta a Tolomeo stesso. La maggior parte delle sezioni B.1 e B.2, invece, era nota ai suoi predecessori, in particolare a Ipparco.

Nei sei capitoli [I, 3-8; T84, 38-47], che costituiscono la 'Parte Generale' dell'*Almagesto*, Tolomeo descrive la sfera celeste, i vari moti osservati nel cielo, e la forma, la posizione, la dimensione e l'immobilità della Terra. In generale, le dottrine qui esposte caratterizzano quello che divenne noto come l'Universo Tolemaico, sebbene fossero state descritte coerentemente per la prima volta da Aristotele.

Anche se concisamente, Tolomeo considerò necessario includere nell'*Almagesto* gli assunti fondamentali cosmologici come prerequisiti alla comprensione della teoria planetaria:

- La volta celeste è una sfera che ruota intorno a un asse fisso passante per i poli celesti (rotazione diurna del cielo), com'è dimostrato dal moto circolare delle stelle circumpolari e dal fatto che le altre stelle sorgono e tramontano sempre agli stessi punti dell'orizzonte.
- La Terra è una sfera, collocata nel centro del cielo; se così non fosse, una parte del cielo ci apparirebbe più vicina dell'altra e le stelle sarebbero più grandi nella parte a noi più prossima; se la Terra si trovasse sì sull'asse celeste, ma più vicina a un polo che all'altro, l'orizzonte non taglierebbe in due parti uguali l'equatore celeste ma uno dei cerchi a esso paralleli; se la Terra si trovasse fuori dell'asse, l'eclittica sarebbe divisa in parti ineguali dall'orizzonte.
- La Terra è come un punto in confronto al cielo, poiché le stelle appaiano della stessa grandezza e alla stessa distanza da qualunque punto di osservazione sulla Terra.
- La Terra non ha alcun moto di traslazione, in primo luogo perché ci dev'essere un qualche punto fermo a cui possano essere riferiti i moti delle altre cose, in secondo luogo perché i corpi pesanti discendono al centro del cielo, che è anche il centro della Terra. Se ci fosse un moto, dovrebbe essere proporzionato alla grande massa della Terra e lascerebbe indietro animali e oggetti sospesi o proiettati in aria. Quest'argomento confuta anche la tesi di coloro i quali affermano che la Terra, benché immobile di moto locale, ruoti intorno al suo asse, ciò che, come Tolomeo riconosce, renderebbe tutto più facile.
- Ci sono alcune stelle erranti che si comportano diversamente dalla maggior parte delle stelle: il Sole, la Luna e i cinque pianeti. Questi sette corpi compiono dei moti individuali verso est rispetto alle stelle fisse e, allo stesso tempo, prendono parte alla rotazione diurna. Il percorso apparente del Sole tra le stelle fisse è un grande cerchio, chiamato eclittica, che interseca l'equatore celeste in due punti diametralmente opposti, l'equinozio di primavera e l'equinozio d'autunno. I restanti sei pianeti seguono un percorso ancora più complicato: si muovono lungo l'eclittica completando le loro rivoluzioni in periodi leggermente variabili e, al tempo stesso, hanno un moto in latitudine, cioè si allontanano un po' dall'eclittica (in prima approssimazione sembra che ruotano su grandi cerchi inclinati di piccoli angoli rispetto all'eclittica tagliandola in due punti opposti, chiamati nodo ascendente e nodo discendente).

La parte geometrica dell'*Almagesto* inizia con un capitolo [I, 10; T84, 48] in cui Tolomeo spiega la costruzione di una tabella di corde in una circonferenza che verrà usata nei numerosi calcoli trigonometrici del suo lavoro. È quasi certo che tabelle simili fossero usate già molto tempo prima di Tolomeo: il suo commentatore Teone di Alessandria afferma che "*an investigation of chords in a circle is made by Hipparchus in 12 Books, and again by Menelaus in 6 Books*"[26] . Inoltre, è molto probabile che Ipparco non sarebbe riuscito a sviluppare la sua teoria del Sole senza una tabella trigonometrica. Tuttavia, la tabella di corde di Tolomeo è la prima ad essere sopravvissuta fino ai nostri giorni e la spiegazione della sua costruzione costituisce il primo trattato sulla trigonometria che conosciamo.

---

[25] Questa notazione indica Libro I, Capitolo 1, *Ptolemy's Almagest* (trad. ingl. e note di G. J. Toomer), Londra 1984, p. 35. Tutti i riferimenti sull'*Almagesto*, nel presente lavoro di tesi, saranno dati in modo simile.

[26] Questa citazione di Teone di Alessandria (ed. Rome) si trova nel libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974, p.56.

Come i precedenti matematici greci, Tolomeo adottò la divisione di una circonferenza in 360°. Il suo scopo è quello di determinare la lunghezza della corda corrispondente a x° di arco in un cerchio di raggio R. Poiché questa lunghezza deve essere proporzionale a R basta risolvere il problema per un cerchio standard: nella trigonometria moderna di solito si prende un cerchio standard con il raggio di una unità ma, al fine di usare il sistema numerico sessagesimale, Tolomeo considera un cerchio standard con un raggio di 60 unità di lunghezza. Indicata con ch(x°) la lunghezza di una corda relativa a x° di arco in una circonferenza di raggio R = 60 unità è interessante vedere come in notazione moderna una corda ch(α) è data dalla formula:

$$\mathrm{ch}(\alpha) = 2R \cdot \sin\frac{\alpha}{2} \text{ e quindi } \sin\alpha = \frac{\mathrm{ch}(2\alpha)}{2R}$$

cioè, la tavola delle corde (*Table of Chords* [I, 11; T84, 57-60]) è equivalente ad una moderna tavola dei seni (troviamo sin α da ch(2α)). Poiché cos α, tan α e cot α possono esprimersi in funzione di sin α, questa tabella costituisce la base per la risoluzione di ogni problema di trigonometria elementare.

Nei restanti capitoli del Libro I [I, 12-16; T84, 61-74] Tolomeo sviluppa la trigonometria sferica in relazione all'astronomia sferica che costituisce l'argomento principale del Libro II dell'*Almagesto*. In particolare, nel capitolo 12 del Libro I, Tolomeo descrive due strumenti osservativi, l'*armilla meridiana* (vedere sezione 2.3.1.1) e il *plinto* (2.3.1.2), mediante i quali determina l'obliquità dell'eclittica ε rispetto all'equatore celeste.

Il Libro II si occupa quasi esclusivamente di mostrare come le proposizioni geometriche dell'astronomia sferica, note prima di Tolomeo, possano essere sottoposte al calcolo numerico: non c'è dubbio che parte di questo lavoro risalga a Ipparco ed è difficile separare i risultati raggiunti da Tolomeo da quelli dei suoi grandi predecessori. Tali calcoli di solito coinvolgono un numero di variabili alcune delle quali sono identiche alle coordinate celesti usate oggigiorno. Ricordiamo che l'*Almagesto* è prima di tutto un'esposizione della teoria planetaria che descrive il moto dei pianeti mediante modelli geometrici: poiché tutti questi moti hanno luogo nell'intorno dell'eclittica, capiamo perché le coordinate maggiormente usate da Tolomeo sono la longitudine eclittica e la latitudine eclittica.

2.2.1.2 Libri III, IV e V (capitoli 1-10): le teorie del moto del Sole e della Luna

Il contenuto del Libro III e dei Libri IV e V (capitoli 1-10) sono stati riassunti rispettivamente nelle sezioni 2.2.2.1 e 2.2.2.2.

2.2.1.3 Libro V (capitoli 11-19): la teoria della parallasse

Dopo aver trattato la teoria della Luna (sezione 2.2.2.2), Tolomeo dedica gli ultimi capitoli (11-19) del Libro V alla teoria della parallasse. Secondo quanto riportato nell'*Almagesto*, le stelle fisse e i cinque pianeti ordinari non mostrano una parallasse apprezzabile. D'altra parte, la Luna è abbastanza vicina alla Terra da mostrare una posizione diversa se osservata dalla superficie terrestre o calcolata rispetto al centro del nostro pianeta. L'esistenza di una parallasse lunare conduce, così, Tolomeo a correggere alcune delle osservazioni della Luna su cui costruì la sua teoria lunare.

Allo scopo di elaborare una successiva teoria predittiva delle eclissi, Tolomeo deve determinare la parallasse del Sole. La parallasse di un astro si trova dalla differenza $\pi = z - z'$ tra le sue distanze zenitali osservate rispettivamente da un punto sulla superficie terrestre z e dal centro della Terra z' (si veda la nota [15]), ma nel caso del Sole Tolomeo non misura direttamente la parallasse con questo metodo. Così, nel capitolo 11 del Libro V afferma che è possibile trovare la distanza del Sole, e quindi la sua parallasse, dal diametro dell'ombra della Terra che, a sua volta, può essere ricavato dalla magnitudine di un'eclissi lunare[27]. Vediamo brevemente in che modo.

Il primo passo consiste nel determinare la distanza della Luna e, a tale scopo, Tolomeo costruisce uno speciale strumento di osservazione, chiamato *strumento parallattico* (che descriveremo nelle sezioni 2.3.2.2 e 3.1.5) mediante il quale è possibile misurare le distanze zenitali con grande precisione[28]. Nel capitolo 12 Tolomeo spiega che, per trovare la parallasse lunare, il triquetro va usato in congiunture celesti propizie: la Luna deve trovarsi al meridiano, vicina all'uno o all'altro solstizio e in prossimità dei punti di massima distanza intrinseca dall'eclittica. Solo una volta ogni 19 anni circa la Luna capita in prossimità del solstizio estivo e, in più, tocca la massima distanza settentrionale dall'eclittica, transitando al meridiano a soli $2\frac{1}{8}°$ dallo zenit di Alessandria. In tale rara evenienza, la parallasse è trascurabile e, note la latitudine della città e l'obliquità dell'eclittica, Tolomeo stabilisce che la circonferenza della Luna è inclinata di 5° sull'eclittica. Il risultato permette di trovare la parallasse presente una congiuntura celeste antitetica. Una volta ogni 19 anni circa la Luna capita in prossimità del solstizio invernale e, in più, tocca la massima distanza meridionale dall'eclittica. In questo caso la parallasse raggiunge il valore massimo misurabile. In proposito, Tolomeo riferisce una sola osservazione eseguita il 1° ottobre 135 d.C. ad Alessandria, che però non risponde in tutto alle

[27] La magnitudine di un'eclissi è misurata in digit e, in questo caso di eclissi lunari, 1 digit è definito come la dodicesima parte del diametro apparente della Luna. Pertanto, una magnitudine di 5 digit, ad esempio, indica che, nella fase massima del fenomeno, $\frac{5}{12}$ del diametro lunare si trova dentro l'ombra della Terra.

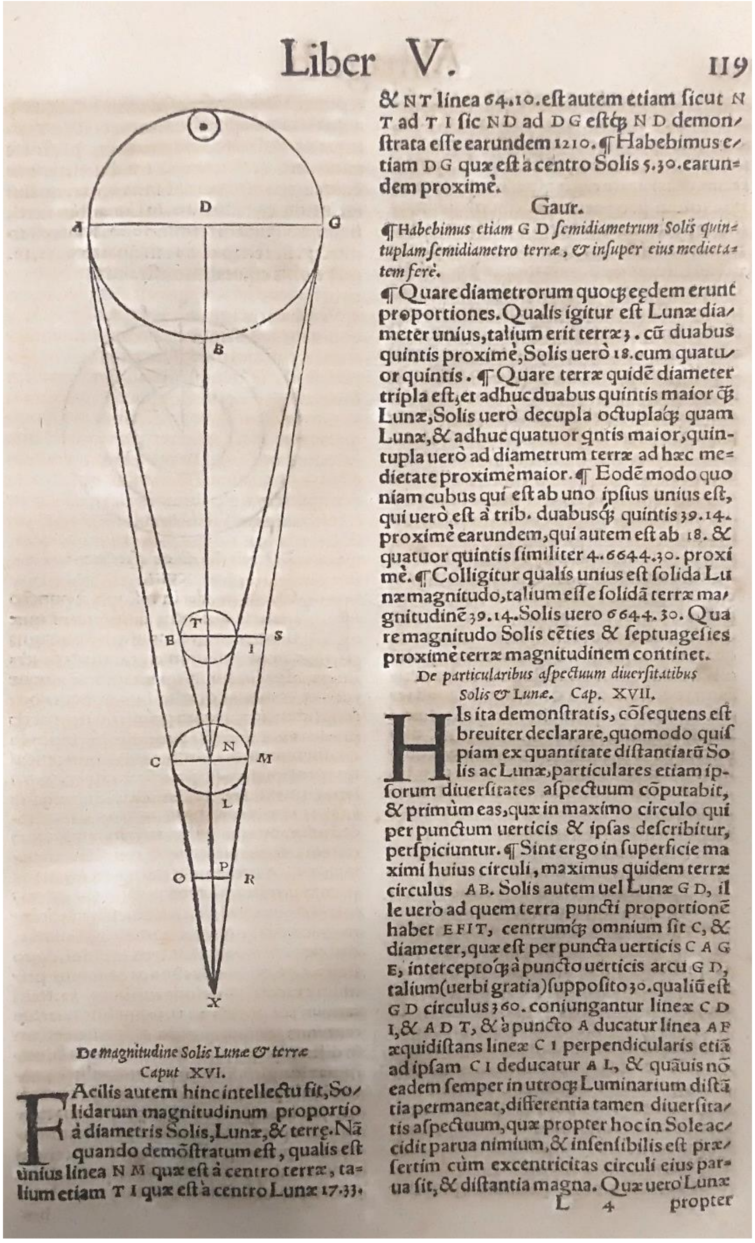
[28] [V, 12; T84, 244]

condizioni ottimali. A fronte di una distanza zenitale geocentrica, calcolata dalla teoria lunare, di $z' = 49° 48'$, egli misura una distanza zenitale apparente di $z = 50° 55'$ ottenendo, così, un valore per la parallasse lunare pari a: $\pi = 1° 7'$ (Tolomeo non si interroga sull'accuratezza del suo risultato e, nel resto della teoria della parallasse e nella successiva teoria delle eclissi usa questo valore). In tal modo, ricava una distanza lunare media pari a 59 raggi terrestri, approssimativamente in accordo con ciò che Ipparco aveva già trovato (e anche in accordo con la distanza reale: 60,3 raggi terrestri).
A questo punto, a partire da tale numero, Tolomeo adotta il metodo di Ipparco nel calcolare la distanza solare. Il diametro apparente della Luna è circa mezzo grado e, per ottenere un valore più preciso, Tolomeo costruisce lo strumento descritto da Ipparco, la *diottra a quattro cubiti*[29] (vedere sezioni 2.3.2.3 e 3.1.6) Con questo strumento trova che:

1) Il diametro apparente del Sole è costante nei limiti di osservazione.
2) Il diametro apparente della Luna è variabile ed equivale a quello del Sole quando la Luna piena si trova alla distanza massima dalla Terra[30].

Non soddisfatto delle misure ottenute con la diottra, Tolomeo determina indirettamente il diametro apparente lunare e il diametro dell'ombra della Terra alla distanza lunare basandosi su due antiche eclissi lunari osservate a Babilonia, avvenute quando la Luna era alla sua massima distanza dalla Terra. Nell'eclissi del 22 aprile 621 a.C. un quarto del diametro della Luna venne eclissato, mentre nell'eclissi avvenuta il 16 luglio del 523 a.C. venne eclissata la metà del suo diametro. A questo punto, con il diametro lunare (pari a $31' 20''$), il diametro dell'ombra della Terra e la distanza della Luna, calcolata precedentemente, Tolomeo trova una distanza solare di 1.210 raggi terrestri, ovvero una parallasse solare di $2' 46''$. (Poiché sappiamo che il valore reale della distanza solare è circa 23.400 raggi terrestri, il valore di Tolomeo è errato per difetto di circa 19 volte.[31])
Trovate le distanze della Luna e del Sole e i loro diametri angolari apparenti, Tolomeo dedica un capitolo[32] al calcolo delle loro dimensioni reali. Trova così che il diametro del Sole è 5½ volte maggiore del diametro terrestre e che il diametro lunare è $3\frac{2}{5}$ volte minore di quello terrestre. Quest'ultimo è circa uguale al valore reale (3,67 diametri terrestri), mentre il valore del diametro solare è errato per difetto di circa 20 volte (il valore reale è pari a 109,2 diametri terrestri).
Nel resto del Libro V, Tolomeo affronta il problema della parallasse in generale e costruisce una tavola delle parallassi lunari e solari.

[29] [V, 14; T84, 252]
[30] L'asserzione di Tolomeo che il diametro apparente della Luna è più grande, o uguale, a quello del Sole preclude la possibilità delle eclissi anulari di Sole. Questo implica che Tolomeo era ignaro dell'esistenza di tali eclissi, delle quali pare non si abbiano testimonianza nell'antichità. Questo è un fatto curioso considerando che il fenomeno era stato osservato e descritto in termini generali. Sappiamo che un'eclisse anulare si verificò il 16 febbraio 477 a.C. a Sardes in Asia Minore e, soprattutto, che, circa 200 anni prima di Tolomeo, l'astronomo alessandrino Sosigene spiegò il meccanismo delle eclissi anulari in un frammento preservato da Simplicio (490 circa – 560 circa).
[31] Per un lettore moderno, il metodo utilizzato da Tolomeo per determinare la distanza del Sole è estremamente impreciso. Poiché l'orlo dell'ombra non è ben definito, le sue affermazioni approssimative (venne oscurato un quarto o una metà del diametro lunare) potrebbero portare ad un errore di vari minuti e, quindi, la parallasse solare diventerebbe completamente trascurabile.
[32] [V, 16; T84, 257]



Liber V. 119

& NT linea 64.10. est autem etiam sicut NT ad TI sic ND ad DG estque ND demonstrata esse earundem 1210. ¶ Habebimus etiam DG quae est à centro Solis 5.30. earundem proximè.

Gaur.

¶ *Habebimus etiam GD semidiametrum Solis quintuplam semidiametro terrae, & insuper eius medietatem ferè.*

¶ Quare diametrorum quoque eędem erunt proportiones. Qualis igitur est Lunae diameter unius, talium erit terrae 3. cũ duabus quintis proximè, Solis uerò 18. cum quatuor quintis. ¶ Quare terrae quidẽ diameter tripla est, et adhuc duabus quintis maior quàm Lunae, Solis uerò decupla octuplaque quam Lunae, & adhuc quatuor qntis maior, quintupla uerò ad diametrum terrae ad haec medietate proximè maior. ¶ Eodẽ modo quoniam cubus qui est ab uno ipsius unius est, qui uerò est à trib. duabusque quintis 39.14. proximè earundem, qui autem est ab 18. & quatuor quintis similiter 4.6644.30. proximè. ¶ Colligitur qualis unius est solida Lunae magnitudo, talium esse solidã terrae magnitudinẽ 39.14. Solis uero 6644.30. Quare magnitudo Solis cẽties & septuagesies proximè terrae magnitudinem continet.

De particularibus aspectuum diuersitatibus Solis & Lunae. Cap. XVII.

His ita demonstratis, cõsequens est breuiter declarare, quomodo quispiam ex quantitate distantiarũ Solis ac Lunae, particulares etiam ipsorum diuersitates aspectuum cõputabit, & primùm eas, quae in maximo circulo qui per punctum uerticis & ipsas describitur, perspiciuntur. ¶ Sint ergo in superficie maximi huius circuli, maximus quidem terrae circulus AB. Solis autem uel Lunae GD, ille uerò ad quem terra puncti proportionẽ habet EFIT, centrumque omnium sit C, & diameter, quae est per puncta uerticis CAGE, interceptoque à puncto uerticis arcu GD, talium (uerbi gratia) supposito 30. qualiũ est GD circulus 360. coniungantur lineae CD I, & ADT, & à puncto A ducatur linea AF aequidistans lineae CI perpendicularis etiã ad ipsam CI deducatur AL, & quãuis nõ eadem semper in utroque Luminarium distãtia permaneat, differentia tamen diuersitatis aspectuum, quae propter hoc in Sole accidit parua nimium, & insensibilis est praesertim cùm excentricitas circuli eius parua sit, & distantia magna. Quae uero Lunae

L 4 propter

De magnitudine Solis Lunae & terrae Caput XVI.

Facilis autem hinc intellectu fit, Solidarum magnitudinum proportio à diametris Solis, Lunae, & terrae. Nã quando demõstratum est, qualis est unius linea NM quae est à centro terrae, talium etiam TI quae est à centro Lunae 17.33.

Fig. 13 – Una pagina del Libro V della versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46. In questa sede Tolomeo descrive la teoria della parallasse: l'immagine mostrata è identica a quella riportata nella Fig. 10 e rappresenta la configurazione dei tre corpi celesti, Sole, Luna e Terra (dall'alto verso il basso), durante un'eclissi solare totale in cui i dischi della Luna (di centro T) e del Sole (di centro D) sono visti sotto lo stesso angolo dal centro della Terra N. Il metodo, usato da Ipparco (e, successivamente, ripreso da Tolomeo), per determinare la distanza ND del Sole o la distanza NT della Luna, a partire dai diametri apparenti dei due corpi celesti e dell'ombra della Terra, è descritto nel testo.

2.2.1.4 Libro VI: la teoria delle eclissi

Con la teoria della parallasse appena sviluppata, Tolomeo è ora in grado di calcolare le eclissi lunari e solari e, dedica il Libro VI totalmente alla sua teoria delle eclissi. A parte il loro interesse astrologico, le eclissi erano importanti anche per ragioni puramente scientifiche; abbiamo visto che il moto della Luna si fondava su osservazioni di eclissi lunari. Questo spiega perché Tolomeo dedica un intero Libro allo sviluppo di una teoria delle eclissi, sebbene non costituisca lo scopo principale dell'*Almagesto*, immediatamente dopo le teorie del Sole e della Luna.

Era noto già da secoli prima di Tolomeo che le eclissi si verificano solo alle sigizie. Sappiamo che un'eclissi lunare ha luogo quando la Luna attraversa l'ombra della Terra (vedere note [14] e [17]); trovandosi in opposizione col Sole, la Luna ha un'elongazione di 180° ed è al plenilunio. Un'eclissi solare, invece, si verifica quando la Luna si frappone tra il Sole e la Terra (nota [14]); trovandosi in congiunzione col Sole, la Luna ha un'elongazione di 0° ed è al novilunio. Poiché l'ombra della Terra è indipendente dal luogo di osservazione sulla superficie terrestre, segue che un'eclissi di Luna è un fenomeno oggettivo, nel senso che tutti gli osservatori osservano il suo inizio (o il suo massimo, o la sua fine)

esattamente allo stesso istante. Al contrario, un'eclissi di Sole dipende dalla linea di vista di un osservatore terrestre, cioè la posizione geografica dell'osservatore gioca un ruolo determinante nella visibilità del fenomeno. Questo equivale a dire che, nel calcolo delle eclissi solari, deve prendersi in considerazione la parallasse lunare.
Per Tolomeo è chiaro che per avere un'eclisse devono verificarsi due condizioni:

1) L'elongazione reale della Luna rispetto al Sole deve essere di 0° o 180°, ed è possibile determinare i relativi tempi dalle teorie delle longitudini eclittiche del Sole e della Luna sviluppate nei Libri III, IV e V. Questa prima condizione è necessaria ma non sufficiente, poiché la Luna può essere in congiunzione col Sole senza trovarsi abbastanza vicina all'eclittica da riuscire ad oscurare il disco solare; o può essere in opposizione col Sole senza attraversare l'ombra della Terra.
2) Perciò, si deve imporre l'ulteriore condizione che la latitudine eclittica della Luna sia abbastanza piccola, o, in altre parole che la Luna in congiunzione o in opposizione sia sufficientemente vicina a uno dei due nodi.

La sostanza della teoria delle eclissi di Tolomeo è un tentativo di esprimere queste due condizioni in termini quantitativi. Ciò non concerne l'introduzione di nuovi modelli, ma richiede una grande quantità di spiegazioni relative ai calcoli di opportune tavole per le eclissi sia lunari che solari, e regole metodologiche per il loro utilizzo. Per un'eclissi di Sole, le tavole di Tolomeo permettono di calcolare il tempo, durata e magnitudine[33] dell'evento per un luogo qualunque della Terra.
Si trova un'interessante discussione sulla periodicità[34] delle eclissi, ovvero sui possibili intervalli temporali tra due eclissi consecutive dello stesso tipo. Tolomeo formula una serie di regole che possono servire da principio di esclusione nei calcoli delle eclissi. Possono essere riassunte nel seguente modo:

- Le eclissi lunari possono verificarsi ogni 5 mesi, ma non ogni 7.
- Le eclissi solari possono aver luogo sia ad intervalli di 5 mesi che di 7 mesi, ma non si verificano mai a distanza di un mese l'una dall'altra.

Sappiamo che Ipparco aveva affrontato lo stesso argomento: senza dubbio il suo interesse era stato sollecitato dagli archivi babilonesi in suo possesso, riguardanti la frequenza delle eclissi e contenenti anche riferimenti a intervalli di questo tipo. Osserviamo, infine, che in questa sede Tolomeo non fa alcun riferimento al periodo di Saros (vedere sezione 1.3) dopo cui, in generale, si ripetono eclissi dello stesso tipo.

2.2.1.5 Libri VII e VIII: le stelle fisse

Nei Libri VII e VIII dell'*Almagesto* Tolomeo interrompe lo sviluppo delle teorie planetarie per affrontare un numero di problemi legati alle stelle fisse. Infatti, nel prologo a questa seconda parte dell'*Almagesto*[35], Tolomeo spiega al suo amico, o protettore Syrus, che il proseguimento delle teorie planetarie presuppone un capitolo sulle *so-called fixed stars*[36]. Infatti, mentre la teoria solare era fondata sulle semplici osservazioni dei tempi dei solstizi e degli equinozi, e la teoria lunare sulle eclissi, le teorie dei restanti cinque pianeti sono fondate, in larga parte, sulle determinazioni esatte delle longitudini planetarie derivate dalla distanza del pianeta in questione da una stella fissa, misurata con l'*astrolabon* (di cui parleremo nelle sezioni 2.3.2.1 e 3.1.4). Ad esempio, una posizione di Mercurio è riferita ad Aldebaran (α Tauri)[37] o a Regolo (α Leonis)[38] così come una longitudine di Venere è relativa a quella di Antares (α Scorpii)[39]. Perciò, le teorie planetarie presuppongono la conoscenza delle coordinate esatte di un certo numero di stelle di riferimento fondamentali situate, quasi tutte, vicino l'eclittica e distribuite più o meno uniformemente nella fascia dello zodiaco in cui si trovano tutti i percorsi apparenti dei pianeti. Le quattro stelle fondamentali usate maggiormente da Tolomeo come riferimento (α Tauri, α Leonis, α Virginis, e β Scorpii) si trovano tutte su una metà dell'eclittica.
Nei primi tre capitoli del Libro VII Tolomeo prova a dimostrare due proprietà fondamentali delle stelle del firmamento:

1) Le stelle fisse sono davvero quelle fisse nel senso che non variano le loro posizioni relative (in realtà, gli effetti dei moti propri erano troppo piccoli per rendersi manifesti nel corso dell'intervallo di tempo durante il quale Tolomeo eseguiva le sue osservazioni).
2) Le stelle fisse mostrano un comune moto regolare e uniforme verso est rispetto al punto vernale ♈.

[33] Abbiamo già detto che la magnitudine di un'eclissi di misura in digit (vedere nota [27]); in questo caso di eclissi solari, 1 digit è definito come la dodicesima parte del diametro apparente del Sole. Pertanto, una magnitudine di 5 digit, ad esempio, indica che, nell'istante calcolato della congiunzione, $\frac{5}{12}$ del diametro solare è coperto dalla Luna.
[34] [VI, 6; T84, 287]
[35] [VII, 1; T84, 321]
[36] Ibid.
[37] [IX, 7; T84, 449]
[38] [IX, 7; T84, 450]
[39] [X, 3; T84, 473]

Per dimostrare la prima proprietà Tolomeo si affida al primitivo ma meravigliosamente semplice metodo degli allineamenti, che risale alla prima fase dell'astronomia egiziana[40] e fa uso di una sola corda sottile che viene tenuta tesa davanti agli occhi dell'osservatore. In tal modo quest'ultimo riesce a decidere se tre o più stelle giacciono o meno sulla stessa linea. Tolomeo cita più di venti allineamenti registrati da Ipparco 260 anni prima e dichiara di averli confrontati con le sue osservazioni senza trovare cambiamenti. Conclude, pertanto, che tutte le stelle incluse negli allineamenti di Ipparco hanno mantenuto inalterate le loro posizioni relative durante un periodo di almeno 260 anni. Generalizzando, Tolomeo definisce le stelle fisse come quelle stelle che mantengono inalterate le loro configurazioni e distanze relative nell'eternità.

Dopo aver raccontato come Ipparco scoprì la precessione degli equinozi, Tolomeo descrive un metodo per determinare le posizioni esatte delle stelle fondamentali basato sull'uso del suo *astrolabon* (vedere sezione 2.3.3).

Quindi Tolomeo determina con questo metodo la longitudine della stella Regolo (α Leonis) nel 139 ad Alessandria, e la confronta con quella trovata ai tempi di Ipparco: la longitudine eclittica era aumentata di $2°\ 40'$ in 265 anni, ovvero di circa 1° in 100 anni. Applicando lo stesso metodo ad altre stelle brillanti vicine all'eclittica (sezione 2.3.3) e confrontando le sue misure con le longitudini eclittiche trovate da Ipparco, Tolomeo ottiene sempre lo stesso risultato. L'intera procedura rivela che Tolomeo aveva a disposizione un grande numero di posizioni stellari determinate da Ipparco, presumibilmente il suo catalogo stellare (andato perso).

Per descrivere completamente il fenomeno della precessione non è sufficiente, però, mostrare una crescita regolare delle longitudini stellari col tempo e nel capitolo 3 del Libro VII fornisce una dimostrazione generale. Innanzitutto, rivolgendosi all'ipotesi iniziale di Ipparco, secondo cui le stelle fuori della fascia dello zodiaco rimanevano stazionarie mentre quelle all'interno mostravano un comune e lento moto verso est, afferma che la precessione è un fenomeno generale che influenza tutte le stelle fisse con la stessa entità; si tratta di un fatto così ovvio per Tolomeo che non spende molte parole al riguardo. Pertanto, assume che tutte le stelle fisse sono attaccate ad una sfera solida e, dopo aver mostrato che la precessione non influenza le latitudini celesti, Tolomeo afferma che la precessione consiste nella rotazione antioraria (ovest-est) della sfera delle stelle fisse attorno l'asse dell'eclittica con una velocità di 1° in 100 anni (ovvero $36''$ all'anno).

La parte principale dei Libri VII e VIII è occupata da un catalogo stellare preceduto da una introduzione generale [VII, 4; T84, 339] in cui Tolomeo precisa che solo le coordinate eclittiche ricavate con l'*astrolabon* permettono di prolungare la validità di questo catalogo. Se si misurassero le coordinate equatoriali, esse subirebbero nel tempo complicate variazioni dovute alla diversa simmetria della precessione degli equinozi. Dunque, la latitudine eclittica di una stella non cambia, mentre la longitudine eclittica può essere agevolmente aggiornata con un incremento proporzionale al tempo trascorso dall'osservazione. Il catalogo stellare occupa due lunghi capitoli, uno contenente le stelle a nord dell'eclittica [VII, 5; T84, 341] e l'altro le stelle del cielo sud con latitudini eclittiche negative [VIII, 1; T84, 371] (Figg. 14a e 14b). In particolare, la stella più a sud elencata nel catalogo ha una latitudine $\beta \approx -75°$ e questo implica che Tolomeo osservò almeno una stella fissa che culminava[41] a soli 7° circa sopra l'orizzonte di Alessandria. Nel catalogo la maggior parte delle stelle sono raggruppate in costellazioni mentre alcune sono considerate allegate ad una costellazione senza propriamente farne parte[42]. Vi si trovano 360 stelle a nord dello zodiaco, 346 stelle nella fascia dello zodiaco e 316 stelle a sud dello zodiaco, per un totale di 1.022 stelle fisse disposte in 48 costellazioni. Il catalogo ha la forma di una tabella con 1.022 linee e 4 colonne: la colonna I permette di identificare la stella fornendo una descrizione della sua posizione nella costellazione, le colonne II e III indicano rispettivamente la longitudine e latitudine della stella (all'epoca dell'inizio del regno dell'Imperatore Antonino, ossia nel 138 d.C.), e la colonna IV dà la sua magnitudine. Quest'ultima rappresenta un tentativo di caratterizzare la luminosità apparente delle stelle con un numero da 1 a 6.

Nel capitolo 2 del Libro VIII Tolomeo fornisce una descrizione dettagliata della Via Lattea e del suo passaggio tra le varie costellazioni. Tuttavia, non offre una spiegazione sulla sua natura fisica e sembra non avere dubbi che si trattasse si un insieme di stelle poco brillanti.

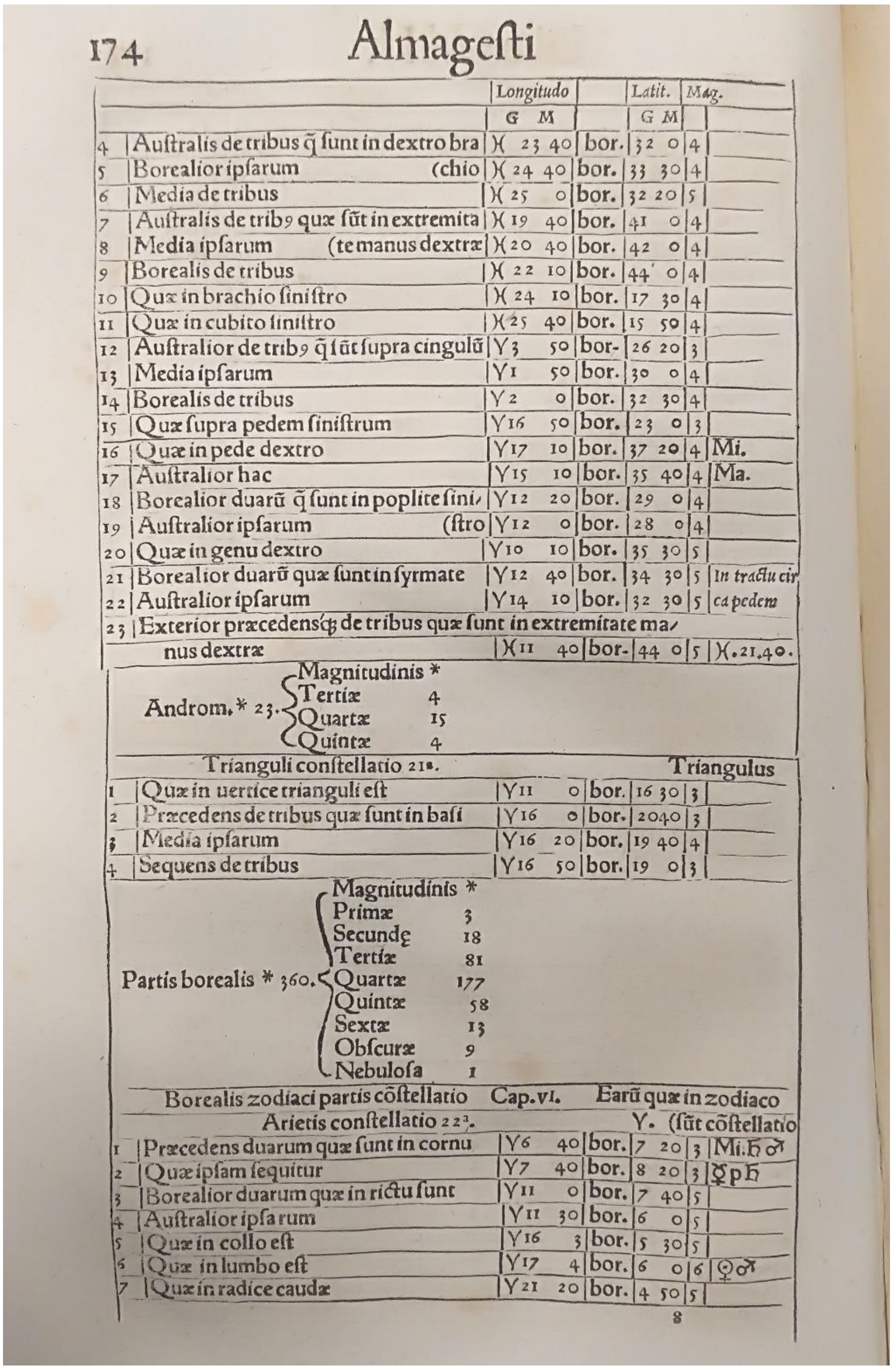
Il capitolo successivo [VIII, 3; T84, 407] descrive la costruzione di un globo celeste su cui vengono inserite le stelle, precedentemente catalogate, come punti secondo la loro longitudine e latitudine, tramite anelli graduati. Le figure delle costellazioni sono indicate solo da linee appena visibili e la superficie del globo è di colore scuro, come il cielo notturno, così che le stelle emergano in maniera realistica (anche la Via Lattea è descritta con le sue parti luminose e i suoi spazi). Tolomeo descrive come montare il globo su un asse sorretto da un meridiano a sua volta sorretto da un cerchio equatoriale, così da poter girare per seguire la rotazione diurna delle stelle. Egli inclina l'asse secondo la

[40] È interessante notare che il metodo degli allineamenti venne usato fino al 1604, quando Galileo dimostrò che la nova di quell'anno era una stella fissa.

[41] La culminazione di un astro è l'altezza massima sull'orizzonte raggiunta dal corpo celeste quando transita per il meridiano locale dell'osservatore. Ricordiamo che si definisce meridiano locale la circonferenza celeste immaginaria che attraversa il cielo e l'orizzonte di un osservatore, unendo il polo nord celeste, lo zenit e il polo sud celeste.

[42] Una tabella che mostra le costellazioni tolemaiche con le relative stelle costituenti o allegate, si trova nel libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974, p. 250.

latitudine del suo osservatorio, affinché l'emisfero celeste visibile appaia sopra il piano dell'orizzonte. Tolomeo utilizzò il suo globo per studiare, per qualunque latitudine geografica, le posizioni delle stelle relativamente ai vari cerchi, e soprattutto all'orizzonte, cioè il loro sorgere e tramontare.


174 Almageſti

		Longitudo G M		Latit. G M	Mag.	
4	Auſtralis de tribus q̃ ſunt in dextro bra	♓ 23 40	bor.	32 0	4	
5	Borealior ipſarum (chio	♓ 24 40	bor.	33 30	4	
6	Media de tribus	♓ 25 0	bor.	32 20	5	
7	Auſtralis de trib9 quæ ſũt in extremita	♓ 19 40	bor.	41 0	4	
8	Media ipſarum (te manus dextræ	♓ 20 40	bor.	42 0	4	
9	Borealis de tribus	♓ 22 10	bor.	44 0	4	
10	Quæ in brachio ſiniſtro	♓ 24 10	bor.	17 30	4	
11	Quæ in cubito ſiniſtro	♓ 25 40	bor.	15 50	4	
12	Auſtralior de trib9 q̃ ſũt ſupra cingulũ	♈ 3 50	bor.	26 20	3	
13	Media ipſarum	♈ 1 50	bor.	30 0	4	
14	Borealis de tribus	♈ 2 0	bor.	32 30	4	
15	Quæ ſupra pedem ſiniſtrum	♈ 16 50	bor.	23 0	3	
16	Quæ in pede dextro	♈ 17 10	bor.	37 20	4	Mi.
17	Auſtralior hac	♈ 15 10	bor.	35 40	4	Ma.
18	Borealior duarũ q̃ ſunt in poplite ſini-	♈ 12 20	bor.	29 0	4	
19	Auſtralior ipſarum (ſtro	♈ 12 0	bor.	28 0	4	
20	Quæ in genu dextro	♈ 10 10	bor.	35 30	5	
21	Borealior duarũ quæ ſunt in ſyrmate	♈ 12 40	bor.	34 30	5	*In tractu cir*
22	Auſtralior ipſarum	♈ 14 10	bor.	32 30	5	*ca pedem*
23	Exterior præcedensq; de tribus quæ ſunt in extremitate ma- nus dextræ	♓ 11 40	bor.	44 0	5	♓.21.40.

Androm. * 23. Magnitudinis * Tertiæ 4, Quartæ 15, Quintæ 4

Trianguli conſtellatio 21ª. — Triangulus

1	Quæ in uertice trianguli eſt	♈ 11 0	bor.	16 30	3	
2	Præcedens de tribus quæ ſunt in baſi	♈ 16 0	bor.	20 40	3	
3	Media ipſarum	♈ 16 20	bor.	19 40	4	
4	Sequens de tribus	♈ 16 50	bor.	19 0	3	

Partis borealis * 360. Magnitudinis * Primæ 3, Secundę 18, Tertiæ 81, Quartæ 177, Quintæ 58, Sextæ 13, Obſcuræ 9, Nebuloſa 1

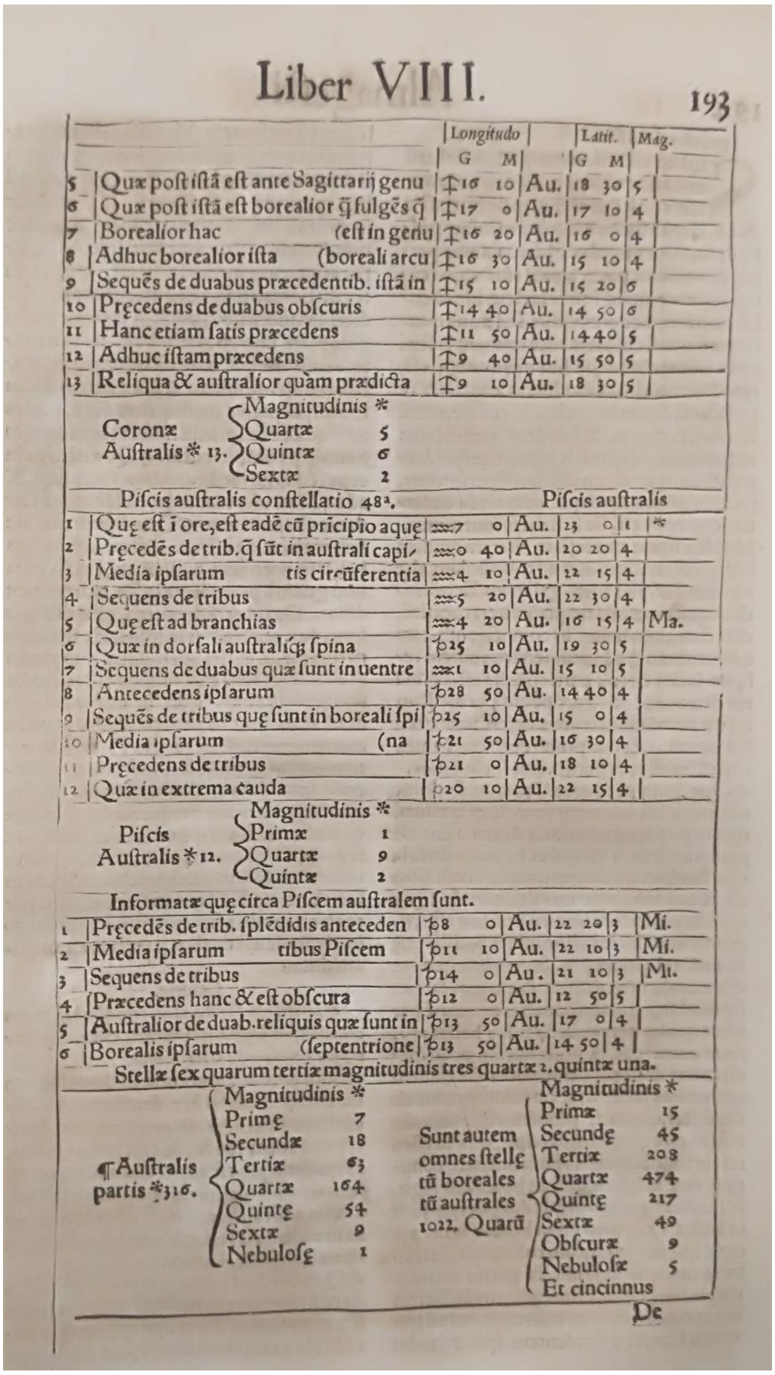
Borealis zodiaci partis cõſtellatio Cap. VI. Earũ quæ in zodiaco (ſũt cõſtellatio

Arietis conſtellatio 22ª. ♈.

1	Præcedens duarum quæ ſunt in cornu	♈ 6 40	bor.	7 20	3	Mi. ♄ ♂
2	Quæ ipſam ſequitur	♈ 7 40	bor.	8 20	3	☿ p ♄
3	Borealior duarum quæ in rictu ſunt	♈ 11 0	bor.	7 40	5	
4	Auſtralior ipſarum	♈ 11 30	bor.	6 0	5	
5	Quæ in collo eſt	♈ 16 3	bor.	5 30	5	
6	Quæ in lumbo eſt	♈ 17 4	bor.	6 0	6	♀ ♂
7	Quæ in radice caudæ	♈ 21 20	bor.	4 50	5	

8

Fig. 14a – Due pagine del catalogo stellare, presente nel capitolo 5 del Libro VII dell'*Almagesto*, fotografate nella versione in latino del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.
Il catalogo ha la forma di una tabella con 4 colonne: la colonna I permette di identificare la stella fornendo una descrizione della sua posizione nella costellazione, le colonne II e III indicano rispettivamente la longitudine e latitudine della stella (all'epoca dell'inizio del regno dell'Imperatore Antonino, ossia nel 138 d.C.), e la colonna IV dà la sua magnitudine con con un numero da 1 a 6. Ricordiamo che, nel capitolo 5 del Libro VIII, Tolomeo riporta le stelle a nord dell'eclittica (osserviamo l'abbreviazione bor. a sinistra dei valori della latitudine eclittica).



Liber VIII.

		Longitudo G	M		Latit. G	M	Mag.	
5	Quæ poſt iſtã eſt ante Sagittarij genu	♐16	10	Au.	18	30	5	
6	Quæ poſt iſtã eſt borealior q̃ fulgẽs q̃	♐17	0	Au.	17	10	4	
7	Borealior hac (eſt in genu	♐16	20	Au.	16	0	4	
8	Adhuc borealior iſta (boreali arcu	♐16	30	Au.	15	10	4	
9	Sequẽs de duabus præcedentib. iſtã in	♐15	10	Au.	15	20	6	
10	Pręcedens de duabus obſcuris	♐14	40	Au.	14	50	6	
11	Hanc etiam ſatis præcedens	♐11	50	Au.	14	40	5	
12	Adhuc iſtam præcedens	♐9	40	Au.	15	50	5	
13	Reliqua & auſtralior quàm prædicta	♐9	10	Au.	18	30	5	

Coronæ Auſtralis * 13. Magnitudinis *: Quartæ 5; Quintæ 6; Sextæ 2

Piſcis auſtralis conſtellatio 48ª. Piſcis auſtralis

1	Quę eſt ĩ ore, eſt eadẽ cũ pricipio aquę	♒7	0	Au.	23	0	1	*
2	Pręcedẽs de trib. q̃ ſũt in auſtrali capi-	♒0	40	Au.	20	20	4	
3	Media ipſarum tis circũferentia	♒4	10	Au.	22	15	4	
4	Sequens de tribus	♒5	20	Au.	22	30	4	
5	Quę eſt ad branchias	♒4	20	Au.	16	15	4	Ma.
6	Quæ in dorſali auſtraliq; ſpina	♑25	10	Au.	19	30	5	
7	Sequens de duabus quæ ſunt in uentre	♒1	10	Au.	15	10	5	
8	Antecedens ipſarum	♑28	50	Au.	14	40	4	
9	Sequẽs de tribus quę ſunt in boreali ſpi	♑25	10	Au.	15	0	4	
10	Media ipſarum (na	♑21	50	Au.	16	30	4	
11	Pręcedens de tribus	♑21	0	Au.	18	10	4	
12	Quæ in extrema cauda	♑20	10	Au.	22	15	4	

Piſcis Auſtralis * 12. Magnitudinis *: Primæ 1; Quartæ 9; Quintæ 2

Informatæ quę circa Piſcem auſtralem ſunt.

1	Pręcedẽs de trib. ſplẽdidis anteceden	♑8	0	Au.	22	20	3	Mi.
2	Media ipſarum tibus Piſcem	♑11	10	Au.	22	10	3	Mi.
3	Sequens de tribus	♑14	0	Au.	21	10	3	Mi.
4	Præcedens hanc & eſt obſcura	♑12	0	Au.	12	50	5	
5	Auſtralior de duab. reliquis quæ ſunt in	♑13	50	Au.	17	0	4	
6	Borealis ipſarum (ſeptentrione	♑13	50	Au.	14	50	4	

Stellæ ſex quarum tertiæ magnitudinis tres quartæ 2. quintæ una.

¶ Auſtralis partis * 316. Magnitudinis *: Primę 7; Secundæ 18; Tertiæ 63; Quartæ 164; Quintę 54; Sextæ 9; Nebuloſę 1

Sunt autem omnes ſtellę tũ boreales tũ auſtrales 1022. Quarũ Magnitudinis *: Primæ 15; Secundę 45; Tertiæ 208; Quartæ 474; Quintę 217; Sextæ 49; Obſcuræ 9; Nebuloſæ 5; Et cincinnus

De

Fig. 14b - Una pagina del catalogo stellare, presente nel capitolo 1 del Libro VIII dell’*Almagesto*, fotografata nella versione in latino del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna, in via Irnerio 46. La disposizione del catalogo segue lo stesso criterio descritto nella figura precedente ma, in questo caso, le stelle riportate sono quelle che si trovano a sud dell’eclittica (osserviamo l’abbreviazione Au. a sinistra dei valori della latitudine eclittica).

Fig. 15 – Immagini delle costellazioni a nord dell’eclittica (figura in alto) e a sud dell’eclittica (figura in basso) presenti nella versione in latino dell’*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna, in via Irnerio 46.

2.2.1.6 Libri IX-XIII: le teorie del moto dei cinque pianeti
Sviluppate le teorie del Sole e della Luna con la teoria delle eclissi come corollario, e descritte le stelle fisse, Tolomeo dedica gli ultimi cinque Libri, dal IX al XIII dell'*Almagesto* alla teoria dei restanti pianeti - Saturno, Giove, Marte, Mercurio, e Venere. Nei primi tre Libri (IX-XI) viene descritta la teoria dei moti in longitudine dei pianeti; ciò avviene nel seguente modo:

- i sei capitoli del Libro IX [IX, 1-6] e i cinque capitoli del Libro XI [XI, 9-13] sono comuni a tutti i pianeti;
- i cinque capitoli del Libro IX [IX, 7-11] trattano la teoria di Mercurio;
- i cinque capitoli del Libro X [X, 1-5] trattano la teoria di Venere;
- il capitolo 6 del Libro X [X, 6] è comune ai pianeti esterni;
- i quattro capitoli del Libro X [X, 7-10] occupano la teoria di Marte;
- i quattro capitoli del Libro XI [XI, 1-4] occupano la teoria di Giove;
- i quattro capitoli del Libro XI [XI, 5-8] occupano la teoria di Saturno.

Nel Libro XII Tolomeo descrive alcuni fenomeni sinodici, mentre nel Libro XIII si occupa della teoria dei moti in latitudine dei pianeti.
Il contenuto di questi cinque libri è stato riassunto nella sezione 2.2.2.3.

2.2.2 Le teorie tolemaiche dei pianeti
La teoria planetaria costituisce l'argomento principale dell'*Almagesto*. Abbiamo visto che Apollonio e Ipparco posero le basi dei primi modelli geometrici caratterizzati da cerchi eccentrici ed epicicli. Si ha l'impressione che Tolomeo voglia continuare e completare il loro lavoro, risolvendo i problemi lasciati irrisolti e sviluppando le teorie di quei fenomeni che i suoi predecessori non erano riusciti a riprodurre matematicamente. Pertanto, la teoria del moto del Sole nel Libro III e il primo tentativo di dare una teoria della Luna nel Libro IV costituiscono principalmente il lavoro di Ipparco, ma nel seguito Tolomeo si fa strada con le teorie dei restanti pianeti.
Nell'*Almagesto* ogni pianeta è trattato separatamente. Non c'è una teoria generale del sistema solare in quanto tale, anche se i pianeti superiori Marte, Giove e Saturno vengono trattati nello stesso modo e i loro modelli differiscono solo nei parametri numerici. La teoria di Venere è leggermente differente, mentre quelle della Luna e Mercurio differiscono molto. Perciò, in senso stretto, non ha senso parlare di teoria tolemaica dei pianeti in quanto tale.
L'ordine con cui Tolomeo discute le varie teorie non corrisponde all'ordine accettato dei pianeti - Luna, Venere, Mercurio, Sole, Marte, Giove e Saturno (a partire dalla Terra). Infatti, comincia con la teoria solare (Libro III) poiché sembra che il moto del Sole sia essenziale per tutti gli altri pianeti, inclusa la Luna. Più precisamente, l'anno solare entra come un periodo caratteristico nei moti di tutti i pianeti e diventa il solo parametro comune a tutti i modelli. È facile comprendere la spiegazione di questo fatto se consideriamo il sistema solare da un punto di vista eliocentrico (copernicano). Infatti, le posizioni apparenti dei pianeti, osservati dalla Terra, dipendono da due fattori, ovvero da dove si trovano il pianeta stesso e la Terra. Il primo è determinato dal moto del pianeta nella sua orbita, ma il secondo dal moto della Terra che descrive un'orbita attorno al Sole con un periodo di un anno. Guardando il sistema da un punto di vista geocentrico, l'ultimo moto si riflette nel moto del Sole attorno la Terra. Perciò, in ogni caso si deve avere una qualche correlazione tra il moto del Sole e il moto di ciascuno dei pianeti.

Di seguito vengono descritte la teoria del Sole (Libro III), la teoria della Luna (Libro IV e prima metà del Libro V [V, 1-10]) e le teorie dei restanti cinque pianeti (Libri IX-XI).

2.2.2.1 Focus Libro III: la teoria solare
Tolomeo sviluppa la teoria solare nel Libro III in cui riconosce senza esitazione il suo debito a Ipparco. La teoria ha la forma di un modello geometrico, i cui parametri sono dedotti dalle osservazioni, capace di riprodurre i fenomeni principali del moto del Sole, primo fra tutti la sua velocità variabile nel corso dell'anno. Alcune di queste osservazioni furono eseguite da Tolomeo stesso, ma la maggior parte appartengono a Ipparco, effettuate 300 anni prima. Molto probabilmente, Tolomeo le trovò nelle raccolte della Biblioteca di Alessandria che conteneva anche numerose osservazioni molto più antiche (quelle dei babilonesi e di altre origini).
Il Libro III inizia con una lunga discussione sull'anno, la costante fondamentale di ogni teoria del moto del Sole. Vengono poste tre domande principali:

1) Qual è il tipo di anno fondamentale per la teoria?
2) Questo anno ha una lunghezza costante?
3) Qual è la sua lunghezza?

Per quanto riguarda la prima domanda, Tolomeo è consapevole che l'anno egiziano di 365^d è privo di ogni significato astronomico perché conduce ad un calendario in cui i mesi non sono correlati agli effetti fisici del moto del Sole, cioè al

cambiamento delle stagioni[43]. Poiché uno degli obiettivi principali di una teoria solare deve essere quello di spiegare come le stagioni vengono prodotte dal moto annuale del Sole, l'anno egiziano non può avere posto nella teoria.
Si definisce anno tropico l'intervallo di tempo impiegato dal Sole per ritornare allo stesso equinozio. Tolomeo sostiene che è l'anno tropico ad essere essenziale nella teoria solare, poiché questo anno mantiene la corrispondenza tra il cambiamento delle stagioni e il trascorrere dei mesi.
Come Ipparco, Tolomeo conosceva anche quello che noi ora chiamiamo anno siderale, ovvero il periodo di tempo che impiega il Sole per ritornare alla stessa stella fissa. Ma, mentre l'anno tropico è più breve di $365\frac{1}{4}$ giorni, l'anno siderale è più lungo di $365\frac{1}{4}$ giorni. Questo è un effetto della precessione degli equinozi; sebbene Tolomeo analizza in dettaglio la teoria della precessione nel Libro VII, dove conferma il risultato di Ipparco[44], nel Libro III menziona il fenomeno solo per spiegare perché l'anno siderale non può tenere il passo con le stagioni e, quindi, non può avere un ruolo nella teoria del Sole.
Alla domanda successiva, se l'anno tropico è una costante astronomica, si può rispondere solo con le osservazioni su un lungo periodo di tempo. Di tutte le osservazioni presentate da Tolomeo nell'*Almagesto*[45], solo 15 sono necessarie per formulare la sua teoria solare[46]. In queste 15 osservazioni solari sono contenute le 9 osservazioni di Ipparco con cui dimostrò che l'anno tropico è inferiore di $365\frac{1}{4}$ giorni. Pare che Ipparco usò anche un'osservazione più antica realizzata da Aristarco nel solstizio d'estate del 280 a.C. (anch'essa appartenente alla lista delle 15). Quattro osservazioni della lista furono, invece, realizzate da Tolomeo stesso allo scopo di verificare se il risultato ottenuto da Ipparco fosse ancora corretto dopo un lasso di tempo di quasi 300 anni. Per queste osservazioni Tolomeo menziona solo uno strumento, un anello di bronzo posizionato nel piano dell'equatore celeste (l'armilla equatoriale; vedere sezione 2.3.1.4).
Per determinare con precisione la durata dell'anno, Tolomeo ricorre a un metodo molto antico: misurare il tempo compreso fra più ritorni del Sole al medesimo equinozio. L'errore di una singola osservazione viene così diviso per il numero dei ritorni considerati; più grande sarà questo numero, più piccolo sarà l'errore sulla durata dell'anno[47]. Tolomeo ha ottime ragioni per adottare questo metodo: lo stesso Ipparco ammetteva che, al pari di Archimede (287 circa - 212 a.C.), aveva osservato i solstizi con errori di $\frac{1}{4}$ di giorno.
Confrontate le osservazioni, Tolomeo conclude nel capitolo 1 del Libro III che l'anno tropico, corrispondente al periodo di ritorno del Sole all'equinozio di primavera, è una costante astronomica e la sua lunghezza coincide con quella trovata precedentemente da Ipparco, $365^{\mathrm{d}}\ 5^{\mathrm{h}}\ 55^{\mathrm{m}}\ 12^{\mathrm{s}}$. Il fatto che questo valore sia un po' più grande del valore reale comporta molte conseguenze per le varie teorie dei moti planetari, in particolare rende i moti medi giornalieri in longitudine più piccoli. In effetti, le osservazioni tolemaiche sugli equinozi, utilizzate per verificare la lunghezza dell'anno proposta da Ipparco, sono sbagliate con uno scarto di un giorno (gli equinozi risultano essere avvenuti un giorno dopo rispetto a quelli riportati da Tolomeo), il che rappresenta un errore cospicuo anche secondo gli standard dell'antichità.
A questo punto Tolomeo deve affrontare il problema della velocità variabile del Sole nel suo moto annuale (apparente). Questo fatto discendeva dalle precedenti osservazioni della diversa lunghezza delle quattro stagioni. Sappiamo che ogni stagione corrisponde ad un moto del Sole lungo l'eclittica di un arco di 90° e, poiché il Sole percorre questi archi uguali in tempi diversi, il suo moto apparente non è uniforme ma presenta un'irregolarità (ossia un''anomalia').
Come abbiamo visto nel Capitolo 1 quando abbiamo parlato di Ipparco, Tolomeo era a conoscenza dei due modelli geometrici che rispettavano il principio del moto circolare uniforme, il modello eccentrico e il modello epiciclico, e nel capitolo 3 del Libro III li esamina attentamente. (Questa rappresenta l'unica fonte disponibile delle nostre attuali conoscenze su questi modelli). Dopo un lungo esame dei modelli generali, Tolomeo fornisce prove della loro equivalenza geometrica e si trova a dover decidere quale modello usare per la sua teoria del moto solare. Le motivazioni di una scelta o dell'altra non si fondavano ovviamente su argomenti empirici, poiché l'equivalenza dei due modelli li rendeva entrambi adatti a riprodurre i fenomeni osservabili. Ma Tolomeo preferisce il modello eccentrico perché è più semplice da un punto di vista teorico: logicamente sembrerebbe più corretto avvicinarsi all'ipotesi eccentrica perché con essa si raggiunge lo scopo con un solo movimento, anziché due. Questo mostra che il fattore decisivo nella scelta tra le due descrizioni matematiche equivalenti è un puro principio di convenienza pratica e non sono coinvolte considerazioni fisiche.

---

[43] L'anno civile egiziano di 365^{d} era più breve dell'anno tropico di circa $365^{\mathrm{d}}6^{\mathrm{h}}$. Questo significava che, anno dopo anno, l'anno nuovo iniziava circa 6 ore prima, con l'ovvia conseguenza di non avere una correlazione tra l'anno civile e le stagioni dell'anno tropico. Il Capodanno attraversava tutte le stagioni, compiendo un giro completo in 1461 anni egiziani ($\frac{1}{4} \cdot 1461 = 365\frac{1}{4}$ giorni). Dopo questo periodo le stagioni iniziavano di nuovo con le stesse date di prima.
[44] Secondo Ipparco, le stelle aumentano la loro longitudine eclittica di 1° ogni 100 anni. Oggi sappiamo che il valore reale è di 1° in 71 anni circa.
[45] La lista completa di tutte le osservazioni riportate da Tolomeo nell'*Almagesto* si trova nel libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974, Appendice A.
[46] La lista delle 15 osservazioni utilizzate da Tolomeo per formulare la sua teoria solare si trova nel libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974, p. 130.
[47] [III, 1; T84, 137]

Pertanto, una volta trovate le stesse lunghezze delle stagioni di Ipparco, basandosi su tre osservazioni che effettuò nel 139 e nel 140[48], derivò da questi valori, sulla base di un modello eccentrico, un'eccentricità e dell'orbita solare pari a $\frac{1}{24}$ (in realtà, si tratta del rapporto $\frac{e}{\mathrm{R}}$ con R raggio del deferente o, equivalentemente (Fig. 4), del cerchio eccentrico[49]) e una longitudine eclittica dell'apogeo di $65° \, 30'$, entrambi identici ai valori di Ipparco (Fig. 9). In realtà, in base a calcoli moderni, le lunghezze delle stagioni di quel periodo erano leggermente diverse (e di conseguenza anche i parametri dell'orbita eccentricità e apogeo), ma una pecca ancora più grave riguarda il fatto che, riscontrando necessariamente che l'apogeo solare si trovava nella stessa posizione sull'eclittica occupata circa trecento anni prima (in riferimento alle osservazioni di Ipparco del 147-146 a.C.), egli concluse che l'apogeo era fisso rispetto all'eclittica. Ciò è in contrasto con la situazione relativa all'apogeo dei pianeti i quali, come Tolomeo stesso trovò in seguito, partecipano al moto di precessione[50]. Infatti, anche l'apogeo solare si muove attraverso l'eclittica nel corso del tempo: questo difetto nella teoria solare di Tolomeo dovette attendere il IX secolo per essere finalmente corretto.

2.2.2.2 Focus Libri IV e V (capitoli 1-10): la teoria lunare

Terminata la teoria del Sole, Tolomeo procede con il moto della Luna. Sebbene egli dichiari di aver adottato l'ordine logico[51], la disposizione degli argomenti non è ovvia. In realtà, il motivo per parlare subito della Luna si fa chiaro solo nel seguito: le teorie degli altri pianeti sono costruite anche sulle osservazioni della distanza tra il pianeta e una stella fissa, e le longitudini delle stelle sono determinate mediante la posizione della Luna. Pertanto, la posizione eclittica di un pianeta non può essere determinata senza sapere dove si trova la Luna, ossia senza avere una teoria del suo moto.
La teoria lunare dell'*Almagesto* è particolarmente importante per la storia dell'astronomia. In particolare, essendo la Luna il corpo celeste più vicino alla Terra, è possibile rilevare più facilmente piccole irregolarità nel suo moto rispetto ai pianeti. In effetti, proprio per la migliore accuratezza dei metodi osservativi, Tolomeo riuscì a scoprire una seconda anomalia della Luna (Ipparco conosceva solo la prima, ovvero l'irregolarità che dipende dalla longitudine eclittica della Luna).
Nel capitolo 1 del libro IV Tolomeo affronta la questione di come determinare, nel miglior modo possibile, i parametri fondamentali della teoria lunare dall'esperienza. La Luna è sufficientemente vicina alla Terra da avere una considerevole parallasse giornaliera. Il valore tolemaico della parallasse è $1° \, 7'$[52] ed è confrontabile con quello reale di $57'$. Questo grande valore, circa due volte il diametro della Luna, implica che la maggior parte delle osservazioni sono disturbate dagli effetti parallattici, rendendo complesso sia confrontare le osservazioni effettuate in diversi punti sulla superficie terrestre che ridurle ad un osservatore ideale al centro della Terra.
Solo le osservazioni delle eclissi lunari restano inalterate dalla parallasse, poiché il passaggio della Luna attraverso l'ombra della Terra è un fenomeno oggettivo e virtualmente lo stesso per tutti i possibili osservatori. In questo aspetto le eclissi lunari sono diverse dalle eclissi solari e, perciò, come aveva già fatto Ipparco, anche Tolomeo costruì la sua teoria lunare su osservazioni di eclissi di Luna. Poiché le eclissi lunari avvengono in Luna Piena, quando la Luna e il Sole sono in punti diametralmente opposti del cielo, un'osservazione di eclissi lunare dà la longitudine eclittica geocentrica della Luna come 180° + la longitudine eclittica del Sole, quest'ultima determinata dalle tabelle solari nel Libro III conoscendo il tempo esatto dell'eclisse. D'altra parte, osserviamo che una teoria costruita interamente su osservazioni di eclissi lunari non garantiva di riuscire a prevedere correttamente le altre posizioni della Luna.
Nel capitolo 2 del Libro IV, Tolomeo riporta le relazioni periodiche usate da Ipparco per ricavare i quattro periodi fondamentali del moto della Luna (che abbiamo visto nella sezione 1.3) e precisa, in un modo non troppo chiaro, che non tutte le eclissi lunari sono ugualmente adatte a determinare i vari periodi ma, devono essere attentamente selezionate secondo certe regole. In particolare, per calcolare il periodo di ritorno allo stesso nodo (mese draconico medio T_d) confrontò un'eclissi del 491 a.C. con un'altra avvenuta nel 125 a.C., selezionate in modo tale che tutte le altre quantità determinanti fossero le stesse in entrambi i casi, e apportò una correzione di $9'$ nei 615 anni al calcolo di Ipparco.
Già all'inizio del primo capitolo teorico [IV, 5], Tolomeo rivela che nel caso della Luna è necessario introdurre due 'anomalie' indipendenti per spiegare le sue deviazioni dal moto circolare uniforme, a differenza del Sole che invece richiedeva una sola anomalia. La prima (o grande) anomalia, già nota a Ipparco, è una deviazione dall'uniformità correlata al moto della Luna lungo l'eclittica con un periodo di un mese anomalistico. La seconda anomalia è

[48] Tolomeo afferma che: l'intervallo tra l'equinozio di primavera e il solstizio d'estate del 140 (ovvero la durata della primavera del 140) è pari a 94½ giorni, l'intervallo tra l'equinozio di autunno del 139 e quello di primavera del 140 è pari a 178¼ giorni e, di conseguenza, che, arrotondata a 365¼ giorni la lunghezza dell'anno tropico, l'intervallo tra il solstizio d'estate e l'equinozio d'autunno del 140 (ovvero la lunghezza dell'estate del 140) è pari a 92½ giorni.
[49] Assegnando al raggio del deferente la lunghezza arbitraria R = 60^p, dove p significa *parti*, Tolomeo esprime l'eccentricità come $e = 60^p : 24 = 2\frac{1}{2}^p$.
[50] È lo spostamento della linea degli apsidi. Oggi sappiamo che tutte le linee apsidali ruotano lentamente con varie velocità angolari. Nelle teorie dei cinque pianeti, Tolomeo assume (erroneamente) che l'apogeo dei cinque pianeti occupi una posizione fissa rispetto alle stelle fisse; pertanto, la sua longitudine cresce di 1° per secolo a causa della precessione degli equinozi.
[51] [IV, 1; T84, 173]
[52] [V, 13]

un’irregolarità che dipende dalla posizione della Luna rispetto al Sole: è una funzione dell’elongazione[53] ed ha un massimo alle due quadrature mentre si annulla due volte, alle sigizie, in un mese sinodico. Tolomeo afferma che non si può trovare la seconda anomalia senza conoscere la prima, mentre quest’ultima può essere trattata indipendentemente dalla seconda. Pertanto, procede in modo pedagogico: nel Libro IV costruisce il Primo Modello Lunare in cui mantiene a grandi linee l’elaborazione di Ipparco, e nel Libro V, lo modifica realizzando il Secondo Modello Lunare, che riesce a spiegare la seconda anomalia scoperta da Tolomeo stesso.

La teoria lunare del Libro IV si fonda su un totale di 15 osservazioni di eclissi distribuite su circa 900 anni[54]; la prima è un’eclisse osservata a Babilonia nel 721 a.C.. Tolomeo procede, quindi, indagando i due modelli geometrici, eccentrico ed epiciclico e, sia per semplicità che, soprattutto, per seguire Ipparco il più possibile, decide di proseguire col modello epiciclico con un deferente concentrico. Prima di occuparsi del problema di determinare i valori numerici dei parametri che permettono al modello lunare di riprodurre quantitativamente i fenomeni, Tolomeo assume che, in prima approssimazione, i moti in longitudine e in latitudine possono essere trattati indipendentemente. Questo significa che, per quanto riguarda i calcoli delle longitudini, il piano inclinato del deferente (concentrico) lunare può considerarsi identico al piano dell’eclittica (vedere Fig. 7). Inoltre, ignorando il moto dei nodi, il deferente assume un’origine e una posizione fisse nel piano dell’eclittica. Il moto in questo modello epiciclico con deferente fisso avviene con la stessa modalità descritta da Ipparco: il centro dell’epiciclo si muove da ovest verso est con velocità ω_t costante ed è responsabile del moto diretto della Luna; la Luna stessa ruota sull’epiciclo nella direzione retrograda con la velocità ω_a costante.

Assumendo la validità dei moti medi proposti da Ipparco (che noi sappiamo in realtà derivati dall’astronomia babilonese), Tolomeo accetta il “metodo delle tre eclissi” del suo predecessore per determinare di nuovo l’eccentricità lunare (o il raggio dell’epiciclo). Eseguì questa operazione due volte, la prima a partire da tre antiche eclissi risalenti all’epoca babilonese (721 e 720 a.C.), e la seconda a partire da un terzetto di eclissi da lui stesso osservate ad Alessandria negli anni 133,134 e 136 d.C. In entrambi i casi, trovò lo stesso valore per il raggio dell’epiciclo, $r = 5\frac{1}{4}^p$ assumendo la lunghezza $R = 60^p$ del raggio del deferente (come fece nella teoria solare), che costituiva un miglioramento rispetto ai valori trovati da Ipparco, e nello stesso tempo mostrava che non vi erano state variazioni di eccentricità nel corso dei molti secoli intercorsi fra i due gruppi di osservazioni. Si trattava di un risultato importante, dal momento che Ipparco aveva trovato valori discrepanti fra due insiemi di tre eclissi; Tolomeo è dispiaciuto di dover ammettere che i risultati di Ipparco derivano da errori nei suoi calcoli. Un ulteriore vantaggio derivante dalla risoluzione del problema attraverso il confronto delle due terne di eclissi, distanziate temporalmente fra loro, fu che Tolomeo poté servirsi dei suoi risultati per verificare i moti medi rispetto alla longitudine e all’anomalia: per il primo ritiene che non c’è bisogno di alcuna correzione, mentre corregge il ritorno all’apogeo di 17′ negli 854 anni intercorsi fra le due osservazioni (questa piccola correzione costituisce un tributo all’accuratezza delle relazioni periodiche di origine babilonese). Tolomeo conclude il Libro IV affermando che il modello lunare riusciva a descrivere eclissi lunari diverse da quelle su cui era stato costruito. Pertanto, il modello funzionava bene quando la Luna era in opposizione rispetto al Sole (Luna Piena) e, presumibilmente, anche in congiunzione rispetto al Sole (Luna Nuova), ossia alle sigizie.

Tolomeo, tuttavia, non si accontentò di questo e, a differenza della sua teoria solare, decise di sottoporre la teoria lunare ad alcune verifiche. In particolare, desiderava verificare se la teoria, sviluppata unicamente sulle osservazioni di eclissi lunari, riusciva a prevedere longitudini corrette anche quando la Luna si trovava in altre posizioni rispetto al Sole, per esempio alle quadrature (cioè al primo e all’ultimo quarto quando la longitudine celeste fra i due astri differisce di 90°). Pertanto, era necessario conoscere queste posizioni e ciò implicava osservazioni diverse dalla semplice determinazione del tempo di un’eclisse. Il Libro V dell’Almagesto inizia con la descrizione di un nuovo tipo di strumento astronomico adatto per questo scopo: l’*astrolabon*, o astrolabio armillare, che descriveremo nella sezione 2.3.2.1.

Utilizzando l’astrolabio armillare e correggendo le coordinate trovate per la parallasse lunare, Tolomeo si accorse che quel semplice modello, che funzionava bene alle sigizie, presentava considerevoli variazioni rispetto alla posizione lunare osservata in occasione di diverse elongazioni fra la Luna stessa e il Sole, e che tale scarto era massimo in quadratura.

L’unica via d’uscita è quella di ammettere che, accanto alla prima anomalia, la Luna deve avere una seconda anomalia indipendente. La scoperta della seconda anomalia, più tardi chiamata evezione, rappresenta uno dei più grandi contributi di Tolomeo all’astronomia.

Per tener conto dell’evezione Tolomeo è costretto a sostituire il Primo Modello Lunare (Ipparchiano) con un Secondo Modello molto più sofisticato che inventa lui stesso. Questo presenta due importanti cambiamenti:

1) Con l’evezione la dimensione apparente dell’epiciclo è più grande alle quadrature che alle sigizie. Pertanto, dobbiamo dotare il modello di un dispositivo capace di tracciare il centro dell’epiciclo più vicino alla Terra alle

[53] Si definisce elongazione lo scostamento angolare di un corpo celeste (in questo caso della Luna) rispetto al Sole.

[54] La lista delle 15 osservazioni di eclissi utilizzate da Tolomeo per formulare la teoria lunare del Libro IV si trova nel libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974, p. 170.

quadrature rispetto alle sigizie da cui dista 60^p. Questo si realizza sostituendo il deferente concentrico fisso del Primo Modello con un deferente eccentrico.

2) L'evezione è una funzione dell'elongazione della Luna dal Sole. Di conseguenza, il Secondo Modello deve possedere un meccanismo che accoppia il moto del centro dell'epiciclo col moto del Sole. Questo si realizza permettendo al centro del deferente eccentrico di ruotare su un piccolo cerchio attorno il centro della Terra.

In questo Secondo Modello l'epiciclo ha lo stesso raggio trovato nel Primo Modello lunare, $r = 5\frac{1}{4}^p$, e il suo centro descrive, nell'arco di un mese sinodico, non un cerchio ma un ovale[55] il cui asse maggiore ruota lentamente in direzione del Sole.
Vediamo brevemente il modello lunare tolemaico perfezionato (Fig. 16). L'epiciclo della Luna (di centro C), pur continuando a ruotare uniformemente (in senso antiorario o da ovest verso est) rispetto alla Terra (O), è trascinato su un circolo il cui centro non è la Terra, ma un punto ulteriore (M) che, a sua volta, ruota nella direzione opposta (in senso orario o da est verso ovest) lungo un cerchio di centro O. Il moto uniforme di M è il moto medio in elongazione fra la Luna e il Sole (denotato con la lettera η). Ciò significa che, poiché l'elongazione aumenta a partire dalla sigizia, l'epiciclo è spinto verso la Terra dal "gomito" OMC, "connesso" in M e di lunghezza OM+MC pari al raggio del deferente nel modello elementare. L'effetto è massimo quando l'elongazione media η è pari a 90°, ma in congiunzione e in opposizione il "gomito" è raddrizzato e la configurazione è identica a quella del modello elementare. Quindi, il modello lunare perfezionato non interviene sulla situazione durante le eclissi (dalle quali è stato ricavato il modello di Ipparco, in tal caso adeguatamente funzionante), ma implica notevoli differenze (fino a 3° secondo i parametri numerici stabiliti da Tolomeo) ad altre elongazioni. Il modello di Tolomeo rappresenta, quindi, molto meglio le longitudini ma presenta un grande svantaggio. Il "gomito" aumenta di molto l'ampiezza dell'intervallo entro cui può variare la distanza della Luna dalla Terra: la sua minima distanza (33 raggi terrestri) è un po' più della metà di quella massima (64 raggi terrestri). Ciò dovrebbe manifestarsi in una simile variazione nella dimensione apparente del disco della Luna. Ora, chiunque osservi per puro caso la Luna può constatare, senza aver bisogno di alcuno strumento di misurazione, che questo non è vero: la Luna non presenta in certe circostanze (al primo e ultimo quarto) una dimensione doppia rispetto alla Luna Piena, ma la variazione osservabile è molto più ridotta. Quindi, la teoria non può certamente rappresentare il movimento reale nello spazio. Tolomeo ignora semplicemente questa banale obiezione, e considera la variazione risultante come un dato nella sua successiva computazione della distanza e della parallasse della Luna. Questi calcoli occupano gli ultimi capitoli del Libro V.

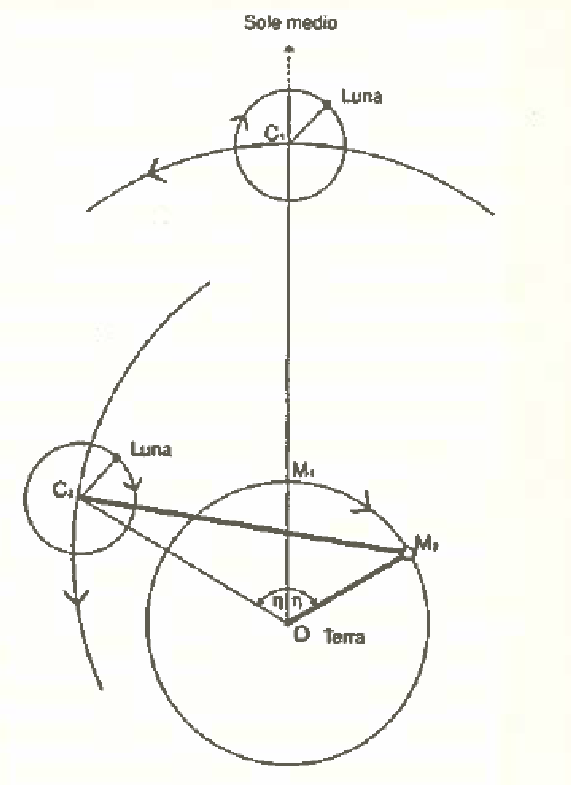


Fig. 16 - Modello lunare tolemaico perfezionato. L'epiciclo (di centro C) è trasportato su un circolo, il cui centro M, a sua volta si muove su un circolo attorno alla Terra O in senso opposto, seguendo il moto medio in elongazione tra la Luna e il Sole. L'epiciclo è mostrato in due posizioni, alla congiunzione media e quasi in quadratura. Nella prima, si trova alla massima distanza dalla Terra, mentre nella seconda il "gomito" l'ha spinto verso la minima distanza dalla Terra e, quindi, apparirà molto più grande.
(Immagine presa dal capitolo di G. J. Toomer, *Tolomeo e i suoi predecessori greci*, in *L'astronomia prima del telescopio* a cura di C. Walker, p. 111)

Per completare la teoria lunare, Tolomeo esamina nel capitolo 7 del Libro V il moto in latitudine attribuendo la procedura ad Ipparco. Confrontato con le complesse teorie del moto in latitudine degli altri pianeti (descritte nel Libro

[55] In questo modo il centro dell'epiciclo, nella sua rivoluzione mensile, incontra due volte sia l'apogeo che il perigeo.

XIII), il metodo lunare è di grande semplicità, in quanto, in questo caso, Tolomeo posiziona sia il cerchio deferente che l'epiciclo su uno stesso piano inclinato di 5° rispetto al piano dell'eclittica.

2.2.2.3 Focus Libri IX-XIII: la teoria dei cinque pianeti minori

Nel capitolo 1 del Libro IX Tolomeo discute sulla questione dell'ordine dei pianeti e ammette che non ci sono criteri oggettivi sulle distanze a causa dell'impercettibile parallasse planetaria. Ritiene che la cosa migliore da fare sia quella di seguire gli astronomi antichi che posizionavano la sfera del Sole al centro, con Saturno, Giove e Marte al di sopra di essa e, Venere, Mercurio e la Luna al di sotto. (Per questo motivo i primi tre pianeti sono anche detti pianeti superiori, mentre Mercurio e Venere, situati tra le orbite del Sole e della Luna, sono conosciuti come pianeti inferiori.) Nonostante Tolomeo affermi di non verificarsi mai un passaggio di Venere o Mercurio davanti al disco solare (dietro è impossibile secondo questa disposizione), l'ordine convenzionale, ed essenzialmente arbitrario, accettato dagli astronomi antichi permetteva alla sfera del Sole di dividere i pianeti in due gruppi naturali, quelli che possono trovarsi in opposizione[56] (pianeti superiori) da quelli che non lo sono mai[57] (pianeti inferiori).

Come si evince dal capitolo 2 del Libro IX, lo scopo di Tolomeo è quello di descrivere il movimento apparente dei cinque pianeti in termini di moti circolari uniformi perché *these are proper to the nature of divine beings, while disorder and nonuniformity are alien [to such beings]*[58] (questi appartengono alla natura degli esseri divini, che non conoscono disordine e disuniformità). Il compito è tra i più difficili poiché, come rivela, nessuno prima di lui provò ad occuparsene. Inoltre, Tolomeo giustifica Ipparco per non essere riuscito a produrre una teoria planetaria soddisfacente, e si scusa in anticipo per le assunzioni apparentemente ingiustificate che può essere indotto a fare durante la sua personale trattazione.

Nell'*Almagesto* non troviamo un modello geometrico comune nelle teorie del moto dei cinque pianeti. Solo i tre pianeti superiori possono essere descritti con lo stesso modello geometrico, i cui parametri numerici sono caratteristici dei singoli pianeti. Gran parte di questo schema si ritrova anche nella teoria di Venere, mentre la teoria di Mercurio è molto diversa, con un deferente mobile come la Luna e più di un perigeo (oggi sappiamo che questo è dovuto alla grande eccentricità della sua orbita).

Oltre ad avere piccole eccentricità, i pianeti superiori mostrano fenomeni osservabili diversi rispetto ai pianeti inferiori. La maggior parte dei fenomeni osservabili sono periodici o quasi periodici, poiché gli intervalli temporali tra due eventi successivi oscillano attorno ad un valor medio costante. Nell'astronomia moderna si distinguono almeno cinque periodi medi:

1) Come il Sole e la Luna, tutti i pianeti seguono un moto generale da ovest verso est tra le stelle fisse. Questo moto diretto ha una velocità angolare variabile ma, è sufficientemente regolare da riuscire a definire un periodo di rivoluzione siderale medio T_f (tempo per ritornare alla stessa stella fissa) e un periodo tropico medio T_t (tempo per ritornare allo stesso punto dell'eclittica).
2) Poiché il moto diretto non è uniforme, è possibile definire un periodo anomalistico medio T_a in cui il pianeta ritorna alla stessa velocità.
3) I pianeti esibiscono diversi fenomeni sinodici, ovvero accoppiati al moto del Sole. Ciascun pianeta interrompe il suo moto diretto divenendo stazionario per un breve tempo, dopo il quale inizia un moto retrogrado descrivendo un arco verso ovest. Alla fine di questo arco è nuovamente stazionario e poi riprende il suo moto diretto. Inoltre, mentre i pianeti inferiori hanno un'elongazione limitata dal Sole, con cui di tanto in tanto sono in congiunzione, i pianeti superiori possono anche essere in opposizione. Empiricamente si trova che un'opposizione ha sempre luogo nel mezzo di un moto retrogrado e, quindi, i due fenomeni sono accoppiati. I fenomeni sinodici avvengono ad intervalli di tempo leggermente irregolari ed è possibile definire un periodo sinodico medio T_s come l'intervallo temporale medio compreso tra due fenomeni dello stesso tipo, per esempio due opposizioni (com'è Tolomeo stesso ad osservare nel capitolo 6 del Libro X, le congiunzioni col Sole non sono osservabili). Inoltre, si trova che il periodo sinodico di un dato pianeta è lo stesso indipendentemente dal

[56] In astronomia moderna si definiscono pianeti interni quelli che si trovano tra la Terra e il Sole (dunque Mercurio e Venere) e pianeti esterni tutti gli altri. Inoltre, quando un pianeta si trova sulla congiungente Terra-Sole si dice in:

- Congiunzione se il pianeta è all'esterno del Sole o tra la Terra e il Sole (valido solo per un pianeta interno); il fenomeno può verificarsi pertanto solo di giorno.
- Opposizione quando un pianeta esterno (e solo un pianeta esterno) è all'esterno della Terra; è il momento di massima visibilità del pianeta perché esso si trova al meridiano a mezzanotte ed è visibile tutta la notte.

[57] Infatti, Venere e Mercurio non sono mai visibili a mezzanotte. Al contrario, si trovano sempre nelle vicinanze del Sole, essendo l'elongazione massima di 47° per Venere e compresa tra 18° e 28° per Mercurio. Quando l'elongazione è ad est rispetto al Sole (e grande abbastanza) questi pianeti appaiono come stelle della sera sopra l'orizzonte ovest subito dopo il tramonto. Quando l'elongazione è a ovest appaiono come stelle del mattino sopra l'orizzonte est appena prima dell'alba. Nel mezzo delle due c'è un periodo di invisibilità durante il quale i pianeti sono troppo vicini al Sole per essere visti dalla Terra.

[58] [IX, 2; T84, 420]

particolare fenomeno usato per determinarlo; per esempio, due opposizioni successive portano allo stesso valore T_s così come due spostamenti successivi dal moto diretto a quello retrogrado.[59]

4) Infine, tutti i pianeti hanno latitudini che variano tra un valore massimo a nord e un valore minimo a sud della stessa entità. Questo permette di definire un periodo draconico medio T_d (tempo per ritornare alla stessa latitudine eclittica).

All'interno dei limiti dell'astronomia tolemaica, questi cinque periodi possono ridursi a due. Prima di tutto, poiché Tolomeo calcola le longitudini eclittiche dal punto vernale ♈ e non da una qualsiasi stella fissa, il periodo siderale T_f non gioca alcun ruolo. Se necessario può essere facilmente derivato dal periodo tropico T_t a causa del moto retrogrado degli equinozi. Tolomeo credeva che le linee dei nodi delle orbite planetarie fossero fisse rispetto alle stelle e questo significa che $T_d = T_f$. Infine, contrariamente a quanto fatto per la Luna, Tolomeo non usa il periodo anomalistico T_a nelle teorie dei cinque pianeti e quando parla di un 'moto medio in anomalia' si riferisce alla seconda anomalia che è responsabile dei fenomeni sinodici. Pertanto, il suo periodo 'anomalistico' equivale all'odierno periodo sinodico (un termine che non utilizza). Questo significa che $T_a = T_s$, dove T_a è il periodo anomalistico nel senso tolemaico.
Il risultato finale è che ci sono solo due parametri cinematici fondamentali nelle teorie dei moti in longitudine dei pianeti, ossia il periodo tropico (o 'zodiacale') T_t e il periodo sinodico (o 'anomalistico') $T_s = T_a$.

Come nel caso lunare, Tolomeo assume in tutti i modelli planetari che la teoria del moto in longitudine sia indipendente, in prima approssimazione, dalla teoria del moto in latitudine, rimandando la trattazione generale di quest'ultima nel Libro XIII. Pertanto, tutti i modelli geometrici, usati per determinare il moto in longitudine dei pianeti, e descritti nei Libri IX-XII, sono meccanismi piatti, i cui cerchi appartengono al piano dell'eclittica.

2.2.2.3.1 Teoria del moto in longitudine dei cinque pianeti (Libri IX-XI)

Iniziamo descrivendo la teoria del moto in longitudine dei pianeti superiori (Marte, Giove e Saturno) riferendoci ad un pianeta qualsiasi dei tre.
Gli archi descritti dai pianeti nei moti retrogradi non hanno la stessa ampiezza e i punti in cui si verificano non sono distribuiti uniformemente lungo l'eclittica. Tuttavia, è possibile distinguere due diverse classi di irregolarità o 'anomalie', ovvero deviazioni indipendenti dai moti circolari uniformi: una è correlata al moto del pianeta lungo l'eclittica, mentre l'altra dipende dalla posizione del pianeta rispetto al Sole (è la stessa distinzione presente nella teoria lunare). Per quanto riguarda la prima anomalia, consideriamo, ad esempio, le opposizioni di un pianeta durante una rivoluzione completa (lungo l'eclittica) e osserviamo sia l'intervallo temporale tra due opposizioni consecutive (ovvero i periodi sinodici reali) che la differenza di longitudine tra un'opposizione e la successiva[60]. Il rapporto tra le relative differenze in longitudine e gli intervalli temporali fornisce una velocità che varia con la longitudine eclittica (oscilla attorno al valor medio $\omega_s = \frac{360°}{T_s}$). Questa variazione della velocità lungo l'eclittica definisce la prima anomalia dei pianeti. La seconda anomalia, invece, consiste nelle fasi di moto retrogrado verso ovest lungo l'eclittica che di tanto in tanto sostituiscono il generale, moto diretto verso est. Poiché le opposizioni si verificano sempre nel mezzo di un moto retrogrado, si evince che esiste una connessione tra quest'ultimo e la posizione del pianeta rispetto al Sole.

Nel capitolo 3 del Libro IX, Tolomeo stabilisce le caratteristiche fondamentali di un modello geometrico che descrive il moto dei pianeti superiori: *we mean by 'motion in longitude' the motion of the centre of the epicycle around the eccentre, and by 'anomaly' the motion of the body around the epicycle*[61] ossia, "identifichiamo il 'moto (medio) in longitudine' col moto del centro dell'epiciclo sull'eccentrico e il moto (medio) 'in anomalia' col moto del pianeta sull'epiciclo". Tolomeo, cioè, afferma che per spiegare la seconda anomalia ('moto medio in anomalia') è necessario un modello geometrico in cui il pianeta si muove su un epiciclo mentre, è possibile riprodurre la prima anomalia ('moto medio in longitudine') con un modello eccentrico. Segue che le due anomalie possono essere simultaneamente rappresentate per mezzo di un cerchio eccentrico su cui è trascinato un epiciclo.
Il primo passo consiste nel determinare i moti medi dei pianeti, ossia le velocità angolari medie: Tolomeo cita da Ipparco determinate relazioni periodiche, per esempio, per Saturno 57 ritorni in anomalia T_a (ossia 57 fenomeni sinodici) corrispondono a 59 anni solari e a 2 rivoluzioni in longitudine T_t. Sappiamo che si tratta di valori ben noti ai babilonesi. Tolomeo applica alcune piccole correzioni e calcola le tavole dei moti medi (dei pianeti esterni), usando una relazione che giustifica in seguito, ovvero:

---

[59] Già gli astronomi babilonesi distinguevano un certo numero di fenomeni planetari accoppiati al moto del Sole. Congiunzioni, opposizioni, posizioni stazionarie, levate e tramonti eliaci sono fenomeni sinodici. La levata eliaca si verifica quando il pianeta, dopo esser stato invisibile, durante una congiunzione col Sole, ritorna ad essere debolmente visibile sopra l'orizzonte est appena prima dell'alba. Il fenomeno opposto si verifica quando il pianeta viene superato dal Sole nel suo moto annuale da ovest verso est; la sua ultima debole apparizione sopra l'orizzonte ovest, immediatamente dopo il tramonto, è chiamata tramonto eliaco del pianeta. Anche il periodo di invisibilità del pianeta durante la congiunzione è un fenomeno sinodico. I fenomeni sinodici avevano un interesse particolare nell'astronomia antica principalmente perché è facile accorgersi del loro avvenimento mediante semplici osservazioni senza ricorrere a strumenti osservativi.

[60] Una tabella che riporta i valori numerici delle grandezze considerate, relativa alle opposizioni di Saturno nel periodo 113-142 d.C., si trova nel libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974, p. 265.

[61] [IX, 3; T84, 424]

$$\omega = \omega_t + \omega_a$$

dove $\omega = \frac{360°}{T}$ è la velocità angolare media del Sole reale (ovvero velocità angolare costante del Sole medio) essendo T un anno tropico, $\omega_t = \frac{360°}{T_t}$ rappresenta la velocità angolare del moto medio in longitudine del pianeta (e quindi del centro dell'epiciclo sul deferente eccentrico) essendo T_t periodo zodiacale (ossia tropico) medio e $\omega_a = \frac{360°}{T_a}$ è la velocità angolare del moto medio in anomalia essendo T_a il periodo anomalistico medio (nel senso tolemaico) del pianeta esterno.

Per separare gli effetti combinati delle due anomalie sui moti planetari, Tolomeo sfrutta il fatto (osservabile) che le opposizioni si verificano sempre nel mezzo di un arco retrogrado e, pertanto, il pianeta può trovarsi all'apogeo A_v o al perigeo Π_v dell'epiciclo (Fig. 17), a seconda che il moto sull'epiciclo sia anch'esso retrogrado (opposizione in A_v) o diretto (opposizione in Π_v). Questo significa che all'opposizione il pianeta ha la stessa longitudine eclittica del centro C dell'epiciclo. Quindi, mediante osservazioni di opposizioni (misurate con l'*astrolabon*; sezione 2.3.2.1), è possibile determinare i parametri del deferente eccentrico, su cui ruota il centro C dell'epiciclo con velocità angolare costante ω_t, che permettono al modello di riprodurre la prima anomalia.

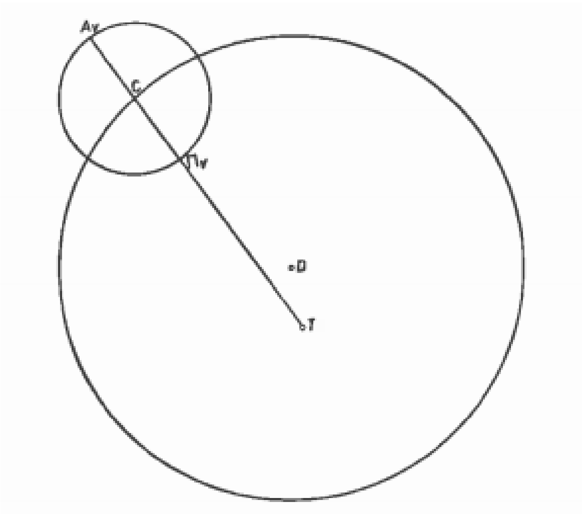


Fig. 17 – Le osservazioni di opposizioni forniscono informazioni sul moto del centro C dell'epiciclo sul deferente eccentrico (di centro D). T indica il centro della Terra.
(Immagine presa dal libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974)

Osserviamo che il cerchio deferente ha diversi nomi: Tolomeo parlava del 'cerchio che riproduce l'anomalia' (la prima), o del 'cerchio di moto uniforme' mentre, gli astronomi latini lo soprannominarono 'cerchio equante'. Come nelle teorie del Sole e della Luna, Tolomeo assume il raggio del cerchio equante pari al valore arbitrario $R = 60^p$, dove 1^p è un'unità peculiare del pianeta in questione, e, determina, mediante tre osservazioni di opposizioni (con un metodo simile a quello delle tre eclissi usato da Ipparco nella teoria lunare), la longitudine del suo apogeo e l'eccentricità $2e$. Il motivo per cui abbiamo indicato con $2e$ l'eccentricità del cerchio equante sarà chiaro tra poco.
Tolomeo, però non completa questo modello, determinando, ad esempio, il raggio dell'epiciclo, ma lo modifica significativamente sostituendo il cerchio equante (di centro E) con un altro cerchio, che chiameremo semplicemente deferente, avente lo stesso raggio $R = 60^p$ e il centro in un punto D diverso da E (Fig. 18). Tolomeo non fornisce sufficienti spiegazioni al riguardo (afferma di abbandonare il cerchio equante in seguito alle sue osservazioni) e posiziona il centro D del deferente a metà tra il centro E del cerchio equante e il centro T della Terra. In questo modo, l'eccentricità TD del deferente è pari ad e (questa è la ragione per cui abbiamo indicato con $2e$ l'eccentricità del cerchio equante). Il modello consiste, quindi, di due cerchi eccentrici:

- Il primo è il cerchio equante (di centro E ed eccentricità $2e$) che non ospita più il moto del centro C dell'epiciclo, ma su cui ruota un determinato punto S con una velocità angolare costante ω_t;
- Il secondo è il deferente (di centro D ed eccentricità e) su cui si muove il centro C dell'epiciclo, determinato dall'intersezione del deferente col raggio ES del cerchio equante.

Dunque, il moto del centro C è ancora circolare, ma la sua rotazione avviene con velocità angolare costante, ω_t, rispetto al punto E e variabile rispetto al centro D del deferente: angoli uguali percorsi in tempi uguali rispetto al punto E non intercettano archi uguali sul deferente. In altre parole, siamo di fronte ad una violazione del dogma fondamentale dell'astronomia greca antica secondo cui i moti circolari, usati nei vari modelli teorici, dovevano essere uniformi rispetto ai loro centri per accordarsi alla *nature of divine beings*[62] (natura degli esseri divini). Tolomeo non rivela le ragioni delle sue assunzioni.

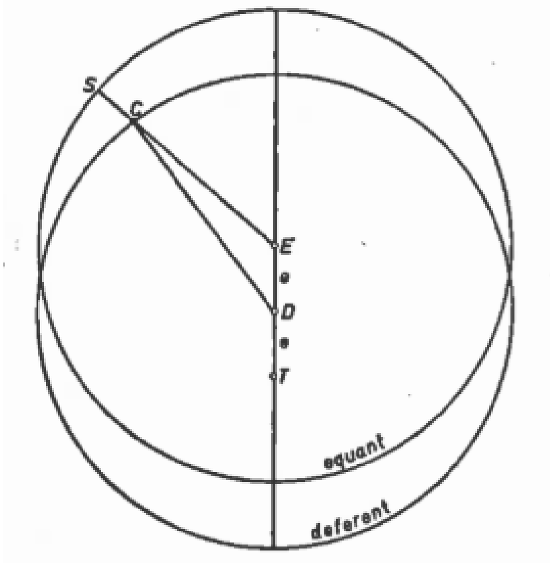


Fig. 18 – Bisezione dell'eccentricità apportata da Tolomeo per riprodurre la prima anomalia dei pianeti esterni. Il centro C dell'epiciclo si muove sul deferente (eccentrico), ma il suo moto uniforme non è riferito al centro D, bensì al punto E, la cui distanza *e* da D è pari alla distanza della Terra T da D in direzione opposta. Il punto E è noto anche con il suo appellativo di origine medievale 'equante'.
(Immagine presa dal libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974)

Riprodotta la prima anomalia, descrivendo il moto del centro dell'epiciclo sul deferente, Tolomeo passa a considerare il moto del pianeta sull'epiciclo in modo da giustificare anche la seconda anomalia. Per determinare la direzione di rivoluzione del pianeta lungo l'epiciclo si sfrutta il fatto (osservabile) che il pianeta nell'intorno dell'opposizione ha una brillantezza apparente massima. Questo significa che le opposizioni, e quindi i moti retrogradi, devono avvenire vicino al perigeo Π_v dell'epiciclo (Fig. 17). Segue che il moto del pianeta sull'epiciclo è diretto (ossia da ovest verso est), contrariamente a quanto si era trovato nella teoria della Luna.
Tolomeo riproduce la seconda anomalia accoppiando il moto del Sole col moto del pianeta sull'epiciclo mediante la relazione (vista sopra) $\omega = \omega_t + \omega_a$. Questa relazione viene discussa nel capitolo 6 del Libro X, in cui sembra un postulato fondamentale delle teorie di tutti i pianeti superiori ed ha una semplice interpretazione geometrica: il raggio CP dell'epiciclo nella posizione istantanea P del pianeta è parallelo alla linea che congiunge il centro della Terra T col Sole medio (sull'eclittica) (Fig. 19).

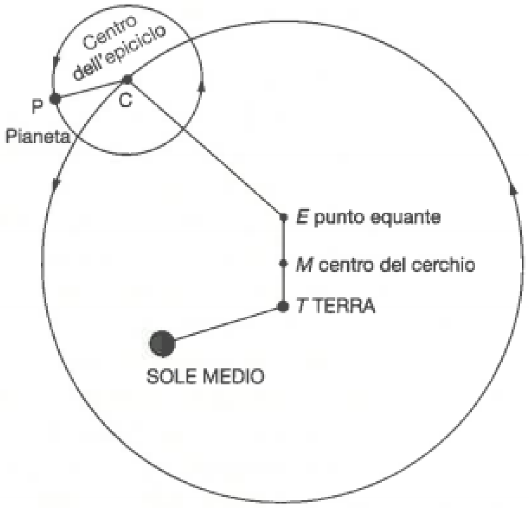


Fig. 19 – Modello del moto (in longitudine) dei pianeti superiori (Marte, Giove e Saturno). La Terra si trova in T, e M è il centro del deferente. C è il centro dell'epiciclo su cui si muove il pianeta P. Il punto equante E si trova sul prolungamento della linea TM con TM = ME. P si muove sull'epiciclo in modo tale che CP è sempre parallelo alla linea che congiunge T col Sole medio. Segue che il periodo del moto lungo l'epiciclo di un pianeta superiore coincide con quello del Sole medio (ovvero un anno tropico), mentre il centro dell'epiciclo C descrive il deferente nel periodo proprio del pianeta con velocità angolare uniforme rispetto al punto equante E.[63]
(Immagine presa dal libro di M. Hoskin, *Storia dell'astronomia*; 2017, p. 67)

[62] [IX, 2; T84, 420]
[63] Un'animazione molto dettagliata sulla teoria dei pianeti superiori si trova nella sezione Museo Virtuale della pagina web del Museo Galileo di Firenze (https://catalogo.museogalileo.it/multimedia/SistemaTolomeo.html). Questo video mostra anche la teoria del moto in latitudine dei pianeti e, dunque, il sistema tolemaico nelle sue grandi linee.

Vediamo ora le caratteristiche fondamentali delle teorie del moto in longitudine dei pianeti inferiori, ovvero Venere e Mercurio. I fenomeni sinodici più importanti per questi pianeti sono le elongazioni massime ad est e ad ovest del Sole. Infatti, le teorie di Venere e Mercurio sono costruite principalmente sulle osservazioni di queste elongazioni massime, al contrario delle teorie dei pianeti superiori che si basavano sulle osservazioni di opposizioni.
Anche nei pianeti inferiori è possibile distinguere due diverse 'anomalie', o deviazioni dal moto circolare uniforme. Poiché accompagnano il Sole nel suo corso annuale lungo l'eclittica, esibiscono una prima anomalia legata alla loro posizione sull'eclittica. Come abbiamo fatto con i pianeti superiori, definiamo velocità angolare del moto medio in longitudine del pianeta la velocità angolare media tropica ω_t, legata al periodo tropico medio T_t dalla relazione $\omega_t \cdot T_t = 360°$. Tuttavia, nel caso dei pianeti inferiori si ha che $T_t = 1$ anno tropico[64]. La seconda anomalia, invece, è legata alla posizione del pianeta rispetto al Sole ed è responsabile dei fenomeni sinodici, esattamente come nei pianeti superiori. Questo significa che anche per Venere e Mercurio valgono le relazioni $T_d = T_f$ e $T_a = T_s$, cioè non è necessario distinguere tra un periodo sinodico e un periodo anomalistico. Pertanto, il periodo anomalistico T_a (nel senso tolemaico), o equivalentemente, la velocità angolare del moto medio in anomalia ω_a, definita come $\omega_a \cdot T_a = 360°$, costituisce il parametro cinematico fondamentale nelle teorie dei moti in longitudine dei pianeti inferiori.
Osserviamo, infine, che, se decidiamo anche in questo caso di rappresentare entrambe le anomalie per mezzo di un cerchio eccentrico su cui viene trascinato un epiciclo, occorre invertire i ruoli del deferente eccentrico e dell'epiciclo. Infatti, poiché il moto in longitudine è uguale a quello del Sole, l'accoppiamento tra il pianeta e il Sole (responsabile dei fenomeni sinodici, e perciò, della seconda anomalia) si realizza mediante un cerchio deferente, mentre il moto sull'epiciclo può considerarsi indipendente e caratteristico del singolo pianeta. Tolomeo realizza questo fatto assegnando al centro dell'epiciclo (ossia alla posizione media del pianeta) la stessa longitudine eclittica del Sole medio; ovvero, i centri degli epicicli che trasportano Mercurio e Venere sono sempre allineati col Sole. Perciò, il centro dell'epiciclo completa una rivoluzione sul deferente eccentrico in un anno tropico, mentre il pianeta stesso ruota sull'epiciclo con un suo periodo caratteristico.

2.2.2.3.2 Moti retrogradi ed elongazioni massime (Libro XII)

Il Libro XII dell'*Almagesto* è diverso dagli altri libri precedenti in quanto non verte sulla costruzione delle teorie planetarie, ma descrive le procedure per determinare alcuni fenomeni sinodici che avevano assunto molta importanza nell'astronomia tradizionale pre-tolemaica. Infatti, nell'antichità (sia nel mondo ellenico che altrove), i primi astronomi teorici si erano occupati di determinare i fenomeni sinodici, come le opposizioni, i punti stazionari, la prima e l'ultima visibilità dei pianeti, e le eclissi del Sole e della Luna. Ciò che accadeva nel mezzo tra questi eventi era considerato meno importante. Con le teorie planetarie di Tolomeo, che coronavano il lavoro iniziato da Ipparco, l'astronomia teorica riuscì ad affrontare, in maniera generale, il moto planetario e a predire le longitudini dei corpi celesti in ogni istante temporale a prescindere se nell'istante considerato avveniva o meno un fenomeno sinodico. Dunque, i fenomeni sinodici avevano perso molta della loro importanza teorica, ma continuavano ad essere trattati per altre ragioni; ad esempio, le eclissi rivestivano un ruolo chiave nell'astrologia.
Restavano fuori dalla trattazione di Tolomeo la descrizione di due fenomeni sinodici: i moti retrogradi e le elongazioni massime di Venere e Mercurio. Riguardo ai primi, il Libro XII rivela che la teoria tolemaica della longitudine non riesce a spiegare i fenomeni in maniera diretta, ovvero a determinare facilmente i punti stazionari dei cinque pianeti, così Tolomeo deve far affidamento sul vecchio teorema di Apollonio che abbiamo descritto nel paragrafo 1.2. Per quanto concerne le elongazioni massime di Venere e Mercurio, a ovest del Sole quando appaiono come stelle del mattino e a est del Sole quando appaiono come stelle della sera, Tolomeo si limita a ridurre i fenomeni ad una forma tabulare.

2.2.2.3.3 Teoria del moto in latitudine dei cinque pianeti (Libro XIII)

In tutti i modelli geometrici dei cinque pianeti considerati fino ad ora, l'intero apparato costituito dal cerchio equante, dal deferente e dall'epiciclo era situato nel piano dell'eclittica. Le longitudini derivate da questi modelli, comprese le complicate variazioni delle longitudini dei pianeti nei loro moti retrogradi, erano in sufficiente accordo con i dati empirici. Tuttavia, anche semplici osservazioni mostravano che il moto dei pianeti avveniva per la maggior parte del tempo al di fuori dell'eclittica. Pertanto, Tolomeo elabora nel Libro finale della sua grande composizione una teoria delle latitudini planetarie. Metà del Libro 13 (capitoli 1-6) è dedicato a questo scopo mentre i restanti capitoli (7-10), ad eccezione dell'ultimo, descrivono una teoria dei periodi di visibilità dei pianeti e delle loro levate e tramonti eliaci.
In questo libro Tolomeo non riporta le osservazioni in dettaglio (non indica date o altre informazioni), come nella parte restante dell'opera, e nel capitolo 2 fa una digressione sull'uso della nozione di semplicità in astronomia: se si pensa allo sforzo impiegato per costruire modelli geometrici che simulano il moto dei corpi, per l'uomo è difficile comprendere l'intero apparato celeste, ma agli occhi di Dio i cieli non mostrano alcuna complessità.

[64] Questo fatto implica che il moto medio in longitudine di Venere e Mercurio è identico al moto medio del Sole.

Descriviamo ora la teoria del moto in latitudine dei pianeti superiori riferendoci ad un pianeta qualsiasi dei tre.
Tolomeo inizia la trattazione spiegando che la latitudine di un pianeta va considerata come un'‘anomalia’, ovvero una deviazione dal moto circolare lungo l'eclittica. Questa anomalia in latitudine ha due componenti: una connessa con il moto del centro dell'epiciclo lungo il deferente e l'altra connessa con il moto del pianeta lungo l'epiciclo. Le osservazioni mostrano che, accanto ad una lenta variazione della latitudine di un pianeta esterno durante una rivoluzione completa attraverso lo zodiaco, esiste una rapida variazione della latitudine durante i moti retrogradi, questi ultimi riprodotti dalla rotazione del pianeta sull'epiciclo.
Analogamente alla teoria della latitudine della Luna, per spiegare la variazione della latitudine planetaria durante una rivoluzione completa lungo l'eclittica, Tolomeo posiziona il deferente eccentrico in un piano inclinato di un angolo i, rispetto al piano dell'eclittica, passante per il centro T della Terra (Fig. 20). I due piani si intersecano lungo una linea dei nodi passante per T. Seguendo la circonferenza del deferente da ovest verso est troviamo il nodo ascendente Ω ad un'estremità della linea nodale, in cui il deferente passa dalle latitudini sud alle latitudini nord. All'altra estremità troviamo, invece il nodo discendente ℧, in cui il deferente passa dalle latitudini nord alle latitudini sud. Indicando la longitudine eclittica di Ω con λ_n, la longitudine di ℧ è $\lambda_n + 180°$. Chiamiamo ora ‘top’ e ‘bottom’ i punti del deferente situati rispettivamente più a nord e più a sud rispetto al piano dell'eclittica. La longitudine eclittica del top è $\lambda_n + 90°$, mentre quella del bottom vale $\lambda_n + 270°$. Osserviamo che, a differenza della linea nodale della Luna che ruota attorno il centro della Terra nella direzione retrograda (da est verso ovest), la linea nodale dei pianeti mantiene una direzione costante, nel piano dell'eclittica, rispetto alla linea degli apsidi (apogeo-perigeo), in quanto Tolomeo assume che entrambe le linee siano fissate rispetto alle stelle fisse. La ragione di questa differenza risiede nel fatto che, mentre la Luna può mostrare la sua latitudine massima (in senso assoluto) in un punto qualsiasi dell'eclittica, la latitudine massima dei pianeti sembra verificarsi solo in corrispondenza di determinati valori delle longitudini eclittiche.

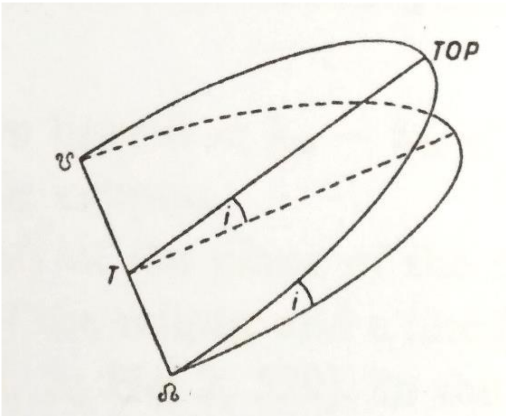


Fig. 20 - Per spiegare la variazione della latitudine planetaria durante una rivoluzione completa lungo l'eclittica, Tolomeo posiziona il deferente eccentrico in un piano inclinato di un angolo i, rispetto al piano dell'eclittica, passante per il centro T della Terra. I punti Ω e ℧ indicano rispettivamente il nodo ascendente e il nodo discendente. Il ‘top’ è il punto del deferente situato più a nord rispetto al piano dell'eclittica.
(Immagine presa dal libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974)

Tolomeo riporta, per ognuno dei pianeti esterni, i valori della longitudine eclittica del top del deferente (ossia $\lambda_n + 90°$) e della longitudine λ_a dell'apogeo[65], e osserva che quest'ultimo si trova in tutti e tre i casi a nord rispetto al piano dell'eclittica. In seguito, assume che l'angolo i, formato tra la linea congiungente il centro T della Terra con il top del deferente e il piano dell'eclittica, è costante nei pianeti superiori. Questo implica che il piano inclinato, su cui si trova il deferente, è completamente determinato dalle quantità i e λ_n, e Tolomeo fissa il cerchio deferente stabilendo la posizione del suo centro D sulla linea congiungente il centro T della Terra con l'apogeo A del deferente (Fig. 21).

[65] Una tabella che riporta i valori numerici delle grandezze considerate si trova nel libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974, p. 358.

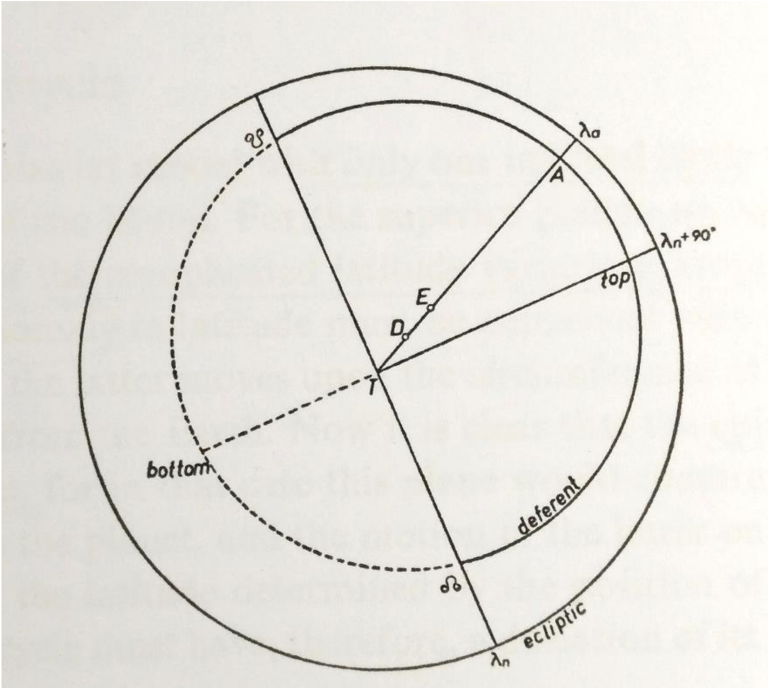


Fig. 21 – Empiricamente si trova che il centro D del deferente giace nella parte del piano inclinato a nord dell'eclittica. Segue che la linea dei nodi, passante per T, non divide il deferente simmetricamente, ma in due parti disuguali, in modo tale che il top del deferente disti maggiormente del bottom dalla Terra T. La figura mostra una visione dall'alto, la linea tratteggiata indica la parte del deferente al di sotto del piano dell'eclittica.
(Immagine presa dal libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974)

Per spiegare le complicate variazioni della latitudine planetaria durante i moti retrogradi, Tolomeo posiziona l'epiciclo su un piano, a sua volta, inclinato rispetto al piano del deferente. Per definire la posizione reale dell'epiciclo, Tolomeo considera prima il diametro $\Pi_v C A_v$ che congiunge il vero perigeo Π_v col vero apogeo A_v dell'epiciclo (Fig. 22). Questo diametro è la linea di intersezione tra l'epiciclo e il piano passante per T e C perpendicolare al piano dell'eclittica. Seguendo gli astronomi arabi medievali, chiamiamo questo diametro 'primo diametro dell'epiciclo' e indichiamolo con d_1. Il diametro perpendicolare a d_1 è chiamato 'secondo diametro dell'epiciclo' e lo indichiamo con d_2. Il moto del piano dell'epiciclo avviene nel seguente modo. Nel caso dei pianeti superiori il secondo diametro d_2 resta sempre parallelo al piano dell'eclittica servendo da asse attorno cui il primo diametro d_1 compie un movimento oscillatorio con la stessa velocità angolare del moto medio del pianeta in longitudine (ossia del centro dell'epiciclo C sul deferente). La condizione iniziale è tale che quando C è al nodo ascendente Ω, d_1 giace sul piano dell'eclittica (lungo la linea dei nodi). Quando C si muove verso le latitudini nord, d_1 si inclina rispetto a d_2 in modo tale che il perigeo Π_v è rivolto verso nord, formando un angolo variabile j col piano del deferente. Quando C è al top del deferente, j ha il valore massimo j_m. Proseguendo oltre il top, il valore di j comincia a decrescere annullandosi, prima, al nodo discendente ℧ e diventando negativo, poi, nella parte del deferente a sud dell'eclittica. Il valore minimo di j è raggiunto al bottom del deferente.

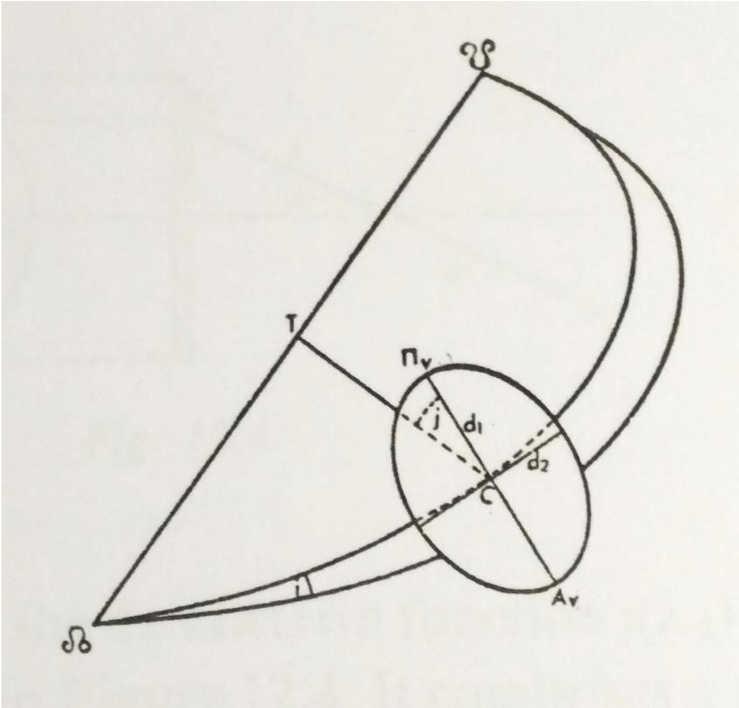


Fig. 22 – Per spiegare le complicate variazioni della latitudine planetaria durante i moti retrogradi, Tolomeo posiziona l'epiciclo su un piano inclinato di un angolo variabile ***j*** rispetto al piano del deferente. La descrizione del moto del piano dell'epiciclo, nel caso dei pianeti superiori, è spiegata nel testo.
(Immagine presa dal libro di O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974)

Nel caso di Venere e Mercurio la teoria del moto in latitudine differisce da quella dei pianeti superiori per diversi aspetti:

1) La linea degli apsidi del deferente è perpendicolare alla linea dei nodi, $\lambda_a = \lambda_n + 90°$. Questo significa che il top del deferente è all'apogeo.
2) Il piano del deferente è inclinato di un angolo *i* rispetto al piano dell'eclittica ma, a diversamente dai pianeti superiori, questo angolo non è costante. La sua variazione conferisce al piano del deferente un moto oscillatorio attorno la linea dei nodi. Questo moto è accoppiato alla rotazione del centro C dell'epiciclo lungo il deferente in modo tale che $i = 0$ quando C è ai nodi e *i* è massimo (in senso assoluto) quando C è al perigeo e all'apogeo. Cioè, in questo caso, l'oscillazione del deferente è analoga a quella dell'epiciclo di un pianeta superiore ed ha lo stesso periodo di rotazione di C sul deferente. Nel caso di Venere si ha che quando il centro del suo epiciclo si muove, verso est, dal nodo ascendente, l'apogeo si alza dal piano dell'eclittica fino a raggiungere una latitudine massima in corrispondenza di C alla longitudine $\lambda_n + 90°$. All'avanzare di C, la latitudine dell'apogeo inizia a diminuire, annullandosi quando C viene a coincidere col nodo discendente. A questo punto, il perigeo inizia ad alzarsi sopra il piano dell'eclittica fino a raggiungere una latitudine massima in corrispondenza di C alla longitudine $\lambda_n + 270°$. Dunque, nel caso di Venere questo accoppiamento implica che il centro del suo epiciclo si trova sempre sopra il piano dell'eclittica. Per Mercurio, invece, vale l'opposto: il centro del suo epiciclo rimane sempre sotto il piano dell'eclittica.
3) Anche nel caso dei pianeti inferiori il primo diametro d_1 dell'epiciclo forma un angolo variabile *j* col piano del deferente ed è accoppiato al moto del centro C dell'epiciclo. In questo caso, però, *j* ha il valore massimo quando C è ai nodi e si annulla quando C è all'apogeo o al perigeo.
4) Nei pianeti inferiori, il secondo diametro d_2 dell'epiciclo non resta parallelo al piano dell'eclittica ma oscilla rispetto ad esso in maniera simile al primo diametro d_1.

Tolomeo conclude la teoria del moto in latitudine sviluppando una procedura generale per calcolare la latitudine di ciascuno dei cinque pianeti in un punto arbitrario della loro traiettoria e tabulando i risultati dei suoi calcoli.
Nella seconda parte del Libro XIII affronta il problema delle levate e dei tramonti eliaci dei pianeti, ossia delle loro prime e ultime apparizioni, e, descrive una teoria dei periodi di visibilità dei pianeti.

2.3 Strumenti osservativi descritti nell'*Almagesto*

L'*Almagesto* di Tolomeo rappresenta l'unica rassegna completa degli strumenti osservativi usati dagli astronomi alessandrini: dall'opera otteniamo utili informazioni sui metodi osservativi impiegati con sei diversi tipi di strumenti.
Come vedremo, Tolomeo non tratta nell'identico modo tutti gli strumenti che presenta. La differenza di trattazione sembra essere un esito della riflessione compiuta sulle prestazioni offerte da alcuni di essi. In particolare, la mancanza di una approfondita descrizione denota che lo strumento ha un qualche vizio intrinseco, come nei casi dell'armilla equatoriale o della diottra di Ipparco[66].
Alcuni tipi devono essere stati conosciuti da Ipparco e taluni possono essere anche più antichi. È chiaro, tuttavia, dalle forme degli strumenti, che essi nel migliore dei casi sono solo di poco progrediti rispetto ai più antichi dispositivi *ad hoc*, che avevano preso il posto dei primitivi espedienti come il filo a piombo. Ogni strumento era stato ideato per uno scopo specifico, un singolo tipo di osservazione: non si nota alcun indizio di una tendenza verso l'economia e la convenienza di progettare uno strumento che potesse essere usato per molteplici scopi, e sono molto evidenti le limitazioni tecniche nella costruzione degli strumenti stessi. Il legno o la pietra sono adoperati fin dove è possibile e quando si ricorse all'uso del metallo, questi prese la forma di armille costituite da strisce di bronzo[67].

I dati osservativi introdotti nell'*Almagesto* sono sempre preceduti dalla presentazione degli strumenti utilizzati da Tolomeo per ottenerli. Alcuni dati riguardano i parametri di alcune circonferenze celesti, altri le posizioni dei pianeti e delle stelle fisse. In particolare, dalla sede privilegiata della Terra, ritenuta ferma al centro del cosmo, Tolomeo coglie due principali movimenti celesti:

- una rotazione uniforme da est verso ovest e in 24 ore di tutti gli astri parallelamente all'equatore celeste, che produce il sorgere e il tramontare del Sole, della Luna, dei pianeti e di parte delle stelle fisse;
- una rotazione uniforme da ovest verso est che presiede ai moti medi dei pianeti (Luna, Mercurio, Venere, Sole, Marte, Giove e Saturno) e della sfera delle stelle fisse con periodi compresi fra un mese lunare e 36.000 anni (secondo il valore trovato da Ipparco[68], e accettato da Tolomeo, per la precessione degli equinozi). Questa rotazione avviene parallelamente all'eclittica, la circonferenza percorsa dal Sole lungo lo Zodiaco, obliqua rispetto all'equatore celeste (Fig. 23).

I due movimenti principali delineano l'assetto degli strumenti per trovare nell'ordine l'inclinazione dell'equatore celeste rispetto all'orizzonte di chi osserva, l'obliquità dell'eclittica rispetto all'equatore celeste, la posizione dei punti dove l'equatore celeste taglia l'eclittica (gli equinozi), le coordinate delle stelle fisse e dei pianeti rispetto all'eclittica e all'equinozio di primavera.

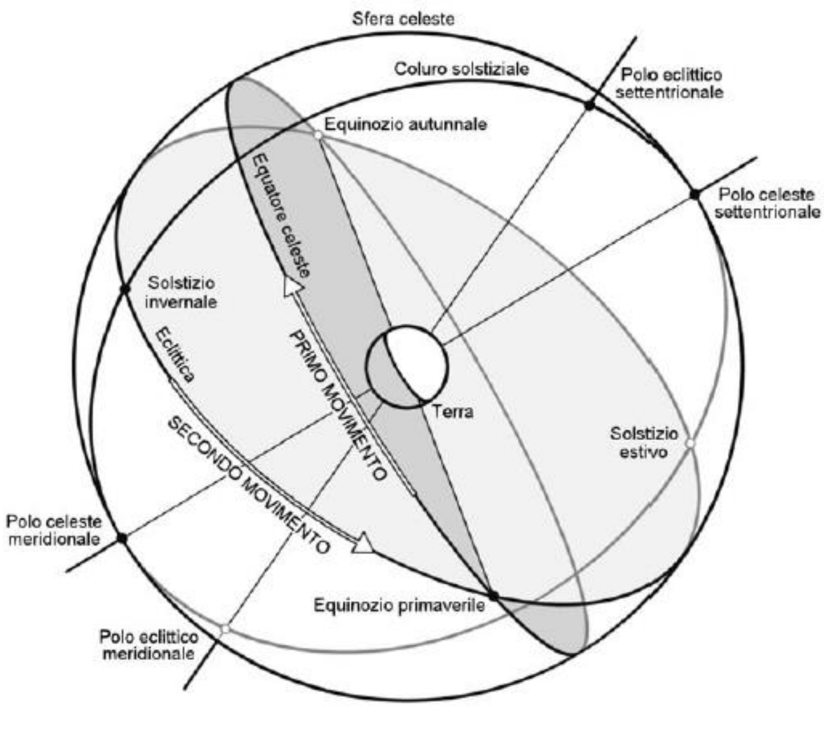


Fig. 23 – I due principali movimenti celesti
(Immagine presa dall'articolo di G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*)

[66] G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike syntaxis*.
[67] D. J. Price, *Strumenti di precisione fino al 1500*, p.596.
[68] 1° in 100 anni, ovvero 36″ all'anno. Il valore reale per la precessione degli equinozi è, invece, di 1° in 71 anni circa, ovvero 50,23″ all'anno circa.

In questa sezione ci concentreremo sugli strumenti osservativi descritti nell'*Almagesto* e sui risultati astronomici che Tolomeo dichiara di aver ottenuto con essi. Nel capitolo 3 continueremo ad occuparci di questi sei strumenti, integrando le informazioni contenute nell'*Almagesto* con quelle dei commentatori all'opera, Pappo, Teone e Proclo, e di alcuni astronomi e autori secondari; descriveremo anche due metodi per determinare la linea meridiana, un elemento essenziale per tutte le osservazioni effettuate da Tolomeo.

2.3.1 Osservazione del Sole

Anche se geocentrica, l'astronomia alessandrina rivela una stretta dipendenza dal Sole: le circonferenze celesti sono enti astratti derivanti dai due movimenti principali. Rispetto a tali enti il Sole descrive l'eclittica in un anno, l'equatore celeste agli equinozi di primavera e d'autunno, e i tropici del Cancro e del Capricorno ai solstizi estivo e invernale. Se si segue il corso del Sole con idonei strumenti si ricavano perciò i parametri alla base di ogni altra misura.
Per trovare l'obliquità dell'eclittica e l'inclinazione dell'equatore celeste rispetto all'orizzonte di chi osserva, Tolomeo descrive gli "anelli" o, in alternativa, il "quadrello" (i due strumenti diverranno noti in seguito come "armilla meridiana (o solstiziale)" e "plinto"); per determinare gli istanti degli equinozi cita invece l'"anello" (strumento che diverrà noto in seguito come "armilla equatoriale (o equinoziale)".

2.3.1.1 L'armilla meridiana

L'armilla meridiana è il primo strumento con una scala graduata circolare documentato nell'astronomia occidentale (Fig. 24).

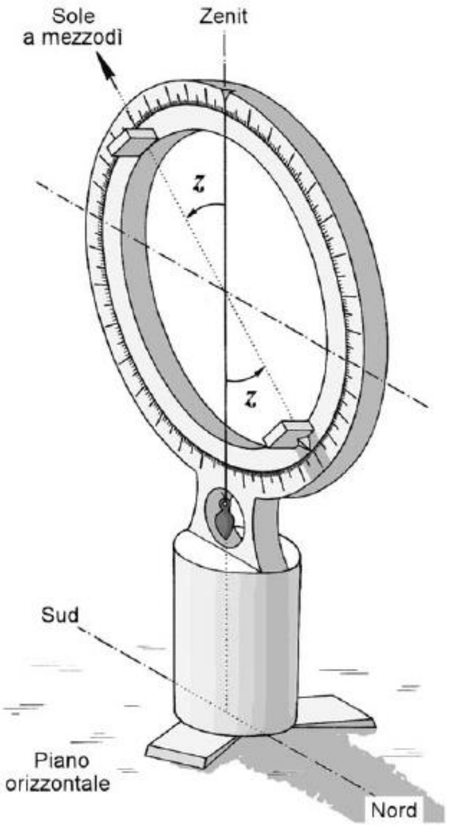


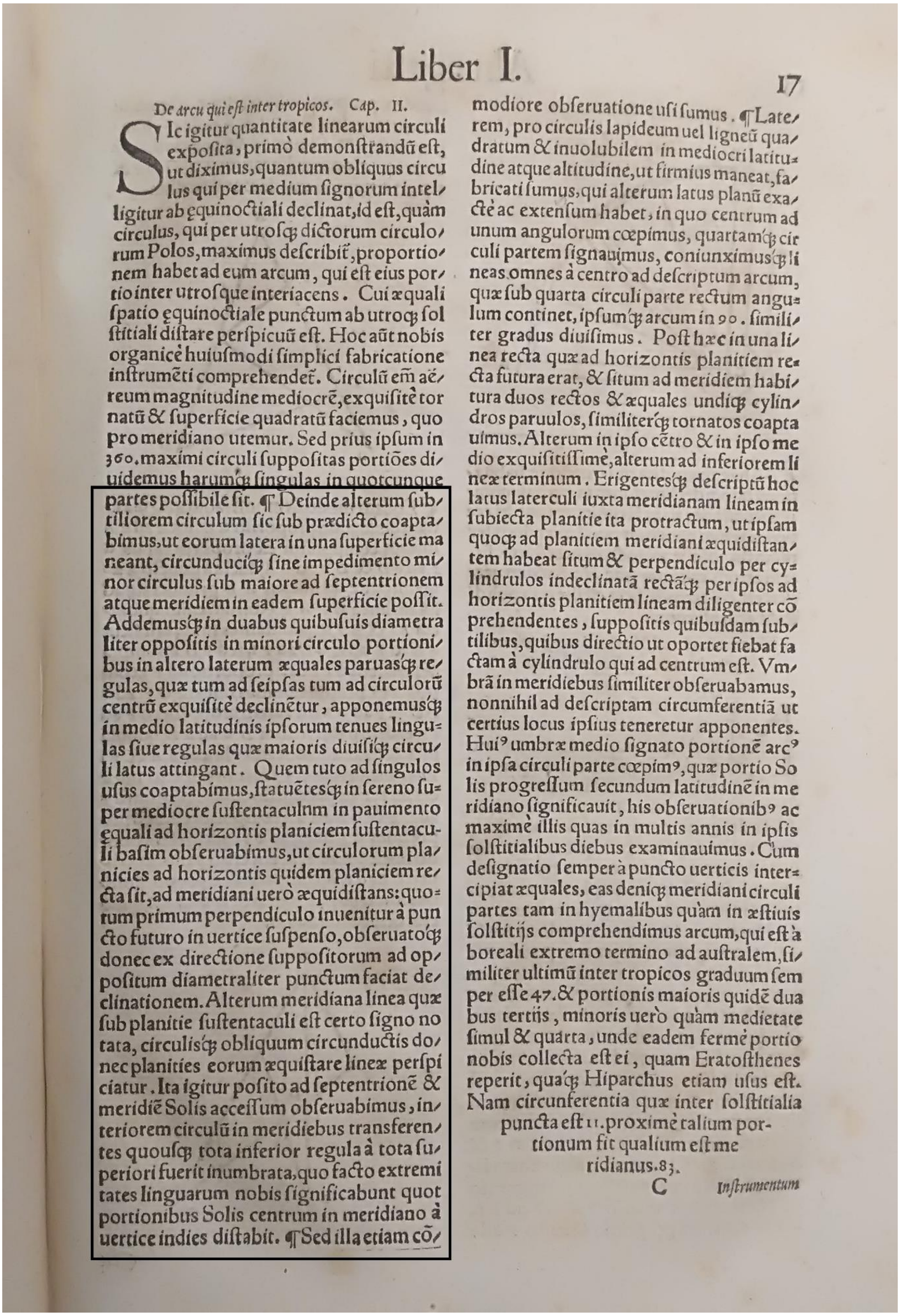
Fig. 24 – Schema dell'armilla meridiana
(Immagine presa dall'articolo di G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*)

È formata da un anello di bronzo a sezione rettangolare diviso in 360 gradi e relative frazioni. L'anello è posto nel piano del meridiano del luogo d'osservazione e contiene un anello più piccolo, in tutto simile, che vi scorre dentro. Una faccia laterale dell'anello interno reca in punti diametralmente opposti due piastrine uguali munite di indici i quali sfiorano la superficie dell'anello graduato più grande. Lo strumento, fissato a una colonna collocata all'aperto su un pavimento orizzontale, è posto in verticale grazie a un filo a piombo calato dalla sommità dell'anello graduato e a sottili elementi di supporto. La collocazione nel piano del meridiano è invece ottenuta muovendo l'anello graduato fino a renderlo parallelo a una linea meridiana (la direttrice nord-sud) tracciata sul pavimento. Fatto ciò, si trova la posizione del Sole in transito al meridiano ruotando l'anello interno dello strumento finché l'ombra della piastrina superiore cade al centro di quella inferiore. A questo punto è possibile leggere sulla scala graduata, in corrispondenza degli indici, la misura della distanza zenitale del Sole al meridiano, cioè l'angolo fra il punto della sfera celeste sulla verticale dell'osservatore e il centro del disco solare.

Tolomeo descrive l'armilla meridiana nel capitolo 12 del Libro I dell'*Almagesto*. Riportiamo qui di seguito la parte di questo capitolo dedicata alla descrizione dello strumento riferendoci alla traduzione in inglese di G. J. Toomer (*Ptolemy's Almagest*, Londra 1984) utilizzata nel lavoro di tesi. A seguire, la medesima descrizione e l'immagine dello strumento (Figg. 25 e 26) presenti nella versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.

«We make a bronze ring of a suitable size, turned on the lathe so that its surface is accurately squared off [i.e. has a rectangular cross-section]. We use this as a meridian circle, by dividing it into the normal 360° of a great circle, and subdividing each degree into as many parts as [the size of the instrument] allows. Then we take another smaller ring, and fit it inside the first in such a manner that the lateral faces of both are in the same plane, while the smaller ring can rotate freely inside the larger, with a north-south motion, [always] in the same plane. At two diametrically opposite points on one lateral face of the smaller ring we fix [two] little plates, of equal size, pointing towards each other and the centre of the rings, and exactly in the middle of the width of each plate we fix small pointers, which graze the surface of the larger, graduated ring. To serve all the necessary purposes we fix this ring firmly on a pillar of appropriate size, and set it up in the open air, so that the base of the pillar is on foundation which is not inclined to the plane of the horizon. We take care that the [lateral] plane of the rings is perpendicular to the plane of the horizon and parallel to the plane of the meridian. The first of these [desiderata] is achieved by suspending a plumb-line from a point [on the outer ring] chosen as zenith, and adjusting supporting elements until the plumb-line points towards the point diametrically opposite [the zenith-point]. The second is achieved by marking a meridian line clearly in the plane below the pillar and moving the rings laterally until one can sight their [lateral] plane as parallel to that line. Having set the instrument up in that way, we observed the sun's movement towards the north and south by turning the inner ring at noon until the lower plate was completely enshadowed by the upper one. When this was the case, the tips of the pointers indicated to us the distance of the sun from the zenith in degrees, measured along the meridian.[69]»

[69] [I, 12; T84, 61-62]



Liber I.

17

De arcu qui eſt inter tropicos. Cap. II.

SIc igitur quantitate linearum circuli
expoſita, primò demonſtrandũ eſt,
ut diximus, quantum obliquus circu
lus qui per medium ſignorum intel-
ligitur ab ęquinoctiali declinat, id eſt, quàm
circulus, qui per utroſq; dictorum circulo-
rum Polos, maximus deſcribitur, proportio-
nem habet ad eum arcum, qui eſt eius por-
tio inter utroſque interiacens. Cui æquali
ſpatio ęquinoctiale punctum ab utroq; ſol
ſtitiali diſtare perſpicuũ eſt. Hoc aũt nobis
organicè huiuſmodi ſimplici fabricatione
inſtrumẽti comprehendetur. Circulũ eñi aë-
reum magnitudine mediocrẽ, exquiſitè tor
natũ & ſuperficie quadratũ faciemus, quo
pro meridiano utemur. Sed prius ipſum in
360. maximi circuli ſuppoſitas portiões di-
uidemus harumq; ſingulas in quotcunque
partes poſſibile ſit. ¶ Deinde alterum ſub-
tiliorem circulum ſic ſub prædicto coapta-
bimus, ut eorum latera in una ſuperficie ma
neant, circunduciq; ſine impedimento mi-
nor circulus ſub maiore ad ſeptentrionem
atque meridiem in eadem ſuperficie poſſit.
Addemusq; in duabus quibuſuis diametra
liter oppoſitis in minori circulo portioni-
bus in altero laterum æquales paruasq; re-
gulas, quæ tum ad ſeipſas tum ad circulorũ
centrũ exquiſitè declinẽtur, apponemusq;
in medio latitudinis ipſorum tenues lingu-
las ſiue regulas quæ maioris diuiſiq; circu-
li latus attingant. Quem tuto ad ſingulos
uſus coaptabimus, ſtatuẽtesq; in ſereno ſu-
per mediocre ſuſtentaculnm in pauimento
ęquali ad horizontis planiciem ſuſtentacu-
li baſim obſeruabimus, ut circulorum pla-
nicies ad horizontis quidem planiciem re-
cta ſit, ad meridiani uerò æquidiſtans: quo-
rum primum perpendiculo inuenitur à pun
cto futuro in uertice ſuſpenſo, obſeruatoq;
donec ex directione ſuppoſitorum ad op-
poſitum diametraliter punctum faciat de-
clinationem. Alterum meridiana linea quæ
ſub planitie ſuſtentaculi eſt certo ſigno no
tata, circulisq; obliquum circunductis do-
nec planities eorum æquiſtare lineæ perſpi
ciatur. Ita igitur poſito ad ſeptentrionẽ &
meridiẽ Solis acceſſum obſeruabimus, in-
teriorem circulũ in meridiebus transferen-
tes quouſq; tota inferior regula à tota ſu-
periori fuerit inumbrata, quo facto extremi
tates linguarum nobis ſignificabunt quot
portionibus Solis centrum in meridiano à
uertice indies diſtabit. ¶ Sed illa etiam cõ-
modiore obſeruatione uſi ſumus. ¶ Late-
rem, pro circulis lapideum uel ligneũ qua-
dratum & inuolubilem in mediocri latitu-
dine atque altitudine, ut firmius maneat, fa-
bricati ſumus, qui alterum latus planũ exa-
ctè ac extenſum habet, in quo centrum ad
unum angulorum cœpimus, quartamq; cir
culi partem ſignauimus, coniunximusq; li
neas omnes à centro ad deſcriptum arcum,
quæ ſub quarta circuli parte rectum angu-
lum continet, ipſumq; arcum in 90. ſimili-
ter gradus diuiſimus. Poſt hæc in una li-
nea recta quæ ad horizontis planitiem re-
cta futura erat, & ſitum ad meridiem habi-
tura duos rectos & æquales undiq; cylin-
dros paruulos, ſimiliterq; tornatos coapta
uimus. Alterum in ipſo cẽtro & in ipſo me
dio exquiſitiſſimè, alterum ad inferiorem li
neæ terminum. Erigentesq; deſcriptũ hoc
latus laterculi iuxta meridianam lineam in
ſubiecta planitie ita protractum, ut ipſam
quoq; ad planitiem meridiani æquidiſtan-
tem habeat ſitum & perpendiculo per cy-
lindrulos indeclinatã rectãq; per ipſos ad
horizontis planitiem lineam diligenter cõ
prehendentes, ſuppoſitis quibuſdam ſub-
tilibus, quibus directio ut oportet fiebat fa
ctam à cylindrulo qui ad centrum eſt. Vm-
brã in meridiebus ſimiliter obſeruabamus,
nonnihil ad deſcriptam circumferentiã ut
certius locus ipſius teneretur apponentes.
Hui⁹ umbræ medio ſignato portionẽ arc⁹
in ipſa circuli parte cœpim⁹, quæ portio So
lis progreſſum ſecundum latitudinẽ in me
ridiano ſignificauit, his obſeruationib⁹ ac
maximè illis quas in multis annis in ipſis
ſolſtitialibus diebus examinauimus. Cùm
deſignatio ſemper à puncto uerticis inter-
cipiat æquales, eas deniq; meridiani circuli
partes tam in hyemalibus quàm in æſtiuis
ſolſtitijs comprehendimus arcum, qui eſt à
boreali extremo termino ad auſtralem, ſi-
militer ultimũ inter tropicos graduum ſem
per eſſe 47. & portionis maioris quidẽ dua
bus tertijs, minoris uerò quàm medietate
ſimul & quarta, unde eadem fermè portio
nobis collecta eſt ei, quam Eratoſthenes
reperit, quaq; Hiparchus etiam uſus eſt.
Nam circunferentia quæ inter ſolſtitialia
puncta eſt 11. proximè talium por-
tionum fit qualium eſt me
ridianus. 83.

C *Inſtrumentum*

Fig. 25 – Nel riquadro si trova la descrizione dell’armilla meridiana presente nel capitolo 12 del Libro I della versione in latino dell’*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna, in via Irnerio 46.

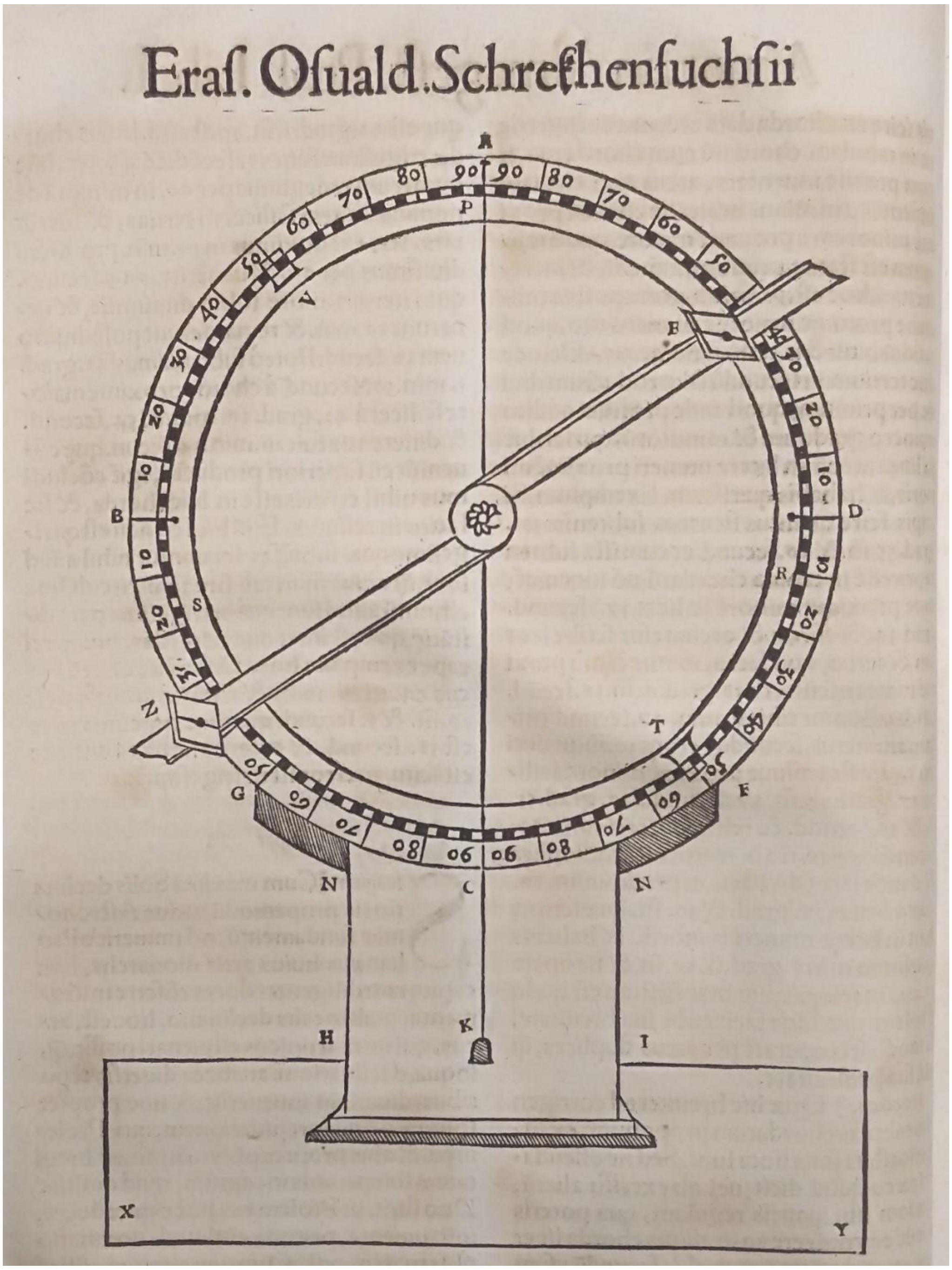


Fig. 26 - Immagine dell'armilla meridiana presente nella versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.

Tolomeo rende un'idea compiuta dell'armilla meridiana, ma tralascia elementi importanti: non cita gli spessori e i diametri degli anelli, e non dice come tracciare la linea meridiana sul pavimento orizzontale[70]. Secondo G. Strano, queste lacune delineano un aspetto caratteristico della *Syntaxis* che, anziché trattare uno strumento specifico, fornisce indicazioni di massima per consentire al lettore di costruirsene uno proprio. A tal fine, Tolomeo dà per scontate alcune nozioni e non pone vincoli alle risorse materiali del lettore[71].
Infine, Tolomeo lascia arguire di non essere il padre dello strumento perché, dopo averlo descritto, afferma di aver trovato un modo più pratico per osservare il Sole ([I, 12; T84, 62]).

[70] Nella sezione 3.2 riportiamo due metodi per determinare la linea meridiana basati sulle ombre di uno gnomone: il metodo del Cerchio Indiano e il metodo delle tre ombre, descritto da Diodoro di Alessandria (1° secolo a.C.) nel suo trattato (andato perduto) *Analemma*.
[71] G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike syntaxis*.

2.3.1.2 Il plinto

Come afferma G. Strano, in *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike syntaxis*, per evitare i problemi costruttivi dell'armilla meridiana, Tolomeo introduce uno strumento equivalente formato da una piastra di pietra o di legno (Fig. 27).

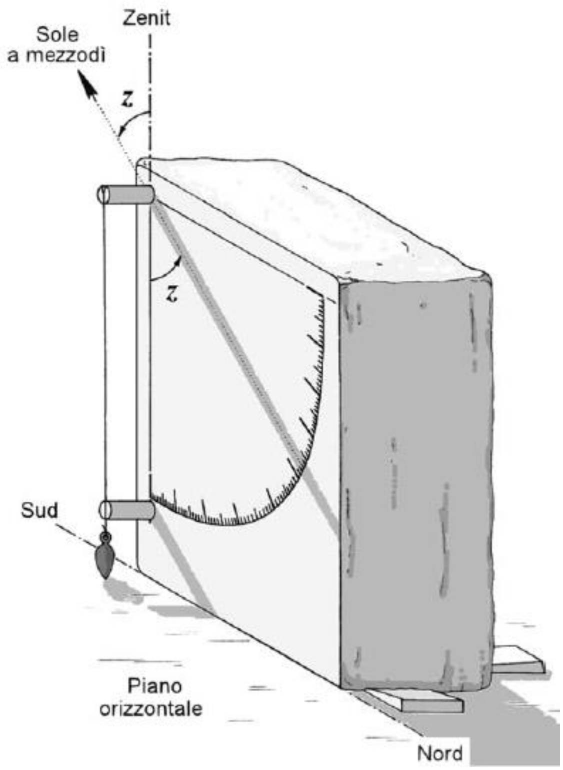
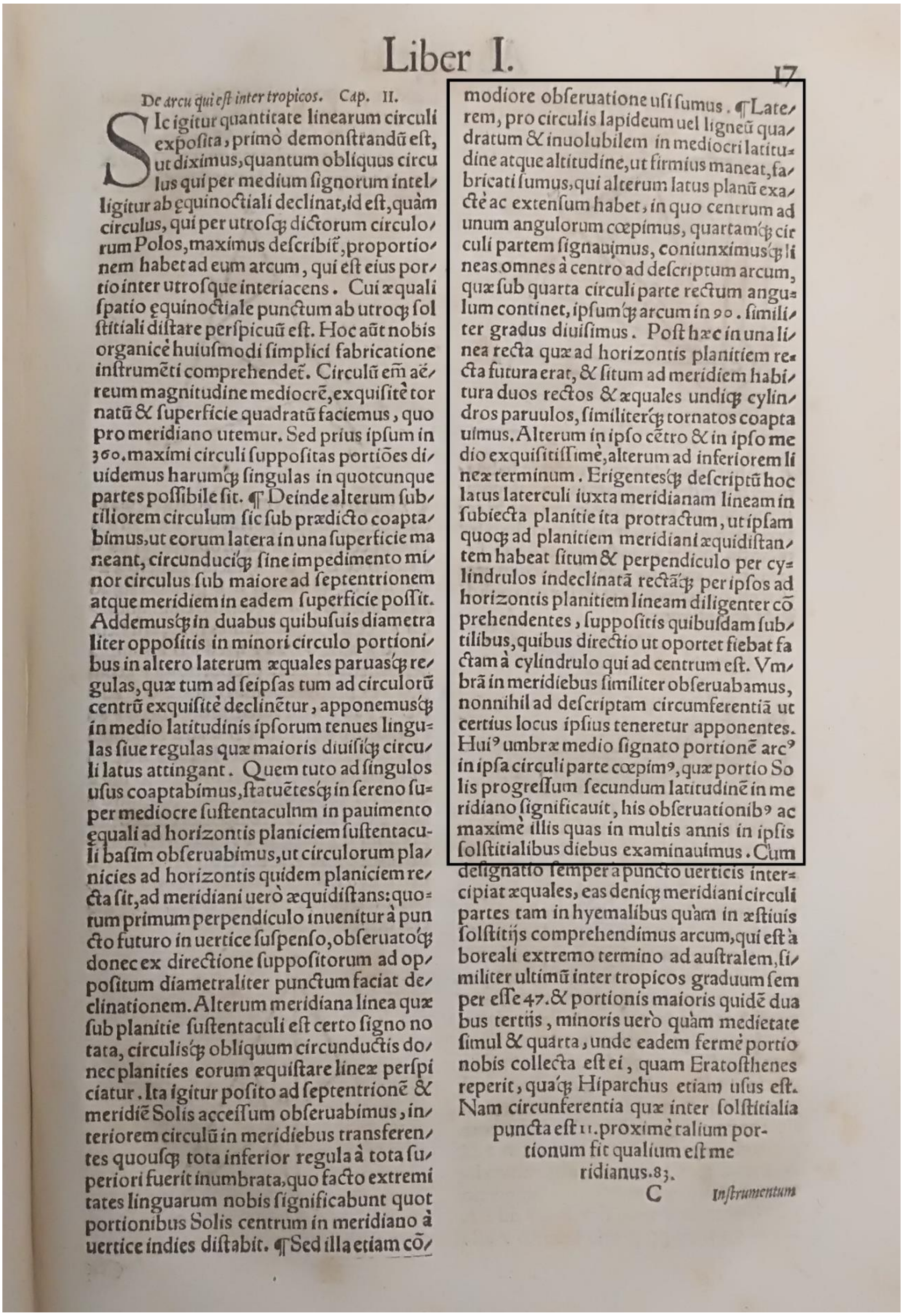


Fig. 27 – Schema del plinto
(Immagine presa dall'articolo di G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*)

Su una faccia liscia e squadrata della piastra è tracciato un quarto di circonferenza diviso in 90° e relative frazioni. Agli estremi del raggio verticale del quadrante rivolto a sud sono fissati due pioli cilindrici uguali e perpendicolari alla faccia dello strumento. Un piolo sporge dal centro usato per tracciare il quadrante, l'altro dall'estremo inferiore della scala graduata.
Lo strumento è collocato all'aperto su un pavimento orizzontale con la faccia graduata disposta nel piano del meridiano. Per realizzare tale condizione, il lato inferiore della faccia graduata è sovrapposto alla linea meridiana tracciata sul pavimento. La verticalità rispetto all'orizzonte è invece ottenuta regolando sottili elementi di supporto finché il filo a piombo calato dall'estremità del piolo superiore tocca l'estremità del piolo inferiore.
A questo punto, per determinare più accuratamente la posizione del Sole al meridiano, si appoggia un oggetto alla scala graduata e si annota la divisione che meglio corrisponde al centro dell'ombra proiettata a mezzogiorno dal piolo superiore.

Tolomeo descrive il plinto nel capitolo 12 del Libro I dell'*Almagesto*. Riportiamo qui di seguito la parte di questo capitolo dedicata alla descrizione dello strumento riferendoci alla traduzione in inglese di G. J. Toomer (*Ptolemy's Almagest*, Londra, 1984) utilizzata nel lavoro di tesi. A seguire, la medesima descrizione dello strumento (Fig. 28) presente nella versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.

«We found an even handier way of making this kind of observation by constructing, instead of the rings, a plaque of stone or wood, square and rigid, with one of its faces smooth and accurately squared off. On this we drew a quadrant, using as centre a point near one of the corners, and drew from the centre to the inscribed arc the lines enclosing the right angle forming the quadrant. We divided the arc, as we had [the other instrument], into 90 degrees and subdivisions of those degrees. Next, on that line which was chosen to be perpendicular to the plane of the horizon and towards the south, we fixed two small cylindrical pegs, with their sides at right angles to their bases and exactly circular, machined to be of equal size: one of them we fixed on the centre-point itself, positioning the mid-point of the peg precisely on it, the other at the lower end of the line. Then we set this inscribed face of the plaque up along the meridian line which we had drawn on the foundation-plane, so as to be parallel to the plane of the meridian, and, using a plumb-line suspended between the pegs, set up the line between them precisely at right angles to the plane of the horizon, again correcting any deficiency by adjusting thin supporting elements underneath. In the same way as before, we observed the shadow cast at midday by the peg at the centre. In order to determine its position more accurately, we placed some object on the inscribed arc [where the shadow crossed it]. Marking the mid-point of the shadow, we took that division of the quadrant as indicating the position of the sun on the meridian in the north-south direction.[72]»



Liber I. 17

De arcu qui est inter tropicos. Cap. II.

SIc igitur quantitate linearum circuli exposita, primò demonstrandũ est, ut diximus, quantum obliquus circulus qui per medium signorum intelligitur ab equinoctiali declinat, id est, quàm circulus, qui per utrosq; dictorum circulorum Polos, maximus describit, proportionem habet ad eum arcum, qui est eius portio inter utrosque interiacens. Cui æquali spatio equinoctiale punctum ab utroq; solstitiali distare perspicuũ est. Hoc aũt nobis organicè huiusmodi simplici fabricatione instrumẽti comprehendet. Circulũ ẽm aëreum magnitudine mediocrẽ, exquisitè tornatũ & superficie quadratũ faciemus, quo pro meridiano utemur. Sed prius ipsum in 360. maximi circuli suppositas portiões diuidemus harumq; singulas in quotcunque partes possibile sit. ¶ Deinde alterum subtiliorem circulum sic sub prædicto coaptabimus, ut eorum latera in una superficie maneant, circunduciq; sine impedimento minor circulus sub maiore ad septentrionem atque meridiem in eadem superficie possit. Addemusq; in duabus quibusuis diametraliter oppositis in minori circulo portionibus in altero laterum æquales paruasq; regulas, quæ tum ad seipsas tum ad circulorũ centrũ exquisitè declinẽtur, apponemusq; in medio latitudinis ipsorum tenues lingulas siue regulas quæ maioris diuisiq; circuli latus attingant. Quem tuto ad singulos usus coaptabimus, statuẽtesq; in sereno super mediocre sustentaculnm in pauimento equali ad horizontis planiciem sustentaculi basim obseruabimus, ut circulorum planicies ad horizontis quidem planiciem recta sit, ad meridiani uerò æquidistans: quorum primum perpendiculo inuenitur à puncto futuro in uertice suspenso, obseruatoq; donec ex directione suppositorum ad oppositum diametraliter punctum faciat declinationem. Alterum meridiana linea quæ sub planitie sustentaculi est certo signo notata, circulisq; obliquum circunductis donec planities eorum æquistare lineæ perspiciatur. Ita igitur posito ad septentrionẽ & meridiẽ Solis accessum obseruabimus, interiorem circulũ in meridiebus transferentes quousq; tota inferior regula à tota superiori fuerit inumbrata, quo facto extremitates linguarum nobis significabunt quot portionibus Solis centrum in meridiano à uertice indies distabit. ¶ Sed illa etiam cõmodiore obseruatione usi sumus. ¶ Laterem, pro circulis lapideum uel ligneũ quadratum & inuolubilem in mediocri latitudine atque altitudine, ut firmius maneat, fabricati sumus, qui alterum latus planũ exactè ac extensum habet, in quo centrum ad unum angulorum cœpimus, quartamq; circuli partem signauimus, coniunximusq; lineas omnes à centro ad descriptum arcum, quæ sub quarta circuli parte rectum angulum continet, ipsumq; arcum in 90. similiter gradus diuisimus. Post hæc in una linea recta quæ ad horizontis planitiem recta futura erat, & situm ad meridiem habitura duos rectos & æquales undiq; cylindros paruulos, similiterq; tornatos coaptauimus. Alterum in ipso cẽtro & in ipso medio exquisitissimè, alterum ad inferiorem lineæ terminum. Erigentesq; descriptũ hoc latus laterculi iuxta meridianam lineam in subiecta planitie ita protractum, ut ipsam quoq; ad planitiem meridiani æquidistantem habeat situm & perpendiculo per cylindrulos indeclinatã rectãq; per ipsos ad horizontis planitiem lineam diligenter cõprehendentes, suppositis quibusdam subtilibus, quibus directio ut oportet fiebat factam à cylindrulo qui ad centrum est. Vmbrã in meridiebus similiter obseruabamus, nonnihil ad descriptam circumferentiã ut certius locus ipsius teneretur apponentes. Huiꝰ umbræ medio signato portionẽ arcꝰ in ipsa circuli parte cœpimꝰ, quæ portio Solis progressum secundum latitudinẽ in meridiano significauit, his obseruationibꝰ ac maximè illis quas in multis annis in ipsis solstitialibus diebus examinauimus. Cum designatio semper à puncto uerticis incipiat æquales, eas deniq; meridiani circuli partes tam in hyemalibus quàm in æstiuis solstitijs comprehendimus arcum, qui est à boreali extremo termino ad australem, similiter ultimũ inter tropicos graduum semper esse 47. & portionis maioris quidẽ duabus tertijs, minoris uerò quàm medietate simul & quarta, unde eadem fermè portio nobis collecta est ei, quam Eratosthenes reperit, quaq; Hiparchus etiam usus est. Nam circunferentia quæ inter solstitialia puncta est 11. proximè talium portionum fit qualium est meridianus. 83.

C *Instrumentum*

Fig. 28 – Nel riquadro si trova la descrizione del plinto presente nel capitolo 12 del Libro I della versione in latino dell’*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna, in via Irnerio 46.

[72] [I, 12; T84, 62-63]

Anche in questo caso l'idea generale dello strumento appare chiara, sebbene manchino di nuovo elementi utili: il raggio del quadrante e le istruzioni per tracciare la linea meridiana. La modalità di misura è invece ben definita con l'introduzione dell'oggetto, forse un piccolo tassello, da appoggiare alla scala graduata per individuare il centro di un'ombra che, quando il Sole transita al meridiano, risulta radente e indistinta. Nella sezione 3.1.2 riportiamo un'interessante considerazione basata su una procedura di misura col plinto leggermente diversa da quella descritta da Tolomeo nell'*Almagesto*, allo scopo di giustificare l'errore sul valore dell'obliquità dell'eclittica ricavato da osservazioni dei solstizi d'estate e d'inverno nel 130 d.C.
Infine, osserviamo che il modo in cui Tolomeo introduce il plinto appare una rivendicazione di paternità anche se troviamo chi attribuisce lo strumento ad Ipparco (cfr. Kotsanas Museum, Fig. 40).

2.3.1.3 Parametri ricavati da Tolomeo dalle osservazioni del Sole

Tolomeo chiarisce indirettamente che le scale graduate dell'armilla meridiana e del plinto iniziano con la direzione del filo a piombo e toccano i 90° con la direzione orizzontale (vedere le Fig. 24 e 27). Egli precisa infatti che con entrambi gli strumenti si misura la distanza zenitale del Sole al meridiano (ovvero al mezzogiorno locale). La serie delle distanze zenitali meridiane ottenute lungo un anno è sempre compresa fra un valore massimo e un valore minimo i quali portano a tre importanti risultati:

- La differenza fra il massimo e il minimo dà l'angolo di separazione fra i punti in cui i tropici del Cancro e del Capricorno tagliano il meridiano (Fig. 29).

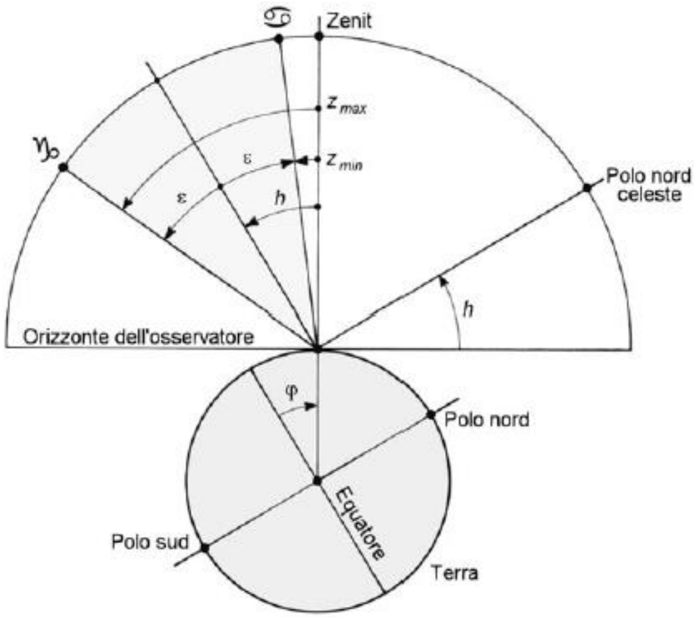


Fig. 29 – Le distanze zenitali meridiane massima (z_{max}) e minima (z_{min}) del Sole, l'obliquità dell'eclittica (ε), l'altezza del polo celeste (h) e la latitudine dell'osservatore (φ). Precisiamo che z_{max} si riferisce al solstizio d'inverno e z_{min} al solstizio d'estate. Inoltre, la figura mostra chiaramente che l'altezza del polo nord celeste è uguale alla latitudine dell'osservatore (cioè h = φ) e il complementare dei due angoli è l'inclinazione dell'equatore celeste rispetto all'orizzonte di chi osserva.
(Immagine presa dall'articolo di G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*)

Senza citare dati specifici, Tolomeo conclude che i due valori non cambiano negli anni e che l'arco di meridiano fra i tropici è compreso fra $47\frac{2}{3}°$ (ovvero 47° 40′) e $47\frac{3}{4}°$ (ovvero 47° 45′). L'esito corrisponde, secondo Tolomeo, al rapporto di $\frac{11}{83}$ di circonferenza già trovato da Eratostene e usato da Ipparco[73]. L'angolo equivalente alla frazione di Eratostene, 47° 42′ 40″[74], è infatti intermedio fra gli estremi dati nella *Syntaxis*. L'obliquità dell'eclittica, pari a metà di questo angolo, ammonta perciò a 23° 51′ 20″ o, senza perdere troppo in precisione, a 23°51′[75].

- La media fra i valori massimo e minimo corrisponde alla distanza zenitale del punto in cui l'equatore celeste taglia il meridiano (Fig. 29)[76]. Tolomeo non riferisce subito il valore trovato, ma lo presenta più oltre, quando

[73] [I, 12; T84, 63]
[74] [I, 14; T84, 70]
[75] [II, 4; T84, 80] e [II, 6; T84, 85]
[76] [I, 12; T84, 63]

gli è necessario introdurlo nei calcoli per definire la teoria del moto lunare. Questo valore, $30° \, 58'$, corrisponde alla latitudine di Alessandria[77].

- Quando raggiunge i valori massimo e minimo (per una data latitudine geografica) il Sole si trova rispettivamente ai solstizi invernale e estivo. L'individuazione dei relativi istanti permette di misurare in quanto tempo il Sole percorre la metà inverno-primavera e la metà estate-autunno dell'eclittica. Anche in questo caso Tolomeo rinvia l'esposizione dei dati a quando gli è necessario introdurli nei calcoli per definire la teoria del moto solare. Fatto notevole, nell'unica osservazione di propria mano che rammenta, eseguita nel 140, il solstizio estivo cade due ore dopo mezzanotte[78]. Ciò rivela che stabilire i solstizi richiedeva di interpolare i dati di più transiti successivi del Sole al meridiano. Infatti, nei giorni prossimi al solstizio, non solo la distanza zenitale meridiana del Sole è quasi stazionaria (poiché in corrispondenza dei solstizi la variazione della declinazione è molto lenta), ma l'istante stesso del solstizio (come dell'equinozio) coincide di rado con il mezzogiorno di un determinato luogo, ossia gli istanti delle stagioni astronomiche si verificano al meridiano locale in una sola longitudine terrestre che varia ad ogni solstizio (o equinozio).

2.3.1.4 L'armilla equatoriale

L'armilla equatoriale è trattata da Tolomeo più in dettaglio dal lato storico che da quello tecnico. La *Syntaxis* non contiene descrizioni dello strumento, che però è menzionato tre volte.
La prima menzione rientra in una citazione da un trattato *Sul Variare dei Solstizi e degli Equinozi* dove Ipparco nota che l'istante dell'equinozio era misurabile con precisione quando l'illuminazione (del bordo) della superficie concava dell'anello di bronzo, posto nella Stoa quadrata di Alessandria passava da un lato (del bordo) all'altro. Tolomeo cita Ipparco come segue:

«'…But the irregularity in the length of the year can be accurately perceived from the [equinoxes] observed on the bronze ring situated in the place at Alexandria called the "Square Stoa". This is supposed to indicate the equinox on the day when the direction from which its concave surface is illuminated changes from side to other'.[79]»

Più oltre, Tolomeo cita un altro passo dal medesimo trattato dove Ipparco richiama due osservazioni dell'equinozio primaverile del 24 Marzo 145 a.C.; in una di esse, l'anello di Alessandria appariva ugualmente illuminato da entrambi i lati:

«[1] In the thirty-second year of the Third Kallippic Cycle, Mechir 27 [-145 Mar. 24], at dawn. Furthermore, he says, the ring at Alexandria was illuminated equally from both sides at about the fifth hour[80]. Thus, we can already see two different observations of the same equinox with a discrepancy of approximately 5 hours.[81]»

Tolomeo nota infine un esempio di cattiva posa in opera di due armille equatoriali situate nella Palestra di Alessandria. Sebbene credute fisse nel piano dell'equatore celeste, nel giorno dell'equinozio vi si produceva un doppio cambiamento di illuminazione (dei bordi) della superficie concava (da un bordo all'altro)[82], particolarmente evidente nella più grande e vecchia:

«Thus in these observations too there is no discrepancy worth noticing, even though it is possible for an error of up to a quarter of a day to occur not only in observations of solstices, but even in equinox observations. For suppose that the instrument, due to its positioning or graduation, is out of true by as little as $\frac{1}{3600}$th of the circle through the poles of the equator: then, to correct an error of that size in declination, the sun, [when it is] near the intersection [of the ecliptic] with the equator, has to move $\frac{1}{4}°$ in longitude on the ecliptic. Thus the discrepancy comes to about $\frac{1}{4}$ of a day.[83] The

[77] [V, 12; T84, 247]
[78] [III, 1; T84, 138]
[79] [III, 1; T84, 133]
[80] Questa affermazione è stata occasionalmente usata come prova che Ipparco eseguì le osservazioni ad Alessandria. G. J. Toomer, al contrario, sostiene che l'espressione chiarisce che questa osservazione alessandrina era diversa (e discordante) da quella di Ipparco. Il luogo di tutte le osservazioni eseguite da Ipparco è l'isola di Rodi. (Si veda G. J. Toomer, *Ptolemy's Almagest*, Londra, 1984, p.134 nota 9)
[81] [III, 1; T84, 134]
[82] Anche se lo strumento fosse correttamente allineato col piano equatoriale, il fenomeno degli "equinozi multipli" che Tolomeo ci menziona sarebbe normale per l'effetto della rifrazione atmosferica. Discutiamo questo effetto, sconosciuto a Tolomeo all'epoca dell'Almagesto, nella sezione 3.1.3.
[83] Tolomeo dice che un errore nella declinazione (dovuto al posizionamento dello strumento) di $6' (= 0{,}1° = \frac{1}{3600}$ di circonferenza) corrisponde, vicino all'equinozio, ad un moto lungo l'eclittica di $\frac{1}{4}°$, ovvero (poiché il Sole si muove di circa 1° al giorno lungo l'eclittica) ad un errore di $\frac{1}{4}$ di giorno nella determinazione dell'istante dell'equinozio. Questo si può verificare facilmente consultando la tabella della declinazione ([I, 15; T84,72]) che indica la trasformazione della coordinata equatoriale celeste declinazione δ nella coordinata eclittica celeste longitudine λ:

error could be even greater in the case of an instrument which, instead of being set up for the specific occasion and positioned accurately at the time of the actual observation, has been fixed once for all on a base intended to preserve it in the same position for a long period: [the error occurs when] the instrument is affected by a [gradual] displacement which is unnoticed because of the length of time over which it takes place. One can see this in the case of the bronze rings in our Palaestra, which are supposed to be fixed in the plane of the equator. When we observe with them, the distortion in their positioning is apparent, especially that of the larger and older of the two, to such an extent that sometimes the direction of illumination of the concave surface in them shifts from one side to the other twice on the same equinoctial day.[84]»

Da quest'ultima citazione deduciamo che probabilmente esistevano due tipi di armille equatoriali: una mobile da posizionare ogni volta, prima di un equinozio, e una fissa già posizionata per tutte le osservazioni. Tolomeo ci dice che uno strumento fisso, la cui collocazione non può essere verificata prima delle osservazioni, può introdurre un errore maggiore nella determinazione degli equinozi. Rimandiamo alla sezione 3.1.3 per una possibile modalità di allineamento dell'anello lungo piano equatoriale che non richiede l'impiego della trigonometria.

L'*Almagesto* suggerisce che il cuore dell'armilla equatoriale era un anello di bronzo non graduato posto nel piano dell'equatore celeste. Inoltre, la menzione di una superficie concava chiarisce che l'anello aveva sezione quadrangolare (Fig. 30).

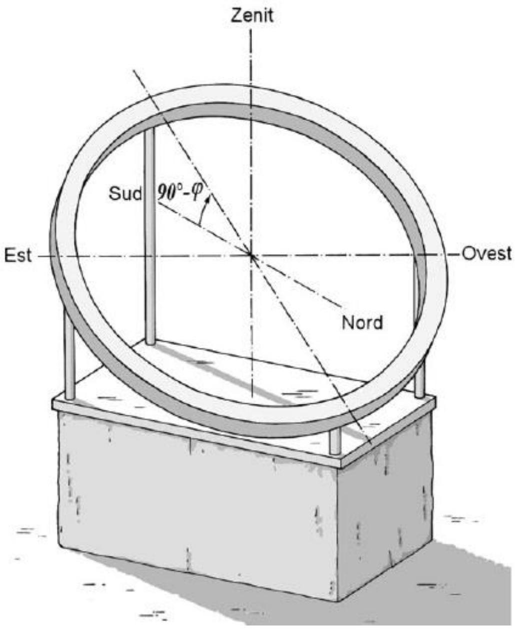
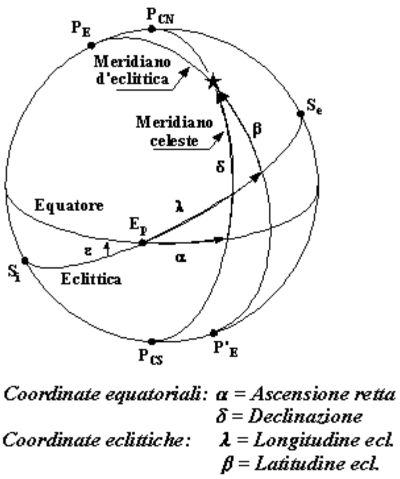


Fig. 30 – Schema dell'armilla equatoriale
(Immagine presa dall'articolo di G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*)



(Immagine presa dalla rete)

Con una interpolazione lineare nella tabella della declinazione, dove la declinazione δ di 1° è pari alla longitudine eclittica λ di $0°\ 24'16''$, troviamo che $\delta = 6'$ equivale a $\lambda = 14'\ 50{,}1'' \approx \frac{1}{4}°$.

Inoltre, il cenno a una dislocazione di $\frac{1}{3600}$ di circonferenza suggerisce che $\frac{1}{10}$ di grado, ovvero $6'$, fossa la minima divisione delle scale graduate degli strumenti alessandrini.

[84] [III, 1; T84, 134]

Concentriamoci ora sulle informazioni storiche dello strumento e sui metodi di misura indicati da Tolomeo nei passi riportati sopra.
Le prime due citazioni indicano che un'armilla equatoriale esisteva da tempo ad Alessandria, collocata in un luogo di pubblica utilità (la Stoa). Non emergono però prove che Ipparco, pur conoscendone i risultati, si sia recato a Alessandria e la abbia usata (vedere nota 80), così come, più in generale, non si può asserire che egli abbia adoperato questo tipo di strumento[85]. Appare invece evidente che l'armilla equatoriale non fu inventata da Ipparco ma sia antecedente alla sua attività[86]. Il terzo passo della *Syntaxis* e le date degli equinozi che Tolomeo dice di aver osservato[87], permettono invece di apprendere che fra il 132 e il 140 si trovavano ad Alessandria, in un altro luogo di utilità pubblica (la Palestra), altre due armille equatoriali, una più grande e vecchia, l'altra più piccola e recente.
Come indica G. Strano, in *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike syntaxis*, l'esplicito richiamo a ben tre strumenti specifici indica un'ampia diffusione dell'armilla equatoriale, fatto che può chiarire perché Tolomeo non la descriva più in dettaglio. Inoltre, è probabile che l'aver collocato lo strumento in alcuni luoghi pubblici di Alessandria sia un indice dell'importanza delle osservazioni equinoziali per scopi rituali e di calendario.

Per quanto riguarda il lato tecnico, invece, deduciamo che l'istante degli equinozi poteva essere individuato in due modi. Le citazioni di Ipparco indicano che l'istante dell'equinozio era colto mediante l'osservazione dell'ombra proiettata dall'armilla equatoriale in se stessa. Un primo metodo consisteva nel rilevare quando l'illuminazione sul bordo inferiore dell'anello passava da un lato all'altro. (Con bordo intendiamo la superficie laterale dell'anello, ovvero ortogonale alle superfici concava e convessa dell'anello.) Perciò, se consideriamo l'equinozio di primavera, il Sole, prima di attraversare l'equatore celeste nel suo moto lungo l'eclittica (cioè quando è a sud dell'equatore, $\delta < 0°$), illumina il bordo inferiore dell'anello e produce un'ombra nel bordo superiore. Superato l'equatore celeste (cioè a nord dell'equatore, $\delta > 0°$), il Sole illumina il bordo superiore dell'anello e produce un'ombra nel bordo inferiore. L'equinozio cade a metà fra i due istanti in cui si osservano illuminazioni antisimmetriche dei due bordi. Ovviamente, mentre nell'equinozio di primavera l'ombra si muove dal bordo superiore a quello inferiore, nell'equinozio d'autunno (quando la declinazione del Sole diventa negativa) l'ombra si muove dal bordo inferiore al bordo superiore.
Un secondo metodo coglieva invece l'equinozio quando la superficie concava era ugualmente illuminata ai due margini: l'ombra, proiettata dalla metà superiore dell'anello sulla superficie concava della sua opposta metà inferiore, la ricopre simmetricamente. In quanto sorgente luminosa estesa, il Sole genera ombre che si restringono allontanandosi dagli oggetti che le proiettano. All'equinozio, il Sole giace nel piano dell'equatore e in quello dell'anello; l'ombra dell'armilla equatoriale, più stretta rispetto allo spessore dell'anello, appare al centro della superficie concava. L'equinozio cade nell'istante in cui si osserva una illuminazione simmetrica dei due margini.

Nella sezione 3.1.3 descriveremo un esperimento, eseguito con una replica dell'armilla equatoriale, tra il 1967 e il 1975 da Frans e Margaret Bruin in cui la determinazione dell'istante degli equinozi avviene col secondo metodo appena visto.
Più delicato è il caso del doppio cambiamento di illuminazione che Tolomeo riscontra nelle armille equatoriali della Palestra di Alessandria. Vedremo che, al di là dell'accuratezza con cui viene sistemata sul piano equatoriale, anche un'armilla equatoriale perfetta può produrre anomalie a causa della rifrazione atmosferica. Tolomeo scoprì tale effetto (come scrive nell'*Ottica*; vedere sezione 3.1.3) solo successivamente e, pertanto, nelle osservazioni preparatorie all'*Almagesto* poté solo subirne gli effetti.

2.3.2 Osservazione della Luna

La teoria solare permette di ubicare le principali circonferenze celesti fino al tramonto; un risultato curioso per una materia, l'astronomia, che in massima parte riguarda l'osservazione notturna degli astri. Per risolvere il problema, Tolomeo passa a studiare il moto lunare. La Luna è visibile sia prima che dopo il tramonto e, conoscendone la posizione rispetto al Sole, si può trasferire alla notte l'informazione sulle circonferenze celesti acquisita per il giorno.
Per trovare la longitudine e la latitudine della Luna rispetto all'eclittica Tolomeo introduce lo "strumento astrolabico" (*astrolábon orgánon* più tardi noto come "astrolabio armillare").
Per correggere tali coordinate per gli effetti prospettici dovuti alla notevole vicinanza della Luna alla Terra, Tolomeo introduce lo "strumento parallattico" (più tardi noto come "triquetro" per la forma triangolare).
Infine, per misurare i diametri apparenti della Luna e del Sole ricorre alla "diottra di quattro cubiti" (più tardi noto come "diottra di Ipparco").

[85] Per J. P. Britton ci sono prove che Ipparco e Tolomeo determinarono con metodi diversi i tempi degli equinozi. Probabilmente, Ipparco determinò gli equinozi dalle declinazioni del Sole misurate con uno strumento graduato simile all'armilla meridiana. Per maggiori dettagli su questa congettura vedere J. P. Britton, *Models and precision: The Quality of Ptolemy's Observations and Parameters*, 1992, pp. 14 e 15.
[86] Nella sezione 3.1.3 citeremo un'ipotetica attribuzione ad Apollonio di Perge (III sec. a.C.).
[87] [III, 1; T84, 138] e [III, 7; T84, 168]

Agli strumenti materiali, Tolomeo ne abbina uno concettuale. La vicinanza alla Terra fa sì che la posizione lunare apparente, che l'osservatore misura dal luogo in cui si trova, e la posizione lunare vera, che l'osservatore misurerebbe dal centro della Terra, il punto al quale occorre riferire i moti celesti, coincidono solo se la Luna è allo zenit. Negli altri casi l'astronomo deve conoscere la "parallasse lunare", cioè la differenza angolare fra le due posizioni (Fig. 31).

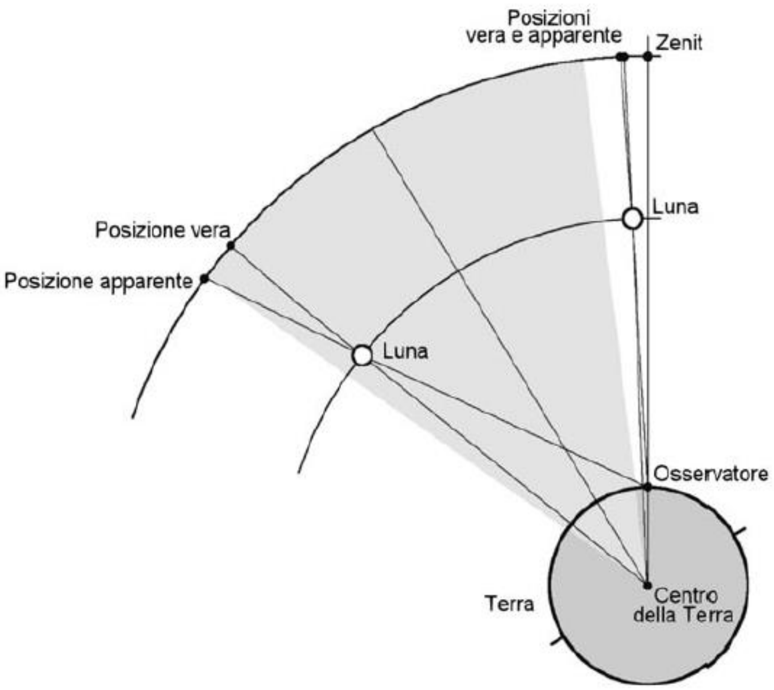


Fig. 31 – La parallasse lunare
(Immagine presa dall'articolo di G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*)

La circostanza produrrebbe uno stallo se non ci fossero degli eventi peculiari: nella fase di massimo oscuramento di una eclisse lunare, il Sole e la Luna sono diametralmente opposti rispetto alla Terra. Qualunque sia la parallasse che ne influenza la posizione apparente, la Luna ha una longitudine eclittica di 180° in più del Sole. Il "metodo delle tre eclissi", che Tolomeo riprende da Ipparco (sezione 1.3), sfruttava questi fenomeni e si può dimostrare che, in questo modo, era possibile cogliere la longitudine della Luna piena con un errore di appena $\frac{1}{5}$°[88].

2.3.2.1 L'astrolabio armillare

Come abbiamo visto, il "metodo delle tre eclissi" porta a una teoria lunare valida rigorosamente solo ai pleniluni. Una teoria generale richiede di compiere osservazioni in vari punti della lunazione e, a questo scopo, Tolomeo descrive nel capitolo 1 del Libro V un nuovo strumento: l'astrolabio armillare (Fig. 32).

[88] Si veda l'articolo di G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike syntaxis*.

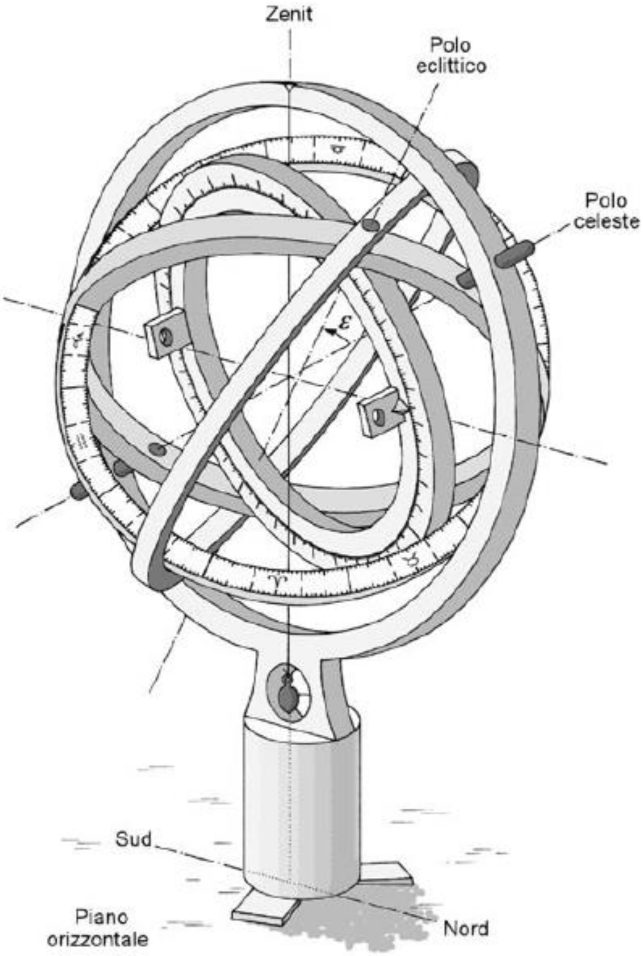


Fig. 32 – Schema dell'astrolabio armillare
(Immagine presa dall'articolo di G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*)

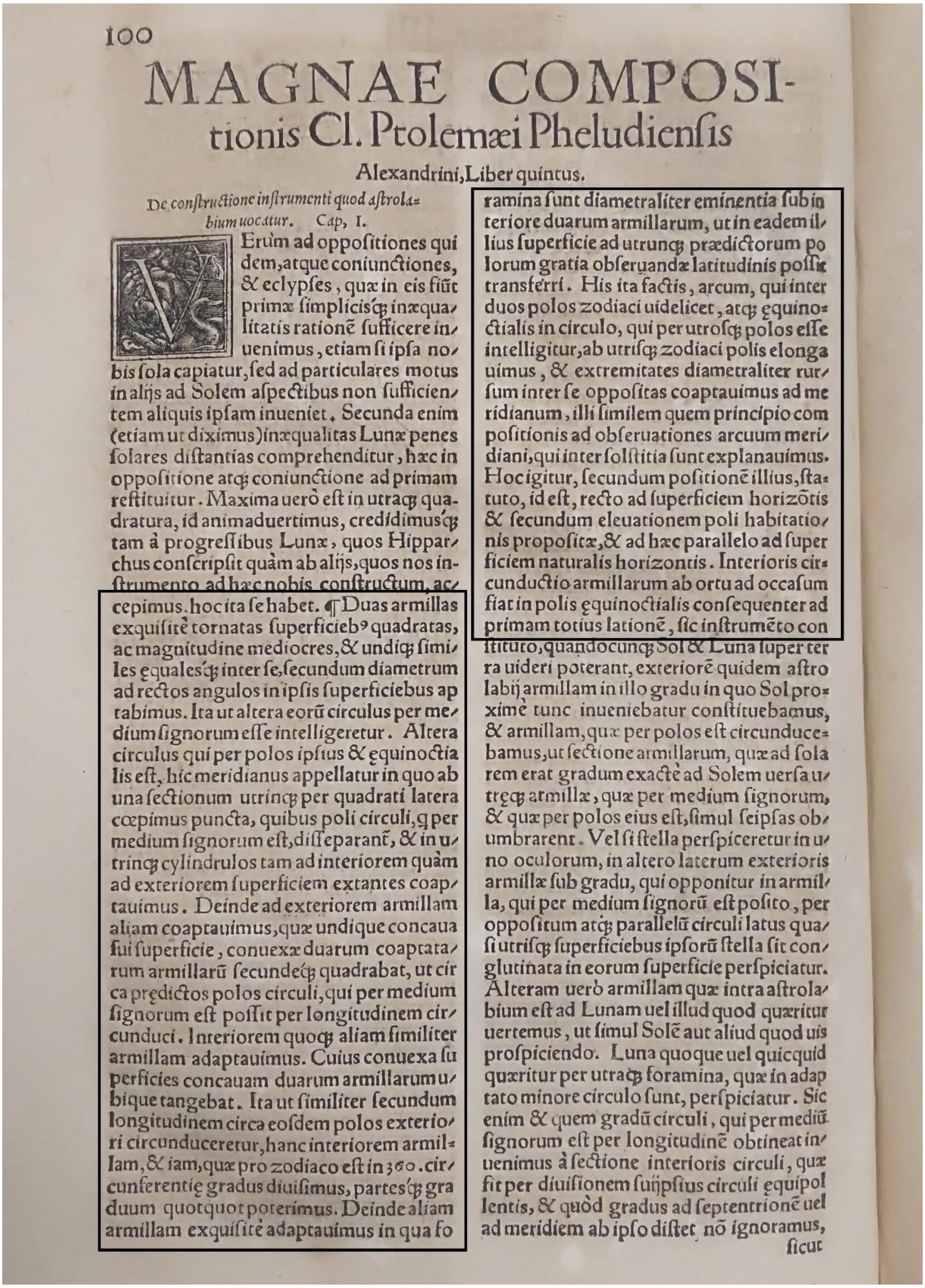
Il nucleo dello strumento è costituito da due anelli uguali a sezione quadrata uniti ad angolo retto lungo un diametro comune: un anello rappresenta l'eclittica, divisa un 360 gradi e relative frazioni, e l'altro il coluro solstiziale, ovvero il cerchio passante per i punti solstiziali dell'eclittica, i poli celesti e i poli eclittici. In coincidenza dei poli eclittici il secondo anello reca due perni cilindrici sporgenti all'esterno e all'interno. I perni sorreggono all'esterno un anello girevole che sfiora la superficie convessa degli anelli uniti e all'interno un altro anello girevole che sfiora la superficie concava degli anelli uniti. Entrambi gli anelli, dunque, ruotano attorno i poli dell'eclittica nella direzione longitudinale. Anche questo anello interno è diviso in 360 gradi e relative frazioni, in più contiene un ulteriore anello sottile che vi scorre dentro e che reca su una faccia laterale due mire forate diametralmente opposte. L'anello che rappresenta il coluro solstiziale reca in coincidenza dei poli celesti altri due perni che si inseriscono in un anello fisso, posto in opera come l'armilla meridiana: in verticale su un pavimento orizzontale e collocato nel piano del meridiano locale. Inoltre, occorre inclinare il polo nord celeste ad un'altezza sopra l'orizzonte pari alla latitudine geografica del luogo di osservazione.

Tolomeo descrive l'astrolabio armillare nel capitolo 1 del Libro V dell'*Almagesto*. Riportiamo qui di seguito la parte di questo capitolo dedicata alla descrizione dello strumento riferendoci alla traduzione in inglese di G. J. Toomer (*Ptolemy's Almagest*, Londra 1984) utilizzata nel lavoro di tesi. A seguire, la medesima descrizione e le immagini dello strumento (Figg. 33 e 34) presenti nella versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.

«We took two rings of an appropriate size, with their surfaces precisely turned on the lathe so as to be squared off [i.e. with rectangular cross-sections], equal and similar to each other in all dimensions. We joined them together at diametrically opposite points, so that they were fixed at right angles to each other, and their corresponding surfaces coincided: thus one of them represented the ecliptic, and the other the meridian through the poles of the ecliptic and the equator [i.e. a colure]. On the latter, using the side of the [inscribed] square [as measure], we marked the points representing the poles of the ecliptic, and pierced each point with a cylindrical peg projecting beyond both outer and inner surfaces. On the outer [projections] we pivoted another ring the concave [inner] surface of which fitted closely on the convex [outer] surface of the two joined rings, in such a way that it could move freely about the above-mentioned poles of the ecliptic in the longitudinal direction. Similarly we pivoted another ring on the inner [projections]; this too fitted the two [joined] rings closely, its convex surface to their concave, and, like the outer ring, moved freely in longitude about the same poles. We marked on this inner ring, and also on the ring representing the ecliptic, the divisions indicating the standard 360 degrees of the circumference, and as small subdivisions of a degree as was practical. Then we fitted snugly inside the inner of the two [movable] rings another thin ring with sighting-holes projecting from it at diametrically opposite points. [This ring was constructed] so that it could move laterally in the plane of the ring it was fitted into, towards either of the above-mentioned poles, in order to allow observation of the variation in latitude.

Having completed the above construction, we marked off from both poles of the ecliptic, on the ring representing the circle through both poles, an arc equal to the distance between the poles of ecliptic and equator (as determined above). At the ends of these arcs (which were, again, diametrically opposite) we again inserted pivots, attaching them to a meridian ring similar to that described at the beginning of this treatise for making observations of the arc of the meridian between the solsticial points. This meridian ring was set up in the same position as the earlier one, perpendicular to the plane of the horizon and at an elevation of the pole appropriate for the place in question, and also parallel to the plane of the actual meridian [at that place]. Thus the inner rings were set up so as to revolve about the poles of the equator, from east to west, following the first motion of the universe.[89]»

[89] [V, 1; T84, 217-219]



100

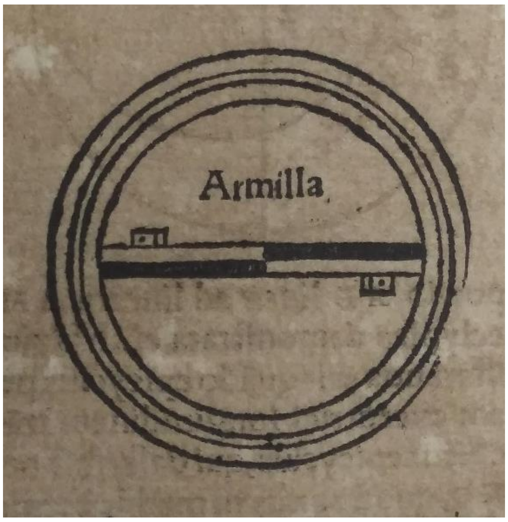
MAGNAE COMPOSI-
tionis Cl. Ptolemæi Pheludienſis

Alexandrini, Liber quintus.

*De conſtructione inſtrumenti quod aſtrola-
bium uocatur.* Cap, I.

VErùm ad oppoſitiones qui
dem, atque coniunctiones,
& eclypſes, quæ in eis fiũt
primæ ſimplicisq; inæqua-
litatis rationẽ ſufficere in-
uenimus, etiam ſi ipſa no-
bis ſola capiatur, ſed ad particulares motus
in alijs ad Solem aſpectibus non ſufficien-
tem aliquis ipſam inueniet. Secunda enim
(etiam ut diximus) inæqualitas Lunæ penes
ſolares diſtantias comprehenditur, hæc in
oppoſitione atq; coniunctione ad primam
reſtituitur. Maxima uerò eſt in utraq; qua-
dratura, id animaduertimus, credidimusq;
tam à progreſſibus Lunæ, quos Hippar-
chus conſcripſit quàm ab alijs, quos nos in-
ſtrumento ad hæc nobis conſtructum, ac-
cepimus. hoc ita ſe habet. ¶ Duas armillas
exquiſitè tornatas ſuperficiebus quadratas,
ac magnitudine mediocres, & undiq; ſimi-
les ęqualesq; inter ſe, ſecundum diametrum
ad rectos angulos in ipſis ſuperficiebus ap
tabimus. Ita ut altera eorũ circulus per me-
dium ſignorum eſſe intelligeretur. Altera
circulus qui per polos ipſius & ęquinoctia
lis eſt, hic meridianus appellatur in quo ab
una ſectionum utrinq; per quadrati latera
cœpimus puncta, quibus poli circuli, q per
medium ſignorum eſt, diſſeparant̃, & in u-
trinq; cylindrulos tam ad interiorem quàm
ad exteriorem ſuperficiem extantes coap-
tauimus. Deinde ad exteriorem armillam
aliam coaptauimus, quæ undique concaua
ſui ſuperficie, conuexæ duarum coaptata-
rum armillarũ ſecundeq; quadrabat, ut cir
ca prędictos polos circuli, qui per medium
ſignorum eſt poſſit per longitudinem cir-
cunduci. Interiorem quoq; aliam ſimiliter
armillam adaptauimus. Cuius conuexa ſu
perficies concauam duarum armillarum u-
bique tangebat. Ita ut ſimiliter ſecundum
longitudinem circa eoſdem polos exterio-
ri circunduceretur, hanc interiorem armil-
lam, & iam, quæ pro zodiaco eſt in 360. cir-
cunferentię gradus diuiſimus, partesq; gra
duum quotquot poterimus. Deinde aliam
armillam exquiſitè adaptauimus in qua fo
ramina ſunt diametraliter eminentia ſub in
teriore duarum armillarum, ut in eadem il-
lius ſuperficie ad utrunq; prædictorum po
lorum gratia obſeruandæ latitudinis poſſit
transferri. His ita factis, arcum, qui inter
duos polos zodiaci uidelicet, atq; ęquino-
ctialis in circulo, qui per utroſq; polos eſſe
intelligitur, ab utriſq; zodiaci polis elonga
uimus, & extremitates diametraliter rur-
ſum inter ſe oppoſitas coaptauimus ad me
ridianum, illi ſimilem quem principio com
poſitionis ad obſeruationes arcuum meri-
diani, qui inter ſolſtitia ſunt explanauimus.
Hoc igitur, ſecundum poſitionẽ illius, ſta-
tuto, id eſt, recto ad ſuperficiem horizõtis
& ſecundum eleuationem poli habitatio-
nis propoſitæ, & ad hæc parallelo ad ſuper
ficiem naturalis horizontis. Interioris cir-
cunductio armillarum ab ortu ad occaſum
fiat in polis ęquinoctialis conſequenter ad
primam totius lationẽ, ſic inſtrumẽto con
ſtituto, quandocunq; Sol & Luna ſuper ter
ra uideri poterant, exteriorẽ quidem aſtro
labij armillam in illo gradu in quo Sol pro-
ximè tunc inueniebatur conſtituebamus,
& armillam, quæ per polos eſt circunduce-
bamus, ut ſectione armillarum, quæ ad ſola
rem erat gradum exactè ad Solem uerſa u-
tręq; armillæ, quæ per medium ſignorum,
& quæ per polos eius eſt, ſimul ſeipſas ob-
umbrarent. Vel ſi ſtella perſpiceretur in u-
no oculorum, in altero laterum exterioris
armillæ ſub gradu, qui opponitur in armil-
la, qui per medium ſignorũ eſt poſito, per
oppoſitum atq; parallelũ circuli latus qua-
ſi utriſq; ſuperficiebus ipſorũ ſtella ſit con-
glutinata in eorum ſuperficie perſpiciatur.
Alteram uerò armillam quæ intra aſtrola-
bium eſt ad Lunam uel illud quod quæritur
uertemus, ut ſimul Solẽ aut aliud quod uis
proſpiciendo. Luna quoque uel quicquid
quæritur per utraq; foramina, quæ in adap
tato minore circulo ſunt, perſpiciatur. Sic
enim & quem gradũ circuli, qui per mediũ
ſignorum eſt per longitudinẽ obtineat in-
uenimus à ſectione interioris circuli, quæ
fit per diuiſionem ſuijpſius circuli ęquipol
lentis, & quòd gradus ad ſeptentrionẽ uel
ad meridiem ab ipſo diſtet nõ ignoramus,
ſicut

Fig. 33 – Nei riquadri si trova la descrizione dell’astrolabio armillare presente nel capitolo 1 del Libro V della versione in latino dell’*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell’Università di Bologna, in via Irnerio 46.



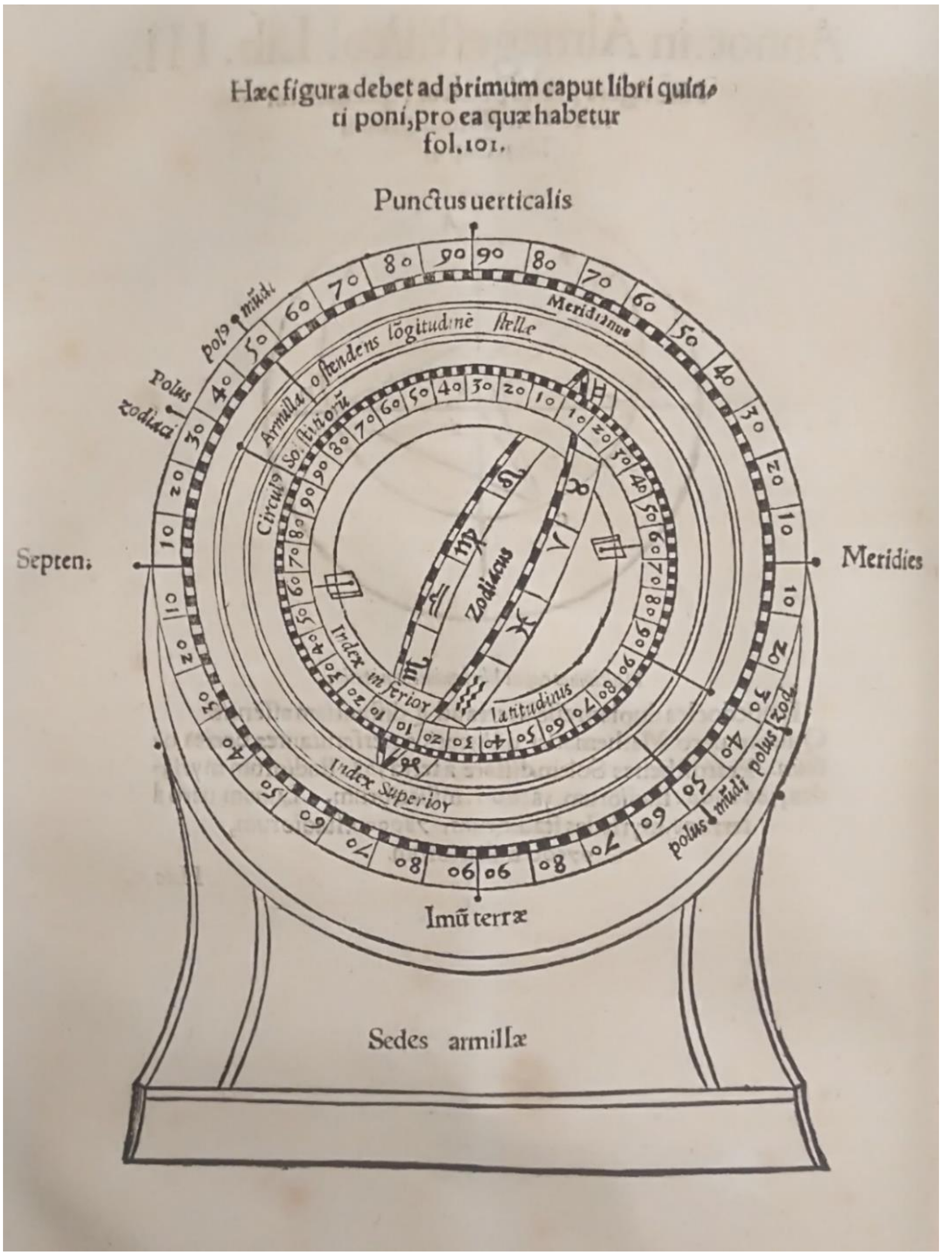


Fig. 34 - Immagini dell'astrolabio armillare presenti nella versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.

Osserviamo che ancora una volta la descrizione generale esclude elementi costruttivi specifici: i materiali da usare (forse il bronzo), i raggi e gli spessori dei sei anelli[90] annidati gli uni negli altri, e la minima divisione delle scale graduate. Attraverso il rinvio all'armilla meridiana, Tolomeo lascia invece intendere che l'astrolabio armillare va messo all'aperto, su una colonna posta su un pavimento orizzontale e che per la corretta collocazione servono sia un filo a piombo, sia una linea meridiana.
L'astrolabio armillare materializza alcune circonferenze celesti e permette di orientarle seguendo i due movimenti principali: da est verso ovest intorno ai poli celesti e da ovest verso est intorno ai poli dell'eclittica.

Vediamo ora il metodo osservativo descritto da Tolomeo per determinare la posizione della Luna. Quando il Sole e la Luna appaiono entrambi sopra l'orizzonte, si ruota l'anello girevole esterno (attorno i poli dell'eclittica) fino a fermarlo sull'anello dell'eclittica in corrispondenza della longitudine calcolata del Sole per il giorno d'osservazione. Si ruota quindi l'anello che rappresenta il coluro solstiziale, e perciò l'intero strumento, intorno ai poli celesti e lo si rivolge verso il Sole, facendo sì che l'anello girevole esterno proietti la propria ombra in se stesso. In tal modo anche l'anello dell'eclittica dovrebbe proiettare la propria ombra in se stesso. Mantenendo questo primo allineamento, si ruota l'anello girevole interno finché si scorge la Luna attraverso le mire forate dell'anello ancora più interno. La longitudine della Luna è data dal grado in cui l'anello girevole interno tocca l'anello dell'eclittica e la latitudine dal grado dell'anello girevole interno corrispondente all'angolo fra la direzione delle mire e il centro dell'anello dell'eclittica.
Tolomeo espone sette osservazioni lunari eseguite con l'astrolabio armillare[91].

2.3.2.2 Il triquetro

L'elaborazione di una adeguata teoria lunare esige di correggere le posizioni trovate con l'astrolabio armillare per la parallasse. Nella sezione 2.2.1.3 abbiamo visto che determinare tale angolo è un compito impegnativo: occorre costruire uno strumento per misurare accuratamente le distanze zenitali della Luna, individuare congiunture celesti favorevoli e, infine, eliminare gli effetti delle intrinseche deviazioni della Luna dall'eclittica. Riguardo al primo aspetto dell'indagine, Tolomeo dichiara, nel capitolo 12 del Libro V, di aver costruito uno strumento grande e sensibile: il triquetro (Fig. 35).

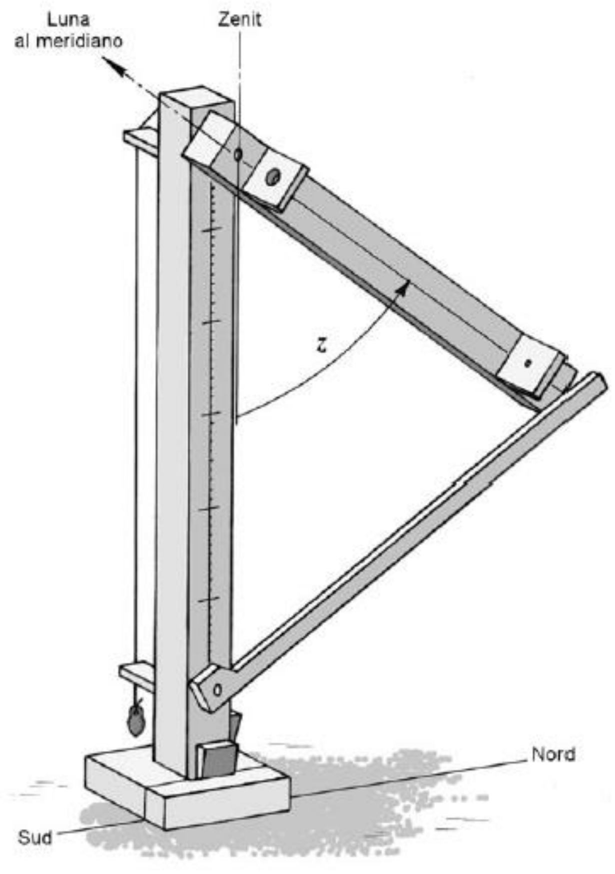


Fig. 35 – Schema del triquetro
(Immagine presa dall'articolo di G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*)

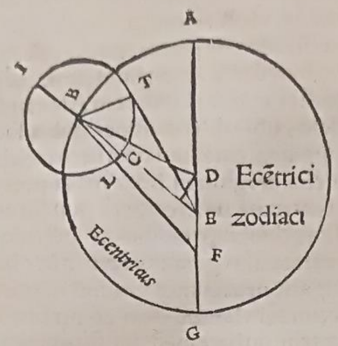
[90] Secondo D. J. Price lo strumento descritto nell'*Almagesto* consta di una serie di sette anelli di bronzo concentrici (D. J. Price, *Strumenti di precisione fino al 1500*, in *Storia della tecnologia*, a cura di C. Singer, 7 voll., 1992-1996, p. 601). Oltre a D. J. Price sappiamo esserci numerosi autori secondari che contano sette anelli (si veda G. Strano, *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike Syntaxis*, nota 58).
[91] [V, 3; T84, 224], [VII, 2; T84, 328], [IX, 10; T84, 461], [X, 4; T84, 475], [X, 8; T84, 499], [XI, 2; T84, 520] e [XI, 6; T84, 538].

Lo strumento è formato da due regoli rettangolari lunghi almeno quattro cubiti e abbastanza spessi da evitare distorsioni.
I regoli sono imperniati a una estremità delle rispettive linee mediane, precedentemente tracciate. Il primo è inserito in una base, mentre il secondo, libero di girare, reca alle estremità due piastre rettangolari, parallele, uguali e forate al centro in corrispondenza della linea mediana. La piastra per l'occhio ha un foro più piccolo, l'altra ne ha uno più grande in modo che guardando attraverso entrambe appaia l'intero disco lunare. Su ciascun regolo, a partire dal punto di giunzione, sono individuati, lungo le linee mediane, due segmenti di uguale lunghezza. Il segmento del regolo con la base è diviso in 60 parti e relative frazioni, mentre il segmento del regolo girevole non è graduato. Il regolo con la base è posto in verticale grazie a un filo a piombo sospeso tra due piastre uguali e parallele, collocate alle opposte estremità sul retro. Lo strumento è quindi collocato all'aperto in modo che il regolo girevole, saldamente fissato al perno da poter ruotare solo se vi si esercita un po' di pressione, rimanga sempre nel piano del meridiano individuato da una linea meridiana tracciata sul pavimento orizzontale. All'estremità inferiore del segmento graduato del regolo con la base è imperniato un terzo regolo più sottile, anch'esso girevole. Questo terzo anello permette di stabilire la distanza fra le estremità del segmento graduato e di quello non graduato sul regolo girevole.

Tolomeo descrive il triquetro nel capitolo 12 del Libro V dell'*Almagesto*. Riportiamo qui di seguito la parte di questo capitolo dedicata alla descrizione dello strumento riferendoci alla traduzione in inglese di G. J. Toomer (*Ptolemy's Almagest*, Londra 1984) utilizzata nel lavoro di tesi. A seguire, la medesima descrizione e l'immagine dello strumento (Figg. 36 e 37) presenti nella versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.

«We made two rods, rectangular [in cross-section], no less than 4 cubit long, so as to admit finer graduation, and with a cross-section of sufficient size that they were not distorted because of their length, but each side conformed very strictly to a straight line. Then we drew a straight line along the middle of the broader side of each rod, and affixed to one of them, at each end, centred on the line, and perpendicular [to it], two rectangular plates, of equal size and parallel to each other; each plate had an aperture exactly in the centre, the aperture at the eye being small, and that towards the moon being greater, in such a way that when one eye was placed at the plate with the smaller aperture, the whole of the moon would be visible through the aperture on the other plate, which was aligned [with the first aperture]. We made a perforation of equal size through both rods at the end of the median line near the plate with the larger hole, and fitted a peg through both perforations in such a way that the sides of the rods inscribed with the lines were fastened together round the peg as a centre, but the rod with the plates could rotate freely in all directions without distortion. We wedged the rod with no plates on it into a base. On the median line of each rod, at the end by the base, we took a point as far as possible from the centre of the peg (the same distance from it [on both rods]), and, on the rod with the base, divided the line so defined into 60 sections, subdividing each section into as many subdivisions as possible. We also attached to the back of the same rod, at its end, [two] plates having their corresponding faces aligned with each other, and each being equidistant in all respects from that same median line, so that when a plumb-line was suspended between them, the rod could be set up exactly perpendicular to the plane of the horizon. We also had a meridian line ready drawn in the plane parallel to that of the horizon in an unshaded place. We set the instrument upright in such a way that the sides of the rods which were held flush with each other by the peg lay in the meridian, being parallel to the meridian line, and the rod with the base was fixed exactly perpendicular, in a firm and immovable position, while the other rod could move in the plane of the meridian about the peg, responding to the pressure [of the user]. We also added another thin, straight rod, attached by a small pin at the base end of the graduated line, so that it too could be rotated, and long enough to reach the end of the line on the other rod equidistant [from the peg] when it was rotated to its maximum distance [from the base]; thus by rotating it at the same time as the latter, one could use it to show the straight-line distance between the ends [of the centre-lines on the two rods].[92] »

[92] [V, 12; T84, 244-246]



De aſpectibus diuerſitatis Lunæ. Cap. XI.

HAec fermè ſunt quę ad inueniēdos
ueros Lunæ progreſſus adhiben-
tur. Verũ cùm accidat ut neque ad
ſenſum quidē apparens Lunæ pro
greſſus idem cum uero ſit, quoniam terra
non ſit(ut diximus)quaſi punctũ ad diſtan
tiam orbis eius, conſequens neceſſariumq́ꝫ
profectò eſt, cum aliorum apparentiũ cau-
ſa cum maximè illorũ quæ in Solaribus ap-
parent eclypſibus, de diuerſitate aſpectuũ
eius dicere. Vnde poterimus per ueros pro
greſſus qui ad terræ & zodiaci circuli cen-
trum intelliguntur, eos qui ſunt à uiſu cer-
nentium, hoc eſt, qui ab aliqua terræ ſuper-
ficie aſpiciuntur, dijudicare, & contrarium
rurſus ueros ab apparentibus. Cùm aũt ad
hanc conſiderationem ſequatur, ut nec par
ticulares diuerſitatis aſpectuum quantita-
tes poſſint inueniri, niſi diſtantiæ propor-
tionentur, nec diſtantiæ proportio niſi ali-
quis diuerſitatis aſpectus habeatur. In his
quidem quæ nullum diuerſitatis aſpectum
ſenſibilem habent atqꝫ uidelicet terrã quaſi
punctum eſt, diſtantiæ proportionem cape
re poſſibile non eſt. In his autem in quibus
diuerſitas aſpectuum eſt, ſicut in Luna ſolũ
modo fit, ut diuerſitate aliqua primũ aſpe-
ctus habita diſtãtiæ proportio inueniatur,
propterea quòd diuerſitas huiuſmodi etiã
per ſe ipſam per obſeruationes accipitur,
diſtantiæ uerò quantitatis minimæ, quam-
uis Hipparchus à Sole id conetur inueni-
re. Nam quoniam à quibuſdã alijs Soli Lu-
næq́ꝫ accidentibus de quibus poſtea uerba
faciemus. Sequitur data unius Lunaris di-
ſtantia, alterius etiã diſtantiã dari, ideo co-
naẽ quaſi per cõiecturas habita Solis diſtã-
tia Lunæ diſtantiã demõſtrare, & primò q
dem minimũ ſenſibilē diuerſitatis aſpectũ
in Sole fieri ſupponit, ut hinc diſtantiã eius
capiat, deinde per eclypſim etiã quã expo-
nit, modò quaſi nullus ſenſibilis ſit in Sole
diuerſitatis aſpectus, modò quaſi magis ſit,
uerba facit, unde proportiones quoqꝫ di-
ſtantiæ Lunæ diuerſæ, ſecundum unãquan-
que ſuppoſitionum uarietatem, inuẽtas ibi
uidemus, cum dubium de Sole penitus ſit,
non ſolùm quantum diuerſitatis aſpectum
habeat, uerũ etiã ſi omnino aliquẽ habeat.

*De conſtructione inſtrumenti quo aſpectus di-
uerſitas capitur.* Cap. XII.

NOs uerò ne aliquid in hac cõſide
ratione incerti aſſumamus, in-
ſtrumentum conſtruximus quo
exacta admodũ obſeruare poſſi-
mus quantum & à quanta diſtãtia uerticis
aſpectus Lunæ uariatur in maximo circu-
lo, qui per polos horizontis & Lunę ipſius
deſcribitur. ¶ Duas enim regulas quadrila-
teras fecimus non minores per longitudi-
nē quatuor cubitis, ut plures poſſint in eis
partes ſignari, craſſitudinem mediocrē ne
per longitudinem flectãtur, ſed optimè re-
cteq́ꝫ per quodlibet latus tendantur, deinde
rectas deſcripſimus lineas per mediũ latio
ris lateris utriuſque regulæ, addidimusq́ꝫ in
utriſqꝫ extremitatibus alterius regulæ tabel
las quadratas rectas in ipſa media linea æ-
quales atqꝫ parallelas, quarum utraqꝫ in me
dio exactum habet foramen, alterũ minus
ad quod uiſus accommodaẽ. Alterũ quod
ad Lunam eſt ita maiuſculum, ut cùm unus
oculus tabellæ qui minus habet foramē ap-
ponatur, poſſit per alterum foramen rectè
oppoſitum tota perſpici Luna, æqualiter i-
gitur utranqꝫ regulam per medium linearũ
in extremitatibus alterius iuxta tabellam
quæ maius foramen habet pforauimus per
clauum ita per utraſqꝫ immiſimus, ut & re-
gularum latera quæ ad lineas ſunt quaſi à
centro ab ipſo connecterenẽ, & regula quę
tabellas habet rectè poſſit undiqꝫ circundu
ci. Alteram uerò quæ tabellas non habet in
baſi ſua firmauimus, deinde in media utri-
uſqꝫ linea ad excẽtricitatis iuxta baſim, pũ-
cta cœpimus æqualiter & quam plurimũ à
centro quod eſt in clauo diſtantia, lineamq́ꝫ
regulæ baſim habẽtis determinatam in 60.
partes partiti ſumus, harumq́ꝫ quamlibet, in
quàm plures potuimus portiones. Appo-
ſuimus autem poſt hanc ipſam regulam ad
extremitates paxillos ad earundem partiũ
latera, in eadem linea recta inter ſe poſitos
& ęqualiter ab eadem media linea undique
diſtantes, ut perpendiculum per ipſos de-
L pendens

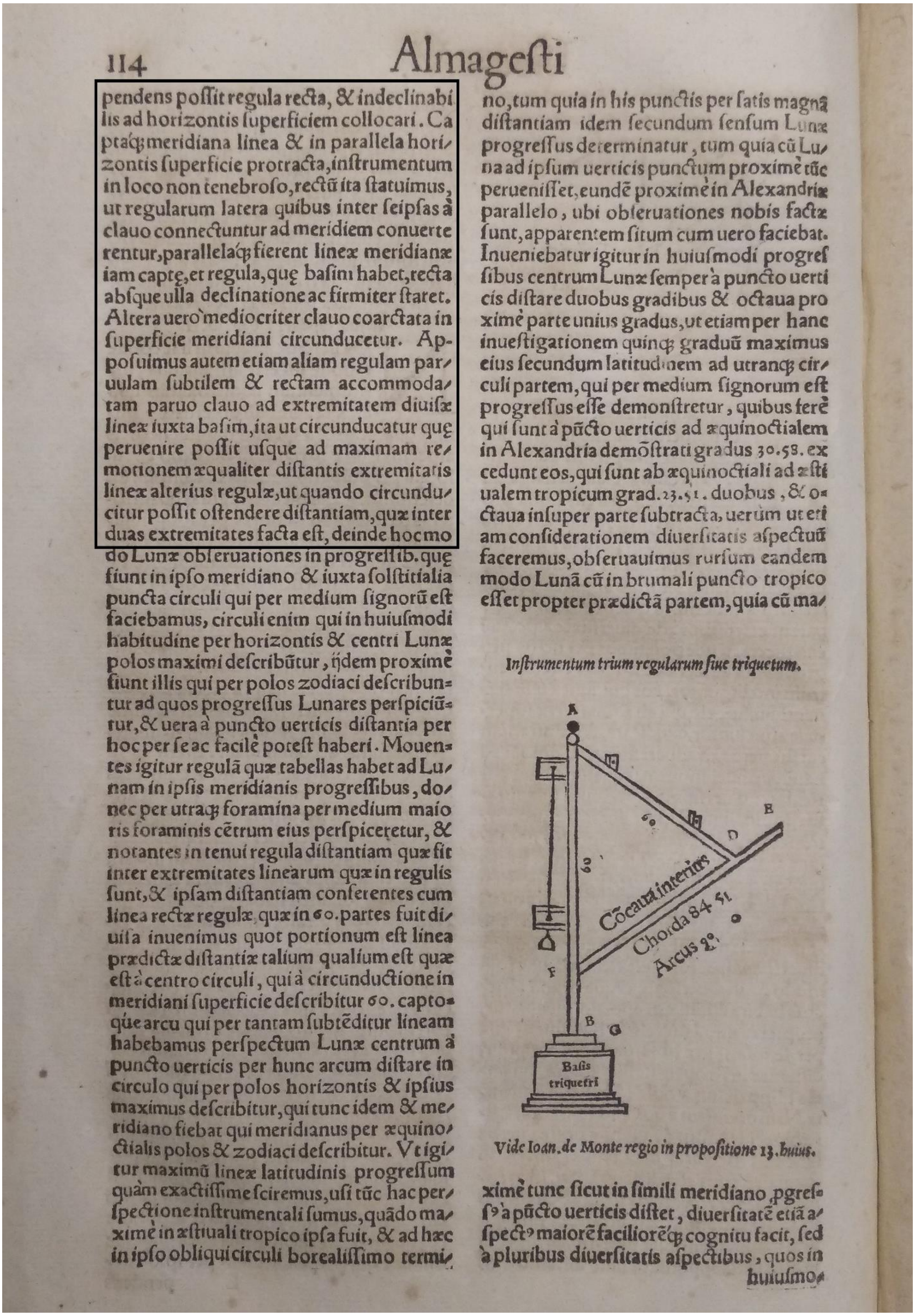


Fig. 36 – Nei riquadri si trova la descrizione del triquetro presente nel capitolo 12 del Libro V della versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.

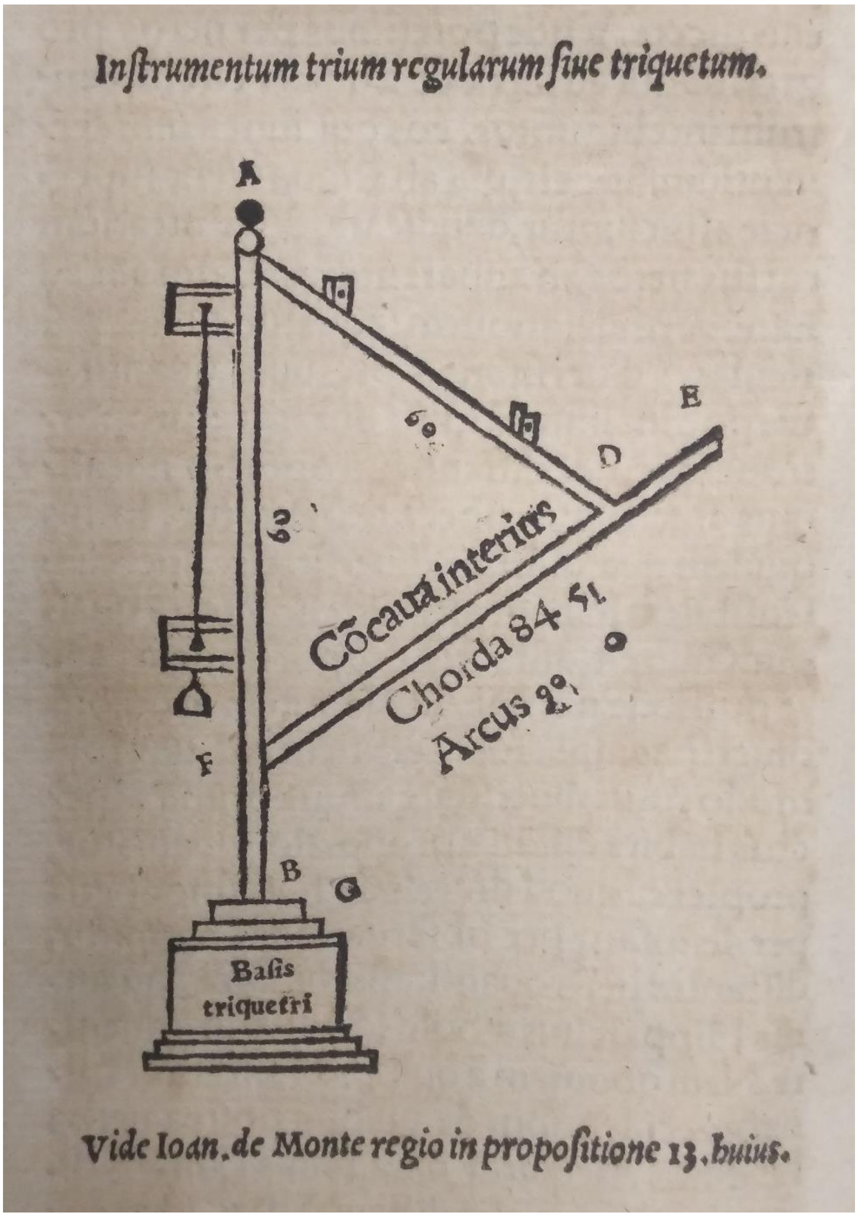


Fig. 37 – Ingrandimento dell'immagine del triquetro presente nella versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.

La descrizione omette ancora una volta il materiale costruttivo, probabilmente il legno. Diversamente dal solito include la lunghezza consigliata per i regoli maggiori, ma non la minima divisione della scala graduata verticale. Quanto alla posa in opera, in analogia con l'armilla meridiana e il plinto, si può immaginare che l'orientamento avvenga regolando alcuni elementi di supporto inseriti fra il regolo verticale e la base. Come in tutti gli altri casi, Tolomeo non spiega come tracciare la linea meridiana (a tal scopo si veda il paragrafo 3.2).

2.3.2.3 La diottra di Ipparco

Per completare la teoria lunare, Tolomeo si dedica ai diametri apparenti del Sole e della Luna. L'indagine richiede uno strumento di diversa concezione rispetto ai precedenti, capace di misurare angoli minori di un grado. In proposito, Tolomeo asserisce di aver costruito il tipo di diottra già descritto da Ipparco, che impiega un regolo di quattro cubiti (Fig. 38):

«…we too constructed the kind of dioptra which Hipparchus described, which uses a four-cubit rod…[93] »

Aggiunge poi che la misura richiede di posizionare uno spessore coprente, o piastra, rispetto alla lunghezza del regolo, ad un'opportuna distanza dall'occhio dell'osservatore:

[93] [V, 14; T84, 252]

«…the measurement involving the positioning of the width [of the plate] which covers [the body being sighted] on the length of the rod running from the eye to the plate[94]»

Nonostante la testimonianza di Tolomeo e qualche lieve differenza di struttura, lo strumento era già noto a Archimede di Siracusa (287-212 a.C.), che nell'*Arenario* afferma d'averlo usato per misurare il diametro apparente del Sole. Tolomeo non dà una descrizione dello strumento, ma fortunatamente il commentario di Pappo ne fornisce una. Rimandiamo alla sezione 3.1.6 per le descrizioni forniteci da Archimede e dai commentatori dell'*Almagesto*, Proclo, Teone e Pappo.

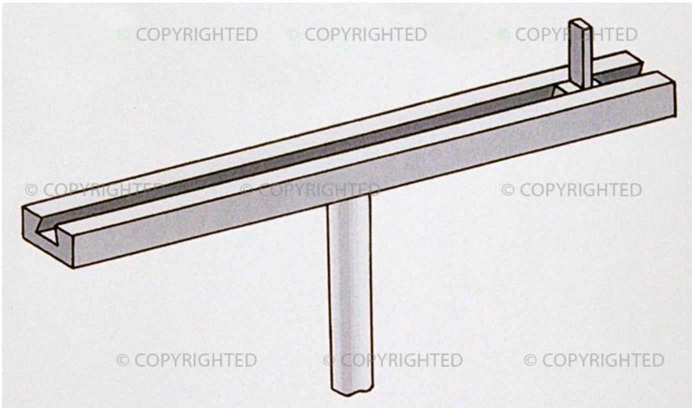


Fig. 38 – Diottra di Ipparco (Vedere sezione 3.1.6 per maggiori dettagli sullo strumento)
(Immagine presa dal sito https://catalogo.museogalileo.it/approfondimento/Diottra.html, Museo Galileo di Firenze).

2.3.3 Osservazione delle stelle fisse e dei pianeti

La definizione di una teoria lunare permette di trasferire dal giorno alla notte la nozione delle principali circonferenze celesti acquisita grazie alla teoria solare. L'osservazione delle stelle e dei pianeti prende quindi le mosse dalla posizione della Luna, determinata appena prima del tramonto e corretta per il momento d'osservazione, in base alla quale occorre impostare l'anello girevole esterno dell'astrolabio armillare rispetto all'anello dell'eclittica. Lo strumento va quindi ruotato in solido intorno ai poli celesti finché il centro della Luna appare nel piano dell'anello girevole esterno. A questo punto si può puntare la stella attraverso le mire forate della coppia di anelli più interni per trovarne la longitudine e la latitudine (quest'ultima può essere letta direttamente sullo strumento).
Per maggiore chiarezza Tolomeo espone una osservazione della stella Regolo da lui compiuta nel 139 (sezione 2.2.1.5). Allo stesso modo egli determina le posizioni di alcune stelle luminose vicine all'eclittica, che diventano le depositarie ultime dell'informazione sulla disposizione delle principali circonferenze celesti già trasferita dal Sole alla Luna. Riferendosi a queste stelle si può compiere ogni altra osservazione; basta predisporre l'anello girevole esterno dell'astrolabio armillare rispetto all'anello dell'eclittica secondo la longitudine di una stella di riferimento (determinata mediante la Luna come descritto sopra), ruotare in solido lo strumento intorno ai poli celesti finché la stella appare nel piano dell'anello girevole esterno e, infine, misurare le coordinate eclittiche dell'astro desiderato con la coppia di anelli più interni.
Un importante esito di questa procedura è il catalogo stellare dell'*Almagesto*.
Come abbiamo già visto (sezione 2.2.1.5), Tolomeo determina le posizioni dei pianeti dalle coordinate di un certo numero di stelle brillanti di riferimento, situate quasi tutte, vicino l'eclittica. Nella *Syntaxis* compaiono 26 osservazioni di pianeti che Tolomeo dichiara di aver compiuto di persona[95]. Per sette di esse asserisce di aver usato l'astrolabio armillare; per 17 fa intendere di essersi appoggiato a una stella di riferimento.

[94] [V, 14; T84, 252-253]
[95] Otto osservazioni per Mercurio: [IX, 7-10; T84, 449-461], sei per Venere: [X, 1-4; T84, 469-474], quattro per Marte: [X, 7-8; T84, 484-499], quattro per Giove: [XI, 1-2; T84, 507-520] e quattro per Saturno [XI, 5-6; T84, 525-538].

Capitolo 3
Ancora sugli strumenti osservativi dell'*Almagesto*: descrizioni degli strumenti di autori successivi e determinazione della linea meridiana

La prima grande ondata di costruzione di strumenti osservativi è dovuta agli astronomi alessandrini e raggiunse un apice col lavoro di Tolomeo. Assai poco sulla teoria o sulla conoscenza di strumenti fu trasmesso all'Impero Bizantino. La rinascita dell'astronomia in Europa ha inizio con la traduzione dall'*Almagesto* e il tentativo di migliorare la precisione delle tavole astronomiche portò ad un intenso sviluppo della costruzione e dell'uso di strumenti astronomici. In particolare, nella seconda metà del XV secolo il lavoro di Regiomontano (1436-1476) rese famosa la città di Norimberga per la costruzione di strumenti osservativi di precisione: fra gli strumenti in legno ritroviamo anche il triquetro già descritto da Tolomeo. A Norimberga Regiomontano raccolse attorno a sé un circolo di ammiratori e studiosi di scienza, tra i quali Bernhard Walther (1430-1504) che divenne suo allievo in astronomia pratica. Nel 1488 Walther costruì un astrolabio armillare, secondo la descrizione di Tolomeo, e allestì nella sua casa una stanza per montare gli strumenti (fu il primo vero osservatorio). Alla sua morte, nel 1504, Walther aveva determinato 746 misure di altezze solari e registrato 615 posizioni di pianeti, luna e stelle. La sua fu la prima serie ininterrotta di osservazioni nel nuovo sorgere della scienza europea e, un secolo dopo, Tycho Brahe (1546-1601) e Giovanni Keplero (1571-1630) si avvalsero del suo lavoro.

Nella sezione 3.1 consideriamo le informazioni, forniteci dai commentatori dell'*Almagesto*, Proclo, Teone e Pappo e da alcuni astronomi e autori secondari successivi, relative alle caratteristiche degli strumenti descritti da Tolomeo e ai metodi di misura adottati con essi. Nella sezione 3.2 descriveremo due metodi per determinare l'elemento caratteristico, fondamentale, di ogni osservazione realizzata con gli strumenti osservativi presentati da Tolomeo, esclusa la diottra di Ipparco: la linea meridiana.

3.1 Caratteristiche e metodi osservativi degli strumenti di Tolomeo descritti dai commentatori dell'*Almagesto* e da alcuni autori successivi

3.1.1 Armilla meridiana

Sebbene la storia documentata dell'armilla meridiana inizi con la *Syntaxis*, non mancano tentativi di attribuirne la paternità a Eratostene di Cirene (IV sec. a.C.) e di estenderne l'uso a tutta l'età alessandrina. L'ipotesi appare azzardata, dato che l'uso babilonese di dividere la circonferenza in 360 gradi sembra entrato nel mondo greco grazie a Ipparco di Nicea (II sec. a.C.). Con prudenza si può perciò guardare all'inizio dell'attività di Ipparco, il 147 a.C., come a un termine *post quem* per la nascita dell'armilla meridiana.
L'interesse per lo strumento è perdurato nei secoli. Purtroppo, la perdita di gran parte del commento ai primi sei libri dell'*Almagesto* scritto da Pappo d'Alessandria (IV sec.) fa sì che non resti traccia delle delucidazioni di questo autore sugli strumenti per osservare il Sole. Invece, nel commento scritto verso il 360 da Teone d'Alessandria, conservatosi per intero, la descrizione dello strumento segue la *Syntaxis* tranne per un dettaglio: l'anello interno scorrevole va mantenuto in sede con alcune piastrine applicate di lato all'anello più grande. Appare però incerto se Teone abbia tratto il dettaglio da uno strumento reale. Inoltre, Teone 'ammette' una graduazione della scala presente sullo strumento di $5'$[96]: con un anello di un cubito[97] di diametro, ciò corrisponde alla finezza, molto improbabile, di segnare circa 3 tacche nello spazio di 1 mm.
Il sospetto che alcuni commentatori di Tolomeo scrivano per congettura emerge anche dall'*Hypotyposes* di Proclo Licio Diadoco (410 circa - 485), per il quale il diametro esterno dell'armilla meridiana non deve essere meno di mezzo cubito e, posto il raggio pari a 60 parti, ciascun anello componente è largo 4 parti e spesso 2 parti e mezza. Queste dimensioni permetterebbero di dividere ogni grado della scala graduata dell'anello esterno in 60 parti (ovvero in 60 minuti d'arco); un dettaglio assai sospetto poiché, anche nel caso più favorevole in cui si abbia a che fare con il cubito reale egizio (c.

[96] Questa affermazione di Teone di Alessandria (ed. Rome) si trova nel libro di J. P. Britton, *Models and precision: The Quality of Ptolemy's Observations and Parameters* 1992, p.14 nota 3.
[97] Il cubito trae origine dalla lunghezza dell'avambraccio. Il cubito egiziano equivale a 52,5 cm e il cubito romano equivale a 44,36 cm.

52,5 cm), le divisioni di un minuto d'arco individuerebbero archi di 0,04 mm scarsi ($2\pi R : 360° = x : \left(\frac{1}{60}\right)^{\circ}$ con 2R = 262,5 mm si ottiene $x \approx 0{,}038$ mm e ciò corrisponderebbe alla finezza, impraticabile, di segnare circa 26 tacche nello spazio di 1 mm)[98]. L'impressione che Proclo ragioni in astratto è rafforzata dalla variante che egli suggerisce per la procedura di osservazione. Collocato lo strumento su una colonna della giusta altezza e con una sezione quadrata di 8 dita (c. 15 cm), la misura si compie quando un raggio di Sole attraversa entrambi i fori che devono essere praticati al centro delle piastrine dell'anello interno. Purtroppo, il Sole non ha un aspetto puntiforme e l'uso dei fori per traguardare introduce un errore di collimazione evitato invece con la procedura di adombramento delle piastrine descritta da Tolomeo.

L'utilità dell'armilla meridiana potrebbe essere stata molto limitata dalle sue dimensioni relativamente piccole e infirmata dalla cattiva costruzione meccanica. L'accoppiamento a frizione tra i due anelli è particolarmente sensibile a qualsiasi deformazione, e il giuoco libero necessario dell'anello mobile può essere causa di notevoli errori nella rilevazione dei dati.

3.1.2 Plinto

Come afferma G. Strano, in *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike Syntaxis*, curioso è il peso dato al plinto dai commentatori di Tolomeo. La descrizione di Teone contempla un solo elemento nuovo: per verificare l'orizzontalità del piano di supporto si usa una livella. In alternativa, il piano è posizionato a dovere quando l'acqua che vi si versa non scorre via. L'indicazione pare utile più al muratore che all'astronomo; ma a ben guardare Teone sembra pensare a un piano di supporto mobile e, di conseguenza, a un plinto portatile.

Lo strumento è invece passato sotto silenzio da Proclo.

Un serio inconveniente del plinto è che il Sole può proiettare un'ombra sulla faccia del blocco soltanto prima o dopo mezzogiorno, a seconda che la superficie guardi a est oppure a ovest; ciò rende difficile giudicare il momento esatto del vero mezzogiorno, allorché devono eseguirsi le letture. Tale inconveniente fu più tardi superato sostituendo il dispositivo del piolo e dell'ombra con un braccio imperniato e munito di un paio di traguardi. In questa forma, detta del "quadrante a muro", fu usato da Tycho Brahe.

Come abbiamo visto nella sezione 2.3.1.3, le osservazioni effettuate nei periodi del solstizio d'inverno e d'estate, mediante l'armilla meridiana e il plinto, davano all'astronomo la possibilità di determinare l'obliquità dell'eclittica ε e la latitudine del luogo di osservazione φ. Esponiamo qui di seguito un'interessante discussione sulla possibile relazione esistente tra l'errore nel valore di ε adottato da Tolomeo nell'*Almagesto* e la modalità di misura delle distanze zenitali meridiane del Sole ai solstizi, realizzate con il plinto[99]. Tolomeo, nel capitolo 12 del Libro I, afferma che dalle sue osservazioni ricava un valore per l'obliquità dell'eclittica che si accorda molto bene con quello determinato da Eratostene, $2\varepsilon = \frac{11}{83} \cdot 360° = 47° \, 42\,' \, 40''$ da cui si ottiene che $\varepsilon_{obs} = 23° \, 51' \, 20''$. D'altra parte, il valore reale per l'obliquità dell'eclittica al tempo di Tolomeo, precisamente nel 130 d.C., è pari a $\varepsilon_r = 23° \, 40' \, 46''$ e quindi si ha che $2\varepsilon_r = 47° \, 21' \, 32''$. Pertanto, l'errore nel valore dell'obliquità adottato nell'*Almagesto*, ovvero $\varepsilon_r - \varepsilon_{obs}$, è di $-10'$, mentre l'errore nel valore dell'angolo in realtà misurato, $2\varepsilon_r - 2\varepsilon_{obs}$, è di $-21'$. (Usiamo il pedice obs per distinguere i valori delle grandezze riportate da Tolomeo nell'*Almagesto* dai valori reali delle medesime grandezze che, invece, sono indicati col pedice r.)

J. P. Britton sostiene che dalle parole di Tolomeo sembra che egli effettuò le osservazioni del Sole solo col plinto e che, quindi, non usò l'armilla meridiana. Con questa ipotesi, l'autore dimostra che, usando un plinto per determinare l'obliquità dell'eclittica, si trovano valori sistematicamente più grandi di quelli ottenuti con misurazioni accurate. Vediamo il ragionamento.

Poiché l'ombra sul plinto è sempre meno definita con l'avvicinarsi del Sole al meridiano, si considera, prima, quello che dovrebbe osservarsi sul plinto a mezzogiorno esatto e, poi, come si muove l'ombra del piolo sulla faccia del blocco in un breve intervallo di tempo che precede mezzogiorno (cioè, quando è più facile eseguire la lettura delle misure). Assumendo per la latitudine di Alessandria il valore $\varphi_r = 31° \, 12'$ e usando le relazioni $\begin{cases} z_{max_r} + z_{min_r} = 2\varphi_r \\ z_{max_r} - z_{min_r} = 2\varepsilon_r \end{cases}$, si trovano i seguenti valori (corretti per la rifrazione) per le distanze zenitali meridiane del Sole, rispettivamente al solstizio d'estate e d'inverno per l'anno 130: $\begin{cases} z_{min_r} = 7° \, 31' \\ z_{max_r} = 54° \, 51' \end{cases}$. Usando, invece, il valore trovato da Tolomeo per la

[98] Alcuni autori sostengono che la suddivisione raccomandata da Proclo dell'anello graduato sia di 5 minuti d'arco.

[99] Questa discussione si trova nel libro di J. P. Britton, *Models and precision: The Quality of Ptolemy's Observations and Parameters*, 1992, pp. 1-11.

latitudine di Alessandria, $\varphi_{obs} = 30° 58'$, e il suo valore per l'obliquità, $\varepsilon_{obs} = 23° 51' 20''$, otteniamo le seguenti distanze zenitali meridiane: $\begin{cases} z_{min} = 7° 6' 40'' \\ z_{max} = 54° 49' 20'' \end{cases}$.
Tolomeo non dice esplicitamente che ricava il suo valore per la latitudine di Alessandria φ_{obs} dalle osservazioni dei solstizi, ma afferma solamente che è semplice determinare la latitudine di un luogo qualsiasi dalle osservazioni. (In effetti, il fatto che il suo valore per la latitudine di Alessandria sia identico al valore implicito nel rapporto di 5:3 tra la lunghezza di uno gnomone e la sua ombra equinoziale a mezzogiorno[100], suggerisce una fonte alternativa per questo parametro: $\tan^{-1}\frac{3}{5} = 30° 58'$.)
Ciò nonostante, J. P. Britton sostiene che quelli appena ottenuti sono gli unici valori compatibili col valore della latitudine di Alessandria nell'*Almagesto* e, perciò, ipotizza che Tolomeo effettuò realmente queste misurazioni di distanze zenitali. Con questa ipotesi, l'autore osserva che la misura di Tolomeo della distanza zenitale del Sole al solstizio d'inverno era sostanzialmente accurata e, perciò, l'errore nel suo valore dell'obliquità, $\varepsilon_r - \varepsilon_{obs}$, deriva solamente dall'errore nella sua misura della distanza zenitale al solstizio d'estate.
Consideriamo ora il movimento dell'ombra del Sole sul plinto all'avvicinarsi del Sole al meridiano. Nella figura 39, BT rappresenta un piccolo piolo cilindrico parallelo all'orizzonte e perpendicolare al piano del meridiano, la cui ombra, BFQ, interseca la scala del plinto in F. La faccia del plinto è allineata nel piano del meridiano e la linea BG è perpendicolare all'orizzonte. La distanza zenitale reale del Sole è indicata con z e il suo azimut con $-A$[101]. Infine, z' (angolo GBF) è l'angolo che si legge sul plinto quando il Sole ha una distanza zenitale z e un azimut $-A$; chiamiamo z' la distanza zenitale apparente del Sole sul plinto.

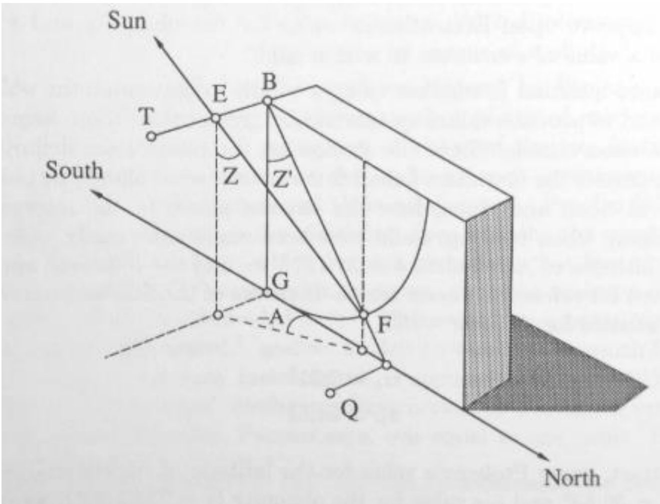


Fig. 39 – Schematizzazione della misurazione della distanza zenitale del Sole col plinto; visione da nord-est.
(Immagine presa dal libro di J. P. Britton, *Models and precision: The Quality of Ptolemy's Observations and Parameters*, 1992, p. 6)

A mezzogiorno, quando il Sole è al meridiano, si ha $z'(0) = z(0)$. Data la declinazione del Sole δ, il suo angolo orario t e la latitudine del luogo di osservazione φ, vale la seguente relazione per la differenza tra la distanza zenitale reale del Sole al mezzogiorno locale, $z(0)$, e la distanza zenitale apparente, $z'(t)$, misurata sul plinto all'angolo orario t:

$$z(0) - z'(t) = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\delta}{\cos t}\right) - \delta. \quad (1)$$

Si trova che $z(0) - z'(t)$ è indipendente dall'angolo φ cioè, l'errore nel valore della distanza zenitale apparente del Sole sul plinto un po' prima di mezzogiorno è lo stesso per ogni luogo di osservazione. Soprattutto, la relazione mostra che per

$0° < \delta < 90°$ si ha $z(0) > z'(t)$
$0° = \delta$ si ha $z(0) = z'(t)$
$0° > \delta > -90°$ si ha $z(0) < z'(t)$

Perciò, quando il Sole è a nord dell'equatore (cioè in primavera, escluso l'istante dell'equinozio, e in estate) la distanza zenitale apparente, $z'(t)$, raggiunge un massimo a mezzogiorno ($t = 0°$), mentre quando il Sole è a sud dell'equatore (cioè in autunno, escluso l'istante dell'equinozio, e in inverno) $z'(t)$ raggiunge un minimo a mezzogiorno. Dunque, il

[100] Il rapporto 5:3 tra la lunghezza dello gnomone e la sua ombra equinoziale ad Alessandria fu attribuita a Ipparco da Strabone.
[101] Qui l'azimut è misurato dal meridiano sud ed è considerato positivo verso ovest e negativo verso est.

comportamento dell'ombra sul plinto quando il Sole ha una declinazione positiva è proprio l'opposto di quello che intuitivamente ci si potrebbe aspettare, poiché al mezzogiorno locale la distanza zenitale reale del Sole è minima.
L'errore nel valore dell'obliquità, $\varepsilon_r - \varepsilon_{oss}$, che emerge da misurazioni accurate eseguite al solstizio d'estate e d'inverno un po' di tempo (t) prima mezzogiorno si determina come segue. Imponendo $\delta = \pm\varepsilon_r$ (il segno $+$ si riferisce al valore esatto della declinazione del Sole al solstizio d'estate, il segno – al valore esatto della declinazione al solstizio d'inverno) e usando la relazione (1) si ottiene la seguente espressione per ε_{obs}:

$$\varepsilon_{obs} = \frac{1}{2}[z'(t)_{max} - z'(t)_{min}] = \tan^{-1}\left(\frac{\tan\varepsilon_r}{\cos t}\right).$$

Segue che l'errore nel valore dell'obliquità dell'eclittica è:

$$\varepsilon_r - \varepsilon_{obs} = \varepsilon_r - \tan^{-1}\left(\frac{\tan\varepsilon_r}{\cos t}\right) < 0 \text{ (poichè t è piccolo).}$$

Quindi, l'effetto di eseguire un'osservazione un po' prima mezzogiorno è quello di rendere l'obliquità misurata più grande dell'obliquità reale (cioè $\varepsilon_{obs} > \varepsilon_r$). Poiché questa è la direzione dell'errore nel valore di Tolomeo dell'obliquità, J. P. Britton sostiene che è molto probabile che l'errore $\varepsilon_r - \varepsilon_{obs} = -10'$ di Tolomeo si originò proprio in questo modo.
La Tabella 1 sottostante mostra l'errore, $\varepsilon_r - \varepsilon_{obs}$, che si otterrebbe con misurazioni accurate del solstizio d'estate e d'inverno ad Alessandria eseguite diversi minuti prima mezzogiorno:

Minutes before Noon	$\epsilon - \epsilon_{obs}$ (0;1°)	Summer z_s	$-A_s$	Winter z_w	$-A_w$
0	0.0	7.52°	0.00°	54.88°	0.00°
−20	−4.8	8.73	31.73	55.09	5.59
−30	−10.9	10.04	43.31	55.35	8.36
−40	−19.5	11.62	52.13	55.71	11.10
−60	−44.3	15.27	64.17	56.73	16.47

Tabella 1 – Errore nel valore dell'obliquità dell'eclittica, $\varepsilon_r - \varepsilon_{oss}$, che risulta da misurazioni accurate del solstizio d'estate e d'inverno ad Alessandria diversi minuti prima mezzogiorno.
(Immagine presa dal libro di J. P. Britton, *Models and precision: The Quality of Ptolemy's Observations and Parameters*, 1992, p. 9)

Questo errore è numericamente lo stesso di quello che si ha in una singola misura della distanza zenitale di entrambi i solstizi, nel 130. (Il segno dell'errore nel valore del solstizio d'estate è positivo.) Osserviamo che un errore nel valore dell'obliquità di $10'$ emergerebbe da due osservazioni effettuate circa 30 minuti prima mezzogiorno o, da una singola osservazione eseguita circa 40 minuti prima mezzogiorno.
Dunque, J. P. Britton sostiene che è possibile spiegare l'errore nel valore dell'obliquità dell'eclittica riportato nell'*Almagesto* se si assume che Tolomeo effettuò entrambe le osservazioni nel 130 circa mezz'ora prima del mezzogiorno locale. L'autore poi prosegue dicendo che, poiché il valore di Tolomeo della latitudine di Alessandria suggerisce che l'errore proviene sostanzialmente dalla misura effettuata al solstizio d'estate, l'osservazione di quest'ultimo deve essere avvenuta circa 40 minuti prima mezzogiorno. Tuttavia, sebbene il Sole sia già molto vicino al meridiano, questo sembra un intervallo di tempo troppo grande e questa ipotesi sembrerebbe incompatibile con la misurata accurata della distanza zenitale al solstizio d'inverno.
La spiegazione alternativa fornita dall'autore è che Tolomeo eseguì le osservazioni dei solstizi nel 130 un po' prima mezzogiorno e stimò l'avanzamento dell'ombra sul plinto nell'intervallo di tempo compreso tra la sua misura e il passaggio del Sole al meridiano locale. Così facendo, estrapolò al solstizio d'estate un valore della distanza zenitale apparente sul plinto con un errore doppio della correzione stimata, mentre al solstizio d'inverno ottenne un valore privo di errore. Perciò, se Tolomeo effettuò osservazioni accurate, circa mezz'ora prima mezzogiorno, e assunse che l'ombra si muoveva di ulteriori $10'$ verso distanze zenitali decrescenti nell'intervallo di tempo che precedeva il mezzogiorno, i suoi risultati sarebbero in errore proprio della quantità che abbiamo trovato, ossia di $10'$.
J. P. Britton conclude l'esposizione ritenendo la sua spiegazione non totalmente soddisfacente e conclusiva, poiché questa congettura richiede di assumere che la procedura utilizzata da Tolomeo sia leggermente diversa da quella descritta nell'*Almagesto*. Infatti, Tolomeo accenna alla difficoltà di osservare l'ombra a mezzogiorno ([I, 12; T84, 63]) e afferma di posizionare qualcosa al bordo della scala per rendere l'ombra più facilmente visibile: teoricamente, questa

procedura avrebbe aggirato la difficoltà e gli avrebbe permesso di osservare l'ombra proprio mentre il Sole attraversava il meridiano. D'altra parte, nessun'altra fonte di errore sistematico tenderebbe a produrre valori così alti per l'obliquità dell'eclittica[102] e l'unica spiegazione possibile, secondo l'autore, è quella di considerare il comportamento peculiare dell'ombra del Sole sul plinto al solstizio estate.

Infine, osserviamo che nella sezione "The astronomical measuring instruments of the ancient Greeks" del "Kotsanas Museum of Ancient Greek Technology" a Katakolo, in Grecia, è esposta una replica del plinto che viene attribuito ad Ipparco (Fig. 40).

Fig. 40 – *The "plinthis" (block) of Hipparchus* esposto nel "Kotsanas Museum of Ancient Greek Technology"
(Immagine presa dal sito http://kotsanas.com/gb/cat.php?category=13)

3.1.3 L'armilla equatoriale

Come abbiamo visto nella sezione 2.3.1.4, l'*Almagesto* suggerisce come usare l'armilla equatoriale per determinare gli istanti degli equinozi, ma non ci fornisce una descrizione dello strumento e delle sue modalità di costruzione e posizionamento.

Le dimensioni restano ignote, ma è evidente che artefici di epoca diversa si sentivano liberi di fare anelli di differente diametro. Un paio di secoli dopo Tolomeo, Teone precisa che ad Alessandria esisteva ancora ai suoi giorni un'armilla equatoriale del diametro di due cubiti.

Nell'articolo di Frans e Margaret Bruin[103] vengono presentati due trattati astronomici successivi all'*Almagesto* che descrivono la realizzazione di un'armilla equatoriale: entrambi fanno riferimento ad un'armilla meridiana che, dotata di una scala graduata per la latitudine geografica, veniva usata per allineare correttamente l'anello lungo il piano equatoriale nel luogo di osservazione (Fig. 41). Il primo è un trattato in arabo sugli strumenti astronomici usati nell'osservatorio di Maragheh (nel nord della Persia) intorno al 1270. Si suppone che questo trattato sia stato scritto da Mu'ajjad Al-Din Al-'Urdi di Damasco, un collaboratore del direttore dell'osservatorio di Maragheh, Nasir Al-Din Al-Tusi. La parte del trattato presentata nell'articolo di F. e M. Bruin è una traduzione in inglese degli autori di una precedente traduzione in tedesco del trattato arabo eseguita da Seemann (precisiamo che l'articolo che stiamo considerando è stato pubblicato nel 1976).

Il secondo è un trattato persiano di 'Abd Al-Mun'im Al-'Amili i-Fotuni, scritto a Isfahan nel 1562. Gli autori presentano il trattato tradotto per la prima volta. Poiché i due trattati mostrano uno stretto legame (è probabile che Al-'Amili abbia avuto accesso al lavoro di Al-'Urdi mentre componeva la sua versione), riportiamo qui di seguito la traduzione inglese del primo trattato.

[102] Le altre fonti più ovvie di errore sistematico sono l'errore di graduazione della scala o l'errore nel centrare il piolo che proietta l'ombra. Il primo dovrebbe influenzare di meno le osservazioni al solstizio d'estate, quando la distanza zenitale del Sole è piccola, mentre sembra che questa osservazione fosse la più seriamente in errore. Per quanto riguarda il secondo, si può facilmente mostrare che l'errore apparente nella distanza zenitale del Sole al solstizio d'estate richiederebbe un errore di 1 pollice (= 2,54 cm) nel posizionamento laterale del piolo cilindrico su un plinto di raggio 1 cubito; tale errore sembra troppo grande per essere possibile.
Un'altra possibile fonte di errore è il mancato allineamento del plinto nel piano del meridiano. Per produrre l'errore nell'obliquità osservato, l'azimut del plinto dovrebbe essere di +12° in entrambi i solstizi. D'altra parte, se è vero che l'errore emerge solo dalla determinazione del solstizio d'estate, l'azimut del plinto dovrebbe essere di circa +17° (al solstizio d'estate).

[103] Frans e Margaret Bruin, *The Equator Ring, Equinoxes and Atmospheric Refraction*, in *Centaurus*, 1976, vol. 20 no. 2, pp. 89 – 111.

Al-‘Urdi: [L’armilla equatoriale]

"The fourth instrument used by the Ancients is [a ring], placed in the plane of the equator. Ptolemaios described it [as the ring with which] the sun's entrance in one of the equinoctial points could be observed. It is a ring of copper with parallel surfaces. In the Almagest he called it [Equator] Ring. Its construction and testing is carried out in the same way as was explained for the Armillary Astrolabe. The ring can be erected [only] after we have found the latitude of the place of observation. The latter equals the [angular] distance from zenith of the equator circle. From this the inclination of the equator plane with respect to the horizon is known, [so that] then we know also the angle between the plane of the ring and the horizon. If the ring is positioned with its two flat surfaces parallel to the equator, then [at a certain moment] it may cast its shadow on itself. At this moment its concave surface will be illuminated symmetrically. This will happen when the sun is exactly in one of the equinoctial points. Since the instrument is used not only at the [terrestrial] equator but also for [other] inclined horizons, the ring should be given a specific inclination with respect to the horizon. However, [as time passes by] its position may change easily [a little]. Moreover, it is difficult to erect the instrument [correctly]. I will therefore describe the best way of placing the instrument properly:

The [equator] ring is fastened to the meridian ring instead of the inner ring [of the armillary astrolabe discussed earlier] which is left out. It is fixed perpendicularly to the meridian ring in the same way as the ecliptic ring to the colure ring of the armillary astrolabe. The [angular] distance of the equator ring from zenith equals the latitude [φ] of the place of observation. At the positions of the slots we fix wedges so as to hold the [rings together].

The meridian ring carries the weight of the equator ring and prevents it from changing position. One makes the [inner diameter of the] equator ring a little larger so that it will be a little thinner [than the meridian ring], in order to make it lighter. The slots are such that the convex part of the bearer becomes flush [with the convex part of the equator ring]. The divisions on the meridian ring are at the inside, so that the ends of the ruler will not be obstructed by the equator ring. All this is clear and straightforward.

There is no difficulty in placing the ring in the plane of the equator and to test its inclination. The [latter] must be taken from the scale on the meridian ring. If it would be measured on a ring which deviated from the meridian plane, then would happen what also occurred to the largest of the rings erected in the Square Peristyle in Alexandria. This one was twice illuminated during one and the same equinox. And this is the figure:"

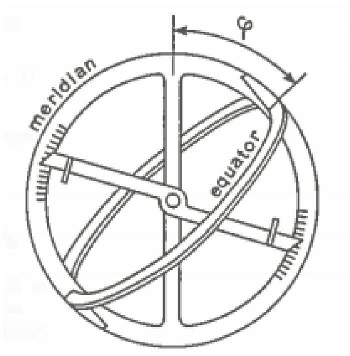


Fig. 41 – Allineamento dell’anello lungo il piano equatoriale mediante un’armilla meridiana dotata di una scala graduata per la latitudine geografica φ.
(La figura è una versione prospettiva dell’originale andata perduta ed è presa dall’articolo di F. e M. Bruin, *The Equator Ring, Equinoxes and Atmospheric Refraction*, in *Centaurus*, 1976, vol. 20 no. 2)

Le istruzioni di Al-‘Urdi sull’uso di un anello meridiano come supporto all’armilla equatoriale non richiedono l’impiego della trigonometria e questo indica che originariamente gli anelli potevano essere posizionati in questo modo. I due anelli formano uno strumento elegante e si pensa che venne inventato da un matematico come Apollonio di Perge, prima dell’avvento dei metodi trigonometrici.

Riportiamo ora gli accorgimenti adottati da F. e M. Bruin nella realizzazione di una replica dell'armilla equatoriale, simile a quella menzionata da Tolomeo, allo scopo di descriverne i meriti e le limitazioni per la determinazione della data e dell'ora degli equinozi.
Gli autori hanno ottenuto, con un tornio, un anello di bronzo di 100 cm di diametro esterno, 92 cm di diametro interno, 4x4 cm di sezione trasversale e pesante 40 kg. Successivamente, è stata costruita una piattaforma attentamente livellata di 4x4 m sul tetto dell'edificio dell'Università americana di fisica di Beirut e, con uno gnomone di ottone di 170 cm, portante in cima una sfera metallica di 72 mm di diametro, si sono determinati la linea meridiana sulla piattaforma e i punti solstiziali (sulla linea), necessari per il posizionamento dell'armilla equatoriale. Per trovare la linea meridiana è stata tracciata una linea est-ovest al solstizio d'inverno col metodo del Cerchio Indiano (che descriveremo nella sezione 3.2). La latitudine del luogo è stata trovata bisecando l'angolo formato dal vertice dello gnomone con i punti del solstizio d'estate e d'inverno sulla linea meridiana. A questo punto, l'anello viene posto su tre supporti cilindrici di bronzo (di 20 cm di altezza e 3 cm di diametro) ciascuno fissato su una colonna di cemento della giusta altezza che poggia sulla piattaforma. Usando righelli e corde e applicando trigonometria di base, l'anello è stato sistemato in modo tale che un diametro sia parallelo alla linea est-ovest e il diametro ad esso perpendicolare formi con la verticale un angolo pari alla latitudine del luogo φ. La regolazione dei due supporti alle estremità del diametro est-ovest permette di realizzare l'orizzontalità con l'ausilio di un dispositivo di livellamento mentre, la regolazione del terzo supporto completa l'orientamento. (Per maggiori dettagli rimandiamo alle pp. 95 e 96 dell'articolo in cui si parla anche di una sagoma a forma di croce rettangolare, da inserire nell'anello, e dotata di un tubo ortogonale al piano dell'anello, mediante il quale si poteva verificare in prima approssimazione l'allineamento dell'armilla.)
I vantaggi e gli svantaggi di usare un anello al posto di uno gnomone sono evidenti durante le osservazioni. L'equinozio può essere accuratamente determinato con una interpolazione di transiti giornalieri successivi dell'ombra di uno gnomone sulla sua linea meridiana. Tuttavia, all'istante dell'equinozio, specialmente di primavera, il Sole è spesso coperto dalle nuvole e, quindi, il transito può trovarsi solo per estrapolazione. Se, invece, si usa un anello, è sufficiente un solo minuto di Sole intenso, in prossimità dell'equinozio, per riuscire a determinare la posizione della striscia d'ombra sulla superficie concava della metà inferiore dell'armilla equatoriale. In particolare, sono sufficienti due misurazioni, una precedente e una successiva all'equinozio, per ottenere, con una semplice interpolazione, l'istante dell'equinozio. In pratica, lavorare con un'armilla equatoriale è più semplice, sebbene potrebbe rivelarsi meno accurato, poiché l'anello viene posizionato usando i dati ottenuti da uno gnomone. Come già osservato da Tolomeo, la deviazione dell'asse dell'anello dalla giusta direzione rappresenta l'errore principale nella determinazione dell'equinozio. Possiamo determinare lo spostamento Δx della striscia d'ombra sulla superficie concava dell'anello corrispondente ad un aumento della declinazione del Sole di $\Delta\delta$ minuti d'arco (siamo in prossimità dell'equinozio, $\Delta\delta \equiv \delta$), con la semplice proporzione:

$$2\pi d_i : 360° = \Delta x : \frac{\Delta\delta \text{ (minuti d'arco)}}{60} \rightarrow \Delta x = \frac{2\pi d_i \cdot \Delta\delta \text{ (minuti d'arco)}}{360° \cdot 60}$$

dove abbiamo indicato con d_i il diametro interno dell'anello. La Figura 42 mostra un raggio di luce, di declinazione $\delta = \Delta\delta$, che incide su un'armilla equatoriale di diametro interno $d_i = 920\text{mm}$:

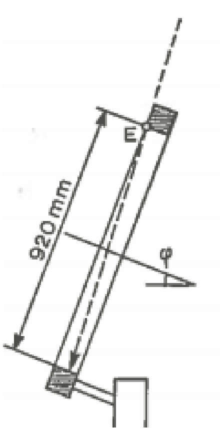


Fig. 42 – Raggio di luce incidente sull'armilla equatoriale. È mostrata la sezione trasversale dello strumento, guardando verso est. (Immagine presa dall'articolo di F. e M. Bruin *The Equator Ring, Equinoxes and Atmospheric Refraction*, in *Centaurus*, 1976, vol. 20 no. 2)

F. e M. Bruin trovarono così che $\Delta x = 0{,}27\Delta\delta$ (minuti d'arco), ovvero che un aumento della declinazione del Sole di $10'$ corrisponde ad uno spostamento della striscia d'ombra sulla superficie concava dell'anello di 2,7 mm (verso sud se siamo nell'equinozio di primavera, verso nord se siamo nell'equinozio d'autunno). A causa della dimensione angolare del Sole (circa $30'$), la separazione tra la luce e l'ombra non è netta e la larghezza della striscia d'ombra è più piccola della larghezza dell'anello. In una giornata di sole i due autori determinarono la posizione della striscia d'ombra con un errore di 0,2 mm, corrispondente ad un errore sulla declinazione di $\pm 1'$. Durante l'equinozio c'è luce su entrambi i lati dell'anello e, un modo accurato per individuarne l'istante esatto, consiste nel determinare il momento in cui le due strisce di luce, che circondano la zona d'ombra, sulla superficie concava dell'anello, hanno la stessa larghezza. Osserviamo, tuttavia, che se l'anello non è perfettamente allineato col piano equatoriale, all'istante dell'equinozio, le due strisce di luce non sono uguali!
Nell'articolo, vengono dettagliatamente riportate le osservazioni condotte, inizialmente, con condizioni meteo altamente sfavorevoli e, poi, adottando una tecnica più raffinata: quando possibile, le letture erano effettuate ogni ora dall'alba al tramonto, alcuni giorni prima e dopo l'equinozio, segnando ogni volta sulla superficie concava dell'anello la larghezza e la posizione della striscia d'ombra. Lo scopo era quello di raggiungere l'accuratezza massima con semplici mezzi. (Anche se non conosciamo il metodo usato dagli astronomi alessandrini, è difficile credere che fossero soddisfatti con una singola osservazione.) Gli autori mostrano, poi, che, con un'analisi dei dati raccolti, anche con un anello non perfettamente allineato col piano equatoriale, si riesce a determinare l'istante esatto degli equinozi: nel 1968 trovarono l'istante dell'equinozio vernale coincidente col mezzogiorno locale con un'incertezza di $\pm\frac{1}{2}$ ora. D'altra parte, senza un'analisi dei dati, l'incertezza saliva a ± 6 ore, in accordo con i risultati di Tolomeo.
Tuttavia, l'equinozio doveva aver luogo, secondo i calcoli, alle 15:22 locali, cioè circa tre ore e mezza dopo l'istante determinato dagli autori. Il motivo di questo fatto risiede nella rifrazione atmosferica che fa apparire il Sole più alto sull'orizzonte di quanto lo sia realmente: vicino all'orizzonte l'effetto è più marcato e la differenza tra la distanza zenitale reale e osservata può raggiungere mezzo grado. Correggendo i dati per l'effetto della rifrazione, F. e M. Bruin trovarono il valore corretto per l'equinozio vernale del 1968.

A questo punto, occupiamoci del ruolo della rifrazione atmosferica sulle osservazioni degli equinozi riportate nell'*Almagesto*, necessarie per determinare la lunghezza dell'anno e, in generale, per costruire una teoria del moto solare.
Innanzitutto, si può facilmente vedere che, a causa della rifrazione atmosferica, durante l'installazione dell'armilla equatoriale, la parte superiore dell'anello (rivolta in alto) viene sempre posizionata un po' sopra il piano equatoriale celeste teorico e, di conseguenza, la parte inferiore dell'anello (rivolto in basso) si troverà sempre sotto il piano equatoriale. Nelle regioni mediterranee, come Alessandria, l'altezza del Sole rispetto all'orizzonte osservata al solstizio d'inverno è di $100''$ superiore al valore reale, mentre al solstizio d'estate è di $10''$ più grande. Questo implica che, con lo gnomone, si individua un piano equatoriale di $55''$ troppo alto. Tuttavia, durante un equinozio al mezzogiorno locale si osserva un'altezza del Sole superiore di $40''$ rispetto al valore reale e, pertanto, usando un'armilla equatoriale si compie un errore di soli $15''$. Questo significa che le ripercussioni della rifrazione atmosferica sulle osservazioni degli equinozi che occorrono al meridiano locale non si hanno tanto sull'allineamento dell'anello lungo il piano equatoriale bensì, sul fatto che la lettura delle osservazioni viene effettuata un po' prima o un po' dopo il transito del Sole al meridiano.
Quando il Sole è al meridiano locale (ovvero al mezzogiorno locale) la sua altezza sull'orizzonte è massima e, perciò, l'effetto della rifrazione è minimo. Di solito, però, il Sole viene osservato quando è vicino all'orizzonte: metà degli equinozi osservati da Ipparco sono avvenuti all'alba o al tramonto (stando a quanto viene riportato da Tolomeo), quando l'altezza osservata del Sole supera di $30'$ il valore reale col conseguente risultato di un errore pari a $1\frac{1}{4}$ giorno sull'istante dell'equinozio.
Nell'*Almagesto* non c'è nessun riferimento alla rifrazione atmosferica ma, come riporta Abu Al-Raihan Al-Biruni (973 -1050 circa) nel suo trattato *Tahdid Al-Amakin*, è Tolomeo stesso ad indicare, nel quinto libro dell'*Ottica*, che i raggi di luce vengono rifratti alla superficie di separazione, sferica e concentrica con la Terra, fra l'aria atmosferica e l'etere cosmico a causa della diversa densità dei due elementi. In particolare, gli astri vicini all'orizzonte appaiono più spostati verso lo zenit rispetto a quando sono alti nel cielo. Tolomeo dichiara di aver osservato l'effetto mentre usava il suo astrolabio armillare e afferma che è possibile derivare il valore esatto della variazione di declinazione (ossia l'entità della deflessione) del raggio di luce solo conoscendo lo spessore degli strati costituiti dall'aria atmosferica e dall'etere.
Per queste sue affermazioni alcuni autori sostengono che è con Tolomeo ad aver avuto inizio l'ottica fisica sperimentale. Riportiamo qui di seguito la parte dell'*Ottica* sulla rifrazione atmosferica, tradotta in inglese, per la prima volta da F. e M. Bruin, dalla versione latina pubblicata con i commenti di Lejeune.

Claudio Tolomeo: [Rifrazione atmosferica (dal Libro 5 dell'*Ottica*)]

"Next it is possible to discern that the ray of vision is refracted at the boundary surface of the air and the ether because of the different density these media appear [to have]. This is shown as follows: We observed that stars which rise and set have a larger northern declination when they are near the horizon. The observation was made with the instrument with which the [coordinates of the] stars are measured [i.e. the armillary astrolabe]. Indeed, when these are rising or setting, in each case the circles parallel to the equator inscribed through them are closer to the north than the circles inscribed through them when they are in the prime meridian. The smaller the amount by which they are away from the horizon, the larger northern declination they have. Conversely, the circumpolar stars have the smallest distance from the pole when they are in the northern meridian. For, when they are in the meridian in the place closest to zenith, the circle parallel to the equator seems larger [than the true one], whereas in the first place it is smaller. This happens because the ray of vision is refracted at the boundary between the air and the ether. This [boundary] must be a sphere, and the center is the center of the universe, which is the center of the earth.

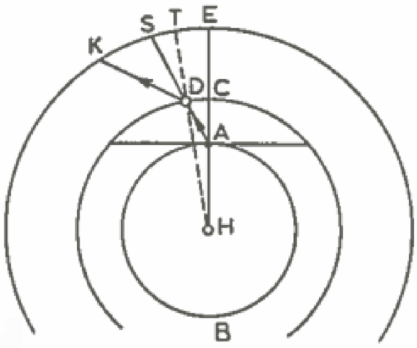


Figure 5. The earth (circle AB), with its atmosphere (circle CD) and a star at its apparent position S.

Thus [in figure 5,] let E be the zenith of the observer. Let AB be a large circle through the place where the mentioned stars [are observed] and which lies on [the surface of] the earth. Let CD be a [circle] in the surface separating the air and the ether. Let ES be the circle passing through a certain [apparent] star [S]. Let H be the center of everything. Let EAH be drawn, and let A be the point of sighting. Let ADS be a line above the boundary of the horizon and [passing] circle CD. Furthermore, let DT be the perpendicular [in D] above this circle. We consider ADK to be the ray of vision, which has been refracted at D towards KD. Thus the star is [seen] above point K.

Since the ray of vision, at a given angle above the surface of the location, is refracted away from E with respect to line [DT] above the surface from which the inflection takes place, in each case angle KDT will be larger [than angle SDT], which lies in the thinner medium. In this way the star will be seen from A. Its [angular] distance from zenith will be smaller than the true distance, for it will be seen at a distance of arc ES instead of arc EK. Thus, proportional to the amount by which the position increases in altitude, the difference between the position at which the star is seen and its true position becomes smaller. If it is in E no inflection will occur, since for the ray of vision proceeding from A towards E no refraction takes place, for then it will be perpendicular to the surface.

These things being set forth, ABC ⟨Figure 6; the same figure was used by Cassini to derive his law of refraction⟩ is made to be the circle of the horizon, and AEPC the half of the [prime] meridian circle which is above the earth. Let E be the zenith, and P the north-pole of the celestial sphere.

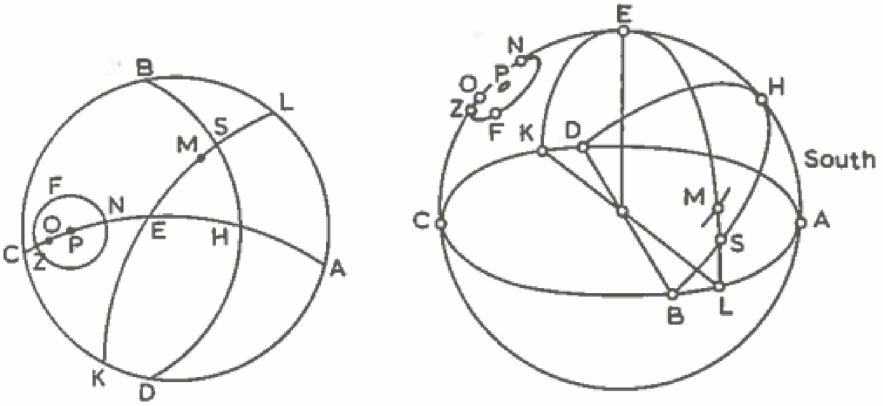


Figure 6. Ptolemaios' diagram explaining atmospheric refraction.

Let BHD be the part above the earth of the circle parallel to the equator and passing through a star. And let the star on this line close to the horizon be situated at S.

The star – when it is near the horizon – is seen nearer to zenith rather than at its true position, differing from the latter in the large circles which pass [at right angles] through points of the horizon. Therefore the position at which the star is seen, and which is above S, will be between E and S, say M. The line parallel to the equator and passing through M will have a larger northern declination than the line parallel to the equator and passing through S. When the star has risen to position H, the ray proceeds without any observable difference between the apparent and the true position.

Likewise, let P be the north-pole. Draw any of the other circles parallel to the equator, such as circle NZF, and on it, in Z of this circle, a star [which is] always visible. Then, by refraction, this [star] will appear closer to zenith E and will appear at O. When the star is in N no difference in position will occur, except for a neglectable one. Therefore, when the star in its trajectory is close to the horizon, its distance from the north-pole will appear smaller, and when its orbit is near zenith, it will appear larger. For arc NP will be larger than arc OP.

Thus [we have] shown the cause of the apparent [position] of the stars to be the refraction of the ray of vision. We may derive amounts of these refractions from stars for which the distance is [exactly] known, i.e. for the sun and the moon. If the distance of the boundary between the two above mentioned media [air and ether] were known, [one could] deduce the amounts [of change in declination] when these come closer to the horizon, and the elevations which take place as a result of the refraction of the ray of vision. But if the distance where the ether terminates – which is nearer to the earth than the sphere of the moon – is not known, as is the case for the distance of the [boundary] surface mentioned above, which may be either close to the earth or more remote from its atmosphere, [then] it is impossible to deduce from this the amount of [variation in] angle which occurs in the declination due to a refraction of this kind."

Usando il suo astrolabio armillare, pare che Tolomeo sia stato il primo ad aver dato una stima empirica all'effetto della rifrazione atmosferica. Le sue osservazioni furono ripetute solo nel 1488, quando Bernhard Walther a Norimberga notò lo stesso effetto con uno strumento simile.
L'effetto della rifrazione atmosferica costituì un serio problema dopo l'introduzione del telescopio. La prima teoria concreta fu sviluppata nel 1662 da Giovanni Dominico Cassini usando, in ambito astronomico, la legge della rifrazione (scoperta da Willebrord Snell nel 1620). Successivamente la teoria fu raffinata da Isaac Newton, James Bradley, Nicholas de Lacaille, Friedrich Wilhelm Bessel, e altri.
Prima di concludere, facciamo alcune considerazioni sulle osservazioni degli equinozi effettuate da Ipparco e Tolomeo. Lo scopo degli astronomi antichi era quello di determinare la lunghezza dell'anno e le sue possibili variazioni dalle osservazioni di questi istanti. Oggi sappiamo che le irregolari variazioni della lunghezza di un anno tropico non potevano essere rilevate in questo modo; queste, infatti, sono dovute agli effetti planetari e ammontano a circa cinque minuti. Sia Ipparco che Tolomeo trovarono un valore accurato della lunghezza dell'anno usando due osservazioni di equinozi (o di solstizi) distanti tra loro di alcuni secoli; così facendo le piccole irregolarità si mediavano tra loro e la lunghezza dell'anno risultava una costante astronomica.
Le osservazioni degli equinozi di Ipparco sono considerate le più accurate dell'antichità. Nel Libro III dell'Almagesto, Tolomeo cita tre equinozi di primavera e sei equinozi d'autunno osservati da Ipparco tra il 163 e il 127 a.C. Le osservazioni differiscono tra loro di circa sei ore. Inoltre, poiché Ipparco afferma che alcuni equinozi avvennero a mezzanotte, si può concludere che dedusse questi risultati da un'interpolazione di almeno un paio di osservazioni, una precedente e una successiva all'equinozio. Se poi si assume che Ipparco eseguì le misure con un'armilla equatoriale, si può dimostrare che le differenze tra i tempi calcolati e osservati degli equinozi sono dovute in larga parte all'effetto della rifrazione atmosferica[104].
In aggiunta a quelle di Ipparco, Tolomeo riporta nell'*Almagesto* anche quattro osservazioni effettuate da lui stesso: tre equinozi e un solstizio. Queste osservazioni sono tutte in anticipo di un giorno rispetto agli eventi reali. A questo proposito, alcuni autori sostengono che Tolomeo, non solo non ottenne i suoi dati da osservazioni accurate (come sostiene) ma anche che, modificò i suoi valori degli istanti per concordarli con quelli di Ipparco. Infatti, sempre secondo la tesi di questi autori, gli istanti dei solstizi e degli equinozi vengono determinati con metodi diversi e, perciò, è quasi impossibile che quattro osservazioni indipendenti presentino l'errore di un giorno di anticipo. Altri autori più cauti, invece, sostengono che la grande fiducia di Tolomeo nei dati di Ipparco può averlo portato ad arrotondare le sue accurate osservazioni nei limiti dell'errore che considerò accettabile. In entrambi i casi, quindi, questo giorno venne in un qualche modo sottratto.
D'altra parte, tolto il giorno in meno, i restanti errori possono essere ricondotti alla rifrazione atmosferica.

3.1.4 L'astrolabio armillare

Come scrive D. J. Price, fra tutti gli strumenti descritti da Tolomeo nell'*Almagesto*, l'astrolabio armillare è quello che ha generato maggior confusione[105]. A causa del suo nome è stato spesso confuso con l'astrolabio piano, completamente diverso (Teone chiama quest'ultimo il "piccolo astrolabio") e per il suo aspetto è stato confuso con la sfera armillare, ideata più tardi (XIII-XIV secolo) e usata principalmente per insegnamento e dimostrazioni, piuttosto che per osservazioni.
L'*Almagesto* è il primo testo a menzionare l'astrolabio armillare, la cui complessità e la circostanza che Tolomeo non dichiari di averlo ideato hanno ispirato due congetture storiografiche antitetiche. Per i sostenitori della prima congettura l'armilla meridiana sarebbe stata unita all'armilla equatoriale per formare una gabbia dove innestare un terzo anello girevole intorno ai poli celesti. Lo strumento risultante sarebbe stato usato prima di Ipparco per rilevare le coordinate degli astri rispetto all'equatore celeste. La scoperta di una lentissima rotazione della sfera delle stelle fisse intorno ai poli dell'eclittica (la precessione degli equinozi) avrebbe suggerito a Ipparco di abbandonare l'assetto equatoriale per quello eclittico e di passare da un astrolabio armillare a tre o quattro anelli allo strumento descritto nell'*Almagesto*.
Per i sostenitori della seconda congettura l'astrolabio armillare nasce invece da uno strumento "completo" o "universale" utilizzato da Ipparco e chiamato "meteoroscopio". Questo strumento sarebbe già stato noto a Eratostene; pertanto, né Ipparco né Tolomeo avrebbero perfezionato i metodi osservativi. L'astrolabio armillare dell'*Almagesto* costituirebbe perciò uno strumento "incompleto" la cui riduzione spetterebbe a Tolomeo. La seconda congettura appare più problematica sia perché non chiarisce l'origine dello strumento universale, sia perché il meteoroscopio è avvolto in una nube d'incertezza.
Vediamo ora le informazioni forniteci dai commentatori. Pappo offre alcuni dettagli dell'astrolabio armillare che travalicano le lacune dell'*Almagesto*. Lo strumento è formato da parti in bronzo o in ottone saldate con lega di stagno, l'anello esterno ha un diametro di un cubito, mentre i singoli anelli sono larghi e spessi $\frac{1}{60}$ di cubito. L'anello più interno

[104] Vedere l'articolo di F. e M. Bruin, *The Equator Ring, Equinoxes and Atmospheric Refraction*, in *Centaurus*, 1976, vol. 20 no. 2, pp 104-109.
[105] D. J. Price, *Strumenti di precisione fino al 1500*, p. 601.

scorrevole è trattenuto nel successivo da staffe a forma di "π". I perni che individuano l'asse dei poli celesti vanno poi fissati a una coppia di anelli analoga all'armilla meridiana, in modo che, se si traccia sull'anello meridiano esterno una scala delle latitudini geografiche, lo strumento può adattarsi all'uno o all'altro luogo d'osservazione ruotando l'anello meridiano interno. Infine, l'intero strumento non deve essere posto su una colonna, ma tenuto sospeso nel piano del meridiano. Le ultime due precisazioni stridono con quanto riportato da Tolomeo nell'*Almagesto* e fanno supporre che Pappo prenda spunto da uno strumento portatile di cui dispone.
Come Pappo, anche Teone e Proclo propongono un astrolabio armillare a sette anelli. Proclo offre in più dettagli tecnici sull'incastro dei due anelli uniti lungo un diametro comune, e descrive l'aspetto delle varie scale graduate. L'anello dell'eclittica deve riportare sulla superficie convessa una divisione nei dodici segni zodiacali e sulla faccia laterale superiore una scala graduata divisa in 360°, in modo da leggervi le posizioni dei due anelli girevoli esterno e interno. L'anello interno è anch'esso diviso in 360° su una faccia laterale, in modo da leggervi l'inclinazione delle mire connesse all'anello ancora più interno.

Relativamente alle sette osservazioni lunari eseguite con l'astrolabio armillare è stato constatato che, ricostruendo le posizioni della Luna relative a tali osservazioni, le longitudini sono affette da un errore sistematico prodotto dalla teoria solare di Ipparco avallata da Tolomeo. Se però si prescinde dall'errore sistematico, si scopre che lo strumento determinava la longitudine della Luna rispetto al Sole con un errore di circa $25'$[106].
Il catalogo stellare dell'*Almagesto* consiste in un elenco di longitudini e latitudini eclittiche di 1.022 stelle espresse in gradi e sette loro frazioni:

a) $\frac{1}{2}°, \frac{1}{4}°$

b) $\frac{2}{3}°, \frac{1}{3}°, \frac{1}{6}°$

e le due combinazioni $\frac{3}{4}° = \frac{1}{2}° + \frac{1}{4}°$ e $\frac{5}{6}° = \frac{1}{2}° + \frac{1}{3}°$.
Se si confrontano tali coordinate con le posizioni stellari calcolate per l'anno 138 d.C. e si prescinde dall'errore sistematico dovuto all'adozione tolemaica del modello solare di Ipparco, si riscontrano errori medi di $35'$ in longitudine e $19'$ in latitudine[107]. Questi errori danno una indicazione sulla precisione delle misure condotte con uno strumento complesso come l'astrolabio armillare.
Si è molto discusso se e fino a che punto tale catalogo incarnasse effettivamente un lavoro personale di Tolomeo o piuttosto fosse una semplice derivazione dall'opera di Ipparco. Alcuni autori sostengono, invece, che il catalogo stellare di Tolomeo derivi da un adattamento di coordinate risalenti all'epoca di Ipparco. Ad esempio, G. Strano afferma che, mediante un'analisi statistica, gli errori sulle posizioni delle singole stelle rivelano una simmetria equatoriale delle osservazioni originarie[108]. Il risultato suggerisce che Ipparco operò a Rodi con un astrolabio armillare equatoriale (cioè rotante solo intorno all'asse dei poli celesti). In seguito, la struttura dello strumento fu modificata in eclittica, o per sciogliere i problemi derivanti dalla precessione degli equinozi, o perché i moti planetari avvengono lungo l'eclittica. Inoltre, ci sono alcune speculazioni sull'origine delle frazioni di grado con cui sono espresse le posizioni delle stelle nel catalogo: le frazioni di tipo a) possono essere trovate con uno strumento avente divisioni di $\frac{1}{4}°$, e le frazioni di tipo b) con un altro strumento graduato di $\frac{1}{6}°$. Un unico strumento in grado di fornire tutte le coordinate del catalogo dovrebbe avere divisioni di $\frac{1}{12}°$, ovvero di $5'$, ma Tolomeo non fornisce informazioni al riguardo.
Invece, per quanto riguarda le osservazioni dei pianeti di Tolomeo, possiamo dire che fino alla fine del Novecento, la ricostruzione delle posizioni planetarie antiche richiedeva un lavoro estenuante. Con l'avvento del computer è stato così possibile riscontrare che, tenuto conto della funzione delle stelle di riferimento, l'errore commesso da Tolomeo nell'osservare le posizioni dei pianeti è contenuto. Questo risultato dimostrerebbe che, nel caso dei pianeti, Tolomeo non inventò i dati, ma si dedicò a osservazioni accurate con buoni risultati[109].

Concentriamoci ora sui metodi impiegati nelle osservazioni realizzate con l'astrolabio armillare (eclittico). Pappo descrive un metodo puramente osservativo per allineare l'anello eclittico con la posizione reale dell'eclittica in cielo senza conoscere la posizione del Sole nel momento di osservazione: ad ogni posizione del Sole corrisponde una e una sola posizione in cui l'anello eclittico proietta la propria ombra in se stesso; se poi anche l'anello girevole esterno, rivolto verso il Sole, proietta la propria ombra in se stesso, siamo certi di aver allineato correttamente l'anello eclittico.
Sappiamo che Bernhard Walter eseguì una serie di misurazioni con l'astrolabio armillare nel 1503-4 a Norimberga. Egli usò un metodo ancora diverso per allineare l'anello eclittico: determinava la declinazione e la longitudine del Sole dalla

[106] Si veda J. P. Britton, *Models and precision: The Quality of Ptolemy's Observations and Parameters* 1992, pp. 117-122.
[107] Si veda O. E. Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, vol.1, Berlino, 1975, p. 284.
[108] Come riporta G. Strano, in *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike Syntaxis*, si veda G.Strano, *Claudio Tolomeo e Tycho Brahe: Tradizione e innovazione negli strumenti per l'osservazione astronomica*, Tesi di dottorato in Storia della Scienza, Università di Firenze 2004; pp. 85-89.
[109] *Ivi*, pp. 91-95

misura della distanza zenitale meridiana del Sole, eseguita con il triquetro, e, usava nell'osservazione pomeridiana con l'astrolabio armillare il valore della longitudine (calcolato al meridiano) opportunamente corretto per il tempo trascorso dal mezzogiorno locale. Questo metodo venne descritto anche da Niccolò Copernico (1473-1543) nel suo *De revolutionibus* con il triquetro sostituito dal quadrante. Inoltre, sempre a Walter viene attribuito il primo uso delle osservazioni di Venere (anziché della Luna, come descritto da Tolomeo) per determinare le longitudini delle stelle di riferimento mediante le quali è possibile misurare con l'astrolabio armillare le coordinate delle altre stelle (cfr. catalogo stellare di Tolomeo) e dei pianeti.
Anche Tycho Brahe costruì un astrolabio armillare nel 1581 seguendo la descrizione di Tolomeo, ma lo criticò presto a causa dei problemi di simmetria che si presentavano misurando le coordinate celesti rispetto all'eclittica. Infatti, la presenza dei due assi di rotazione, quello equatoriale e quello eclittico, faceva sì che gli anelli interni, dipendenti dal secondo asse, si flettessero più o meno verso il basso a seconda della posizione rispetto all'orizzonte del particolare astro osservato. Inoltre, dal momento che le conoscenze di trigonometria sferica (ormai acquisite dagli astronomi europei) permettevano di determinare le coordinate eclittiche degli astri dalle osservazioni compiute in coordinate equatoriali, Tycho ripensò completamente la funzione e l'assetto dello strumento: ridusse il numero degli anelli (solo uno e mezzo nel modello più avanzato) e, soprattutto, eliminò il secondo asse eclittico; in tal modo, gli strumenti mostravano un'ottima simmetria e un perfetto bilanciamento in qualunque direzione li si ruotava.

Infine, accenniamo ad un articolo volto allo studio dei meriti e delle limitazioni dell'astrolabio armillare[110]. Allo scopo è stata realizzata una replica dello strumento con cui sono state eseguite misurazioni di latitudini e longitudini eclittiche dei corpi celesti. Queste osservazioni sono state poi confrontate con quelle riportate da Tolomeo nell'*Almagesto* e con quelle effettuate da Bernhard Walter nel 1503-4 a Norimberga. Dallo studio è possibile trarre, inoltre, le principali cause di errore sulle osservazioni condotte con lo strumento: errori nella costruzione dello strumento, come la differenza tra il valore reale e strumentale dell'obliquità dell'eclittica e l'eccentricità dell'anello eclittico; errori nel posizionamento dello strumento; errori sistematici dovuti alla rifrazione atmosferica, tra cui il mancato allineamento dell'anello eclittico al tramonto (specialmente se l'allineamento avviene col metodo di Pappo); errori dovuti al valore calcolato, mediante la teoria, della longitudine del Sole (se l'allineamento avviene col metodo di Tolomeo); errori sistematici dovuti al cambiamento accidentale della posizione relativa dei singoli anelli durante le misure; errori dovuti alle dimensioni delle aperture nelle mire.

3.1.5 Il triquetro

Il triquetro aggira la difficoltà materiale di costruire una scala graduata circolare tanto grande da apprezzare minime frazioni di grado. Del resto, lo strumento equivale a una scala graduata circolare più di quanto non sembri: le estremità dei due regoli maggiori delineano un triangolo isoscele la cui base è la corda sottesa dall'angolo compreso fra due raggi di circonferenza. La divisione in 60 parti della scala graduata verticale serve poi per abbinare lo strumento alla tavola delle corde di circonferenza calcolata da Tolomeo considerando un raggio di 60 unità di lunghezza (vedere sezione 2.2.1.1). Lo strumento permette quindi di passare dalla corda, individuata con il regolo sottile, all'angolo al vertice dei due regoli maggiori; cioè alla distanza zenitale meridiana della Luna.
Tolomeo riferisce una sola osservazione eseguita col triquetro, trovando una distanza sul regolo più sottile di 51 parti e $\frac{7}{12}$: questa misura può darci un indizio su una probabile divisione in dodicesimi della scala graduata dello strumento.

Come afferma G. Strano, in *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike Syntaxis*, il commentatore Pappo appare attento ad appianare le incongruità del triquetro descritto, e costruito, da Tolomeo. Innanzitutto, il regolo più sottile deve essere rinforzato in corrispondenza del proprio perno. Inoltre, per potersi appoggiare alla scala graduata verticale, deve scivolare fra gli altri due regoli. Il regolo girevole superiore deve perciò essere separato quanto basta dal regolo con la base. Il terzo regolo deve anche essere più corto della scala graduata, o batterebbe nel perno superiore. Quanto al regolo girevole superiore, esso non può terminare ad angolo retto, o toccherebbe il regolo più sottile con uno spigolo o di piatto. Pappo credeva di risolvere il problema facendo terminare il regolo girevole superiore con uno smusso semicircolare. Aggiunge infine un secondo filo a piombo calato da metà del regolo girevole superiore fino al regolo sottile, così da cogliere la minima deviazione di entrambi dal piano del meridiano.
Teone segue il dettato di Pappo, mentre Proclo si limita ad asserire che, per determinare la parallasse e l'inclinazione della Luna lunare rispetto all'eclittica, Tolomeo introduce uno strumento che non occorre descrivere. Da un lato egli stesso lo ha descritto bene a sufficienza, dall'altro le misure che se ne ottengono possono compiersi con l'armilla meridiana. Con questa, per esempio, si può trovare l'inclinazione della Luna.
Nel tipo di strumento descritto da Tolomeo e da Pappo il regolo sottile non è graduato; dopo aver fatto un'osservazione questo viene fatto ruotare per confrontarlo con la scala graduata verticale incisa sul regolo con la base. Ciò ha il

[110] Ci riferiamo all'articolo di Jaroslaw Wlodarczyk, *Observing with the Armillary Astrolabe*, , in Journal for the History of Astronomy, Luglio 1987.

vantaggio si proteggere la scala graduata dai danni, e permette di fare la lettura con comodo quando la Luna viene traguardata con sufficiente cura. Nonostante ciò, come afferma D. J. Price, in *Strumenti di precisione fino al 1500*, è chiaramente più sicuro evitare di trasferire le letture a un'altra scala, e la modifica di graduare il regolo sottile fu apportata col tempo da Al-Battani (circa 858 - 929).
Il triquetro venne utilizzato in una forma simile da diversi astronomi in epoche successive. Copernico ne costruì uno, alto circa due metri e mezzo, che utilizzò per determinare la distanza zenitale della Luna e delle stelle al meridiano. Nel 1584 lo strumento parallattico di Copernico passò, come preziosa reliquia, nelle mani di Tycho Brahe che costruì subito una replica per adoperarla nelle proprie osservazioni. Come il triquetro di Tolomeo, lo strumento di Copernico faceva ricorso a pinnule di mira munite di semplici fori circolari: uno più piccolo dietro al quale porre l'occhio e un altro più grande rivolto verso il cielo. Questa struttura elementare introduceva nelle misure un consistente errore di collimazione, dovuto alla cosiddetta parallasse oculare: la dimensione non trascurabile dei fori di mira oculare e obiettivo faceva sì che, mentre si puntava un astro per trovarne la posizione, l'astro stesso appariva attraverso ambedue i fori anche se lo strumento non era esattamente allineato. Tycho era sorpreso nel constatare che Copernico, per la cui abilità di matematico nutriva una grandissima ammirazione, non fosse riuscito a concepire un dispositivo di mira migliore. Così, realizza un particolare dispositivo di mira mediante il quale la parallasse oculare veniva ridotta in modo drastico.

Infine, osserviamo che nella sezione "The astronomical measuring instruments of the ancient Greeks" del "Kotsanas Museum of Ancient Greek Technology" a Katakolo, in Grecia, è esposta una replica del triquetro in cui un indice, posto vicino l'estremità libera del regolo girevole superiore, scorre lungo una sottile fessura praticata nella linea mediana del regolo sottile (Fig. 43).

Fig. 43 - *The parallactic instrument of Ptolemy* esposto nel "Kotsanas Museum of Ancient Greek Technology"
(Immagine presa dal sito http://kotsanas.com/gb/exh.php?exhibit=1301008)

3.1.6 La diottra di Ipparco

A rigore il termine "diottra", che significa "osservo attraverso", vale per qualsiasi dispositivo munito di mire. Nonostante i pochi cenni della diottra di Ipparco nell'*Almagesto*, è possibile riconoscere uno strumento analogo nella descrizione fornitaci da Archimede nell'*Arenario*. Per determinare il diametro apparente del Sole, Archimede afferma di posizionare il regolo orizzontalmente su un supporto verticale, in modo da osservare il Sole basso sull'orizzonte senza danno per la vista. Messo l'occhio a una estremità del regolo, si sposta avanti e indietro un piccolo cilindro tornito verticale finché il disco solare è esattamente coperto (Fig. 44 A).

L’identificazione esclude che la diottra menzionata da Tolomeo sia attribuibile a Ipparco. Inoltre, il fatto che Archimede premetta di aver stimato l’angolo sotteso dal Sole allo stesso modo di Aristarco di Samo (c. 310 – 230 a.C.) può portare ad affermare che l’ideazione della diottra risalga a prima della metà del III secolo a.C.[111]

L’*Almagesto* non permette di capire le varianti registrate dallo strumento nel passaggio da un autore all’altro. Tolomeo stesso, al posto del cilindro tornito, pone sul regolo uno spessore o piastra (Fig. 44 B).

Pappo nel suo *Commento al quinto libro dell'Almagesto*, descrive la diottra come una guida scanalata, a coda di rondine, lunga quattro cubiti dove sono montate due piastrine rettangolari. La prima, per l’occhio, fissa a un estremo della guida, reca un piccolo foro centrale; la seconda, scorrevole lungo la scanalatura, è priva di fori (Fig. 44 B e C). Si osserva che, se la piastrina scorrevole doveva coprire il disco solare a quattro cubiti, la sua larghezza doveva essere di circa un centimetro e mezzo. Puntato lo strumento, si sposta avanti e indietro la piastrina mobile finché copre esattamente il disco del Sole o della Luna. Il rapporto fra il diametro della piastrina mobile e la sua distanza dalla piastrina fissa permette di calcolare l'angolo sotteso dal corpo celeste.

La struttura di Pappo è confermata da Teone, mentre Proclo, fermi il regolo e la piastrina oculare, pone verso il Sole una piastrina scorrevole con due fori sovrapposti (Fig. 44 C e D).

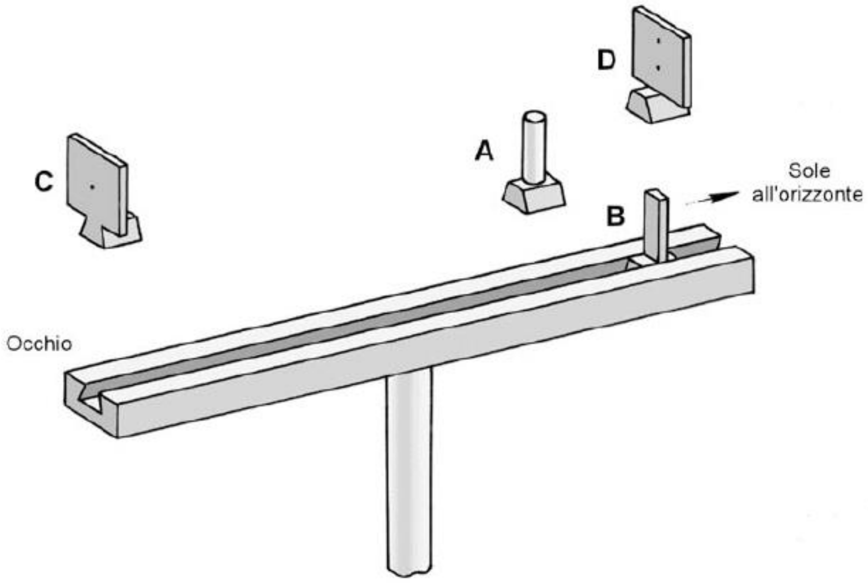


Fig. 44 – Schema della diottra di Ipparco:

A. Cilindro obiettivo di Archimede
B. Piastrina obiettiva di Tolomeo e Pappo
C. Piastrina oculare di Pappo e Proclo
D. Piastrina obiettiva di Proclo

(Immagine presa dall’articolo di G.Strano, *Strumenti alessandrini per l’osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*)

Informazioni sulla qualità dello strumento di Tolomeo emergono dai risultati delle sue osservazioni: egli afferma che il diametro apparente del Sole è costante nei limiti di osservazione, ma oggi sappiamo che varia tra $32' \, 36''$ e $31' \, 31''$, e sostiene che il diametro apparente della Luna è variabile, sapendo però che varia tra $33' \, 31''$ e $29' \, 22''$.

Un ulteriore indizio dello strumento usato da Tolomeo emerge da un inconveniente della misura rilevato da Archimede. In teoria, l’angolo sotteso dal disco solare è dato dal rapporto fra il diametro del cilindro coprente e la distanza del cilindro dall’occhio di chi osserva. In pratica, però, l’occhio non vede da un punto, ma attraverso l’apertura circolare della pupilla, così che quando l’osservatore scorge il Sole del tutto coperto, il cilindro è più vicino del dovuto. Con opportune valutazioni, Archimede afferma, correttamente, che il diametro solare apparente può solo dirsi compreso tra $\frac{1}{200}$ e $\frac{1}{164}$ dell’angolo retto, ovvero tra $27'$ e $32' \, 55{,}6''$.

Come afferma G. Strano, in *Strumenti alessandrini per l’osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematiké syntaxis*, questo sembra essere il problema che induce Tolomeo a diffidare della diottra e a sostituirla con lo studio dei diametri apparenti dell’ombra proiettata dalla Terra e della Luna in eclisse. Ciò fa pensare che Tolomeo adotti una diottra ancora priva della piastrina oculare forata (Fig. 44 C) che, riducendo il diametro della pupilla, avrebbe reso l’osservazione più precisa. L’introduzione della piastrina oculare forata è perciò successiva alla *Syntaxis* e anteriore

[111] G. Strano, *Strumenti alessandrini per l’osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike Syntaxis*, p. 89.

all'attività di Pappo. L'ulteriore innovazione di Proclo avviene, invece, ancora una volta, in ambito ipotetico: poiché il Sole veniva coperto dalla piastrina, probabilmente, il metodo di misura era più conveniente con la conseguente riduzione del bagliore ma, non si aveva la certezza che dai due fori sovrapposti trapelasse proprio i bordi del disco solare.

Infine, osserviamo che nella sezione "The astronomical measuring instruments of the ancient Greeks" del "Kotsanas Museum of Ancient Greek Technology" a Katakolo, in Grecia, è esposta una replica della diottra di Ipparco (Fig. 45).

Fig. 45 - *The four-cubit dioptra of Archimedes* esposto nel "Kotsanas Museum of Ancient Greek Technology"
(Immagine presa dal sito http://kotsanas.com/gb/exh.php?exhibit=1301009)

3.2 Determinazione della linea meridiana

Nell'arco di un giorno l'estremità dell'ombra di uno gnomone (ossia un elemento verticale) percorre una curva simmetrica su un piano orizzontale rispetto alla linea meridiana (direttrice nord-sud).
Il Sole nel suo moto apparente diurno incrocia il meridiano celeste del luogo dell'osservatore nel momento della sua massima altezza sull'orizzonte, ovvero all'istante del mezzogiorno solare vero locale: in quell'attimo l'ombra dello gnomone si proietta sul piano orizzontale lungo la linea meridiana e raggiunge la sua minima lunghezza (Fig. 46).

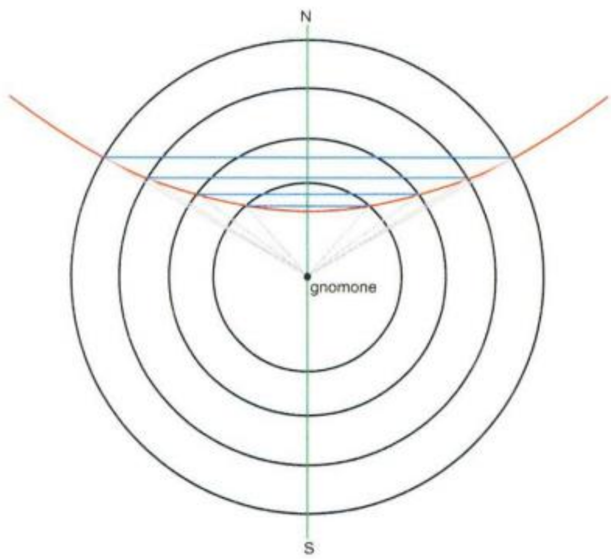


Fig. 46 – È disegnata in rosso la curva dell'estremità delle ombre di uno gnomone in una giornata invernale nell'emisfero nord. (Immagine dal sito https://cspace.spaggiari.eu/pub/VRII0006/Geografia%20Astronomica/ESPERIENZE%20E%20MISURE%20-%20linea%20meridiana.pdf, N. Scarpel)

I raggi solari che incrociano lo gnomone generano, nel loro percorso diurno, una superficie conica il cui asse è parallelo alla linea immaginaria che unisce l'estremità dello gnomone col polo nord celeste del luogo di osservazione. L'intersezione tra questa superficie conica e il piano orizzontale, su cui è fissato perpendicolarmente ad esso lo gnomone, è una curva che alle latitudini intermedie tra i poli e l'equatore è un ramo di iperbole (Fig. 47). Nel solstizio estivo boreale (declinazione del Sole $\delta = +23° 27'$) questa avrà la sua massima concavità verso sud, mentre in quello invernale boreale (declinazione del Sole δ = −23° 27') la sua massima concavità è verso nord (declinazione δ = −23° 27'). Da un solstizio all'altro la curva tende a degenerare in una retta che sarà ottenuta esattamente nei giorni degli equinozi (declinazione del Sole δ = 0°). La curva di intersezione rappresenta, dunque, il percorso diurno dell'estremità dell'ombra di uno gnomone e l'asse di simmetria della curva è la linea meridiana.

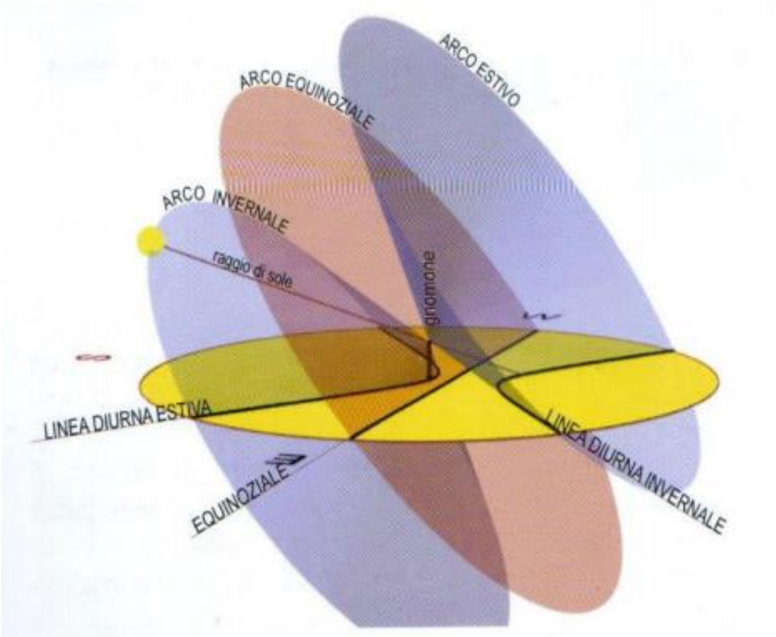


Fig. 47 – Superficie conica generata dai raggi solari che incrociano, nell'arco di un giorno, l'estremità di uno gnomone. Se il Sole ha δ = 0° la superficie conica degenera in un piano e l'intersezione è una retta, la linea est-ovest.
(Immagine dal sito https://cspace.spaggiari.eu/pub/VRII0006/Geografia%20Astronomica/ESPERIENZE%20E%20MISURE%20-%20linea%20meridiana.pdf, N. Scarpel)

Descriviamo ora due metodi per determinare la linea meridiana, necessaria per eseguire correttamente le misurazioni con gli strumenti osservativi descritti da Tolomeo nell'*Almagesto* (eccetto la diottra di Ipparco). Entrambi i metodi si basano sulle ombre di uno gnomone su un piano orizzontale: il metodo del Cerchio Indiano e il metodo delle tre ombre di Diodoro di Alessandria (I secolo a.C.).

Il primo metodo è un procedimento tradizionale dove sono necessari pochi semplici elementi: uno gnomone, una corda, un filo a piombo e una livella per assicurare rispettivamente la verticalità dello gnomone e l'orizzontalità del piano delle ombre e, un gesso per segnare l'estremità delle ombre. Innanzitutto, si sceglie un luogo che possa essere illuminato dal Sole per diverse ore prima e dopo mezzogiorno e poi, su un piano orizzontale si tracciano, con una cordicella, varie circonferenze concentriche attorno alla base dello gnomone aventi un raggio diverso. Nel corso della mattina si segnano i punti in cui l'estremità dell'ombra dello gnomone interseca le circonferenze. Nel corso del pomeriggio si procede allo stesso modo e si tracciano i punti in cui l'estremità dell'ombra dello gnomone cade sulle stesse circonferenze del mattino, dalla parte opposta. Si congiungono le coppie di punti che si trovano sulla stessa circonferenza ottenendo così delle corde che devono risultare parallele tra loro. Si trovano i punti medi di tali corde e si traccia una retta che unisca tali punti con il punto base dello gnomone. Questa retta è la linea meridiana (Fig. 48). Teoricamente basterebbe una sola circonferenza e una sola corda, ma con più letture si può controllare l'allineamento dei punti medi fra loro e il risultato finale è più preciso.

Fig. 48 – Ombra del mattino (a sinistra), ombra del pomeriggio (al centro) e individuazione della linea meridiana (a destra).
(Immagine dal sito https://cspace.spaggiari.eu/pub/VRII0006/Geografia%20Astronomica/ESPERIENZE%20E%20MISURE%20-%20linea%20meridiana.pdf, N. Scarpel)

Grazie ad un riferimento di al-Biruni nel suo trattato sulle *Ombre*, è stata identificata una sezione dell'*Analemma* (andato perduto) di Diodoro riguardante un ingegnoso metodo per la determinazione della linea meridiana mediante tre ombre qualsiasi di uno gnomone. Inoltre, il metodo di Diodoro è stato ritrovato anche negli scritti del geodesista romano Igino (circa 100 a.C.). Il metodo si basa sulle seguenti considerazioni.

In un piano orizzontale si considerano tre differenti ombre, GA, GB, GC di uno gnomone GF, di lunghezza g (Fig. 49). Si vuole trovare la linea meridiana GS. Si assume che l'osservazione avvenga nell'emisfero nord e che il Sole abbia una declinazione δ negativa (ossia autunno-inverno). Si considera l'estremità F dello gnomone come il centro della sfera celeste: il Sole sorge, nell'orizzonte di F, in H e tramonta in Δ. N indica il polo nord celeste del luogo di osservazione. Dunque, FN rappresenta l'asse del cono circolare descritto dai raggi solari che incrociano l'estremità F dello gnomone nel loro percorso diurno. Il cono interseca il piano orizzontale passante per il punto base G dello gnomone nell'iperbole ABC. Si considera sul cono la circonferenza H′CΔ′ passante per l'estremità dell'ombra dello gnomone C. Poiché questa circonferenza è parallela al percorso diurno del Sole HΔ, e quindi al piano equatoriale, interseca il piano orizzontale passante per G anche in un punto D tale che il segmento CD è parallelo alla direzione est-ovest. La perpendicolare alla direzione di CD, passante per G, corrisponde alla linea meridiana.

Dunque, il problema consiste nel trovare il punto di intersezione D, noto il punto C. A questo scopo si determinano i punti A′ e B′ in cui i raggi solari FA e FB intersecano la circonferenza H′CΔ′. Si proietta perpendicolarmente al piano orizzontale A′ su A″ e B su B″. Pertanto, A″B″ è la proiezione sul piano orizzontale della corda A′B′ che appartiene al piano della circonferenza H′CΔ′. D'altra parte, il piano del triangolo ABF interseca il piano orizzontale nella linea AB. Segue che la circonferenza H′CΔ′ attraversa il piano orizzontale nel punto D di intersezione del segmento AB col segmento A″B″. CD indica la direzione est-ovest e PGS la linea meridiana.

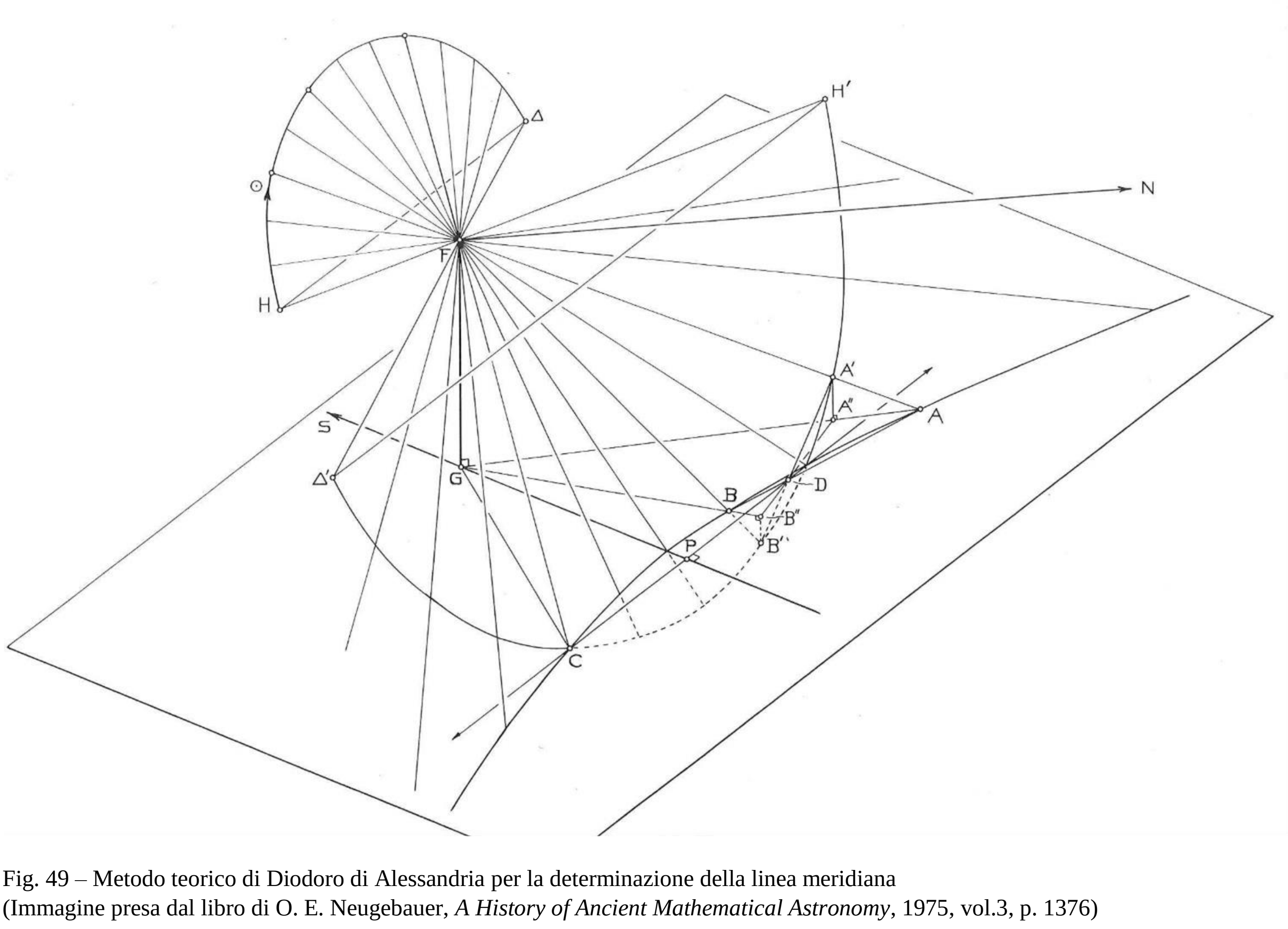


Fig. 49 – Metodo teorico di Diodoro di Alessandria per la determinazione della linea meridiana
(Immagine presa dal libro di O. E. Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, 1975, vol.3, p. 1376)

Vediamo nella pratica come si procede. Prima di tutto, si determinano le distanze d_1=FC, d_2=FA, d_3=FB realizzando in dimensioni reali i tre triangoli retti [F]GC, [F]GA, [F]GB dove GA, GB e GC sono le lunghezze, note, delle ombre e G[F]=g è la lunghezza dello gnomone (Fig. 50a). La Fig. 50b rappresenta il piano orizzontale su cui si tracciano le ombre dello gnomone (GA, GB, GC) in dimensione e direzione reali. Dalla Fig. 50a si ricavano le distanze GA″ e GB″ e, perciò, dall'intersezione di A″B″ con AB, è possibile trovare il punto D.

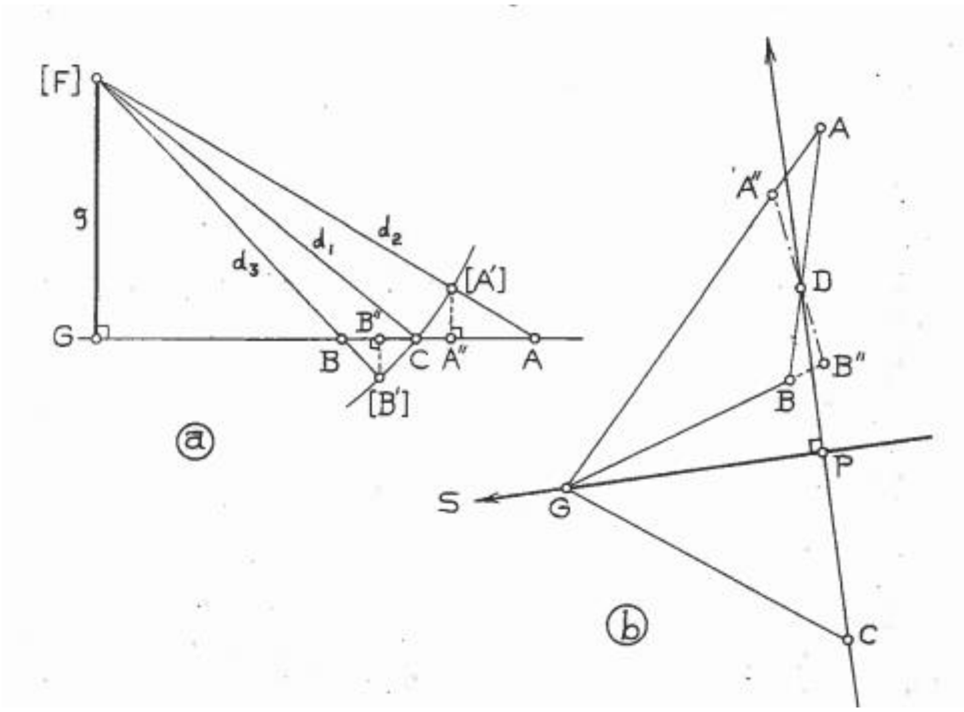


Fig. 50 – Metodo pratico di Diodoro di Alessandria per la determinazione della linea meridiana: a) piano verticale, b) piano orizzontale.
(Immagine presa dal libro di O. E. Neugebauer, *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, 1975, vol.3, p. 1377)

Capitolo 4
Conclusioni

4.1 Osservazioni sulle teorie planetarie dell'*Almagesto*

Nel capitolo 3 abbiamo discusso sull'accuratezza delle osservazioni del Sole, della Luna, delle stelle e dei cinque pianeti, effettuate da Tolomeo con gli strumenti che descrive nell'*Almagesto.* Facciamo ora alcune considerazioni sui risultati ottenuti e sull'approccio impiegato nell'elaborazione delle varie teorie presentate dell'*Almagesto*.[112]

Quando abbiamo descritto la teoria solare (sezione 2.2.2.1) è stato detto che le quattro osservazioni di equinozi e solstizi realizzate da Tolomeo erano sbagliate con uno scarto di un giorno, cioè i fenomeni astronomici risultano essere avvenuti un giorno dopo rispetto a quanto indicato nelle sue misure. Tutti gli autori secondari considerati nel presente lavoro di tesi concordano sul fatto che questo giorno di differenza venne in qualche modo sottratto da Tolomeo: la sua grande fiducia nei dati di Ipparco potrebbe averlo portato ad arrotondare le sue accurate osservazioni nei limiti dell'errore che considerava accettabile. Dalle osservazioni sugli equinozi, Tolomeo determinò la lunghezza dell'anno tropico ottenendo lo stesso valore trovato precedentemente da Ipparco, che era di circa 7 minuti maggiore di quello reale. Questa differenza comportava molte conseguenze per le teorie dei moti planetari; in particolare, implicava che la posizione media del Sole, derivata dalle sue tavole, diventasse progressivamente sempre più errata col passare del tempo al punto che, a partire dal IX secolo d.C., gli astronomi arabi furono indotti ad introdurre delle correzioni.
Inoltre, un'osservazione importante riguarda il fatto che, dai valori delle lunghezze delle stagioni (identici a quelli trovati da Ipparco), Tolomeo conclude che l'apogeo solare è fisso rispetto all'eclittica. Oggi sappiamo che questo è errato in quanto, se si esclude la precessione, la linea degli apsidi dell'orbita della Terra ruota lentamente verso est di circa 12″ all'anno. Questo difetto nella teoria solare venne corretto solo nel IX secolo.
Diversi autori trovano molto strano che Tolomeo non abbia fatto alcun tentativo per migliorare la precisione della teoria solare. Inoltre, che a causa dell'errore commesso nel calcolo del moto medio del Sole e alla sua propagazione attraverso il calcolo delle posizioni lunari, Tolomeo confermò anche il valore, troppo piccolo, ottenuto da Ipparco sulla precessione degli equinozi. Alcuni astronomi moderni hanno criticato Tolomeo in modo severo, sostenendo che avesse avuto una considerazione per il suo grande predecessore così smodata da adottare i suoi valori senza sottoporli a verifica. Altri, invece, sostengono che il suo lavoro fosse essenzialmente teorico: il suo scopo era di sviluppare ed esporre un quadro geometrico del mondo. Al di là delle singole opinioni, resta il fatto che la teoria del moto solare di Tolomeo era in grado di rappresentare il moto apparente del Sole, e quindi la velocità variabile lungo l'eclittica, con un errore di meno di un minuto d'arco.

Nella teoria lunare, abbiamo visto che per spiegare la seconda anomalia (o evezione), Tolomeo introdusse un meccanismo che variava la distanza dell'epiciclo della Luna dalla Terra. Quando Terra, Sole e Luna erano in linea (ovvero la Luna era alle sigizie), il meccanismo restava inoperoso, ma altrove spingeva l'epiciclo verso la Terra, soprattutto quando Luna, Terra e Sole, formavano un angolo retto (ovvero la Luna era in quadratura). Il modello che ne risultava era soddisfacente in relazione al calcolo delle posizioni della Luna, ma implicava che la distanza della Luna dalla Terra variasse fra 33 e 64 raggi terrestri. Un tale scarto nelle distanze avrebbe dovuto far variare il diametro apparente della Luna di un fattore di quasi due, ma variazioni di tale entità non erano mai state osservate. Questo disaccordo rispetto all'osservazione poteva disturbare il lettore dell'*Almagesto* che cercava qualcosa di più esatto di tavole delle posizioni, ma molti autori moderni concordano sul fatto che il modello geometrico, ideato da Tolomeo per rappresentare le due anomalie, sia una testimonianza dell'alto grado di ingegnosità e sofisticatezza con cui riuscì a far fronte alle difficoltà neanche sospettate, secondo quanto ci è pervenuto, dai suoi predecessori greci.

L'*Almagesto* contiene un catalogo di 1.022 stelle fisse, disposte in 48 costellazioni, in cui Tolomeo indica i valori della longitudine, della latitudine e della luminosità apparente (magnitudine) di ognuna. Questo catalogo è il primo che ci è stato tramandato e costituisce uno dei più importanti raggiungimenti dell'astronomia antica. Si è molto discusso se e fino a che punto tale catalogo incarnasse effettivamente un lavoro personale di Tolomeo o piuttosto fosse una semplice derivazione dall'opera di Ipparco. Ad esempio, l'evidenza di un errore sistematico nelle longitudini eclittiche delle stelle ha portato qualche storico ad affermare che Tolomeo si sarebbe limitato a prendere le posizioni dal catalogo di Ipparco e ad aumentare la longitudine di ciascuna stella di 2° 40′ per tener conto della precessione accumulata nel frattempo. Nonostante sembri probabile che non si tratti interamente di un prodotto delle osservazioni di Tolomeo, essendo ampiamente evidenti i riferimenti ai risultati di Ipparco, molti autori (tra cui quelli consultati nel presente lavoro di tesi) concordano sul fatto che il catalogo presente nell'*Almagesto* non costituisca un mero aggiornamento di un catalogo già esistente. Sembra certo, per esempio, che Tolomeo fosse il primo ad utilizzare sistematicamente le coordinate di latitudine e di longitudine eclittiche.

[112] Le considerazioni finali, riportate nel paragrafo 4.1, sono state dedotte anche grazie ad alcune osservazioni degli autori O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974; M. Hoskin, *Storia dell'Astronomia*, 2017.

Come è Tolomeo stesso a spiegare, il catalogo può essere prontamente adattato ad un'epoca differente aggiungendo alle longitudini eclittiche una costante per la precessione. Infatti, il risultato finale dello studio di Tolomeo sulla natura della precessione delle stelle fisse può essere riassunto con le seguenti due espressioni:

$$\lambda(t) = \lambda(t_0) + p(t - t_0)$$
$$\beta(t) = \beta(t_0)$$

dove λ indica la longitudine eclittica, β la latitudine eclittica e p la velocità di precessione che Tolomeo assume costante e pari a 1° per secolo (t e t_0 sono misurate in secoli). A patto di sostituire il valore di p con quello corretto (1° in 71 anni), queste relazioni sono valide anche in astronomia moderna.

Per quanto riguarda i cinque pianeti, osserviamo che Tolomeo afferma di esser stato il primo ad elaborarne una teoria basata esclusivamente su combinazioni di moti circolari uniformi. Poiché nella teoria del Sole e nel Primo Modello Lunare riconosce il suo debito a Ipparco, la sua dichiarazione fa pensare che le teorie esposte negli ultimi cinque Libri (dal Libro IX al Libro XIII) dell'*Almagesto* siano dovute interamente a egli stesso.
Abbiamo visto che nelle teorie del moto in longitudine dei pianeti superiori (Marte, Giove e Saturno) Tolomeo riproduce la seconda anomalia accoppiando il moto del Sole col moto del pianeta sull'epiciclo mediante la relazione $\omega = \omega_t + \omega_a$. Questo fatto è comprensibile se guardiamo le teorie da un punto di vista copernicano: il moto del pianeta sull'epiciclo nella teoria geocentrica è un semplice riflesso del moto annuale della Terra attorno il Sole nella disposizione eliocentrica. Nei pianeti inferiori (Venere e Mercurio), invece, il moto annuale della Terra si riflette nel moto del centro dell'epiciclo sul deferente eccentrico.
Molti autori moderni sono d'accordo nell'affermare che l'introduzione del punto equante di Tolomeo costituisca l'aspetto più innovativo e più controverso della teoria planetaria esposta nell'*Almagesto*. Questo artificio fu aspramente criticato in epoche successive in quanto comportava una violazione del principio di moto circolare uniforme, dal momento che il centro dell'epiciclo, benché in moto lungo una circonferenza, si muove con velocità non uniforme rispetto al centro di tale cerchio. Molti secoli dopo la scrittura dell'*Almagesto*, Copernico, nel *De Revolutionibus*, afferma che uno degli incentivi nella sua ricerca di una teoria planetaria alternativa fu proprio quello di non riuscire ad accettare l'esistenza del punto equante e, dunque, di voler trovare un modo in cui ripristinare il vecchio dogma del moto circolare uniforme.
Oggi sappiamo che le teorie elaborate nell'*Almagesto* risultavano essere un'ottima approssimazione del moto reale dei pianeti in quanto esiste un'analogia tra il punto equante di Tolomeo e il fuoco vuoto di un'ellisse kepleriana. La prima delle due leggi pubblicate da Keplero nel 1609 ci dice che un pianeta si muove intorno al Sole su un'orbita ellittica di cui il Sole occupa uno dei due fuochi. La seconda legge di Keplero prescrive la velocità del pianeta nella sua orbita: la linea che congiunge il pianeta al Sole (il raggio vettore) si muove all'interno dell'ellisse in modo tale da descrivere aree uguali in tempi uguali. Segue che il pianeta si muove nello spazio con una velocità minore quando è più lontano dal Sole (in questa parte dell'orbita il raggio vettore ha una lunghezza maggiore di quella media e, dunque, l'arco di traiettoria percorsa è minore), e con velocità maggiore quando è più vicino al Sole (qui il raggio vettore ha lunghezza minore di quella media e, dunque, l'arco di traiettoria percorsa è maggiore). Ci chiediamo ora come apparirebbero i moti planetari a un ipotetico osservatore situato nel fuoco dell'ellisse non occupato dal Sole, ossia nel "fuoco vuoto" (Fig. 51). Quando il pianeta è nella parte della sua orbita più lontana dal Sole (e si muove nello spazio più lentamente del solito), esso si trova alla massima vicinanza a quest'osservatore nel fuoco vuoto; la minore velocità è perciò mascherata dalla prossimità del pianeta all'osservatore. Similmente, anche quando il pianeta è più vicino al Sole (e si muove più velocemente) il fatto rimane ignoto all'osservatore, che è troppo lontano per poterlo percepire. Di conseguenza, il pianeta visto dal fuoco vuoto, sembra muoversi in cielo con una velocità angolare quasi uniforme. Ovvero, il moto del pianeta nella sua orbita intorno al Sole (poco importa se quest'orbita sia un'ellisse quasi circolare o un vero cerchio) è ben rappresentato da un modello in cui il pianeta sembra muoversi con velocità angolare uniforme se osservato dal fuoco vuoto (in questo caso di un'orbita ellittica), o (nel caso di un'orbita circolare) da un punto equante localizzato in modo simile, ossia dal lato opposto del Sole e alla stessa distanza dal centro. Poiché ciò vale particolarmente per la Terra, ne segue che vale anche per il moto del Sole relativamente alla Terra. Ovviamente Tolomeo voleva rappresentare il moto apparente del pianeta rispetto alla Terra (e non al Sole) ma questo è una traiettoria composta, in quanto formato dal moto del pianeta intorno al Sole e dal moto del Sole rispetto alla Terra.

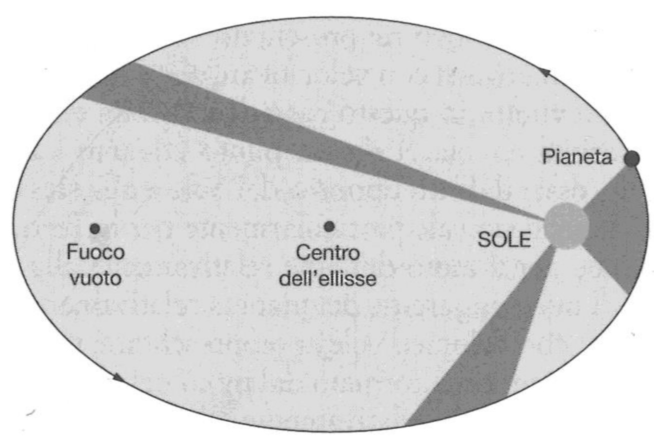


Fig. 51 – Le prime due leggi di Keplero ci dicono che un pianeta si muove intorno al Sole su un'orbita ellittica di cui il Sole occupa uno dei fuochi, e che il raggio vettore che unisce il Sole al pianeta descrive in tempi uguali aree uguali. Di conseguenza, il pianeta si muove più velocemente quando è più vicino al Sole, e più lentamente quando è più lontano dal Sole. Il cerchio equante è stato uno strumento utile per Tolomeo a causa dell'analogia fra il punto equante e il fuoco vuoto dell'ellisse. (Nella figura l'eccentricità dell'ellisse è molto esagerata: con l'eccezione di Mercurio, che è difficile da osservare a causa della sua perpetua vicinanza al Sole, le orbite planetarie sono in effetti quasi circolari.)
(Immagine presa dal libro di M. Hoskin, *Storia dell'astronomia*, 2017, p. 65)

Infine, per quanto concerne le teorie del moto in latitudine dei pianeti, molti autori sostengono che in nessun'altra parte dell'*Almagesto* si trova una teoria tanto complessa quanto quella presentata nel Libro XIII. Una delle ragioni per cui le teorie in latitudine planetarie di Tolomeo sono così complicate può essere compresa se, nuovamente, adottiamo il punto di vista copernicano. Ogni pianeta del sistema solare descrive un'orbita che giace su un piano passante per il centro del Sole (o molto vicino), così come l'orbita della Luna appartiene ad un piano passante per il centro della Terra (in entrambi i sistemi, tolemaico e copernicano). Pertanto, il calcolo della latitudine eliocentrica di un pianeta secondo Copernico, era all'incirca equivalente al calcolo della latitudine geocentrica della Luna secondo Tolomeo. Se, però, si pensa che la trasformazione della latitudine eliocentrica in un sistema copernicano alla latitudine geocentrica in un sistema tolemaico non è affatto semplice, il calcolo diretto della latitudine geocentrica di un pianeta, ovvero il tentativo effettuato da Tolomeo, costituisce un'impresa ancora più complessa.

4.2 Lavori astronomici minori di Tolomeo: le *Tavole Manuali* e le *Ipotesi Planetarie*

Tolomeo compose numerose opere dopo l'*Almagesto*. Escluso il lavoro astrologico *Tetrabiblos*, alcune fra queste opere riguardano argomenti a carattere non astronomico (come l'*Ottica*, la *Musica* e la *Geografia*), ma altre integrano l'*Almagesto* in vari modi. Concludiamo il lavoro di tesi descrivendo brevemente i due lavori astronomici minori di Tolomeo che esercitarono una grande influenza sull'astronomia del Medioevo: le *Tavole Astronomiche Manuali* e le *Ipotesi Planetarie*.[113]
Osserviamo, innanzitutto, che entrambe le opere sono dedicate allo stesso Syrus dell'*Almagesto*. Le *Tavole Manuali* sono un insieme di tavole astronomiche, basate su quelle già presentate nell'*Almagesto*, ma rese più convenienti da un punto di vista pratico. Per esempio, i moti medi sono forniti ad intervalli di 25 anni anziché in raggruppamenti di 18 anni come nell'*Almagesto*. L'impostazione di queste tavole divenne la norma per la stragrande maggioranza delle tavole astronomiche durante tutto il periodo medievale, sia nel mondo latino che nel mondo arabo.
Consideriamo ora il Tolomeo delle *Ipotesi Planetarie*. Questo lavoro non si è ben conservato nel tempo; solo una parte del Libro I ci è pervenuta nell'originale testo greco, mentre del Libro II possediamo solo una traduzione araba. Nella prefazione all'opera, Tolomeo dichiara di volersi occupare dei moti celesti non più da un punto di vista matematico, come nell'*Almagesto*, ma in un modo più generale facendo appello all'immaginazione. Vengono persino dati dei suggerimenti ai costruttori di strumenti per rappresentare l'intero universo mediante modelli meccanici.
Le *Ipotesi Planetarie* sono considerate un compendio dell'*Almagesto*. Presentano alcune piccole semplificazioni, come l'arrotondamento di alcuni parametri numerici caratteristici dei modelli geometrici in valori più convenienti, ma anche importanti perfezionamenti, come avviene nella teoria del moto in latitudine dei cinque pianeti. Infatti, nel caso di

[113] I due lavori astronomici minori di Tolomeo, le *Tavole Astronomiche Manuali* e le *Ipotesi Planetarie*, sintetizzati nel paragrafo 4.2, sono ampiamente descritti dagli autori O. Pedersen, *A survey of the Almagest*, 1974; G. J. Toomer, *Tolomeo e i suoi predecessori greci*, in *L'astronomia prima del telescopio* a cura di C. Walker; M. Hoskin, *Storia dell'Astronomia*, 2017.

Venere e Mercurio, i piani dei deferenti non oscillano più rispetto al piano dell'eclittica e formano un angolo costante anche con i piani degli epicicli mentre, nel caso dei pianeti superiori, i piani degli epicicli si mantengono sempre paralleli al piano dell'eclittica. Osserviamo che quest'ultima proprietà è comprensibile da un punto di vista copernicano in cui il moto del pianeta sull'epiciclo è un semplice riflesso del moto annuale della Terra attorno il Sole.
Tuttavia, lo scopo di Tolomeo nelle *Ipotesi Planetarie* non è solo quello di voler dare un'esposizione semplificata dei moti celesti, ma di provare a descrivere la struttura fisica dell'universo e a determinare l'ordine e le distanze di tutti i pianeti, deducendo così una dimensione del mondo nel suo insieme. Come abbiamo visto nella sezione 2.2.1.3, Tolomeo, nell'*Almagesto*, aveva calcolato solo le distanze assolute della Luna e del Sole. La prima era stata trovata da osservazioni della parallasse lunare, e la seconda era stata dedotta con un ragionamento basato sulle osservazioni di eclissi lunari. A causa, però, dell'impercettibile parallasse dei cinque pianeti, non era possibile trovare le loro distanze e, persino il loro ordine, poteva determinarsi solo con un argomento che passava da ragioni plausibili a congetture più o meno arbitrarie. A questo argomento, le *Ipotesi Planetarie* ne aggiunge un altro: poiché le teorie della Luna e di Mercurio prevedono un numero complessivo di moti maggiore rispetto a quello degli altri pianeti, i due corpi celesti devono trovarsi più vicino degli altri alla sfera dell'Aria, dove il moto è in abbondanza.
Nel Libro I, la dimensione del sistema planetario tolemaico viene calcolata dalle seguenti supposizioni:

1) l'ordine dei pianeti è lo stesso di quello presente nell'*Almagesto*;
2) il modello di ciascun pianeta è un meccanismo fisico, di cerchi eccentrici ed epicicli, compreso in un guscio sferico di vario spessore concentrico alla Terra;
3) questi gusci, o sfere, sono disposti in maniera tale che la superficie esterna di una sfera relativa ad ogni corpo celeste deve coincidere con la superficie interna della sfera del corpo immediatamente superiore, cioè la massima distanza di Marte, per esempio, equivale alla minima distanza di Giove.

Quest'ultima supposizione fa in modo che i gusci riempiano completamente lo spazio disponibile e si basa sull'assunzione che non esiste spazio vuoto nell'universo.
Guidato da questo principio, Tolomeo sfrutta il fatto che, secondo l'*Almagesto*, la distanza della Luna dal centro della Terra varia fra 33 e 64 raggi terrestri. Pertanto, a partire dal centro dell'universo, Tolomeo include tutte le sfere elementari della Terra, dell'Acqua, dell'Aria e del Fuoco in un guscio spesso 33 raggi terrestri e inserisce il meccanismo fisico della teoria lunare nella regione di una sfera compresa tra 33 e 64 raggi terrestri. Successivamente, impone che la distanza minima di Mercurio doveva essere uguale a 64 raggi terrestri e, dal rapporto dell'epiciclo di Mercurio col suo deferente, calcola la distanza massima del pianeta. Pone questa distanza uguale alla distanza minima di Venere e, procedendo nello stesso modo, posiziona, infine, le stelle fisse alla distanza massima del pianeta più esterno, Saturno. In questo modo, perviene a un universo il cui raggio è 19.865 volte maggiore del raggio della Terra, ossia di circa 120 milioni di chilometri. Osserviamo che questa misura è addirittura minore della reale distanza Terra-Sole (circa 150 milioni di chilometri) e, anche se oggigiorno può sembrare molto piccola, alcuni autori sostengono che è proprio con Tolomeo che l'universo divenne troppo grande perché la mente umana potesse comprenderlo davvero.
Dunque, dal Libro I delle *Ipotesi Planetarie* deduciamo il sistema tolemaico dell'universo di sfere (Fig. 52).

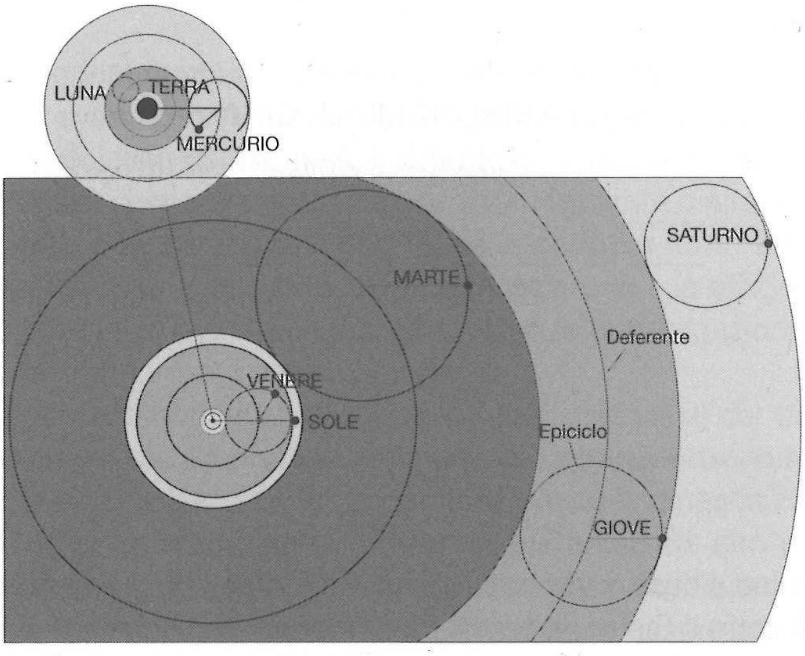


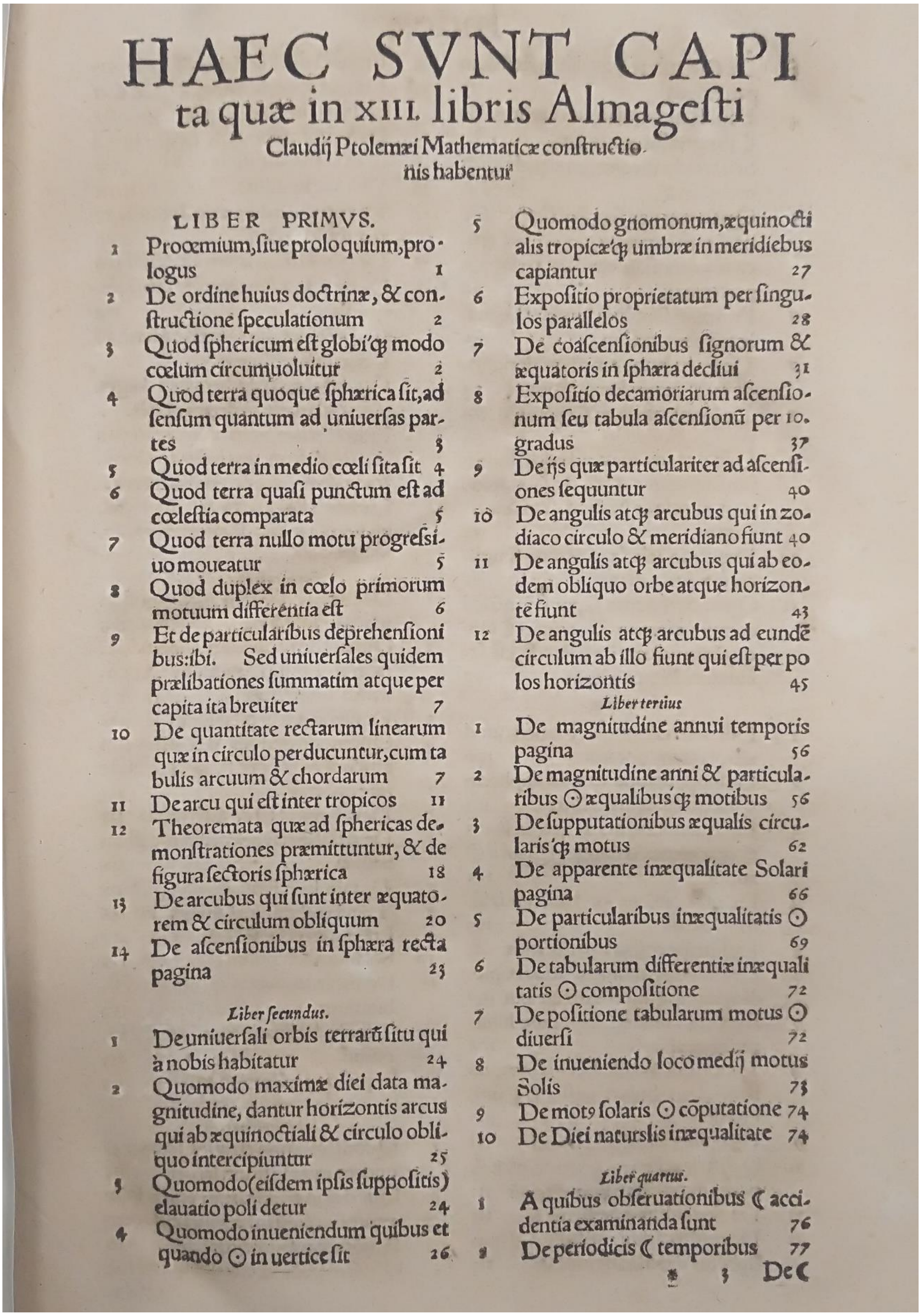
Fig. 52 – Il sistema tolemaico nelle sue grandi linee. Ogni distanza dalla Terra è occupata da uno, e un solo, pianeta. Inoltre, i centri degli epicicli che trasportano Mercurio e Venere sono sempre allineati col Sole (medio), mentre i raggi degli epicicli di Marte, Giove e Saturno sono paralleli alla linea congiunge la Terra col Sole (medio). Dopo Copernico sappiamo che questo coinvolgimento del Sole nella geometria degli altri pianeti riflette il fatto che la Terra è un luogo di osservazione in orbita intorno al Sole.
(Immagine presa dal libro di M. Hoskin, *Storia dell'astronomia*, 2017, p. 71)

Nel Libro II Tolomeo espone dettagliatamente il meccanismo all'interno di ciascuna sfera facendo alcune considerazioni fisiche. Innanzitutto, le sfere sono solide, consistono di etere celeste e sono completamente penetrabili alla luce. Sono perfettamente circolari e ruotano attorno i diversi assi senza vincoli o resistenze. Non si muovono per azione di forze esterne, ma è il pianeta al loro interno a possedere una forza vitale che impartisce il moto corretto a ciascuna parte del meccanismo. Infine, Tolomeo calcola il numero delle sfere necessario a rappresentare l'intero sistema, includendo la sfera delle stelle fisse e una sfera esterna agente da Primo Mobile dell'Universo. Il sistema richiede almeno 34 sfere, un numero inferiore di quello ottenuto da Aristotele (47-55). Le *Ipotesi Planetarie* concludono con un riferimento agli strumenti usati per simulare o illustrare i moti dei cieli e la struttura dell'intero universo.

Gli scritti astronomici di Tolomeo condussero a una conclusione trionfale la fase iniziale, greca, della campagna per escogitare modelli geometrici che replicassero i moti dei sette pianeti. In questo modo, divenne possibile predire, in un modo incoraggiantemente corretto, le posizioni future dei pianeti, e sembrava non ci fosse ragione di dubitare del fatto che i perfezionamenti operati dai futuri astronomi avrebbero portato sempre più vicine fra loro predizione e osservazione. Questo programma impegnò gli astronomi per i successivi 14 secoli. La revisione radicale dell'astronomia tolemaica eseguita nel Rinascimento da Copernico fu ispirata da una fedeltà ai moti circolari uniformi persino maggiore di quella di Tolomeo. I moti circolari, infine, scomparvero con la precisione delle osservazioni di Tycho Brahe.

Appendice A

Riportiamo qui di seguito l'indice e una pagina del successivo, accurato, indice dei nomi della versione in latino dell'*Almagesto* del 1551 conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.



HAEC SVNT CAPITA quæ in XIII. libris Almagesti Claudij Ptolemæi Mathematicæ constructionis habentur

LIBER PRIMVS.

1 Prooemium, siue proloquium, prologus 1
2 De ordine huius doctrinæ, & constructione speculationum 2
3 Quod sphericum est globi'q; modo cœlum circumuoluitur 2
4 Quod terra quoque sphærica sit, ad sensum quantum ad uniuersas partes 3
5 Quod terra in medio cœli sita sit 4
6 Quod terra quasi punctum est ad cœlestia comparata 5
7 Quod terra nullo motu progressiuo moueatur 5
8 Quod duplex in cœlo primorum motuum differentia est 6
9 Et de particularibus deprehensionibus: ibi. Sed uniuersales quidem prælibationes summatim atque per capita ita breuiter 7
10 De quantitate rectarum linearum quæ in circulo perducuntur, cum tabulis arcuum & chordarum 7
11 De arcu qui est inter tropicos 11
12 Theoremata quæ ad sphericas demonstrationes præmittuntur, & de figura sectoris sphærica 18
13 De arcubus qui sunt inter æquatorem & circulum obliquum 20
14 De ascensionibus in sphæra recta pagina 23

Liber secundus.

1 De uniuersali orbis terrarũ situ qui à nobis habitatur 24
2 Quomodo maximæ diei data magnitudine, dantur horizontis arcus qui ab æquinoctiali & circulo obliquo intercipiuntur 25
3 Quomodo (eisdem ipsis suppositis) elauatio poli detur 24
4 Quomodo inueniendum quibus et quando ☉ in uertice sit 26
5 Quomodo gnomonum, æquinoctialis tropicæ'q; umbræ in meridiebus capiantur 27
6 Expositio proprietatum per singulos parallelos 28
7 De coascensionibus signorum & æquatoris in sphæra decliui 31
8 Expositio decamoriarum ascensionum seu tabula ascensionũ per 10. gradus 37
9 De ijs quæ particulariter ad ascensiones sequuntur 40
10 De angulis atq; arcubus qui in zodiaco circulo & meridiano fiunt 40
11 De angulis atq; arcubus qui ab eodem obliquo orbe atque horizonte fiunt 43
12 De angulis atq; arcubus ad eundẽ circulum ab illo fiunt qui est per polos horizontis 45

Liber tertius

1 De magnitudine annui temporis pagina 56
2 De magnitudine anni & particularibus ☉ æqualibus'q; motibus 56
3 De supputationibus æqualis circularis'q; motus 62
4 De apparente inæqualitate Solari pagina 66
5 De particularibus inæqualitatis ☉ portionibus 69
6 De tabularum differentiæ inæqualitatis ☉ compositione 72
7 De positione tabularum motus ☉ diuersi 72
8 De inueniendo loco medij motus Solis 73
9 De mot9 solaris ☉ cõputatione 74
10 De Diei naturalis inæqualitate 74

Liber quartus.

1 A quibus obseruationibus ☾ accidentia examinanda sunt 76
2 De periodicis ☾ temporibus 77

* 3 De ☾

Index.

1 De ☾ motibus æqualibus secũdum partes suas 79
4 Expositio regularum quæ medios ☾ progressus continent.
Seu tabulæ mediorum æqualiumq; motuum ☾ 80 & 81
5 Quod etiam in simplici suppositione ☾ tam excentricitatis quam epicycli suppositio eandem faciat apparentiam 86
6 Primæ ac simplicis Lunaris inæqualitatis demonstratio 87
7 De emendatione mediorũ longitudinis & inæqualitatis motuũ ☾ 94
8 De locis æqualium ☾ motuum tempore Nabonassari 94
9 De emendatione mediorum motuum latitudinis ☾ & de locis ipsorum in primo Nabonassari anno pagina 94
10 Expositio tabulæ primæ ac simplicis inæqualitatis ☾ 96
11 Quod non penes suppositionũ sed computationum differentias ☾ inæqualitatis quantitas diuersa est secundum Hipparchum 97

Liber quintus.

1 De constructione instrumẽti quod astrolabium uocatur 100
2 De suppositione quæ ad duplicem ☾ inæqualitatem pertinet 101
3 De quantitate huius inæqualitatis ☾ quæ penes distantiam suam à ☉ accidit 102
4 De proportione excentricitatis lunaris circuli 103
5 De lunaris epicycli declinatiõe 104
6 Quomodo per lineas à motib. periodicis uerus ☾ motus inueniatur 107
7 Expositio uniuersalis tabulæ lunaris inæqualitatis 108
8 Canon uniuersalis lunaris inæqualitatis, seu tabula diuersitatis ☾ uniuersalis 109
9 De uniuersali calculo lunari 111
10 Qđ nulla differẽtia fiat in ☊ atq; ☋ penes excẽtricum lunæ circulũ 111
11 De aspectibus diuersitatis ☾ 113
12 De constructione instrumenti quo aspectus diuersitatis capitur 113
13 Lunariũ distãtiarũ demõstratio 113
14 De quãtitate diametrorũ ☉ & ☾ et umbræ q̃ in ☊ et ☋ pspiciuntur 117
15 De Solari distantia & ijs quæ simul cũ ea demonstrantur 118 (119
16 De magnitudine ☉ & ☾ & terræ
17 De particularibus aspectuum diuersitatibus ☉ & ☾ 119
18 De tabula diuersitatis aspectuũ 120
19 De diuersitatibus aspectuum discernendis 124
Empedocles duplam esse à terra ad ☾ distantiam asseruit.
Quidam uero Mathematici diligentius perscrutantes decies octies.
Eratosthenes Solem distare à terra 308. stadiorum. myriadas, 1080000. stadiorum, 385000. miliariorum.
Lunam uero à terra 78. myriadas, stadiorũ, 780000. stadiorum, 97500. miliariorum.

Liber sextus.

1 De coniunctionibus atq; oppositionibus solis & lunæ 128
2 Quomodo mediarum coniunctionum atque oppositionum componendæ sint tabulæ 128
3 De synodis atq; pleniluniis 128
4 Quomodo periodicas & ueras coniunctiones et oppositiones considerare oportet 133
5 De eclypticis ☉ & ☾ terminis 133
6 De distãtia eclypticorum mensium pagina 136
7 De tabulis eclypticis 139
8 Tabula eclypsium luminarium 146
9 Lunarium eclypsiũ cõputatio 147
10 Solarium eclypsium cõputatio 148
11 De inclinationibus quæ in eclypsibus fiunt 150
12 Tabula declinationum & inclinationum 153
13 Inquisitio inclinationum 155

Liber septimus.

1 Quod stellæ non erraticæ semper eundem inter se situm seruent 155
2 Quod non erraticarum etiam sphæra motu quodam ad successionem signorum progreditur 158
3 Quod in polis circuli obliqui ad successio-

Index.

ceſsionem non erraticarum * ſphæra mouetur 159
4 De modo deſcriptionis fixarũ 162
5 De conſtellationibus in ſphæra ſolida fabricandis 163

Liber octauus.

1 Expoſitio tabularis conſtellationis hemiſphærij auſtralis 180
2 De lactei circuli ſitu 194
3 De ſphæra ſolida fabricanda 196
4 De ꝓprijs erraticarũ aſpectibus 197
5 De coortibus et in medio cœli locationibus cooccaſibusq́ꝫ fixarũ 199
6 De apparitionibus & occultationibus fixarum 200

Liber nonus.

1 De ordine globorũ ☉ & ☾ cæterarumq́ꝫ ſtellarum erraticarum 203
2 De difficilimo ſuppoſitionum modo in 5. planetis 203
3 De periodicis reſtitutionibus 5. planetarum 204
4 Tabulæ mediorum motuum longitudinis & inæqualitatis 5. planetarum 207
5 De ijs quæ præmittuntur ad doctrinam motuum 6. planetarum 222
6 De modo & differentia ſuppoſitionum 222
7 Demonſtratio maximæ ☿ longitudinis & motus eius 225
8 Quod ☿ ſtella bis proxima terræ in una reuolutione ſit 227
9 De proportione ac magnitudine inæqualitatum ☿ 228
10 De periodicis ☿ motibus 230
11 De locis periodicorũ motuũ ☿ 233

Liber decimus.

1 Demonſtratio maximæ longitudinis ſtellæ ♀ 234
2 De epicycli ♀ magnitudine 235
3 De proportionibus excentricitatis ſtellæ ♀ 235
4 De emendatione periodicorum ♀ motuum 236
5 De locis periodicorum motuum ſtellæ ♀ 239
6 Hæc præmittuntur ad ea quæ de reliquis planetis demonſtrantur 240
7 Demonſtratio excentricitatis et maximæ longitudinis ♂ 241
8 Demonſtratio magnitudinis epicycli ♂ 249
9 De emendatione periodicorũ motuum ♂ 250
10 De locis periodicorum ♂ motuũ tempore Nabonaſſari 252

Liber undecimus.

1 Demonſtratio excẽtricitatis & maximæ longitudinis ſtellæ ♃ 252
2 Demonſtratio magnitudinis epicycli ♃ 258
3 De emẽdatione periodicorum motuum ♃ 260
4 De locis periodicorũ motuũ ♃ 261
5 Demonſtratio excentricitatis ♄ & maximæ longitudinis eius 261
6 Demonſtratio magnitudinis epicycli ♃ 267
7 De periodicorum ♄ motuũ emendatione 269
8 De locis periodicorum ♄ motuum tempore Nabonaſſari 270
9 Quomodo à periodicis motibꝰ apparentes ac ueri capiantur 270
10 De faciendis inæqualitatum tabulis 271
11 De computatione motus longitudinis 5 planetarum 279

Liber duodecimus.

1 De ijs quæ prætermittuntur ad regreſſus planetarum demonſtrandos 280
2 Demonſtratio regreſſuum ♄ 284
3 Demonſtratio regreſſuum ♃ 286
4 Regreſſuum ♂ demonſtratio 287
5 Regreſſuum ♀ demonſtratio 288
6 Regreſſuum ☿ demonſtratio 289
7 Computatio tabulæ ſtationum 291
8 Tabula ſtationum 5. planetarũ 294
9 Maximarum à ☉ diſtantiarum ♀ atqꝫ ☿ 295

Liber decimus tertius.

1 De ſuppoſitionib. quæ ad motus latitudinis 5. planetarum ꝑtinent 299
2 De modo motus latitudinis ſecundum ſuppoſitiones inclinationum atqꝫ obliquationum 300
3 De ſingularum inclinationum magnitudine 301

De

Index.

4 De componendis particularium latitudinis motuum tabulis 303
5 Tabula latitudinū 5. planetarū 315
6 Calculus remotionis 5. planetarum ſecundum latitudinem 320
7 De apparitionibus atq; occultationibus 5. planetarum 320
8 Quod etiam apparitio ♀ atque ☿ propria cum ſuppoſitionibus ad unguem fit 322
9 Doctrina ad particulares à ☉ diſtantias apparitionum atq; occultationum 324
10 Tabulæ apparitionum & occultationum 5. planetarum 325
11 Concluſio totius uoluminis 326

Index capitum in Proclum Diadochum.

1 De motu planetarum 333
2 De motu Solis indaganda ratione fol. 338
3 De Luna 345
4 De Mercurio 357
5 De aſtrolabij fabrica uſu'q; 364
6 De in plano deſcriptione in quo poſita dioptra, & cuius unumquodq; eſt quæ in ipſo deſcripta ſunt 364
7 De in tympanis deſcriptione in qui bus climata deſcripta ſunt, & cui de ſcriptorum unumquodq; proportione conferatur, & quod partium ſit ſigniferi obliquitas 364
8 De eis quæ in aranea deſcripta ſunt fol. 366
9 De diurna ſolis inſpectione, et quo pacto ſolerter ipſam indagemus fol. 366
10 Cur in proportionem agente ſub terra ſegmento horiææ lineæ deſcriptæ ſint, & cur ab occaſu enumerationis earum faciamus principium, & quo pacto horæ portio capiatur 367
11 Quod quatuor centra compareant, quod horoſcopum inuehit, et quod cœli medium, & quæ hæc ex aduerſo ſpectant, quod'q; in quibuſdam contingat inſtrumentis in quouis tympano perſpicere
12 De nocturna hærentium cœlo ſtellarum artificiali inſpectione. Sciendum illam eſſe ſpectandam ſtellam, quæ cum primum Sol occidit, oritur, nec aliam quampiam 368
13 Quo pacto ſit noſſe utrum ante meridiē ſpectetur propoſita ſtella, aut in ipſo, aut poſt ipſum, et quo pacto cuiuſuis in ſignifero partis maxima capienda ſit altitudo 369
14 Quo pacto ſit inuenire quod æquinoctialibus horis quodlibet ſignū aſcendat & quod accidat 370
15 Quo pacto qualibet die & nocte temporalem horam pariter inuenia mꝰ q̄d horarū ſit æquinoctialiū 370
16 Quo pacto ſit ex inſtrumento inuenire Solis diſtantiā, & quo pacto ſit capere ſingulis diebus Solis maximam ſublimitatem 371
17 Quæ partes in ſignifero ſub eodem ſunt parallelo, et eadē ſublimitas attollitur, in quo eſt Solem inuenire poſt tropica puncta in quo ſigniferi ſunt quadripartio 371
18 Quo pacto uagantium ſtellarum abſentias inuenire poſſimus 372
19 Quo pacto eſt inuenire quamlibet ſigniferi partem, quantū ab æquinoctiali declinet in ſeptentrionē aut auſtrum, ſimiliter Solem & Lunam et ſingulos uagantes ſtellas 373
20 Quo pacto nos oporteat inuenire medio aberrantes pelago, aut in ſolitudinibus degentes, quo in climate ſimus 374
21 Quo pacto ſit cognoſcēdū ex aſtrolabo noctu à quacūq; ſtella in quo climate ſimus, ſi ignoremus 374
22 De altitudine climatum aut tractus alicuius 374
23 De eo ut cognoſcatur an recte, integre'q; ſit fabrefactus aſtrolabus, nec ne 374

Index titulorum in libros duos Quadripertitos.

1 Proœmium 379
2 Aſtronomicarum præuiſionū ſcientiam eſſe, & quatenus ea tendat 379
3 Aſtronomicam præuiſionem eſſe utilem 381
4 De uiribus ſtellarum errantium 383

5 De

5 De stellis masculinis & fœmininis 384
6 De diurnis & nocturnis 384
7 Quid ualeant configurationes ergà Solem 384
8 De uirib. stellarum inerrantium 384
9 De anni temporibus & quatuor angulorum natura 386
10 De signis tropicis æquinoctialibus & bicorporibus 386
11 De signis masculinis et fœminin. 387
12 De cōfiguratione duodecim locorū 387
13 De imperantibus & obedientibus signis 387
14 De intuentibus & eiusdem potentiæ signis 387
15 Inconiuncta 387
16 De domibus 388
17 De triangulis 388
18 De altitudinibus 389
19 De finibus 389
20 Ratio Chaldaica 390
21 Fines Aegyptiorum 390
22 De sua cuius'q; stellæ persona, & carpentis ac solijs 391
23 De applicationibus ac defluxibus 392

Liber secundus.

1 Procœmium 392
2 De proprietate uniuersali gentium 393
3 De familiaritate locorum & triangulorū ac stellarum 393
4 Nuda expositio quæ gentes quibus sub signis ponantur 397
5 Particularium prædictionum ratio 397
6 De regionibus quarum sint significationes 397
7 De tempore euentuum 397
8 De genere euentuum 398
9 De modis futurorum 399
10 De coloribus in deliquijs et crinitis ac huiusmodi alijs 400
11 De nouilunio anni 401
12 De particulari natura signorū in tempestatibus 401
13 De particulari tempestatum consideratione 402
14 De obseruandis meteoris, id est, facie cœli 403

Libri tertij capitum index.

Procœmium 404
1 De causis spermatis, & de exitu infantis 404
2 De scientia gradus ascendentis 405
3 De partitione locutionis natiuitatum 406
4 De parentibus 407
5 De fratribus & sororibus 408
6 De masculinis & fœmininis 409
7 De natiuitate geminorum 409
8 De monstruosis signis 409
9 De his qui non creuerunt 410
10 De spatio uitæ 411
11 De forma & figura corporis nati, ac ac de ipsius complexione 415
12 De impedimentis & infirmitatibus accidentibus corpori nati 417
13 De qualitatibus animæ nati 419
14 De impedimentis animæ 423

Liber quartus.

Procœmium 425
1 De prosperitate nati & substantia 425
2 De prosperitate & inualetudine nati 426
3 De magisterio nati & eius opere 426
4 De coniugijs 428
5 De filijs 430
6 De amicitijs & de inimicitijs 431
7 De peregrinationibuss 432
8 De qualitate mortis nati 433
9 De diuisione temporum in uita nati 435
Centiloquium Ptolemæi 438
Inerrantium stellarum significationes folio 442

INDEX OMNIVM

QVAE NOTATV DIGNA VISA SVNT IN operibus diligentissimus.

AEgyptiorum nomina perplexa fol. 330
Aegyptiorum finis 390
Aequationis Martis in longitudine tabula 276
Aequationis in longitudine Mercurij tabula 278
Aequationis Veneris in longitudine tabula 277
Aeq̄tionis Satur. tabula 274
Aequationum tabula 147
Aequationis Iouis in lōgitudine tabula 275
Aequinoctialia signa duo, fol. 386
Aequinoctialis tropiceq'ue

umbræ in meridiebus quo modo capiuntur 27
Aetatũ quatuor natura 386
Altitudo planetarum 389
Amicitiæ & inimicitiæ qualitas cognoſcenda 431
Amnis conſtellatio 186
Andromadæ cõſtellatio 173
Angulorum ſphæralium ſcientia 40.41 & 42
Angulorum quatuor natura 386
Anguli atq; arcus q in obliq̃ circulo zodiaci & meridiano fiunt 40.41 & 42
Anguli atq; arcus qui fiunt ab obliquo orbe atq; horizonte 43.44
Anguli atq; arcus qui fiunt à circulo qui eſt per polos horizontis 45.46.47.48
Animæ impedimenta quomodo cognoſcenda & unde proueniunt 425
Anni nouilunium 401
Annui temporũ natura 386
Annui loci coniunctionum & oppoſitionum ſiue pleniluniorum 132
Annui temporis magnitudo 56
Apparitiones atq; occultationes quinq; planetarum fol. 320
Apparitio Vener. atq; Mercurij propria cum ſuppoſitionibus ad unguem fit. 322
Apparitionum atque occultationum doctrina ad particulares à Sole diſtantias fol. 324
Apparitionum atq; occultationum tabulæ 325
Applicationes & defluxus fol. 392.
Aquarij conſtellatio 182
Aquilæ conſtellatio 172
Aranea aſtrolabij quid contineat 366
Arcus qui eſt inter tropicos 17
Arcus inter æquinoctialem & obliquũ circulum 20
Arcus atq; anguli qui fiunt à circulo qui eſt per polos horizontis 45.46.47.48.
Arcus diurnus quomodo ꝑ ſcrutetur 40
Arcus horizontis ab æquinoctiali & obliquo circulo interceptus 24
Arcus finitoris quibus inuenitur 25
Arcus ſemidiurni æqualis, & breuiſsimi in omni regione differentia 28
Arcus atq; anguli q in obliquo zodiaci circulo et meridiano fiunt 40
Arcus atq; anguli qui fiunt ab obliquo orbe atq; horizonte 43
Arcuum atq; angulorum tabularis expoſitio per 7. climata 49.50.51.52.54.55.
Argi conſtellatio 189
Arietis conſtellatio 174
Armilla aſtrolabij 101
Aſcenſionum tabula per denos gradus 37.38.39.
Aſcẽſiones ſignorũ in ſphæra obliqua 31
Aſcendentis gradus inueſtigandus 405
Aſpectus diuerſitatis Lunæ fol. 113.
Aſpectuum diuerſitatum tabula 123
Aſpectuum particularis diuerſitas 120
Aſpectuum diuerſitas diſcernenda 124.125
Aſpectus ſolis & lunæ particularis diuerſitas 119
Aſtrolabus an recte integre q'ue ſit fabricatus 374
Aſtrolabij uſus 374 & 375 et 376
Aſtrolabij inſtrumenti conſtructio 100
Aſtrolabij fabrica uſusq'ue fol. 364
Aſtronomicæ prædictiones duo requirunt 379
Aſtronomiã ſcientiam eſſe, quare quidã negant 379
Aſtronomica præuiſio eſt ſcientia 379
Aſtronomica præuiſio quatenus tendat 379
Aſtronomorum propoſitum 375
Aſtronomiæ ſcientiæ immerito fidem quidam derogant 380.381
Aſtronomica ſcientia docet prædicere euẽturas res hominibus 381
Aſtronomica præuiſio utilis in multis 381.382
Aſtronomica ſcientia & medicis neceſſaria 381.382.
Auis conſtellatio 168
Aurigæ conſtellatio 170
Aurigæ ſtellæ 170
Auſtrales & boreales ſtellæ quot 193
Auſtralis hemiſpherij conſtellationis expoſitio tabularis 180
Auſtralis zodiaci partis cõſtellatio 180

B

Bicorpora ſigna, quatuor 386
Bootis conſtellatio 166
Bootis ſtellæ 167
Borealis coronæ conſtellatio 167
Borealis zodiaci partis conſtellatio 170
Borealis hemiſphærij conſtellationum regularis expoſitio 180
Boreales & auſtrales ſtellæ quot 193

C

Calculus remotionis quinq; Planetarum ſecundũ latitudinem 320
Cancri conſtellatio 177
Canis conſtellatio 187
Capri-

Appendice B

Riportiamo qui di seguito le immagini di due strumenti osservativi presenti nella versione in latino dell'*Almagesto* del 1551, conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna, in via Irnerio 46.
Il primo strumento (Fig. 1) consiste di un quadrante, dotato di un'asta imperniata con due piastrine, che permette di determinare l'altezza del Sole sull'orizzonte, probabilmente quando si trova al meridiano. Il metodo di misura ricorda quello utilizzato con l'armilla meridiana: si trova la posizione del Sole ruotando l'asta sul quadrante finché l'ombra della piastrina superiore cade al centro di quella inferiore.
Il secondo strumento (Fig. 2) fa pensare ad un'armilla equatoriale fissata insieme ad altre due armille, che potrebbero rappresentare i tropici del Cancro e del Capricorno, su un anello meridiano dotato di una scala graduata. Probabilmente, quest'ultimo permetteva di allineare correttamente le armille parallelamente al piano equatoriale nel luogo di osservazione, in maniera simile a quanto indicato da Al-'Urdi nel suo trattato arabo del 1270 (vedere sezione 3.1.3).
Osserviamo che, in entrambe le immagini, le scale graduate presentano una suddivisione minima molto grande, pari a 2°. Inoltre, il primo strumento indica una latitudine geografica φ del luogo di osservazione pari a 45°. Infatti, facendo la media tra l'altezza massima e minima del Sole troviamo l'altezza dell'equatore celeste sul piano dell'orizzonte e, dunque, l'angolo complementare della latitudine φ: in questo caso si ha $90° - \varphi = \frac{68°+22°}{2} = 45°$, da cui $\varphi = 45°$.
Il secondo strumento, invece, permette di leggere una latitudine geografica compresa tra 44° e 48°, in quanto la direzione del filo a piombo attraversa la scala graduata in due posizioni differenti, segnando circa 46° nella parte superiore e 42° nella parte inferiore. Ancora una volta, il valore della latitudine φ è il complementare dell'angolo segnato sullo strumento, dato che questo corrisponde alla distanza zenitale del polo nord celeste. Poiché la latitudine di Basilea è di circa 47° 33′, è probabile che queste immagini rappresentino strumenti realmente esistenti nelle vicinanze del luogo di pubblicazione di questa edizione dell'*Almagesto*.

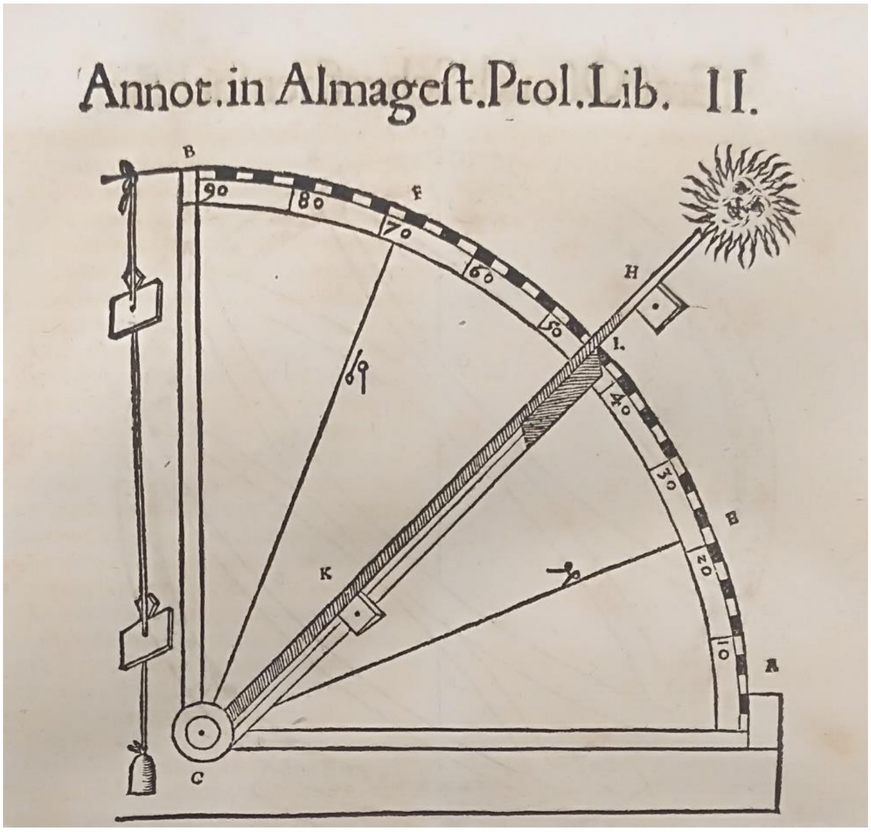


Fig. 1

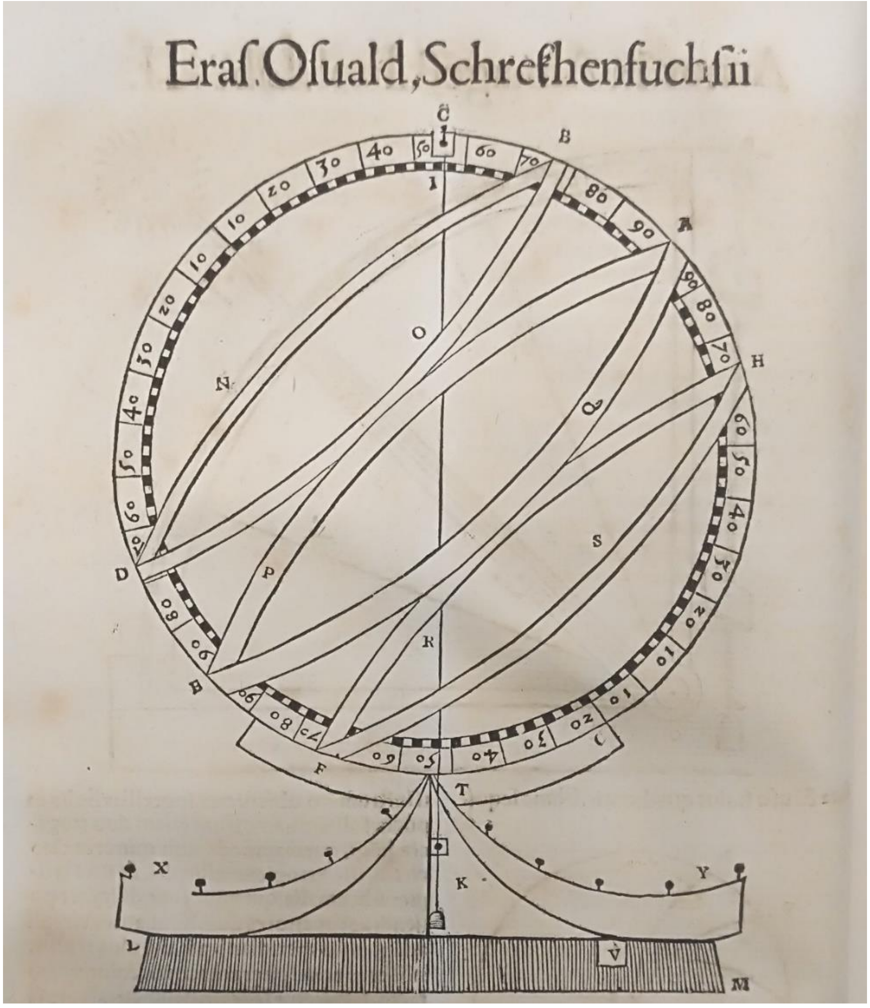


Fig. 2

Bibliografia

BRITTON J. P., *Models and precision: The Quality of Ptolemy's Observations and Parameters*, New York, 1992;

BRUIN F. e M., *The Equator Ring, Equinoxes and Atmospheric Refraction*, in *Centaurus*, vol. 20 no. 2, 1976;

DREYER J. L. E., *Storia dell'Astronomia da Talete a Keplero*, 2016;

HOSKIN M., *Storia dell'Astronomia*, 2017;

NEUGEBAUER O. E., *A History of Ancient Mathematical Astronomy*, voll. 3, Berlino, 1975;

PANNEKOEK A., *Una storia dell'astronomia* (traduzione italiana disponibile nel materiale didattico del corso di "Storia della Cosmologia" tenuto dal Prof. F. Bonoli dell'Università di Bologna);

PEDERSEN O., *A survey of the Almagest*, Odensa, 1974;

PRICE D. J., *Strumenti di precisione fino al 1500*, in *Storia della tecnologia*, a cura di C. Singer, 7 voll., 1992-1996;

STRANO G., *L'osservatorio essenziale*, in *Giornale di Astronomia*, no.4, 2007;

STRANO G., *Strumenti alessandrini per l'osservazione astronomica: Tolomeo e la Mathematike syntaxis*;

TOLOMEO C., *Claudii Ptolemaei Pelusiensis Alexandrini omnia quae extant opera, praeter Geographiam, quam non dissimili forma nuperrime aedidimus: summa cura & diligentia castigata ab Erasmo Osvaldo Schrekhenfuchsio, & ab eodem Isagoica in Almagestum praefatione, & fidelissimis in priores libros annotationibus illustrata, quemadmodum sequens pagina catalogo indicat.* Basileae, edizione in latino dell'*Almagesto* conservata nella biblioteca storica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna in via Irnerio 46, luogo e data di pubblicazione: officina Henrichi Petri, Basileæ, Marzo 1551;

TOLOMEO C., *Ptolemy's Almagest* (trad. ingl. e note di G. J. Toomer), Londra, 1984;

TOOMER G. J., *Tolomeo e i suoi predecessori greci*, in *L'astronomia prima del telescopio* a cura di C. Walker, 1997;

WLODARCZYK J., Wlodarczyk, *Observing with the Armillary Astrolabe*, in *Journal for the History of Astronomy*, Luglio 1987.