



Publication Year	2020
Acceptance in OA	2023-02-09T13:04:38Z
Title	Da Tolomeo alla campagna internazionale per l'osservazione di Eros: la lunga strada verso la misura della parallasse solare.
Authors	ZANINI, Valeria
Publisher's version (DOI)	10.19272/202008803012
Handle	http://hdl.handle.net/20.500.12386/33320
Journal	GIORNALE DI ASTRONOMIA
Volume	46

Da Tolomeo alla campagna internazionale per l'osservazione di Eros:

la lunga strada verso la misura della parallasse solare.

Tra i problemi fisico-astronomici, la determinazione della parallasse è il più rilevante e se un astronomo dedicasse a essa tutta la vita, egli impegnerebbe la sua opera nel migliore dei modi.

Riccioli, *Almagestum Novum* (1651)

Il rapporto tra Uomo e Cielo è sempre stato, nella storia dell'umanità, un rapporto privilegiato e non a caso l'astronomia, con la matematica, è considerata la 'scienza' più antica del mondo. Il corso ciclico ed eterno del Sole, della Luna, delle stelle e dei pianeti ha permesso, infatti, a ogni civiltà di regolare la quotidianità della propria vita e di scandire i tempi delle semine e dei raccolti, così come quelli delle cerimonie politiche e religiose. Solo con la cultura greca, tuttavia, nasce l'astronomia geometrica e con essa il desiderio di conoscere le reali dimensioni e distanze dei corpi celesti.

Pian piano, ma sulla base delle evidenze osservative, si sviluppò l'idea che attorno alla Terra, immobile al centro dell'universo, si muovesse il mondo celeste, etereo e immutabile, costituito dalle stelle e dai pianeti. Quest'idea fu favorita anche dal rapido sviluppo della geometria che, nel IV secolo a.C., portò gradualmente all'uso dei modelli geometrici per descrivere e spiegare i fenomeni astronomici: Anassimandro, della scuola di Talete, sviluppò il concetto di sfera e di Terra sospesa; Pitagora, maestro di Platone, diede centralità ai numeri mentre a Platone stesso si deve la dogmatizzazione della circolarità e uniformità dei moti celesti; Euclide fornì infine tutta la matematica necessaria all'epoca per lo studio dei movimenti planetari.

È quindi con Platone (ca. 427-348 a.C.) che si affermò definitivamente la concezione di un cosmo geometricamente sferico, diviso gerarchicamente in due sfere concentriche e distinte: quella del mondo sublunare, corruttibile, e quella del mondo celeste, perfetto, nel quale gli astri si muovevano di moto circolare e uniforme. Quest'ultimo assioma, in particolare resterà fino ai tempi di Galileo la 'pietra angolare' della dinamica celeste di tutta l'astronomia antica. Aristotele (ca. 384-322 a.C.) portò a definitiva consacrazione il cosmo geocentrico facendo proprio il sistema delle sfere omocentriche di Eudosso (ca.

408-355 a.C.), per il quale ciascun pianeta si muoveva trasportato da una serie di sfere concentriche una con l'altra, ma ciascuna dotata di un moto proprio, cosicché la combinazione dei diversi movimenti giustificava l'apparente traiettoria contorta del pianeta in cielo, rispettando ugualmente il dogma del moto circolare e uniforme. Combinate in un unico sistema fisico, le 56 sfere cristalline solide e reali di Aristotele rispondevano perfettamente alla fisica da lui stesso sviluppata. Per Aristotele, infatti, l'intero Cosmo era costituito da cinque elementi che si distribuivano nell'universo secondo la loro pesantezza e il loro movimento naturale: quattro di questi elementi - terra e acqua, aventi movimento naturale verso il basso, aria e fuoco con movimento naturale verso l'alto - si trovavano solo sulla Terra e, continuando a rimescolarsi, la rendevano continuamente soggetta a generazione e corruzione. Il quinto elemento - la quintessenza o etere - era invece la sostanza perfetta e incorruttibile di cui erano composti i corpi celesti, cui competeva il movimento naturale circolare e uniforme. Tutto questo rispondeva all'esperienza empirica degli osservatori del tempo e d'altra parte, non possiamo dimenticare che «la cosmologia aristotelica attingeva forza dal fatto di essere una formulazione intellettuale che rafforzava il senso comune» e che «la storia della cosmologia non è la storia facile del rifiuto di idee assurde [...] ma la saga eroica del rifiuto di ciò che sembra chiaramente vero a favore di ciò che sembra assurdo» (HOSKIN 2009, p.33).

Tuttavia l'astronomia aristotelica non forniva risposte al quesito, considerato secondario, di quanto grande fosse questo Cosmo di cui la Terra occupava la posizione centrale, ma si limitava a dare solo un'idea delle dimensioni della Terra, facendo riferimento a una misura di 400000 stadi per la sua circonferenza, o meglio, per il suo meridiano, misura che Aristotele probabilmente ricavò dai trattati astronomici, oggi perduti, di Eudosso. Anche sull'argomento delle distanze dei pianeti e delle stelle egli rimandava ai trattati astronomici del tempo sostenendo che «i problemi relativi al loro ordine - in che modo si muove ciascuno di essi, dal momento che gli uni sono anteriori e gli altri posteriori, e quali siano i rapporti tra loro a causa delle distanze - vanno considerati partendo dai trattati astronomici, dove sono discussi a sufficienza» (ARISTOTELE 1999, p. 281). Purtroppo nessuno di quei trattati è giunto fino a noi, ma quel che è certo è che per Aristotele e i suoi contemporanei, la Terra era una «sfera di modeste dimensioni» rispetto alle sfere celesti (ARISTOTELE 1999, p. 325).

La dicotomia lunare e il diagramma delle eclissi di Aristarco

Tra i più antichi tentativi di misurare le dimensioni del Cosmo, è da annoverarsi certamente quello compiuto nel III secolo a.C. da Aristarco di Samo. Aristarco (ca. 310-230 a.C.) è noto per essere stato uno dei primi filosofi greci a elaborare una cosmologia alternativa rispetto a quella platonico-aristotelica, concependo un sistema eliocentrico (SCHIAPARELLI 1998b), tuttavia nessun suo scritto a riguardo è giunto fino a noi. Ci è pervenuta invece la sua opera intitolata *Sulle dimensioni e distanze del Sole e della Luna*.¹ In questo trattato Aristarco descrive accuratamente i procedimenti geometrici con i quali ricavare i rapporti tra le distanze della Luna e del Sole dalla Terra, e le loro dimensioni relative. Per effettuare i calcoli, Aristarco partì da alcuni assunti a priori, in particolare suppose di osservare esattamente il momento della dicotomia lunare, ossia la fase della quadratura, che si verifica quando la porzione della superficie della Luna illuminata dal Sole, visibile da Terra, è esattamente uguale alla porzione in ombra; egli assunse poi come diametro angolare del Sole e della Luna, un valore di 2° . Inoltre, attraverso procedure e strumenti osservativi che restano ignoti, Aristarco ricavò come distanza angolare tra Luna e Sole al momento della dicotomia (l'angolo LTS in Fig. 1), un valore di 87° . Non avendo a disposizione alcun tipo di funzione trigonometrica per eseguire i suoi calcoli (la trigonometria sarà disponibile solo con Ipparco), e potendosi basare solo sulla geometria di Euclide, i cui *Elementi* sono coevi all'epoca (KLINE 1999, pp. 70-106), Aristarco effettuò delle procedure alquanto laboriose per ricavare un rapporto tra distanza solare e distanza lunare compreso tra 18 e 20. È abbastanza intuitivo comprendere come gli errori insiti in tale procedura siano numerosi: anzitutto è assai difficile determinare l'esatto istante della dicotomia, dal momento che nel tempo impiegato ad eseguire la misura il Sole si muove, introducendo un errore. Poi, la misura di 2° assunta per il diametro angolare di Sole e Luna, è palesemente errata per eccesso di un fattore 4 e inoltre si trascurano completamente gli errori di rifrazione, che all'epoca erano ancora sconosciuti. Tuttavia, è a partire da questa misura che si consolida l'idea che la parallasse solare sia circa un diciannovesimo di quella

¹ Una copia manoscritta del trattato di Aristarco è conservata presso la Biblioteca Vaticana, rilegata assieme ad altre opere astronomiche greche di Autolico, Euclide, Ipotici e Teodosio, e ad altre opere matematiche. L'intero manoscritto è stato digitalizzato e reso disponibile al seguente link: https://digi.vatlib.it/view/MSS_Vat.gr.204

lunare. Questo valore diventa poi per Aristarco il punto di partenza per elaborare una metodologia matematica, nota come 'diagramma delle eclissi' (descritta in Fig. 2) in grado di attribuire al Sole e alla Luna delle misure assolute di dimensione e di distanza.

Come sostiene Van Helden, da un punto di vista moderno l'opera di Aristarco può essere considerata un grande «successo geometrico ma un fallimento scientifico» (VAN HELDEN 1985, p. 6): essa ci mostra allo stesso tempo la forza e la debolezza della geometria greca. Aristarco sviluppò due brillanti procedure teoriche - il metodo della dicotomia lunare e quello del diagramma delle eclissi - che rimasero in uso nell'astronomia per ben due millenni, ma i cui risultati dipendevano da un'accuratezza della misura assolutamente impossibile da raggiungere all'epoca e, in parte, ancor oggi. In tal modo i valori che si potevano ricavare da questi procedimenti geometrici erano nettamente difformi rispetto a quelli reali di almeno un ordine di grandezza.

Dalle misure relative alle misure assolute

Un passo importante per ottenere il valore del raggio terrestre, indispensabile per trasformare i rapporti relativi forniti dal diagramma delle eclissi di Aristarco in valori assoluti, fu quello compiuto da Eratostene (ca. 275-195 a.C.), direttore della grande biblioteca d'Alessandria, incorporata al Museo e congiunta al palazzo reale, massimo centro culturale dell'epoca ellenistica. Eratostene sapeva che il Sole, a mezzogiorno del solstizio estivo, illuminava l'acqua presente sul fondo di un pozzo sull'isola Elefantina a Syene, la moderna Assuan, sul Nilo, nell'alto Egitto, non proiettando alcuna ombra sulle pareti. Ciò stava ad indicare che il Sole, in quell'istante, passava allo zenit in quel luogo (PAYN 1914). Come abbiamo visto, uno dei postulati fondamentali della teoria geocentrica aristotelica assumeva che la Terra fosse assimilabile ad un punto rispetto alle sfere dei corpi celesti, ivi compresa la sfera del Sole, pertanto Eratostene poteva assumere che i raggi solari giungessero sulla superficie terrestre paralleli, anche se osservati da località molto distanti tra loro. Misurando quindi anche ad Alessandria l'altezza del Sole a mezzogiorno del solstizio estivo, egli trovò che, in questo caso, i raggi solari formavano con lo gnomone un angolo pari a $1/50$ di circonferenza (Fig. 3). Essendogli poi noto che la distanza tra Alessandria e Syene, che egli riteneva giacere sullo stesso meridiano, era di 5000 stadi, Eratostene ricavò per la circonferenza terrestre un valore di

250000 stadi (WEIR 1931). In questo modo si aveva a disposizione la misura del raggio terrestre (ca. 39808 stadi) come unità di base per il diagramma delle eclissi e per le conseguenti misure di parallasse. Nonostante non si conosca con certezza il valore dello stadio usato da Eratostene e i suoi dati di partenza non siano esatti - Alessandria ed Assuan non sono sullo stesso meridiano, ma quest'ultima è 300 km più ad est e inoltre non è esattamente sul tropico, distandone in realtà di $0^{\circ} 37'$ e $25''$ - essi portarono comunque a conoscere il raggio terrestre con il corretto ordine di grandezza e posero le basi per dimensionare il Cosmo.² A Eratostene sono, infatti, attribuite anche alcune determinazioni delle distanze e delle grandezze dei corpi celesti, ed egli avrebbe calcolato per la Luna una distanza di 780 mila stadi e per il Sole di 804 milioni (SCHIAPIARELLI 1998a), anche se a supporto di queste misure non ci è prevenuto alcuno dei procedimenti di calcolo da lui eventualmente applicati.

Ipparco e l'astronomia predittiva

A differenza di quanto fecero i suoi predecessori, che si accontentarono di creare modelli geometrici che spiegassero i moti celesti in linea di principio, il lavoro di Ipparco di Nicea (ca. 180-125 a.C.) fu invece indirizzato a sviluppare una cosmologia che rendesse conto in modo predittivo del movimento degli astri e i cui parametri fossero ricavati da osservazioni reali. Per questo egli fece ricorso al modello degli eccentrici ed epicicli, già sviluppato geometricamente da Apollonio (ca. 262-190 a.C.) (BOYER 1990, pp. 166-170), gettando le basi di quello che sarà il più corposo modello tolemaico. Tra i meriti attribuiti a Ipparco vi è anche quello di essere il fondatore della trigonometria, più propriamente della trigonometria sferica (KLINE 1999, pp. 139-147), grazie allo sviluppo di quella che potremmo chiamare la 'funzione corda', ossia lo strumento matematico che permetteva di determinare gli archi di circonferenza partendo dalla misura

² È da evidenziare, tuttavia, che il metodo di Eratostene fu contestato da studiosi successivi. All'astronomo Posidonio (ca. 135-51 a.C.), ad esempio, è attribuito un metodo alternativo per ricavare il raggio terrestre: essendogli noto che la stella Canopo, nella costellazione della Carena, aveva un'altezza di $7^{\circ}.5$ ad Alessandria, nello stesso momento in cui da Rodi era vista invece esattamente sull'orizzonte, e conoscendo la distanza tra Rodi e Alessandria, egli ricavò per la circonferenza terrestre un valore di 180 mila stadi, cioè il 72% del dato ottenuto da Eratostene. Lo stesso Tolomeo adottò poi nelle sue opere questo valore, riferendosi a un raggio terrestre di 28667 stadi.

della corda ad essi sottesa. Grazie a questa funzione, utilizzando dati osservativi da lui stesso raccolti o provenienti da osservazioni precedenti, in particolare dall'astronomia babilonese, egli elaborò una soddisfacente teoria del Sole, basata su di un solo eccentrico, e una discreta teoria lunare, per la quale oltre all'eccentrico introdusse anche un epiciclo, ottenendo buoni risultati previsionali per la posizione della Luna alle sizigie, ovvero al novilunio e al plenilunio, e per le eclissi lunari. Inoltre, rifacendosi in particolare a un'eclisse solare, identificata con quella avvenuta il 14 marzo 189 a.C., totale nell'Ellesponto e parziale per 4/5 ad Alessandria, egli fece una delle prime attendibili misure della parallasse lunare: assumendo nulla la parallasse solare tra le due località, attribuì tutto l'effetto di parallasse, vale a dire $1/5$ del diametro solare, alla Luna. Sapendo che la differenza di latitudine tra l'Ellesponto (41° N) e Alessandria (31° N) è di 10° , e conoscendo l'elevazione lunare nelle due località, Ipparco ricavò come distanza massima della Luna un valore compreso tra 71 e 83 volte il raggio terrestre. In seguito, per affinare questa sua prima stima, egli applicò anche il metodo del diagramma delle eclissi di Aristarco, partendo dall'assunto che la parallasse solare orizzontale non potesse superare il valore massimo di $7'$, che corrispondeva al limite di sensibilità dell'occhio umano. In tal modo determinò che la distanza minima del Sole dalla Terra fosse di 490 raggi terrestri (R_T), cui corrispondeva, nell'ipotesi che i diametri angolari dei due astri fossero coincidenti, una distanza massima della Luna pari a $67\frac{1}{3} R_\oplus$. Assumendo invece un valore nullo della parallasse solare, cioè ponendo il Sole a una distanza infinita, ricavò come distanza minima della Luna la misura di 59 raggi terrestri (VAN HELDEN 1985, pp. 11-13).

Sulla base di questi calcoli e affidandosi infine al valore ricavato tramite il metodo della dicotomia lunare di Aristarco, per il quale il rapporto tra la distanza del Sole e quella della Luna era di circa 19 volte, Ipparco arriva ad assegnare alla parallasse solare un valore di poco inferiore a $3'$, corrispondente ad una distanza dalla Terra di circa $1140 R_T$. Ipparco è il primo astronomo, di cui si abbia notizia da fonti documentali, ad aver applicato i metodi geometrici di Aristarco per ricavare valori assoluti delle distanze celesti.

L'autorità di Tolomeo

Il lavoro di Ipparco è alla base del sistema cosmologico-matematico di Tolomeo (ca. 100-175 d.C.). Con Tolomeo la complessa teoria matematica che reggeva la cosmologia geocentrica si fuse con la spiegazione

fisico-cosmologica aristotelica, trovando piena sintesi e pieno compimento. La sua *Mathematikè sintaxis* (Μαθηματικὴ συνταξις, Raccolta matematica), meglio nota come *Almagesto*, è il grande trattato astronomico-matematico su cui si fondò tutta l'astronomia occidentale per ben quattordici secoli, fino alla fine del Cinquecento. Seguendo le orme di Ipparco, il sistema cosmologico di Tolomeo mirava a fornire un metodo universale per calcolare in ogni luogo e in ogni tempo le posizioni degli astri in cielo. Esso supponeva che i pianeti si muovessero su circonferenze di raggio relativamente piccolo - gli *epicicli* - i cui centri a loro volta erano trasportati da circonferenze di raggio molto maggiore - i *deferenti* - il cui centro talvolta poteva anche essere spostato (cioè *eccentrico*) rispetto alla Terra, e sui quali a volte il moto era uniforme non rispetto al centro dell'eccentrico stesso, bensì rispetto a un punto decentrato, simmetrico rispetto alla posizione occupata dalla Terra, detto *equante*.

Nell'*Almagesto* Tolomeo evidenzia come le parallassi di Sole e Luna siano dei parametri importanti per dare corpo a tutto il modello cosmologico, pertanto, mentre riprende sostanzialmente immutato il modello solare di Ipparco, egli dedica ampio spazio alla rielaborazione del modello lunare, cercando un'accurata misura della parallasse, e quindi della distanza, della Luna. È a questo scopo che realizzò lo 'strumento parallattico' (Fig. 4), da lui utilizzato principalmente per correggere le coordinate eclittiche della Luna dagli effetti di parallasse. Tolomeo confrontò quindi le posizioni previste dal suo modello con le posizioni osservate, per determinare la parallasse orizzontale diurna della Luna, ricavandone così la distanza. Come già fatto in precedenza da Ipparco, applicò quindi il diagramma delle eclissi per ricavare la distanza del Sole, utilizzando però parametri diversi. In particolare Tolomeo assunse per il diametro angolare della Luna un valore di $31' 20''$, uguale al diametro solare solamente quando la Luna si trova alla massima distanza dalla Terra, da lui stabilita essere $64\frac{1}{2} R_T$. Inoltre per Tolomeo il diametro del cono d'ombra formato dalla Terra, alla distanza media della Luna, è pari a $2\frac{3}{5}$ il diametro lunare. I parametri adottati da Tolomeo finiscono per avvalorare il valore di diciannove per il rapporto tra distanza solare e distanza lunare, confermando che tale valore, esattamente lo stesso ricavato da Aristarco, aveva di fatto già acquisito lo status di autorevole assioma in epoca classica (VAN HELDEN 1985, pp. 16-19). In tal modo per Tolomeo la parallasse solare è di $2' 45''$, il che pone il Sole a una distanza dalla Terra di $1250 R_T$.

Introducendo il meccanismo matematico degli eccentrici e degli epicicli, Tolomeo, così come Ipparco prima di lui, riuscì a spiegare le evidenti variazioni di distanza dei pianeti dalla Terra, irrisolte nei sistemi di Eudosso e Aristotele, anche se, introducendo l'equante, fu costretto a violare il principio di uniformità dei moti celesti. Le 'sfere planetarie' nel sistema tolemaico diventano in realtà dei gusci sferici sufficientemente spessi da poter contenere l'eccentrico, il deferente e gli epicicli necessari a spiegare il moto del pianeta. Questo meccanismo, tuttavia, riesce a rendere conto solo delle proporzioni esistenti tra i raggi delle diverse circonferenze competenti a ciascun pianeta, ma non fornisce le reali dimensioni delle sfere e, di conseguenza, delle distanze degli oggetti celesti dalla Terra, se non nel caso di Luna e Sole, di cui si è determinata la parallasse. Il tema delle distanze planetarie non è affrontato da Tolomeo nell'*Almagesto*, ma viene trattato successivamente nell'*Ipotesi dei pianeti*, opera nella quale egli cercò di stimare le dimensioni dell'universo geocentrico partendo dall'assunto che non potesse esserci 'vuoto' tra le sfere celesti. Egli suppose perciò che queste fossero adiacenti una all'altra, vale a dire che la distanza minima dalla Terra raggiunta da un pianeta veniva a coincidere con la distanza massima del pianeta appena inferiore. Partendo da queste ipotesi e «assumendo pari all'unità il raggio della superficie sferica della terra e dell'acqua», egli calcolò (VAN HELDEN 1985, p. 24) che

il raggio che circonda la superficie sferica dell'aria e del fuoco è 33, il raggio della sfera lunare è 64, il raggio della sfera di Mercurio è 166, il raggio della sfera di Venere è 1079, il raggio della sfera solare è 1260, il raggio della sfera di Marte è 8820, il raggio della sfera di Giove è 14189 e il raggio della sfera di Saturno è 19865.

Utilizzando poi un raggio terrestre pari a 28667 stadi,³ ricavò che

il confine che separa la sfera di Saturno dalla sfera delle stelle fisse si trova ad una distanza di 5 miriadi di miriadi e 6946 miriadi di stadi, e un terzo di miriade di stadi.

In questo modo Tolomeo calcolò per l'intero Universo un raggio pari a poco meno di 20.000 volte il raggio terrestre, cioè una dimensione dello stesso ordine di grandezza della moderna unità astronomica, un numero che oggi sembra risibile, ma che all'epoca rappresentava una misura quasi inconcepibile (TOOMER 1997).

³ Cfr. nota 2.

Anche se non era certamente nelle intenzioni del suo estensore, di fatto l'opera tolemaica congela ogni progresso in campo astronomico, e quindi anche nello studio della parallasse solare, per i successivi quattordici secoli. L'autorità che acquista questo modello cosmologico non viene messa in discussione né nel mondo occidentale, avviato verso un'epoca di decadenza e impoverimento, né nel mondo islamico medievale, pur attivo e frizzante nel settore. Gli astronomi islamici, in particolare, non mancarono di sottoporre a critiche l'opera di Tolomeo, soprattutto per quanto riguarda l'uso dell'equante e la conseguente violazione dell'assioma del moto uniforme, tuttavia non contestarono i risultati di base della cosmologia classica, limitandosi ad aggiustare le teorie planetarie senza apportare alcuna significativa variazione nelle determinazioni della parallasse solare, e quindi nella valutazione delle distanze cosmologiche, già realizzate dagli antichi.

L'epoca moderna

Per avere una vera svolta nella storia della misura della parallasse, bisogna dunque attendere la comparsa del sistema eliocentrico copernicano e lo studio dei moti planetari di Keplero. Johannes Kepler (1571-1630), ultimo assistente dell'eccentrico Tycho Brahe (1546-1601), l'uomo che aveva portato alla massima perfezione possibile la capacità risolutiva della strumentazione astronomica pre-telescopica, alla morte del maestro aveva potuto ottenere, non senza difficoltà, la disponibilità di tutti i dati osservativi relativi a Marte, che furono fondamentali per portarlo alla formulazione delle sue celebri leggi (LOMBARDI 2008). Grazie a quei dati, Keplero si rese anche conto che la parallasse solare non poteva eccedere il minuto o al massimo i 2' d'arco. Infatti, al momento dell'opposizione di Marte, nel sistema copernicano - ma anche nel sistema ticonico - il pianeta si trova più vicino alla Terra di quanto non lo sia il Sole, eppure, anche in questa configurazione, l'eccellente strumentazione di Tycho, il cui potere risolutivo era in grado di raggiungere il 1' d'arco e aveva migliorato di un fattore 10 la precisione della misura rispetto a tutta la strumentazione astronomica precedente, non riusciva a rilevare alcuna parallasse per il pianeta. Keplero ne dedusse pertanto che la parallasse di 1' e la conseguente distanza di 3469 raggi terrestri per il Sole fossero solo un limite inferiore, e quindi incoraggiò tutti i suoi contemporanei a rilanciarsi alla ricerca della determinazione di questa misura. Sarà l'astronomo gesuita Giovan Battista Riccioli (1598-1671) uno dei primi a raccogliere

l'invito di Keplero e anche uno degli ultimi ad applicare il metodo della dicotomia lunare di Aristarco, pur evidenziandone i limiti pratici. Egli, a differenza di Ipparco e Tolomeo, disponeva di uno strumento nuovo, il cannocchiale, che gli permise di ridurre gli errori di misura evidenziati in precedenza e grazie al quale ricavò per la parallasse solare un valore di 28", che equivale a collocare il Sole ad una distanza di circa 50 milioni di chilometri dalla Terra. Inoltre, nel nuovo modello cosmologico di Riccioli, Saturno viene portato ad una distanza di 73000 diametri terrestri, equivalenti ad oltre 940 milioni di chilometri, mentre la sfera delle stelle fisse assume un dimensione di ben 300 milioni di diametri terrestri, vale a dire quasi 2000 miliardi di chilometri (Riccioli 1651a, pp. 107-114; Riccioli 1651b, p. 456; Van Helden 1985, pp. 113-117). Insomma, con l'ausilio del cannocchiale e applicando quegli stessi metodi geometrici che dopo 1500 anni continuavano a mantenere una loro validità, il cosmo ancora geocentrico di Riccioli era cresciuto molto più di quanto non si fossero espansi i sistemi eliocentrici di Copernico, Galileo e Keplero (Fig. 5)!

Un nuovo metodo: la triangolazione planetaria

Con la guida di Giovanni Domenico Cassini (1625-1712), l'astronomo italiano naturalizzato francese dopo che ebbe assunto la direzione dell'Observatoire de Paris, gli astronomi d'oltralpe furono i primi ad adottare una nuova procedura per il calcolo della parallasse solare, abbandonando definitivamente i metodi classici. Essi decisero di affrontare il problema passando attraverso la misura della parallasse di Marte. L'introduzione del telescopio nelle osservazioni astronomiche e le rapide implementazioni tecnologiche, quali montatura e micrometro, che resero quest'oggetto uno strumento indispensabile alla scienza di Urania, avevano, infatti, portato a maturazione i tempi per la rilevazione della parallasse del pianeta rosso, sfuggita a Tycho. L'idea di fondo degli astronomi francesi era di effettuare osservazioni simultanee del pianeta da due postazioni significativamente distanti sulla superficie della Terra, misurando la sua distanza da una stella di campo scelta come riferimento; conoscendo esattamente la lunghezza del segmento immaginario che, passando attraverso la Terra, collega le due postazioni osservative, era possibile ricavare la parallasse per triangolazione e quindi la distanza di Marte. Una volta nota questa, attraverso le leggi di Keplero si poteva quindi determinare la parallasse solare. Nell'ideazione della nuova metodologia, di estrema importanza furono gli studi sul Sole compiuti da Cassini con la grande meridiana di San Petronio a

Bologna. Con essa ricavò non solo un nuovo e più accurato valore dell'inclinazione dell'eclittica ($23^{\circ}29'15''$) e la conferma della non uniformità della velocità orbitale della Terra, in accordo con le leggi kepleriane dei moti planetari, ma anche una precisa tavola delle rifrazioni atmosferiche per ogni singolo grado di distanza zenitale, superando così la vecchia concezione ticonica secondo la quale la rifrazione era nulla al di sopra dei 25° di altezza sull'orizzonte (BÒNOLI 2006).

In occasione dell'opposizione di Marte del 1672, configurazione astrale nella quale l'effetto di parallasse si massimizzava, fu dunque organizzata una spedizione transoceanica per compiere osservazioni simultanee della distanza angolare del pianeta rosso rispetto alla stella Ψ Aquarii: Cassini, Jean-Felix Picard (1620-1682) e Ole Rømer (1644-1710) osservarono il fenomeno da Parigi, mentre Jean Richer (1630-1696) si recò a Cayenne, nella Guyana Francese. I risultati ottenuti da questa spedizione, pubblicati da Cassini diversi anni dopo, non furono risolutivi e lo stesso Cassini evidenziò la grande incertezza da cui erano affetti, ma essi portarono ad attribuire alla parallasse solare un valore massimo compreso tra $9''.5$ e $10''$ che, ponendo il Sole a una distanza dalla Terra di circa 138 milioni di chilometri, può essere considerato il primo valore moderno (VAN HELDEN 1985, pp. 129-143).

La procedura francese aveva aperto concretamente la strada alla possibilità di ricavare l'unità astronomica attraverso il calcolo delle parallassi planetarie. In questo consisteva anche il metodo proposto nel 1663 dal matematico e astronomo scozzese James Gregory (1638-1675) nella sua *Optica Promota*, metodo poi ripreso e ampliato da Edmond Halley (1656-1742) in seguito all'osservazione del transito di Mercurio sul Sole del 7 novembre 1677. Halley, nella sua relazione pubblicata nel 1679, evidenziava come

rimanesse un'unica osservazione con cui risolvere il problema della distanza del Sole dalla Terra, un privilegio riservato agli astronomi del prossimo secolo, vale a dire quando la stella di Venere passerà sul disco del Sole, il che accadrà solo il 26 maggio⁴ 1761.⁵ (HALLEY 1679, p. 4)

⁴ Il transito di Venere del 1761 ebbe luogo in realtà il 6 giugno; all'epoca in cui scrive Halley, però, nel Regno Unito era ancora in vigore il calendario giuliano, che anticipava quello gregoriano di 11 giorni. Questo spiega la discrepanza nella data.

⁵ *Unica manet observatio, cujus ope problema de distantia Solis a Terra, se Astronomis insequentis Seculi solutum dabit, viz. cum Veneris Stella se in disco Solari spectandam præbuerit quod non accidit ante Annum 1761 Maii 26.*

In quest'occasione la parallasse di Venere sarebbe stata «quasi tre volte più grande di quella del Sole», rendendo le osservazioni da farsi molto più facili di qualsiasi altra occasione (VAN HELDEN 1985, p. 145).

Com'è noto, il transito di Venere è un fenomeno molto raro da osservare, data la diversa inclinazione dell'orbita di Venere rispetto a quella terrestre, così esso si verifica solamente ogni 105 anni e mezzo oppure ogni 121 e mezzo, alternativamente, con due eventi appaiati, separati di otto anni l'uno dall'altro. Pertanto l'occasione fornita dalla coppia di transiti del XVIII secolo diventava un appuntamento scientifico fondamentale, cui la comunità astronomica internazionale non poteva sottrarsi. Come per la determinazione della parallasse di Marte, anche la determinazione della parallasse solare tramite il transito di Venere si basa sulla necessità di avere due postazioni osservative collocate in località molto distanti tra loro. Due astronomi che osservano il fenomeno rispettivamente dall'emisfero nord o dall'emisfero sud, vedono Venere muoversi lungo traiettorie diverse sulla superficie del Sole. Calcolando la lunghezza del segmento immaginario che, passando attraverso la Terra, collega le due postazioni osservative, questa diviene la base per effettuare la triangolazione di Venere e quindi calcolarne la distanza. Anche in questo caso, nota la distanza di Venere, attraverso le leggi di Keplero si poteva determinare la distanza di questo dal Sole e quindi del Sole dalla Terra.

L'invito di Halley fu accolto da moltissimi astronomi e il transito di Venere del 6 giugno 1761 fu recensito da almeno 120 osservatori che lo avevano osservato dalla Francia, dalla Gran Bretagna, dalla Germania, dalla Spagna, dalla Russia e dall'America coloniale (CHAPMAN 2018a). Tuttavia, una volta che tutti i dati osservativi furono ridotti e pubblicati, divenne evidente che l'imponente campagna internazionale non aveva fornito il risultato sperato, vista la difformità nei risultati, che variavano da $8''.28$ a $10''.6$ secondi d'arco, e pertanto non era possibile giungere a una conclusione definitiva in merito al reale valore della parallasse solare. Più di tutto, su questo insuccesso pesò l'inaspettato fenomeno della 'goccia nera', ossia il fatto che, quando il disco di Venere si avvicinava al brillante bordo solare, appariva un filamento nero, una specie di ponte, che collegava i due astri, causando un grande margine d'incertezza nella determinazione dell'esatto tempo di contatto, e quindi sull'inizio o sul termine del transito. Il successivo transito del 1769 fu affrontato con la coscienza di questo nuovo problema e con una strumentazione astronomica che nel frattempo si era notevolmente evoluta, dato che il doppietto acromatico era divenuto un'implementazione fondamentale

nella nuova generazione di telescopi. Purtroppo, esso fornì un valore della parallasse solare compreso tra $8''.43$ e $8''.80$, considerato ancora troppo impreciso per gli standard di misura che l'astronomia aveva ormai raggiunto, visto che comportava un'incertezza sulla reale distanza del Sole dalla Terra di oltre 300 mila chilometri (CHAPMAN 2018b).

Il Diciannovesimo secolo

Lo straordinario allineamento tra Sole, Venere e Terra previsto per il secolo seguente fu ancora una volta atteso con grande trepidazione dalla comunità scientifica internazionale, e finalmente vi ebbero una parte attiva anche gli astronomi italiani, da pochi anni aggregati sotto un unico regno. Poiché il fenomeno non era visibile in Italia, in occasione del primo passaggio ottocentesco previsto per il 9 dicembre 1874, il governo finanziò una spedizione in India. Il luogo prescelto fu Muddapur (l'odierna Madhapur) vicino a Calcutta, e tutta la fase organizzativa della missione fu diretta da Pietro Tacchini (1838-1905), astronomo aggiunto presso l'Osservatorio di Palermo, in stretta collaborazione con l'amico Giuseppe Lorenzoni (1843-1914), che lavorava invece presso l'Osservatorio di Padova. Lorenzoni non prese parte in prima persona alla spedizione, troppo impegnato con le incombenze che lo occupavano in Osservatorio dove, di fatto, doveva sostituire in tutto e per tutto il vetusto direttore Giovanni Santini (1787-1877), ma sovrintese alle operazioni di sistemazione degli strumenti necessari e alla loro spedizione. Da Padova partirono invece l'astronomo aggiunto Antonio Abetti (1846-1928), che era stato magistralmente istruito proprio da Lorenzoni all'uso dello spettroscopio, e Antonio Cagnato, un giovanissimo meccanico che doveva prendersi cura di tutta la strumentazione. Membri della spedizione furono anche Alessandro Dorna (1825-1886), direttore dell'Osservatorio di Torino, e Carlo Morso, un astronomo amatore di Palermo, aggregatosi alla spedizione a sue spese. Infine, arrivò a Muddapur anche il gesuita padre Eugène Lafont (1837-1908) direttore del collegio di St. Xavier di Calcutta ed esperto di astronomia, aggregandosi alla spedizione italiana (Fig. 6). Alla missione avrebbe dovuto partecipare anche padre Angelo Secchi (1818-1878), ma all'ultimo momento fu costretto a rinunciare per problemi di salute. Tutti gli sforzi organizzativi italiani si concentrarono sulla pianificazione delle osservazioni spettroscopiche del fenomeno, secondo una metodologia innovativa elaborata proprio dai nostri astronomi che furono gli unici ad utilizzarla in quell'occasione, con lo scopo primario di testare la validità del metodo per farne, poi, largo impiego nel

successivo transito del 1882. Il procedimento osservativo consisteva nell'evidenziare spettroscopicamente le righe di emissione della cromosfera solare, composta prevalentemente d'idrogeno e non osservabile quindi visualmente, così da riuscire a cogliere il passaggio del disco oscuro del pianeta su di essa prima ancora che questo toccasse il bordo del Sole. In questo modo era possibile registrare con precisione anche il primo e l'ultimo contatto tra i due astri, quelli esterni, evitando il problema della 'goccia nera'.

I metodi di osservazione impiegati furono due: il primo, utilizzato da Tacchini, consisteva nel porre la fenditura dello spettroscopio, tenuta molto stretta, in posizione tangente al bordo solare in modo da generare uno spettro cromosferico da osservarsi in corrispondenza della riga di emissione H_{α} . L'ingresso del pianeta nella fenditura, corrispondendo al passaggio di Venere davanti alla cromosfera e quindi a un parziale occultamento della cromosfera stessa, produceva la rottura dello spettro e la comparsa di una riga trasversale, dapprima sottilissima e poi via via sempre più spessa, proporzionalmente alla frazione di pianeta entrante. L'egresso del pianeta dalla fenditura avrebbe poi prodotto un effetto analogo ma opposto, fino alla completa scomparsa della riga. Se la fenditura veniva posizionata in maniera corretta, la comparsa e la scomparsa graduale della banda trasversale fornivano in successione, all'ingresso e all'uscita del pianeta dal disco solare, tutti gli istanti dei contatti tra Venere e il Sole.

Il secondo metodo, utilizzato da Abetti, il quale lo aveva appreso dal suo maestro Lorenzoni, consisteva ancora nel posizionare la fenditura tangente al bordo solare, ma tenendola allargata, così da ottenere righe sufficientemente ampie da poter osservare, in corrispondenza della riga H_{α} , l'intera porzione di cromosfera racchiusa entro la fenditura. Comprendendo anche una piccolissima porzione del disco del Sole, se ne evidenziava l'arco nero in assorbimento contornato dalla brillante immagine rossa della cromosfera. Il pianeta era quindi visibile come un dischetto nero transitante sulla cromosfera; al momento della congiunzione tra questo e il bordo nero del Sole si registrava l'istante del primo contatto, e in maniera analoga i successivi.

Le innovative osservazioni italiane riscossero un unanime consenso internazionale, ma non poterono pervenire all'autonoma determinazione di un valore per la parallasse solare, mancando di una seconda stazione che avesse applicato la medesima metodologia osservativa, con la quale individuare la base della triangolazione con Venere. Se ciò fosse avvenuto, probabilmente il risultato italiano avrebbe potuto dare

un importante contributo alla determinazione della misura, visto che nel loro complesso le campagne osservative del 1874 ottennero ancora un risultato affetto da un errore del 2%. Purtroppo, sia a causa delle difficoltà finanziarie in cui versava il nuovo Governo, sia per colpa di un'evidente miopia scientifica del preposto Ministro dell'Istruzione, nel successivo passaggio del 1882 non fu possibile organizzare altre spedizioni, così gli astronomi italiani persero l'opportunità di essere coinvolti nel più ampio dibattito scientifico che si sviluppò in seguito, con la grave conseguenza di un progressivo arresto, in Italia, dello sviluppo della moderna astrofisica (PIGATTO 2001; PIGATTO 2004).

La campagna internazionale per l'osservazione di Eros

Il transito di Venere è un evento estremamente raro ma, fortunatamente, nel XIX secolo si cominciò ad individuare un numero sempre maggiore di oggetti in orbita attorno al Sole, che talvolta si avvicinavano alla Terra anche più di Venere, divenendo così i candidati ideali per determinare con essi, mediante il metodo della triangolazione, la parallasse solare: gli asteroidi. Uno dei vantaggi fondamentali che presentano questi oggetti, rispetto ai pianeti, è che essi, osservati al telescopio, appaiono puntiformi così che, misurandone la distanza da una stella di riferimento, si eliminano gli errori dovuti alle dimensioni planetarie e osservandone il transito sul disco solare, si elimina definitivamente l'effetto 'goccia nera'. Una prima campagna osservativa, incentrata sugli asteroidi Victoria, Sappho e Iris, fu condotta tra il 1888 e il 1889 dall'astronomo scozzese David Gill (1843-1914), il quale ricavò per la parallasse solare un valore di 8".8 secondi d'arco, corrispondente una distanza del Sole dalla Terra di 149.669.000 chilometri (WEBB 1999, p. 48). Ma l'oggetto più interessante allo scopo fu scoperto qualche anno più tardi.

Il 13 agosto 1898, Gustav Witt dell'Osservatorio Urania di Berlino e Auguste H.P. Charlois dell'Osservatorio di Nizza scoprirono, ciascuno in modo indipendentemente, su lastra fotografica un nuovo asteroide, il 1898 DQ. Questo nuovo pianeta, successivamente denominato 433 Eros, si rivelò essere il primo membro di un nuovo gruppo di asteroidi, i cosiddetti 'near-Earth object'. Sin da subito se ne riconobbe la potenzialità nella determinazione della parallasse solare: l'opposizione del 30 ottobre 1900, infatti, avrebbe portato il pianetino molto vicino alla Terra, più di qualsiasi altro oggetto celeste mai osservato in precedenza eccetto la Luna. Quale miglior opportunità poteva mai offrirsi agli astronomi di tutto il mondo per determinare

finalmente la parallasse solare con una precisione ineguagliabile? Il *Comité International Permanent pour l'Exécution Photographique de La Carte du Ciel*, durante la riunione del 19 luglio 1900, stabilì così di istituire una Commissione temporanea speciale, dedicata al coordinamento delle osservazioni di Eros, che si sarebbero svolte in tutto il globo. La raccomandazione principale posta dalla Commissione era di osservare l'asteroide sia al mattino che alla sera, così da avere il più ampio angolo orario possibile per massimizzare lo spostamento parallattico. Tra gli Osservatori italiani che parteciparono al progetto, vi fu anche quello di Padova, dove a farsi carico delle osservazioni fu Antonio Maria Antoniazzi (1872-1925). Questi effettuò osservazioni di tipo micrometrico con il rifrattore Merz da 187 mm di apertura, lo strumento più importante presente in istituto, seppur di dimensioni modeste rispetto agli altri grandi telescopi che in tutto il mondo partecipavano al progetto. Per le osservazioni micrometriche, quali erano quelle espletate da Antoniazzi, la Commissione aveva suggerito di misurare sia ascensione retta che declinazione tramite il micrometro, tenendo asteroide e stella di confronto contemporaneamente visibili nel campo del telescopio. Antoniazzi tuttavia preferì adottare il metodo dei transiti, più adatto al piccolo rifrattore padovano: questo metodo consisteva nel registrare tramite cronografo la differenza dei tempi di transito allo stesso cerchio orario del pianeta e della stella di confronto, eseguendo contemporaneamente, tramite il micrometro, la misura della differenza di declinazione, mantenendo fisso il telescopio. Un vantaggio essenziale, in tal modo, era di poter usare sempre la stessa stella comparativa, tanto di sera quanto di mattina. Un'osservazione completa durava in media mezz'ora e in questo intervallo temporale si raccoglievano dieci gruppi di transiti e dieci misure di declinazione sia per il pianeta che per la stella, in differenti posizioni del telescopio (Fig. 7). Nel complesso, Antoniazzi eseguì 180 osservazioni micrometriche, relative a 113 stelle di confronto scelte dal catalogo *Astronomische Gesellschaft Katalog* (AGK) e da esse ricavò un valore preliminare della parallasse solare di $8''.84 \pm 0''.03$. Tuttavia, resosi conto che le posizioni stellari dell'AGK presentavano degli errori, Antoniazzi si procurò le posizioni più precise dello *Standard Photographic Catalogue* di Arthur Robert Hinks (1873-1945), grazie alle quali ricavò una parallasse di $8''.795 \pm 0''.023$, un valore che fu considerato di estrema accuratezza, tenuto conto della modesta strumentazione con cui era stato ottenuto, tanto che ai dati di Antoniazzi fu dato lo stesso peso di quelli ottenuti con il telescopio del Lick Observatory, che aveva un'apertura di 91 cm (PIGATTO 2002).

A metà del '900, l'introduzione della tecnologia radar in astronomia e l'avvento dell'astronomia satellitare e spaziale hanno reso superati e obsoleti tutti i metodi fin qui descritti per misurare la parallasse solare, ma essi restano a testimoniare le fatiche compiute dall'uomo per arrivare a determinare con la miglior accuratezza possibile la distanza della Terra dal Sole e, con essa, le reali dimensioni del Cosmo in cui abitiamo.

Bibliografia

- ARISTOTELE (1999), *Il cielo. Testo greco a fronte*, a cura di A. Jori, Sant'Arcangelo di Romagna, Rusconi Libri, 1999.
- F. BÒNOLI (2006), *350 anni della grande meridiana di Cassini in San Petronio*, in F. BÒNOLI, G. PARMEGGIANI, F. POPPI (a cura di), *Atti del Convegno Il Sole nella Chiesa: Cassini e le grandi meridiane come strumenti di indagine scientifica. Bologna, Archiginnasio, 22-23 settembre 2005*, «Giornale di Astronomia», 2006, 32 (1), pp. 59-68.
- C. B. BOYER (1990), *Storia della matematica*, Cles (TN), Oscar Saggi Mondadori, 1990.
- A. CHAPMAN (2018a) *Venus in Transit, June 1761*, in A. CHAPMAN, *Comets, Cosmology and the Big Bang: A history of astronomy from Edmond Halley to Edwin Hubble*, Lion Hudson Limited, 2018 (ebook edition).
- A. CHAPMAN (2018b) *Venus transits the Sun in 1769*, in A. CHAPMAN, *Comets, Cosmology and the Big Bang: A history of astronomy from Edmond Halley to Edwin Hubble*, Lion Hudson Limited, 2018 (ebook edition).
- E. HALLEY (1679), *Mercurii transitus sub Solis disco, Octob. 28 Anno 1677 cum tentamine pro Solis parallaxi*, in E. HALLEY, *Catalogus stellarum australium*, Londini, typis Thomae James, 1679.
- M. HOSKIN (2009), *Storia dell'Astronomia*, Milano, Ed. BUR-Rizzoli, 2009.
- M. KLINE (1999), *Storia del pensiero matematico. Volume primo. Dall'antichità al Settecento*, Torino, Biblioteca Einaudi, 1999.
- A. M. LOMBARDI (2008), *Keplero. Una biografia scientifica*, Torino, Codice edizioni, 2008.
- H. PAYN (1914), *The well of Eratosthenes*, «The Observatory», Vol. 37 (1914), pp. 287-288.
- L. PIGATTO, V. ZANINI (2001), *Spectroscopic observations of the 1874 transit of Venus: the Italian party at Muddapur, east India*, «Journal of Astronomical History and Heritage», 2001, 4, pp. 43-58.

- L. PIGATTO, V. ZANINI (2002), *Opposition of Eros (433) of 1900-01 and the contribution of Padova Observatory to solar parallax determination*, «Journal of Astronomical History and Heritage», 2002, 5(2), pp. 141-153.
- L. PIGATTO, V. ZANINI (2004), *The 1882 transit of Venus observed in Italian observatories*, «Journal of Astronomical History and Heritage», 2004, 7 (1), pp. 18-24.
- G. B. RICCIOLI (1651a), *Almagestum novum astronomiam veterem novamque complectens...*, Tomus Primus, Bononiae, Ex Typographia Haeredis Victorij Benatij, 1651.
- G. B. RICCIOLI (1651b), *Ad Magnanimum Principem Nonoratum Il... Almagesti novi Pars Posterior Tomi Primi*, Bononiae, Typis Haeredis Victorij Benatij, 1651.
- G.V. SCHIAPARELLI (1998a), *Opinioni e ricerche degli antichi sulle distanze e sulle grandezze dei corpi celesti, loro idee sull'estensione dell'universo visibile*, in G.V. SCHIAPARELLI, *Scritti sulla storia dell'astronomia antica*, ristampa anastatica, Bologna, Collana Mimesi, 1998, vol. I, pp. 327-360.
- G.V. SCHIAPARELLI (1998b), *Le sfere omocentriche di Eudosso di Callippo e di Aristotele*, in G.V. SCHIAPARELLI, *Scritti sulla storia dell'astronomia antica*, ristampa anastatica, Bologna, Collana Mimesi, 1998, vol. II, pp. 3-112.
- G. J. TOOMER (1997), *Tolomeo e i suoi predecessori greci* in C. Walker (a cura di), *L'astronomia prima del telescopio*, Bari, Ed. Dedalo, 1997, pp. 87-119.
- A. VAN HELDEN (1985), *Measuring the Universe*, Chicago&London, The University of Chicago Press, 1985
- S. WEBB (1999), *Measuring the Universe: The Cosmological Distance Ladder*, Chichester, Springer 1999.
- J. WEIR (1931), *The Method of Eratosthenes*, «Journal of the Royal Astronomical Society of Canada», Vol. 25, pp. 294-296.

Valeria Zanini, laureata in Astronomia e tecnologo dell'INAF-Osservatorio Astronomico di Padova, è responsabile del Museo *La Specola* e dei Beni Culturali dell'Osservatorio stesso, dei quale cura la conservazione, tutela e valorizzazione anche mediante studi e ricerche. Collabora attivamente con il Servizio Biblioteche Musei e Terza Missione dell'INAF.

Didascalie:

FIG. 1: La configurazione geometrica tra Terra, Luna e Sole che si presenta in fase di dicotomia lunare.

FIG. 2: Il diagramma delle eclissi mira a determinare i rapporti dimensionali di Terra, Luna e Sole durante le eclissi lunari. In figura è rappresentata la Luna immersa nel cono d'ombra durante l'eclisse; Aristarco assume che il diametro angolare del Sole e della Luna siano uguali tra loro e misurino 2° e che il diametro dell'ombra terrestre, alla distanza della Luna, sia doppio rispetto al diametro lunare, assunzione che egli ricava probabilmente dall'analisi della durata delle eclissi storiche di cui aveva dati disponibili. Dai teoremi di congruenza e di similitudine dei triangoli della geometria Euclidea, nonché dai risultati della dicotomia lunare, Aristarco ricava: $\frac{19}{3} < R_S/R_T < \frac{43}{6}$ e $\frac{108}{43} < R_T/R_L < \frac{60}{19}$ cioè $R_S \sim 6^{3/4} R_T$ e $R_L \sim \frac{1}{3} R_T$. Noto R_T , si potrebbero quindi ricavare le dimensioni assolute, ma questo valore non viene fornito da Aristarco nel suo trattato *Sulle dimensioni e distanze del Sole e della Luna*.

FIG. 3: Al solstizio estivo il Sole si trovava allo zenit di Syene (S), mentre ad Alessandria (A) i raggi solari formavano un angolo di $1/50$ di circonferenza con lo gnomone. Conoscendo la distanza (D) tra Syene e Alessandria, Eratostene poté calcolare la dimensione della Terra.

FIG. 4: Lo strumento parallattico di Tolomeo, sfruttando la funzione corda di Ipparco, le cui tavole furono riprese e implementate da Tolomeo stesso, risolveva la difficoltà di dover graduare gli archi di altre tipologie di strumenti ed era utilizzato principalmente per correggere le coordinate eclittiche della Luna dagli effetti di parallasse.

FIG. 5: Nell'*Almagestum Novum* Riccioli confronta i risultati forniti dalle diverse misure di parallasse e dai diversi modelli cosmologici degli antichi o degli autori a lui contemporanei; si vede che il modello geocentrico di Riccioli presentato nell'*Almagestum* porta ad un Cosmo molto più vasto di quello ipotizzato da Copernico o da Keplero.

FIG. 6: I membri che parteciparono alla missione per l'osservazione del transito di Venere sul Sole del 1874. Da sinistra a destra, seduti: E. Lafont, P. Tacchini, il console F. Lamouroux, A. Dorna, C. Morso; in piedi: il capostazione di Muddapur, Mr Witley, A. Abetti, A. Cagnato (Archivio Storico dell'Osservatorio Astronomico di Padova).

FIG. 7: La prima pagina del Registro delle Osservazioni nel quale sono riportate le misure micrometriche compiute da Antoniazzi (Archivio Storico dell'Osservatorio Astronomico di Padova).