

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI “FEDERICO II”

SCUOLA POLITECNICA E DELLE SCIENZE DI BASE

AREA DIDATTICA SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

Corso di Laurea in Fisica

ANNO ACCADEMICO 2017/2018



Tesi di Laurea Magistrale

Le Fonti Ellenistiche dell'*Almagesto* di Tolomeo

Relatori:

Prof. Giovanni Covone

Prof. Lucio Russo

Prof. Alessandro Della Corte

Candidato: Alessandro Amabile

Matricola: N94/284

Indice

Introduzione	1
1 L'Astronomia Ellenistica	3
1.1 Ascesa e Caduta della Scienza Ellenistica	3
1.2 Il Problema delle Fonti	5
1.3 Il Metodo Scientifico Ellenistico	8
1.4 L'Ipotesi Eliocentrica	12
1.5 Ipparco e l'Eliocentrismo Dinamico	15
1.6 Seleuco e la Prova dell'Eliocentrismo	23
1.7 Stelle e Comete	25
2 L'Astronomia Tolemaica	28
2.1 Vita e Opere di Tolomeo	28
2.2 Matematica, Fisica e Metafisica	29
2.3 La Struttura Generale del Cosmo	36
2.4 Teoria e Osservazione nell' <i>Almagesto</i>	41
2.5 La Fonte di Tolomeo	49
3 Tolomeo, l'Eliocentrismo e la <i>Sphairopoia</i>	59
3.1 Scienza e Tecnica	60
3.2 La <i>Sphairopoia</i>	64
3.3 Astronomia, Geometria, Meccanica	66
3.4 La Macchina di Anticitera	80
3.5 Tolomeo e la <i>Sphairopoia</i>	91
Conclusione	104
Bibliografia	108

Introduzione

L'*Almagesto* di Tolomeo è probabilmente una delle opere scientifiche più lette e studiate della storia, avendo costituito lo standard dell'astronomia matematica dall'epoca della sua composizione, nel II secolo d.C., fino all'affermarsi del modello copernicano nel XVI secolo. Nel suo trattato Tolomeo affronta pressoché tutti gli argomenti di pertinenza dell'astronomia matematica greca, costruendo in particolare dei modelli geometrici atti a prevedere le posizioni di Sole, Luna e cinque pianeti osservabili ad occhio nudo per un tempo indefinito. Con l'eccezione delle stelle fisse, i movimenti di tutti i corpi celesti trattati nell'*Almagesto* sono descritti utilizzando composizioni di moti circolari nella forma di eccentrici ed epicicli, modelli che Tolomeo dice di riprendere dal lavoro di astronomi a lui precedenti risalenti al periodo ellenistico (III-II sec. a.C.). I dettagli quantitativi dei modelli dipendono dai valori di alcuni parametri che Tolomeo deriva da un centinaio di osservazioni astronomiche opportunamente selezionate, compiute da lui stesso o dai suoi predecessori e distribuite su un periodo di circa 900 anni. Nell'*Almagesto* è incluso anche un catalogo di 1022 stelle suddivise in 48 costellazioni che a meno di poche aggiunte minori rimase il riferimento per l'astronomia islamica ed europea fino alla pubblicazione del catalogo di Tycho Brahe del 1598. Il cosmo tolemaico è chiuso e delimitato dalla sfera delle stelle fisse e la prospettiva generale della teoria è rigorosamente geocentrica. È superfluo dunque sottolineare l'importanza che l'*Almagesto* ha avuto tanto nella storia dell'astronomia quanto nella storia della filosofia e del pensiero occidentale in generale.

Tuttavia all'inizio del XIX secolo sono cominciati a sorgere molti dubbi sul lavoro compiuto da Tolomeo. Delambre, nella sua *Histoire de l'Astronomie Ancienne*, evidenziò in particolare come Tolomeo affermi nell'*Almagesto* di aver compiuto osservazioni astronomiche in perfetto accordo con le previsioni della sua teoria anche laddove sappiamo che questa è in grave errore, circostanza che sarebbe emersa inequivocabilmente compiendo delle reali osservazioni. Delambre sospetta quindi che Tolomeo abbia spacciato per osservazioni quelli che in realtà erano risultati di calcoli compiuti utilizzando la sua stessa teoria. La tesi di Delambre è passata relativamente inosservata per lungo tempo, fino a quando nel 1977 R. Newton, nel suo libro *The Crime of Claudius Ptolemy*, l'ha riportata alla luce analizzando gran parte delle osservazioni astronomiche contenute nell'*Almagesto*. La conclusione di Newton è che Tolomeo andrebbe considerato non il massimo astronomo dell'antichità, ma il più grande truffatore della storia della scienza.

Nel presente lavoro assumeremo che il 'crimine' di cui parla Newton sia effettivamente avvenuto, ma cercheremo di dimostrare che si tratta di un delitto

di natura *colposa*, ovvero, secondo l'enciclopedia Treccani, di una "condotta civilmente o penalmente illecita, non determinata da volontà di nuocere, ma da negligenza, imprudenza, imperizia o inosservanza delle leggi". Fuor di metafora, ciò equivale a dire che Tolomeo ha compiuto inconsapevolmente un parziale recupero di antiche conoscenze, che nella loro forma originaria gli risultano tuttavia inaccessibili a causa del divario culturale che lo separa dalle sue fonti, risalenti in massima parte al periodo d'oro della scienza ellenistica. Quella che Newton classifica come frode appare come la naturale conseguenza di un profondo regresso metodologico, come emerge chiaramente da uno studio dell'intero *corpus* tolemaico e dal confronto con quanto sappiamo della scienza ellenistica. In particolare va interpretato in quest'ottica anche il primato che Tolomeo si intesta a proposito dell'elaborazione di una teoria planetaria.

Non vi è dubbio infatti che una teoria planetaria fosse già stata elaborata in età ellenistica, ma è difficile stabilire quali potessero essere le caratteristiche di una tale teoria. Sappiamo tuttavia che sin dagli albori dell'età ellenistica alla visione geocentrica dell'universo si era affiancata l'ipotesi eliocentrica, cui è associato solitamente il nome di Aristarco di Samo, vissuto all'inizio del III sec. a.C.. Nonostante per molto tempo si sia ritenuto che l'idea di Aristarco rimase un caso isolato, Russo (1994) ha mostrato che Ipparco di Nicea, vissuto nel II sec. a.C., era verosimilmente giunto a sviluppare l'ipotesi di Aristarco in una teoria planetaria eliocentrica, includendovi anche elementi dinamici.

L'obiettivo del presente lavoro è avanzare un'ipotesi sul carattere della fonte a cui attinse Tolomeo nella stesura dell'*Almagesto*. Trattandosi di una fonte risalente al II sec. a.C., sarà necessario innanzitutto discutere in un certo dettaglio le caratteristiche generali della scienza ellenistica, con particolare attenzione ai risultati e ai metodi propri dell'astronomia. La nostra presentazione si baserà in gran parte sul lavoro di Russo (2010). In secondo luogo analizzeremo le caratteristiche dell'astronomia praticata da Tolomeo, al fine di evidenziare il divario contenutistico e metodologico che lo separa dai suoi predecessori ellenistici. Solo allora saremo pronti ad avanzare la nostra ipotesi, la quale tuttavia per essere pienamente legittimata richiederà di fare un passo indietro per ripercorrere alcune tappe dell'evoluzione dell'astronomia greca che si legarono inscindibilmente allo sviluppo di altre discipline matematiche. Alla tesi principale se ne affiancherà così un'altra, più generale, circa il modo in cui debba intendersi lo sviluppo dell'astronomia ellenistica nelle sue profonde connessioni con la tecnologia.

Il quadro che ne emergerà riserverà non poche sorprese.

Capitolo 1

L'Astronomia Ellenistica

1.1 Ascesa e Caduta della Scienza Ellenistica

Con il termine *ellenismo* si intende un preciso contesto storico, geografico e culturale che si colloca tra il IV e il I sec. a.C., avente il suo centro principale ad Alessandria d'Egitto.

Convenzionalmente l'inizio del periodo ellenistico della storia greca si fa risalire al 323 a.C., anno della morte di Alessandro Magno. Al suo apice l'impero alessandrino si estendeva dall'Egitto fino all'India settentrionale, passando per l'Asia Minore. Alla morte di Alessandro l'accesa disputa tra i suoi successori culminò nella cosiddetta Guerra dei Diadochi (315 a.C. - 301 a.C.), al termine della quale l'impero si divise in tre stati principali:

- L'Egitto, con capitale la nuova città di Alessandria (fondata nel 331 a.C.), retto dalla dinastia dei Tolomei;
- Il regno dei Seleucidi, con capitale Antiochia, che comprendeva Siria, Asia Minore, Mesopotamia e Persia;
- Lo stato degli Antigonidi, che comprendeva la Macedonia e alcune città della Grecia.

A questi stati principali si aggiungevano altri stati minori, come il regno di Pergamo, e città greche autonome come Rodi, Siracusa e Marsiglia.

Con la formazione di questi nuovi stati continuò il processo di ellenizzazione del Mediterraneo e del vicino Oriente già iniziato da Alessandro; al tempo stesso i nuovi regni subirono influenze dalle culture indigene e spesso ne adottarono le usanze. I regni ellenistici ereditarono dunque una popolazione che vedeva mescolarsi elementi indigeni e greci emigrati e la cultura ellenistica rappresentò in molti ambiti un'ibridazione dell'antichità greca con le culture asiatiche e medio-orientali.

La scienza ellenistica raggiunse l'apice del suo sviluppo durante il III secolo a.C., nell'alveo di questo incontro tra la Grecia e gli antichi regni. Tale circostanza non deve stupire: mentre la Grecia classica era stata la culla della filosofia naturale, sul piano strettamente tecnologico l'Egitto e la Mesopotamia erano ad un livello nettamente superiore grazie a millenni di lenta accumulazione. Non è azzardato immaginare che il pensiero scientifico, dovendosi nutrire tanto della speculazione

teorica quanto delle applicazioni concrete, sia nato dall'incontro tra il rigoroso approccio intellettuale dei Greci immigrati e le conoscenze empiriche tramandate negli antichi regni locali.

Molte figure di primo piano della scienza ellenistica si collocano in questo periodo aureo: Euclide (IV-III sec. a.C.), autore degli *Elementi*, insegnò e lavorò ad Alessandria sotto il regno di Tolomeo I; Aristarco di Samo (ca. 310 a.C. - ca. 230 a.C.), matematico e astronomo, lavorò negli stessi anni; Archimede di Siracusa (287 a.C. ca. - 212 a.C.), che si occupò di matematica, meccanica, idraulica, astronomia; Apollonio di Perga (III-II sec. a.C.), geometra e astronomo, noto soprattutto per il suo trattato sulle sezioni coniche.

Un ruolo importante nella fioritura della scienza ellenistica fu svolto dalle politiche culturali promosse da alcuni sovrani, che colsero bene l'importanza della scienza e della tecnologia nell'esercizio del potere. L'emblema di questa interazione tra scienza e istituzioni era il Museo di Alessandria, un vero e proprio centro di ricerca che ospitava decine di studiosi di vario ambito cui erano forniti vitto, alloggio e salario. Al Museo era annessa la più nota Biblioteca, sostenuta dai primi Tolomei con un'aggressiva campagna di raccolta di testi: numerosi agenti reali erano inviati per tutto il Mediterraneo con l'incarico di acquistare opere, mentre ad Alessandria un decreto di Tolomeo II sancì l'obbligo per le navi che attraccavano al porto di depositare nella Biblioteca tutti i libri trasportati a bordo. Alla ripartenza, ai proprietari erano rese delle copie, mentre gli originali entravano a far parte della collezione reale. Si stima che in questo modo la Biblioteca sia arrivata a contare tra i 40.000 e i 400.000 volumi, diventando di gran lunga il polo culturale più importante del mondo antico. Il primo direttore della Biblioteca fu Zenodoto, cui si deve la prima edizione critica di Omero, pilastro fondamentale della cultura greca. Tra i direttori della Biblioteca di Alessandria figurò anche Eratostene di Cirene (ca. 276 a.C. - ca. 194 a.C.), matematico e geografo, autore della prima misura conosciuta del raggio terrestre.

L'età d'oro della scienza ellenistica ebbe vita breve. A partire dal 212 a.C., anno del sacco di Siracusa e dell'uccisione di Archimede da parte delle forze del comandante Marcello, i principali centri dell'ellenismo furono gradualmente conquistati dai Romani, che nell'arco di un paio di secoli imposero il loro dominio su tutto il Mediterraneo. Le ricerche si interruppero quasi ovunque, e molti studiosi furono perseguitati, deportati a Roma come schiavi o costretti a emigrare. Mentre la Biblioteca di Alessandria sopravvisse, il Museo con ogni probabilità chiuse i battenti intorno al biennio 145-144 a.C., quando su spinta di Roma le persecuzioni di Tolomeo VIII decimarono la popolazione greca di Alessandria. È emblematico che in questi stessi anni la direzione della Biblioteca passò da Aristarco di Samotracia, uno dei massimi filologi dell'antichità, ad un certo Cida, ufficiale romano di cui non sappiamo nulla. Alcune città come Pergamo e Rodi divennero per qualche tempo stati satelliti di Roma, condizione che garantì una parziale stabilità e permise il proseguimento degli studi in taluni ambiti. Tale circostanza non era casuale, ma legata a motivi strategici: Rodi, ad esempio, era un centro importante degli studi di balistica e per la progettazione navale. Proprio a Rodi nella seconda metà del II sec. a.C. lavorò Ipparco di Nicea (ca. 190 a.C. - ca. 120 a.C.), il massimo astronomo dell'antichità. In Mesopotamia abbiamo invece notizia del lavoro di Seleuco di Babilonia (II sec. a.C.), noto principalmente per i

suoi studi sulle maree. Tuttavia, nell'ormai mutato contesto mediterraneo, in un paio di generazioni la ricerca scientifica morì dappertutto.

Dopo un'interruzione di circa due secoli, in epoca imperiale ci fu una parziale ripresa degli studi scientifici. A questo periodo risale l'opera di Claudio Tolomeo (ca. 100 d.C. - ca. 175 d.C.), che pure lavorò ad Alessandria d'Egitto e aveva certamente accesso alle opere conservate nella Biblioteca, ancora aperta benché orfana del Museo. Nei secoli successivi il livello scientifico continuò a scendere, come testimoniato dall'assenza di opere originali e dal prevalere di commenti ad antiche opere, sempre meno comprese per la perdita dello stesso metodo scientifico. Simbolicamente si può porre la fine della scienza antica al 415 d.C., anno della morte di Ipazia, matematica linciata da una folla di cristiani per non essersi voluta convertire alla nuova religione di stato, nella stessa Alessandria che qualche secolo prima era stata il cuore pulsante della cultura ellenistica.

1.2 Il Problema delle Fonti

Tra il III e il II sec. a.C. l'astronomia ellenistica si sviluppò all'interno di una tradizione scientifica continua, che tra le sue fila annoverava figure come i già menzionati Aristarco, Archimede, Apollonio e Ipparco. Il principale problema che si incontra nel tentativo di ricostruire metodi e risultati raggiunti dagli astronomi ellenistici è la mancanza di fonti dirette: sulla base delle opere di cui ci è pervenuto solo il titolo si stima che di tutta la produzione scientifica di questo periodo (che comprendeva opere di matematica, pneumatica, ottica, meccanica, medicina e tanto altro), solo l'1-2 % sia giunto intatto fino a noi. Le alterne vicende storiche e il generale regresso culturale hanno fatto sì che tali opere, non più comprese e, dunque, ritenute di scarso interesse, smettessero di essere tramandate nella loro forma originaria. Il processo di selezione, lungi dal preservare automaticamente gli scritti migliori, ha favorito piuttosto opere di compilazione o di carattere divulgativo, che utilizzavano un linguaggio ancora comprensibile nella tarda antichità e nel Medioevo. Scritti di età imperiale, metodologicamente inferiori, si sono così tramandati meglio delle opere ellenistiche di cui rappresentavano già una parziale degradazione: si è conservato ad esempio il trattato sugli specchi di Erone di Alessandria (I - II sec. d.C.), ma non l'opera sullo stesso argomento scritta da Archimede. In certi casi delle opere originali sono sopravvissute solo le parti più semplici e immediatamente accessibili: degli otto libri che componevano le *Coniche* di Apollonio di Perga, ad esempio, restano in greco solo i primi quattro libri; i tre successivi si sono conservati in arabo, mentre l'ultimo è perduto. Nel tentativo di tracciare un quadro della scienza ellenistica è dunque indispensabile rifarsi a fonti indirette, cioè a resoconti di autori dei secoli successivi che alludono, spesso sommariamente, ai risultati raggiunti dagli studiosi ellenistici.

Il caso dell'astronomia è particolarmente grave. Tutto quello che ci resta di una tradizione lunga circa tre secoli si può tristemente riassumere in poche righe:

- *Sulle dimensioni e le distanze del Sole e della Luna* è l'unico scritto pervenuto di Aristarco di Samo. Per quanto illuminante a proposito dei metodi utilizzati dall'autore, quest'opera non tocca il problema fondamentale dell'astronomia, cioè lo studio del *moto* dei corpi celesti.

- Nell'*Arenario* di Archimede è presente un celebre passo in cui si menziona l'ipotesi eliocentrica di Aristarco. Si tratta tuttavia non di un'opera di astronomia, bensì di uno scritto di altra natura in cui si allude ad un modello astronomico.
- Il *Commentario ai Fenomeni di Arato ed Eudosso* è un lavoro giovanile di Ipparco che si è salvato grazie alla popolarità del poema di Arato, di cui rappresentava un commento critico. Quest'opera polemica in due libri, del tutto minore, contiene alcune posizioni stellari e ci informa sui sistemi di coordinate utilizzati da Ipparco. Risulta però utile per la ricostruzione dei *Fenomeni* di Eudosso, opera andata perduta.

Tale disastro non è casuale, ma dovuto al ruolo ricoperto dall'*Almagesto* di Tolomeo nella trasmissione delle opere astronomiche precedenti. Dal momento della sua stesura, intorno al 150 d.C., l'*Almagesto* divenne in breve tempo lo standard per l'astronomia della tarda antichità.¹ Nonostante gli evidenti difetti del modello tolemaico, l'*Almagesto* rispondeva adeguatamente all'esigenza (anche astrologica) di prevedere le posizioni osservabili dei corpi celesti, includendo anche un manuale pratico per la costruzione di tavole astronomiche che, in una certa misura, prescindeva dalla comprensione approfondita dell'intera opera. Dopo il crollo culturale avvenuto alla fine del II sec. a.C. sarebbe stato anacronistico chiedere di meglio. Successivamente, nel Medioevo, l'ibridazione tra modello tolemaico, cosmologia aristotelica e teologia cristiana sancì per oltre quattordici secoli l'indiscutibile autorità di Tolomeo. Nella complessa dinamica di trasmissione delle conoscenze e di successiva ricostruzione storica delle stesse, data la mancanza di scritti più antichi l'*Almagesto* si è guadagnato col tempo la fama di *opera summa* che ha raccolto e ampliato tutti i risultati contenuti nelle opere precedenti, le quali, si presume, non sono state tramandate perché ormai superate. Questa posizione dominante tra gli storici è ben riassunta da Toomer nella prefazione alla sua traduzione inglese dell'*Almagesto*:

In ogni caso, il suo successo [dell'*Almagesto*] ha contribuito per la fine dell'antichità alla perdita della maggior parte delle opere dei predecessori di Tolomeo, soprattutto di Ipparco, perché, essendo obsolete, cessarono di essere copiate.

Di conseguenza l'*Almagesto* è diventato anche la principale fonte utilizzata per ricostruire l'astronomia pretolemaica, nonostante il lungo periodo di stagnazione della ricerca scientifica riscontrabile tra la fine del II sec. a.C., dove si colloca il lavoro di Ipparco, e l'inizio del II sec. d.C., periodo di composizione dell'*Almagesto*. Oltre all'assenza totale di opere astronomiche risalenti a questo periodo, a tal proposito è molto eloquente l'istogramma riportato in Fig. 1.1, che mostra il numero di osservazioni astronomiche registrate per ogni ventennio su un arco temporale di dieci secoli, così come indicate nell'*Almagesto* stesso: come si vede, a un periodo di attività continua tra il III e il II sec. a.C., con un picco in corrispondenza del lavoro di Ipparco, segue un vuoto lungo più di due secoli che si interrompe solo sul finire

¹Lo stesso titolo dell'opera in arabo significa ecc ecc. Si tratta tuttavia di un titolo affibbiatogli dagli astronomi arabi nel Medioevo; il titolo originale era il più umile *Mathematike Syntaxis*.

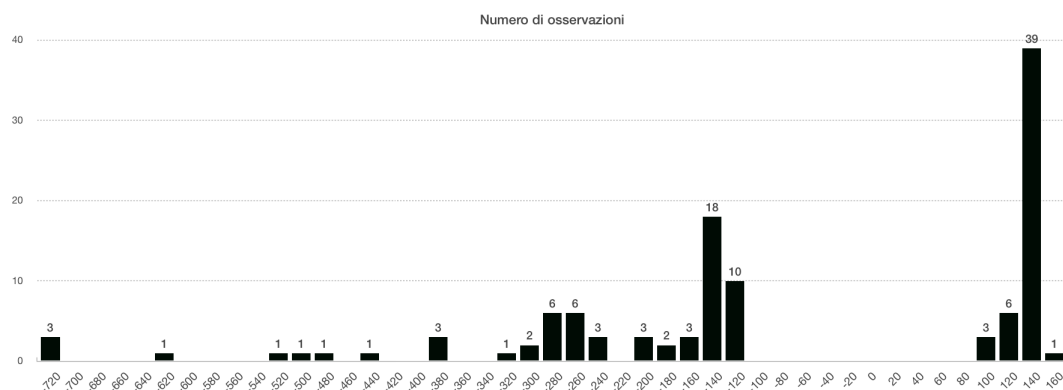


Figura 1.1: Numero di osservazioni astronomiche per ogni ventennio in base a quanto riportato nell'*Almagesto* di Tolomeo. Sull'asse orizzontale sono riportati gli anni mediani di ogni intervallo (ad es. 60 denota l'intervallo 51-70). I numeri negativi indicano anni precedenti la nascita di Cristo. Immagine rielaborata da Russo (2013).

del I sec. a.C.. Come vedremo più avanti, a tale vuoto corrisponde un evidente regresso metodologico che impedisce di porre Tolomeo in immediata continuità con la tradizione scientifica ellenistica. Alla luce di ciò, sorge il sospetto che l'idea secondo cui tutte le conoscenze astronomiche anteriori all'*Almagesto* siano confluite in esso abbia un carattere tautologico, dato che l'astronomia pretolomeica è stata ricostruita in gran parte a partire dall'*Almagesto* medesimo. Alla base di questa lettura vi è evidentemente un pregiudizio sull'andamento monotono crescente delle conoscenze scientifiche. Vedremo più avanti quanto può essere fuorviante guardare l'astronomia ellenistica attraverso gli occhi di Tolomeo.

Oltre a siffatte questioni di carattere storiografico, più avanti discuteremo seri dubbi circa sull'attendibilità di Tolomeo come fonte nella ricostruzione dell'astronomia ellenistica. In una situazione del genere, assumono particolare rilievo le fonti di letterarie risalenti al periodo buio di Fig. 1.1, cioè opere non scientifiche che contengono riferimenti a modelli astronomici del passato. Per quanto spesso difficili da decifrare, da queste fonti è possibile trarre informazioni preziose sull'astronomia ellenistica: paradossalmente l'incompetenza scientifica degli autori circa le teorie espone ne limita le possibilità di contaminazione e facilita la ricostruzione delle idee presenti nelle fonti originarie. Come evidenziato in Russo (1994), tali alterazioni possono avvenire essenzialmente in tre modi: aggiunta di idee personali, modificazione di idee non comprese e omissione di argomenti.

Gli elementi personali aggiunti arbitrariamente possono essere individuati facilmente perché tipicamente estranei all'impostazione assiomatico-deduttiva della teoria; al contrario, se un autore estraneo al metodo scientifico espone argomenti di carattere matematico possiamo concludere che la fonte conteneva argomenti dello stesso genere.

Le alterazioni della fonte pure possono avere effetti limitati, poiché non dipendono da contaminazioni di altre teorie scientifiche ma dall'incapacità dell'autore di comprendere la fonte originaria. Di conseguenza, tali alterazioni hanno carattere soggettivo e difficilmente si possono trovare identiche in due autori diversi: la presenza dello stesso concetto nelle testimonianze di più autori è dunque un indizio

che tale concetto era presente in una fonte scientifica.

Il problema delle omissioni può essere risolto parzialmente grazie al fatto che qualunque teoria scientifica ha una struttura logica interna ben definita: talune conseguenze non possono essere dedotte in mancanza delle necessarie premesse. Ad esempio un modello eliocentrico dell'universo, con la Terra in moto al pari degli altri pianeti, non può essere nemmeno ipotizzato senza l'idea della relatività del moto, che permette di scegliere liberamente il sistema di riferimento. In generale, dunque, se un certo passaggio sembra riferirsi ad un'affermazione scientifica, questa può essere controllata sia incrociandola con ulteriori testimonianze sia cercando altre affermazioni logicamente connesse alla prima.

Con in mente queste considerazioni metodologiche, nel resto del presente capitolo cercheremo di ricostruire i metodi e alcuni risultati verosimilmente raggiunti dall'astronomia ellenistica, con particolare riferimento all'ipotesi eliocentrica e ai suoi probabili sviluppi. Faremo riferimento sia alle poche fonti dirette che ci sono rimaste sia a fonti indirette, scientifiche e non, e risulteranno più chiari i meccanismi di contaminazione sopra descritti. Per motivi che saranno evidenti più avanti, limiteremo per quanto possibile i riferimenti all'*Almagesto* di Tolomeo, su cui ci concentreremo nel prossimo capitolo.

1.3 Il Metodo Scientifico Ellenistico

Per ricostruire il metodo scientifico ellenistico è utile partire dagli scritti originali, che mostrano senza ambiguità l'approccio adottato dagli scienziati nello studio dei fenomeni naturali. Come già accennato precedentemente, l'astronomia si inseriva in una tradizione scientifica che copriva ambiti molto diversi, caratterizzati tuttavia da una chiara omogeneità metodologica. In questa sezione faremo dunque alcune incursioni in settori diversi dall'astronomia nel tentativo di distillare informazioni circa la struttura logica ed epistemologica delle teorie scientifiche ellenistiche.

Cominciamo dal già menzionato trattato di Aristarco *Sulle dimensioni e le distanze del Sole e della Luna*. L'opera si apre così:²

Ipotesi:

1. *Che la Luna riceva la sua luce dal Sole.*
2. *Che la Terra sia un punto e un centro rispetto alla sfera in cui si muove la Luna.*
3. *Che quando la Luna ci appare dimezzata, il cerchio massimo che divide le parti scura e illuminata della Luna sia in direzione del nostro occhio.*³
4. *Che quando la Luna ci appare dimezzata, la sua distanza dal Sole sia inferiore a un quadrante di un trentesimo di quadrante.*

²Heath 1913, pp. 353-355. Il libro di Heath contiene un'analisi approfondita del trattato di Aristarco e una sintesi dei precedenti di eliocentrismo nell'astronomia greca.

³Come spiegato meglio più avanti, nella Proposizione 5, ciò equivale a dire che il terminatore e il nostro occhio giacciono sullo stesso piano.

5. *Che la larghezza dell'ombra [della Terra] sia pari a [quella di] due Lune.*
6. *Che la Luna sottenda la quindicesima parte di un segno zodiacale.*⁴

Siamo ora in grado di dimostrare le seguenti proposizioni:

1. *La distanza del Sole dalla Terra è compresa tra diciotto e venti volte la distanza della Luna dalla Terra; ciò segue dalle ipotesi sulla Luna dimezzata.*
2. *Il diametro del Sole ha il medesimo rapporto col diametro della Luna.*
3. *Il diametro del Sole ha con il diametro della Terra un rapporto maggiore di $19/3$, ma minore di $43/6$; ciò segue dal rapporto suddetto tra le distanze, dall'ipotesi sull'ombra e dall'ipotesi che la luna sottenda la quindicesima parte di un segno zodiacale.*

Il corpo dell'opera è costituito da diciotto proposizioni di carattere geometrico che includono, in particolare, le tre proposizioni enunciate a proposito delle distanze e delle dimensioni di Sole e Luna.⁵

Alla lettura di questo *incipit* salta subito all'occhio la struttura tipica di un teorema matematico: il primo passo di Aristarco è infatti esporre chiaramente le *ipotesi* (υποθεσεις) di partenza, detti talvolta anche *postulati* (αιτέματα) o *assunzioni* (λαμβάνόμενα), che costituiscono, come indicato esplicitamente, le necessarie premesse alle proposizioni che si vogliono dimostrare. Tale impostazione assiomatico-deduttiva, propria per noi delle scienze matematiche, è caratteristica in realtà di tutta la tradizione scientifica in cui si iscrive il lavoro di Aristarco. Oltre agli *Elementi*, altre opere che presentano una struttura analoga sono, ad esempio, l'*Ottica* di Euclide e il trattato *Sui Galleggianti* di Archimede.

In età ellenistica con il termine μαθηματικά si indicava un complesso di discipline quali la geometria, l'ottica, la meccanica, l'idrostatica e l'astronomia, che avevano in comune la stessa *metodologia*. Tale metodologia era basata innanzitutto sul metodo dimostrativo, una tecnica che permette di dedurre affermazioni in modo in linea di principio inconfutabile a partire da un ristretto numero di premesse. Il metodo dimostrativo, che assume una forma pienamente matura già negli *Elementi* di Euclide, costituisce una versione raffinata delle esposizioni proprie dell'arte retorica, il cui obiettivo era convincere un interlocutore della propria tesi adducendo delle opportune argomentazioni logiche. A differenza delle dimostrazioni della retorica, tuttavia, in ambito scientifico gli oggetti propri delle dimostrazioni sono *enti teorici* consapevolmente definiti come *retta*, *sfera* o *raggio visuale*.

Qualunque dimostrazione comincia con delle *ipotesi*. Il termine *ipotesi* viene dal greco υποθεσεις, che letteralmente significa "ciò che sta sotto" e originariamente aveva il semplice significato di "base" o "fondamento". Esso era utilizzato anche in altri contesti in cui chiaramente non sussiste alcun carattere "ipotetico" nel senso

⁴Cioè 2°: ogni segno zodiacale copre convenzionalmente un angolo di 30°.

⁵Molto è stato scritto a proposito dell'inesattezza dei valori numerici utilizzati da Aristarco, ad esempio a proposito delle dimensioni apparenti della Luna (cfr. ad esempio la discussione in Heath 1913). C'è un generale accordo sull'idea che l'obiettivo dell'opera di Aristarco fosse proporre un metodo di misura, che viene mostrato all'opera utilizzando dei valori fittizi di semplice manipolazione. Ciò che interessa qui prescinde comunque da tali considerazioni.

moderno del termine: Aristotele lo usa per indicare il "fondamento del governo" e Teofrasto chiama υποθεσις il tronco degli alberi. Nel lessico scientifico ellenistico le ipotesi sono, coerentemente, le assunzioni iniziali su cui si fonda la teoria che si vuole costruire. A partire da tali assunzioni, attraverso il metodo dimostrativo si costruisce una rete di proposizioni legate tra loro da rapporti logico-deduttivi. L'insieme di queste proposizioni costituisce il contenuto della teoria, la quale è legata alla realtà fisica osservabile da opportune regole di corrispondenza. Tali regole di corrispondenza sono definite implicitamente dagli stessi postulati della teoria che, utilizzando sempre termini mutuati dal linguaggio ordinario, conservano un chiaro legame con la realtà fisica. L'obiettivo di qualunque teoria scientifica è descrivere e spiegare a partire dalle ipotesi poste i fenomeni osservati.

Il termine *fenomeno* viene dal greco φαινόμενον (al plurale φαινόμενα), che letteralmente significa "ciò che appare". Oggi il termine *fenomeno* viene spesso utilizzato per indicare qualcosa che, si intende, accade indipendentemente dal soggetto, che può indagarlo in maniera oggettiva prescindendo dal proprio atto percettivo. Al contrario, l'originale φαινόμενον si riferisce esplicitamente all'interazione tra soggetto e oggetto, con tutte le vastissime conseguenze epistemologiche che questa differenza comporta. Non a caso in epoca moderna Kant ha recuperato il significato etimologico della parola *fenomeno* per denotare l'atto di conoscenza trascendentale che avviene all'incontro tra soggetto e oggetto, in cui l'uomo ha parte attiva attraverso l'impiego di categorie innate. Kant distingue così il *fenomeno* dal *noumeno*, l'inconoscibile "cosa in sé". Nel lessico scientifico greco questa importante sfumatura era implicita nel termine *phainomena*.

I *phainomena*, essendo legati alle percezioni, costituiscono il punto di partenza euristico nella costruzione di una teoria scientifica. In un secondo momento, tali *phainomena* dovranno essere dedotti logicamente da un ristretto numero di ipotesi, rispetto alle quali assumeranno il ruolo di effetti. Così va letta la testimonianza del manoscritto *Anonymus Londinensis*, un'opera medica risalente al I sec. d.C. che riporta la posizione di Erofilo di Calcedonia (ca. 335 a.C. - ca.280 a.C.), fondatore della scuola medica alessandrina:

come osserva [...] Erofilo dicendo: «Siano descritti per primi i *phainomena* (φαινόμενα), anche se non sono i primi».

Sono dunque i *phainomena* a indicare in prima battuta la scelta delle ipotesi.

Tuttavia la "verità" di tali ipotesi spesso non è per nulla evidente, né tantomeno verificabile. Come pure in fisica moderna, i postulati sono a volte proposizioni la cui verificabilità è preclusa dal carattere universale delle affermazioni stesse: basti pensare a tutti i principi che cominciano con la formula "per ogni...". Altre volte i postulati non sono verificabili nemmeno in casi specifici, com'è il caso dell'idrostatica di Archimede alla cui base è posto il seguente postulato:

Se porzioni di liquido sono contigue e allo stesso livello, la porzione più compressa caccia via la meno compressa. Ogni porzione è compressa dal peso del liquido che ha sopra di sé in verticale, purché il liquido non sia rinchiuso in qualcosa e compresso da qualcos'altro.

Chiaramente è impossibile indagare direttamente le interazioni tra parti di un liquido che non si trovi in condizioni di equilibrio; tuttavia Archimede, assumendo un'affermazione in sé non verificabile, trae molte conseguenze osservabili in condizioni di equilibrio, tra cui la ben nota spinta che porta il suo nome.

La bontà dei postulati poggia dunque solo sulla verificabilità degli effetti che se ne possono dedurre logicamente. Ma se i postulati non sono verificabili *per se*, cosa accade laddove gli stessi fenomeni sono deducibili a partire da diverse ipotesi? Nella fisica moderna situazioni del genere sono ben note: in ottica, ad esempio, per un'ampia gamma di fenomeni la descrizione ondulatoria e quella corpuscolare della luce danno risultati del tutto equivalenti. Che già in epoca ellenistica ci fosse coscienza di questa possibilità è chiaro in almeno due casi, su cui avremo modo di tornare più avanti: la descrizione delle irregolarità dei moti celesti utilizzando eccentrici o epicicli e il carattere relativo del moto. Nel primo caso, Tolomeo in *Alm.* XII.1 riferisce che Apollonio di Perga aveva dimostrato che le stazioni planetarie sono salvate da entrambi i modelli, mentre a proposito della relatività dei moti Simplicio (V sec. d.C.) nel suo commento ad Aristotele riporta il seguente passo di Gemino (I sec. a.C.):

A volte [l'astronomo] attraverso un'*ipotesi* [ὑποθεσις] trova il modo di *salvare i fenomeni* (πραινόμενα σοζειν). Per esempio perché il Sole, la Luna e i pianeti appaiono muoversi irregolarmente? Se supponiamo che le loro orbite circolari siano eccentriche o che gli astri si muovano su un epiciclo, l'irregolarità che appare sarà salvata e bisognerà investigare in quanti modi diversi si potranno rappresentare i *fenomeni*.

Galeno, medico dell'età imperiale, cita invece la seguente opinione di Erofilo a proposito del moto dei corpi:

Egli [Erofilo] dubiterà anche in un altro modo facendo le seguenti distinzioni: «Chi vede ha la sensazione di ciò che è visto o, essendo fermo, di un oggetto fermo o, in moto, di un oggetto fermo o, in moto, di un oggetto in moto oppure, fermo, di un oggetto in moto». Mostrando poi che non è convincente spiegare la percezione secondo nessuna delle affermazioni precedenti, egli nega la nostra possibilità di vedere in alcun modo.

Piuttosto che affermare una tale assurdità, è probabile che Erofilo intendesse dire che *non è possibile* determinare il reale stato di moto dei corpi.⁶ In tali circostanze, infatti, il lavoro del *matematico* si ferma: il suo compito non è quello di cercare la "verità", bensì solo quello di trovare, come già detto, *ipotesi* atte a *salvare i fenomeni*. Naturalmente l'ampliamento della classe di fenomeni da descrivere può risultare discriminante nel distinguere ipotesi fino a quel momento considerate equivalenti. Tuttavia la nozione di "verità" resta estranea al quadro teorico della scienza ellenistica.

Che alle ipotesi non venisse attribuito un valore di "verità" è riscontrabile anche nel fatto che nell'ambito della stessa teoria in contesti diversi venivano

⁶Stiamo ovviamente assumendo una posizione pre-relativistica, in cui si postula l'esistenza di uno spazio assoluto in cui abbia senso la nozione di moto "reale". Vedremo più avanti che verosimilmente già in epoca ellenistica era stato destituito di fondamento il concetto di moto assoluto.

ammesse talvolta ipotesi contrastanti tra loro. Nel trattato di Archimede *Sui Galleggianti*, ad esempio, vengono utilizzati due modelli diversi della Terra: nel primo libro si dimostra, sulla base del postulato sopra citato, la forma sferica della Terra; nel libro successivo la superficie della Terra viene supposta piana. Si tratta chiaramente di due modelli diversi tra cui scegliere in base alla classe di *phainomena* che si vogliono descrivere.

Mentre col termine *matematica* si indicavano quelle che oggi chiameremmo scienze esatte, il termine *fisica* (φυσική) corrispondeva a quello che oggi chiameremmo *filosofia naturale*. Essa si distingueva sia per l'oggetto di studio (che in Aristotele, ad esempio, includeva anche piante, animali e il "primo motore immobile") che per la metodologia. Il lavoro dei φυσικοί è descritto così da Gemino subito prima del passo citato poco sopra, tratto da Simplicio:

È proprio dell'indagine fisica considerare ciò che riguarda la sostanza del cielo e degli astri, la loro potenza e qualità. la loro generazione e corruzione [...]. L'astronomia invece non si occupa di tutto ciò [...]. In molti casi astronomi e fisici si occupano degli stessi argomenti, per esempio della grandezza del Sole o della sfericità della Terra, ma non seguono la stessa via. L'uno infatti [il fisico] dedurrà ogni cosa dalla sostanza [οὐσία] o dalla potenza [δυναμὶς] o da ciò che è meglio che sia o dalla generazione e dalla trasformazione, l'altro invece [l'astronomo] dalle opportune figure o dalle grandezze o dalla misura del moto e del tempo corrispondente. Il fisico in molti casi coglierà la causa individuando la potenza produttrice, mentre l'astronomo, dovendo basarsi su ciò che è esteriore, non sarà un giusto osservatore della causa [...].

Si trattava evidentemente di due discipline ben distinte.

1.4 L'Ipotesi Eliocentrica

L'affermarsi del modello eliocentrico dell'universo avvenuto all'inizio dell'età moderna è solitamente associato al nome di Niccolò Copernico (1473 - 1543), astronomo polacco autore del *De Revolutionibus Orbium Coelestium*. In quest'opera Copernico, pur mantenendo un'impostazione di tipo tolemaico a epicicli/eccentrici, attribuisce alla Terra il duplice moto di rotazione intorno al proprio asse e di rivoluzione intorno al Sole, che è posto immobile al centro dell'universo; tutti gli altri pianeti, al pari della Terra, compiono orbite circolari intorno al Sole.⁷ È difficile sovrastimare la portata della "rivoluzione copernicana" nella storia del pensiero. Basti pensare che il termine *rivoluzione*, nato in ambito astronomico per indicare l'orbita di un corpo intorno a un altro, ha ampliato il suo significato fino ad indicare qualunque grande e improvviso sconvolgimento del quadro politico, sociale, economico o concettuale di riferimento in un dato momento storico.

È lo stesso Copernico a raccontare nella prefazione al *De Revolutionibus* la genesi del suo modello. Il motivo principale che l'ha spinto a intraprendere il

⁷Come sottolineato da Barone, il modello copernicano a rigore andrebbe chiamato *eliostatico* piuttosto che eliocentrico. Il Sole infatti è posto *vicino* al centro dell'universo, che coincide con il centro dell'orbita terrestre.

lavoro di revisione del sistema tolemaico è la mancanza di accordo tra le diverse descrizioni fornite dai matematici del suo tempo:⁸

nessun altro motivo mi ha indotto a meditare su un nuovo possibile criterio di calcolare i movimenti delle sfere del mondo se non il fatto di essermi accorto che i matematici stessi non sono d'accordo fra loro sul modo di determinarli.

Qui Copernico fa riferimento agli errori accumulatisi nel modello tolemaico dopo quattordici secoli di utilizzo, alle numerose ipotesi *ad hoc* introdotte per spiegare le irregolarità dei moti e alla mancanza di armonia complessiva del sistema tolemaico, descritto come un «mostro» formato da «mani, piedi, testa e altre membra, molto belle in sé, ma non fatte per un solo corpo». Copernico prosegue criticando anche i filosofi suoi contemporanei, che

mentre indagano con tanta finezza le cose più minute del mondo, non hanno poi alcun sicuro criterio di spiegazione per il meccanismo di questo stesso mondo che è stato creato per noi dal migliore e più regolare degli artefici.

Davanti a tale insoddisfazione, la strategia adottata da Copernico è la seguente:

Perciò mi misi a rileggere le opere di tutti i filosofi che avevo a disposizione, per vedere se mai qualcuno di essi avesse pensato che i movimenti delle sfere del mondo fossero diversi da quelli che ammettono coloro che nelle scuole insegnano matematica. E trovai dapprima in Cicerone che Iceta aveva intuito che la Terra si muove. Poi trovai presso Plutarco che alcuni avevano avuto la stessa opinione [...].

Copernico riporta per intero un brano di Plutarco secondo cui anche Ecfanto ed Eraclide Pontico (IV sec. a.C.) avevano attribuito un moto diurno alla Terra, mentre secondo Filolao Pitagorico la Terra «gira intorno al fuoco secondo un circolo obliquo, così come il Sole e la Luna». Copernico conclude il racconto così:

Prendendo spunto da qui, cominciai anch'io a meditare intorno alla possibilità di un movimento della Terra.

Sono ben noti i risultati cui giunse Copernico nella sua meditazione. La testimonianza di Copernico richiama quelle di Simplicio, che pure attribuisce a Eraclide l'idea della rotazione terrestre, e di Diogene, Aezio e Ippolito, cui dobbiamo il poco che si sa sui pitagorici Iceta ed Ecfanto. Non vi è dubbio, comunque, che l'idea di una Terra non immobile fosse già presente tra i pensatori greci in età prescientifica.

Il problema dei moti della Terra è, probabilmente, lo scoglio più grande da superare per poter anche solo *concepire* un sistema eliocentrico.⁹ Copernico ha compiuto tale passo grazie alla lettura di antiche opere, e non stupisce che tale

⁸Copernico 1979, pp. 168-178.

⁹Per quanto oggi tale circostanza sia acclarata, per avere una prova informale di ciò basta guardare la faccia di qualcuno dopo averlo fatto soffermare sul fatto che, in quel momento, si sta muovendo a migliaia di chilometri orari senza averne alcuna percezione.

passo possa essere effettivamente avvenuto già in età ellenistica. Se l'alternarsi tra giorno e notte viene spiegato attribuendo un moto alla Terra, infatti, appare abbastanza naturale spiegare in modo analogo il moto retrogrado dei pianeti.

La più antica, autorevole e chiara testimonianza di un modello eliocentrico dell'universo è fornita da Archimede nell'introduzione del già menzionato *Arenario*. Rivolgendosi al re Gelone II, destinatario dell'opera, Archimede scrive:¹⁰

Sai che "cosmo" è il nome dato dai più grandi astronomi alla sfera il cui centro è il centro della terra ed il cui raggio è uguale alla distanza fra il centro del Sole e il centro della Terra. Aristarco di Samo ha comunque enunciato alcune *ipotesi* (υποθησεις) da cui si ricava che l'universo è molto più grande di quanto ora detto. Effettivamente egli suppone (υποτιθεται) che le stelle fisse e il Sole non si muovano, ma che la Terra ruoti su una circonferenza intorno al Sole, che si trova nel mezzo dell'orbita, e che la sfera delle stelle fisse, situata intorno allo stesso centro del Sole, sia così grande che il cerchio, in cui si suppone ruoti la Terra, ha rispetto alla distanza delle stelle fisse lo stesso rapporto che il centro della sfera ha rispetto alla sua superficie.

Abbiamo già discusso il significato da attribuire ai termini qui utilizzati da Archimede: poiché un'*ipotesi* costituisce il "fondamento" di qualcosa, alle *ipotesi* di Aristarco doveva seguire una "dimostrazione" (αποδεισις) di qualche *fenomeno*. Plutarco conferma questa interpretazione nel *De facie quae in orbe lunae apparet*, in cui riferisce che Aristarco aveva cercato di *salvare i fenomeni* (φαινόμενα σῶζειν) assumendo i moti di rotazione e rivoluzione della Terra.¹¹ Poiché la descrizione dei moti di Sole e Luna rimane inalterata in un modello eliocentrico, e così pure quella delle stelle fisse, poste dallo stesso Aristarco a una distanza infinitamente maggiore dell'estensione dell'orbita terrestre, gli unici *fenomeni* spiegati dalla teoria dovevano necessariamente riguardare i pianeti.

L'ipotesi eliocentrica e gli eventuali moti della Terra sono questioni legate al problema più generale della descrizione dei moti. Osserviamo che, in linea di principio, l'idea che le percezioni possano rendere conto solo dei moti *relativi* tra i corpi, e che quindi il moto assoluto non sia una quantità osservabile, è sufficiente ad ammettere che anche noi, insieme alla Terra, *potremmo* essere in movimento. Che un'idea del genere fosse stata elaborata in età ellenistica è provato dal già ricordato passo di Galeno, in cui è citato Erofilo,¹² e dalla proposizione 51 dell'*Ottica* di Euclide:

Se si muovono nella stessa direzione l'occhio e diversi corpi che si spostano con velocità diversa, quelli che si muovono con la stessa velocità dell'occhio sono giudicati fermi, quelli più lenti appaiono muoversi all'indietro e quelli più veloci in avanti.

Ricordiamo che Aristarco era contemporaneo o poco più giovane di Euclide, ed è dunque inverosimile che tale risultato non gli fosse noto. È interessante notare

¹⁰Dijsterkuis 1989, p. 292.

¹¹Come osservato da Russo (2010) lo stesso termine latino *revolvere* utilizzato da Copernico è un calco del greco ἀνελειν utilizzato da Plutarco per descrivere i moti ipotizzati da Aristarco.

¹²vedi *supra*, p. 11

inoltre che nel trattato di Aristarco *Sulle dimensioni...* si fa sempre riferimento all'*occhio* dell'osservatore: potrebbe trattarsi di un riferimento diretto alla teoria di Euclide, a conferma di come l'astronomia ellenistica si sia sviluppata in stretta connessione con l'ottica, cioè la *scienza della visione*, coerentemente con il legame sopra descritto tra *phainomena* e percezioni soggettive.

1.5 Ipparco e l'Eliocentrismo Dinamico

L'eliocentrismo di Aristarco è stato spesso considerato un antecedente isolato, un'idea geniale che non avrebbe dato luogo a sviluppi ulteriori.¹³ Diversi riferimenti in fonti pretolemaiche, tuttavia, testimoniano come al tempo di Ipparco e Seleuco, circa un secolo dopo Aristarco, l'astronomia ellenistica abbia raggiunto risultati compatibili con un modello eliocentrico dinamico, basato cioè su qualche forma di principio di inerzia e sull'interazione gravitazionale tra corpi. Se tale circostanza stupisce, basti ricordare che all'incirca lo stesso intervallo di tempo separa il *De Revolutionibus* di Copernico dai *Principia* di Newton.¹⁴

Plutarco, la Luna e la Fionda

Il già menzionato *De facie quae in orbe lunae apparet* di Plutarco, scritto alla fine del I sec. d.C., contiene lunghi passi dedicati a vari argomenti astronomici e costituisce un'importante testimonianza sull'astronomia pretolemaica, poiché le opinioni riportate da Plutarco sono senza dubbio riprese da fonti del periodo ellenistico. Fu un testo molto studiato in età moderna da autori come Copernico, che lo cita nel *De Revolutionibus*, Keplero, che ne pubblicò una traduzione in latino e soprattutto Newton, che ne aveva trascritto interi passi negli *Scolii classici* preparati per i *Principia* ma non inclusi nella versione pubblicata dell'opera.

Nel *De facie* Plutarco scrive:

Certo la Luna è trattenuta dal cadere dallo stesso moto e dalla rapidità della sua rotazione, proprio come gli oggetti posti nelle fionde¹⁵ sono trattenuti dal cadere dal moto circolare. Il moto secondo natura guida infatti ogni corpo, se non è deviato da qualcos'altro. Perciò la Luna non segue il suo peso, [che è] equilibrato dall'effetto della rotazione. Ma si avrebbe forse più ragione di meravigliarsi se essa restasse assolutamente immobile e fissa come la Terra.

Il riferimento di questo passo a quello che oggi chiameremmo equilibrio tra forza gravitazionale e forza centrifuga è evidente, ma ancora più sconcertante forse è la similitudine tracciata tra un sasso e la Luna, soggetti allo stesso *peso* che tenderebbe a farli cadere verso la Terra. Tale accostamento tra oggetti del mondo celeste e del mondo sublunare è in aperto contrasto con la dottrina aristotelica,

¹³Sull'origine di questa interpretazione si veda Russo e Medaglia 1996.

¹⁴Sul debito che anche Newton, come già Copernico, ha nei confronti delle fonti classiche si veda Russo 2010, pp. 421-437.

¹⁵Qui per "fionde" si intendono le antiche armi rudimentali, costituite da un semplice laccio che veniva fatto roteare sopra la testa.

secondo cui il moto *secondo natura* (κατα φύσιν) dipende dal corpo considerato: corpi "pesanti", come un sasso, cadono verso il basso (cioè verso il centro della Terra); corpi "leggeri", come il fuoco, vanno verso l'alto; corpi celesti, come la Luna, si muovono di moto circolare uniforme. Nella fonte di Plutarco è chiaro invece che il sasso e la Luna condividono lo stesso moto *secondo natura*, che nel caso dei sassi non può certo essere il moto circolare. Di conseguenza il moto circolare della Luna è da interpretare come uno dei possibili effetti di "qualcos'altro". Abbiamo conferma di questa interpretazione più avanti quando Lampria, un altro personaggio che nel dialogo polemizza con i *matematici*, dice:

Non bisogna dare ascolto ai filosofi se vogliono respingere paradossi con paradossi e, combattendo le stranezze di alcune dottrine, ne inventano di ancora più strane e stravaganti, come costoro che vi introducono la *spinta* verso il centro. Quale paradosso vi manca? [...] Non che massi incandescenti del peso di mille talenti, *spinti* attraverso le profondità della Terra, qualora giungessero al centro si fermerebbero, senza incontrare nulla cui appoggiarsi, e se, *spinti* verso il basso con velocità, superassero il centro, si volgerebbero di nuovo indietro e andrebbero su e giù tra questi [punti di svolta]? [...] Non che una corrente impetuosa d'acqua *spinta* verso il basso, se giungesse al punto centrale, che essi stessi dicono incorporeo, starebbe ferma sospesa, [o] girerebbe in cerchio, [o] oscillerebbe in maniera incessante e perpetua?

Ad occhi moderni i "paradossi" descritti da Lampria non sono altro che tipici fenomeni connessi ad una forza centrale di tipo attrattivo, qui indicata come una *spinta verso il centro* (ἐπὶ τὸ μέσον φορὰ) facilmente identificabile con la gravità. La "stravagante dottrina" criticata da Lampria era presumibilmente una teoria scientifica, che possiamo cercare di ricostruire parzialmente a partire dai "paradossi" descritti da Plutarco.

Ancora una volta, le parole sono importanti. Il termine che nel passo precedente Russo traduce con "moto" è κινεσις, ed è utilizzato nel testo solo per indicare il moto "secondo natura" o quello di rotazione della Luna. L'effetto della gravità è invece descritto sempre con il termine φορὰ, qui tradotto con "spinta". Plutarco stesso suggerisce la natura teorica del termine («costoro *introducono* la spinta verso il centro») e nel seguito lo utilizza sempre in maniera coerente per denotare l'azione della gravità. Di fatto non vi è mai ambiguità tra κινεσις e φορὰ, anche perché i "moti" soggetti alla "spinta verso il centro" non sono diretti in generale verso il centro. Questo "centro" è chiamato in realtà "punto centrale", usando per "punto" il termine σημειον, termine tecnico proprio della geometria euclidea. Ciò suggerisce che nella fonte di Plutarco fossero presenti delle costruzioni geometriche ad illustrazione di quanto esposto. Tale punto centrale, d'altra parte, è detto "incorporeo", a ulteriore conferma della natura teorica dei "paradossi" descritti. Plutarco descrive in totale tre tipi di moto compatibili con la stessa φορὰ verso il centro (quiete, oscillazione e moto circolare) che, diremmo oggi, differiscono tra loro per le condizioni iniziali: nel testo questa circostanza è resa esplicita almeno in un caso, quello dei massi «spinti verso il basso *con velocità*». In particolare l'oscillazione e il moto circolare indicano che la φορὰ può avere l'effetto non solo di aumentare la velocità, ma anche di diminuirla o di modificarne solo la direzione. Dunque sul piano cinematico ciò che accomuna tutti i moti descritti è, in termini

moderni, un'accelerazione verso il centro, coerentemente con l'interpretazione di $\varphi\phi\alpha$ come "spinta" o, a questo punto, *forza*, cioè il nome di origine aristotelica che Newton ha dato al *qualcos'altro* che devia i corpi dal loro moto "secondo natura".

È verosimile che in epoca ellenistica sia stato formulato un principio di inerzia? Diverse testimonianze sembrano indicare una risposta affermativa.

Innanzitutto il concetto di inerzia è strettamente legato a quello di attrito, da cui il primo può emergere solo per astrazione. Diverse fonti accennano alla resistenza al moto offerta dal mezzo in cui i corpi si muovono e Erone nella *Meccanica* fa uso del concetto di attrito in più occasioni. In particolare Erone dimostra la proposizione seguente:

I pesi in una tale posizione [posti su un piano orizzontale privo di attrito] possono essere mossi da una forza minore di qualsiasi forza data.

Per convincersi della bontà di questa formulazione del principio d'inerzia si confronti la definizione data da Galilei nel *De Motu*, opera giovanile pubblicata nel 1590:

In queste condizioni [cioè in assenza di attrito], qualsiasi mobile, su un piano equidistante dall'orizzonte, sarà mosso da una forza minima, anzi anche da una forza più piccola di qualsivoglia forza data.

Se a Galilei è attribuita normalmente la paternità del principio d'inerzia, non vi è ragione per negare la presenza di un concetto simile nella fonte ellenistica di Erone.¹⁶

Oltre al principio d'inerzia, un altro ingrediente fondamentale per descrivere il moto circolare come effetto di una "spinta verso il centro" è un metodo di composizione dei moti. Sempre nella *Meccanica* di Erone è esposta la regola del parallelogramma per la somma degli spostamenti, in una forma identica a quella proposta nelle *Questioni Meccaniche*, opera pseudo-aristotelica (su cui torneremo) dove si osserva che un moto circolare è sottoposto contemporaneamente a due spostamenti: uno, "secondo natura ($\chi\alpha\tau\alpha\ \varphi\upsilon\sigma\iota\nu$)", lungo la tangente e l'altro, "contro natura ($\pi\alpha\rho\alpha\ \varphi\upsilon\sigma\iota\nu$)", diretto verso il centro.

Senza necessità di ipotizzare che i concetti di forza e accelerazione siano stati elaborati in età ellenistica nella forma a noi familiare, le considerazioni precedenti suggeriscono che la fonte di Plutarco con moti "secondo natura" intendesse un moto rettilineo e/o uniforme che l'azione di "qualcos'altro", in questo caso la $\varphi\phi\alpha$ verso il centro, può modificare causando delle *variazioni* di velocità.

Non è semplice individuare la fonte scientifica di Plutarco, ma alcune circostanze suggeriscono che si possa trattare del già menzionato Ipparco di Nicea.

Innanzitutto proprio Ipparco è individuato come il principale avversario nel corso della polemica antiscientifica inscenata da Lampria nel dialogo di Plutarco, la stessa polemica in cui vengono elencati i "paradossi" della "stravagante dottrina". L'assenza di idee simili a quelle che abbiamo descritto nell'opera di Filone di Bisanzio, che si occupò di meccanica e balistica e fu attivo ad Alessandria alla fine

¹⁶Si veda Dell'Isola et al. 2016 per maggiori dettagli sul rapporto tra Erone e Galileo.

del III sec. a.C., suggerisce che si tratti di idee non anteriori al II sec. a.C.. Indizi geografici sono invece forniti dalla testimonianza di Erone, noto per la sua familiarità con la tradizione scientifica mesopotamica e che su diversi argomenti sembra essere a conoscenza di opere di Ipparco sconosciute ad altri studiosi alessandrini di epoca imperiale. Le interazioni tra Ipparco e l'astronomia mesopotamica sono pure ben note, ed è plausibile immaginare che dopo gli eventi del biennio 145-144 a.C. i risultati del lavoro di Ipparco si siano conservati in Oriente molto meglio che in Egitto. D'altra parte la teoria di cui stiamo parlando unificava i moti celesti e i moti dei sassi fatti roteare in una fionda: non stupisce che tale sintesi sia stata fatta da un astronomo come Ipparco che nell'ultima parte della sua vita lavorò a Rodi, il principale centro di studi di balistica.

Al riguardo l'indizio più forte è fornito da Simplicio, che nel *Commento al De Caelo di Aristotele* ci dice che Ipparco aveva scritto un'opera intitolata *Sui corpi spinti verso il basso a causa della gravità*. Simplicio accenna alla teoria di Ipparco nel caso di un corpo lanciato verticalmente verso l'alto, descrivendo come questo rallenti in salita e acceleri in discesa. A questo punto Simplicio afferma che Ipparco «riconosce la stessa causa anche per corpi lasciati cadere dall'alto». La teoria di Ipparco dunque trattava nello stesso modo il moto di corpi lanciati verso l'alto o verso il basso, il che è possibile solo introducendo quantità relative alle variazioni di velocità, coerentemente con quanto emerge dall'analisi del passo di Plutarco. A ciò si aggiunge che Giovanni Filopono, contemporaneo di Simplicio, allude nel suo *Commento alla Fisica di Aristotele* all'idea, già presente in Lucrezio,¹⁷ che i corpi cadano indipendentemente dal loro peso: è verosimile che Filopono avesse accesso alle stesse opere di Simplicio, e che dunque stia riferendo anche lui idee tratte dall'opera di Ipparco sulla gravità.

Un Brano di Seneca

Come abbiamo già accennato, dopo il biennio 145-144 a.C. Ipparco continuò le sue ricerche a Rodi, con cui Roma intrattenne rapporti commerciali e culturali fino a metà del I sec. a.C.. È possibile, dunque, che nelle opere di lingua latina siano rimaste tracce delle sue idee più facilmente che altrove.

Nelle *Naturales Quaestiones* di Seneca, scritte tra il 62 e il 63 d.C., leggiamo a proposito dei pianeti:

Di queste cinque stelle, che si mostrano a noi e apparendo ora in un luogo ora in un altro non possono non suscitare la nostra curiosità, da poco abbiamo cominciato a capire come sorgano al mattino o alla sera, dove stazionino, quando si spostino in linea retta, perché ritornino indietro; se Giove si immerga o tramonti o sia retrogrado (questo nome infatti gli hanno attribuito quando *resta indietro* (*cedenti*)), l'abbiamo stabilito da pochi anni.

Seneca sottolinea che solo «da pochi anni» si erano incominciati a comprendere i moti planetari: è generalmente ammesso che Seneca abbia attinto nella stesura della sua opera ad un'unica fonte risalente al I sec. a.C., epoca in cui doveva

¹⁷*De Rerum Natura*, II, 225-239

esserci ancora memoria di una teoria planetaria. A sua volta la fonte di Seneca non poteva non riportare idee proprie dell'astronomia ellenistica del II sec. a.C., il periodo di attività di Ipparco.

È particolarmente interessante l'uso di *cedenti*, qui tradotto con "resta indietro", che sembra proprio indicare la descrizione eliocentrica delle retrogradazioni planetarie in cui un pianeta esterno (come Giove, nell'esempio di Seneca) viene "superato" dalla Terra e dunque "cede il passo". Più avanti comunque Seneca fuga ogni dubbio sulle idee esposte dalla sua fonte:

Abbiamo trovato chi ci ha detto: "Sbagliate, pensando che qualche stella interrompa il suo cammino o lo inverta. Non è permesso ai corpi celesti fermarsi né invertire il moto; tutti avanzano: *come una volta sono stati lanciati, così procedono*; la fine del loro cammino coinciderebbe con la loro stessa fine. Quest'opera eterna ha moti irrevocabili: se dovessero arrestarsi, quei [corpi] ora conservati nel loro moto regolare cadrebbero *gli uni sugli altri*. Qual è allora il motivo per cui alcuni sembrano tornare indietro? L'intervento del Sole (*Solis occursus*) e la natura dei percorsi e delle orbite circolari, disposte in modo che per un certo tempo *ingannino gli osservatori*, impone loro un'apparenza di lentezza: così le navi, sebbene procedano a vele spiegate, *sembrano* tuttavia star ferme".

Analizziamo le parti evidenziate nel passo in connessione con quanto emerso precedentemente a proposito della teoria esposta dalla fonte di Plutarco.

- «Non è permesso ai corpi celesti fermarsi né invertire il moto; tutti avanzano» è immediata conseguenza dell'attribuire anche ai pianeti il meccanismo alla base del moto della Luna: mentre infatti la Luna non pone problemi particolari, le stazioni e le retrogradazioni dei pianeti sono in contraddizione con l'analogia della fionda riportata da Plutarco. Ne consegue che i pianeti non possono *realmente* fermarsi e invertire il loro moto. A questa difficoltà si può ovviare almeno in due modi: (1) un sistema geocentrico ad epicicli, come sarà il modello tolemaico; (2) un modello eliocentrico come quello proposto due secoli prima della fonte di Seneca da Aristarco di Samo.
- «Come una volta sono stati lanciati, così procedono» è una formulazione elementare del principio d'inerzia, che richiama i moti «non deviati da qualcos'altro» menzionati da Plutarco.
- Che i pianeti cadano «gli uni sugli altri (*alia alis incident*)» indica che, in aggiunta a quanto emerge dal brano di Plutarco, nella teoria che stiamo cercando di ricostruire la gravità era concepita come interazione reciproca tra corpi. Questa interpretazione sarebbe certa se si parlasse ancora della Luna; estendendo il discorso ai pianeti, «gli uni sugli altri» potrebbe anche indicare un comune centro di attrazione.
- «L'intervento del Sole (*Solis occursus*)» è una chiara indicazione del carattere eliocentrico della teoria. In un modello geocentrico ad epicicli non vi è alcun motivo per menzionare un *intervento* del Sole.

- Il fatto che le orbite dei pianeti «ingannino gli osservatori» con un'«apparenza di lentezza» conferma l'idea che stazioni e retrogradazioni non corrispondano a moti "reali" perché osservati dalla Terra, rispetto a cui i pianeti «restano indietro» (cfr. passo precedente). La similitudine con le navi, che esprime ancora la relatività dei moti già vista in Euclide ed Erofilo, richiama un passo molto simile del *De Rerum Natura* di Lucrezio.¹⁸

Dobbiamo dunque concludere che la fonte di Seneca applicava anche al moto dei pianeti intorno al Sole l'idea riferita da Plutarco nel caso della Luna, cioè l'idea dell'equilibrio tra interazione gravitazionale e forza centrifuga. Come si è visto, un eliocentrismo dinamico rende conto in maniera coerente di tutti gli aspetti emersi nei passi visti finora, risolvendo in particolare il problema posto da Seneca a proposito di stazioni e retrogradazioni: si aveva cioè una giustificazione dinamica della teoria eliocentrica. Alla luce di quanto detto precedentemente, si può ipotizzare che queste idee fossero il frutto degli ultimi anni del lavoro di Ipparco.

Alternativamente i passi finora riportati si possono interpretare immaginando un modello geocentrico di tipo tolemaico, cinematicamente equivalente ad un modello eliocentrico. Sarebbe tuttavia necessario il postulato aggiuntivo che i centri degli epicicli (che potrebbero identificarsi con i punti "incorporei" di Plutarco) esercitino un'attrazione sui pianeti simile a quella che la Terra esercita sulla Luna. In tal caso l'«intervento del Sole» potrebbe essere un'interpretazione personale di Seneca che allude alla circostanza secondo cui stazioni e retrogradazioni planetarie avvengono sempre quando il pianeta e il Sole sono in opposizione. Resterebbe tuttavia oscuro il verbo *cedere* utilizzato alla fine del primo passo di Seneca, che sembra indicare il moto del pianeta *rispetto* a qualcos'altro.

Plinio, Vitruvio e i Raggi Triangolari

Nella letteratura latina risalente al periodo compreso tra II sec. a.C. e II sec. d.C. troviamo altre due esposizioni di argomento astronomico: nel IX libro del *De Architectura* di Vitruvio, risalente al 15 a.C., e nel II libro della *Naturalis Historia* di Plinio il Vecchio, pubblicata intorno al 77 d.C.. Come si evince dai titoli, si tratta in realtà di opere di altro argomento contenenti digressioni di carattere astronomico. Data la mancanza di altre fonti, tuttavia, sia Plinio che Vitruvio hanno avuto un ruolo non trascurabile nella trasmissione di molte idee scientifiche risalenti al periodo ellenistico, nonostante entrambi gli autori dimostrino di essere completamente estranei al metodo scientifico.

Ipparco è nominato esplicitamente sia da Plinio che da Vitruvio. Plinio, indicando le fonti straniere del II libro della *Naturalis Historia*, non solo cita Ipparco al primo posto, ma ne elogia il lavoro con entusiasmo lamentando il fatto che nessuno sia stato in grado di raccogliergli l'eredità scientifica. Prosegue poi parlando esplicitamente di un'ingegnosa teoria capace di spiegare il moto dei pianeti, da lui divulgata per la prima volta, in cui le stazioni planetarie sono, come per Seneca, un fenomeno solo apparente. A ulteriore supporto del fatto che anche la fonte di Plinio fosse eliocentrica, Rawlins (1987) ha evidenziato come alcuni

¹⁸ *De Rerum Natura*, IV, 387-390.

elementi orbitali riportati da Plinio indichino chiaramente il carattere eliocentrico del modello esposto dalla sua fonte:

- L'apogeo di Venere è posto nel Sagittario, in opposizione a quello del Sole che è posto nei Gemelli. In un modello geocentrico ciò è impossibile, dovendo essere i due apogei di Sole e Venere vicini tra loro (nel modello tolemaico, ad esempio, distano tra loro $10^{\circ}30'$).
- L'apogeo di Marte è posto nella costellazione del Leone. Ciò sarebbe corretto se si parlasse dell'afelio eliocentrico, che all'epoca si trovava a 2° nel Leone; non lo è in una prospettiva geocentrica, in cui l'apogeo si collocava a $25^{\circ}30'$ nel Cancro (come riportato correttamente nell'*Almagesto*).

Questo per quanto concerne l'aspetto cinematico. Sul piano dinamico, un passo interessante di Plinio è il seguente:

I pianeti sono colpiti nella posizione che abbiamo detto e sono impediti da un raggio triangolare del Sole a proseguire in linea retta e sono tratti in alto dalla [sua] forza ardente.

Plinio sta parlando dei pianeti esterni, e per quanto non sia chiaro cosa intenda per "raggi triangolari" sono evidenti i riferimenti all'influenza diretta del Sole che, in particolare, impedisce ai pianeti di «proseguire in linea retta». Abbiamo dunque un altro accenno non solo al ruolo attivo del Sole nel determinare il moto dei pianeti, ma anche a un principio di inerzia che farebbe muovere i pianeti di moto rettilineo.

Anche Vitruvio dà una descrizione dei moti planetari e ne elenca i periodi orbitali: l'attendibilità della sua fonte è indicata dal fatto che il periodo di Saturno, ad esempio, è più accurato di quello riportato da Tolomeo nell'*Almagesto* circa 150 anni dopo. L'eliocentrismo della fonte di Vitruvio è confermato dalla descrizione dei moti di Mercurio e Venere, che è esplicitamente eliocentrica:

I pianeti Mercurio e Venere, prossimi ai raggi del Sole, facendogli da corona nei loro giri, come al loro centro, formano le retrogradazioni e le stazioni, fermandosi negli spazi dei segni per le stazioni cagionati dalla natura dei loro giri.

Sorvolando per il momento su cosa intendesse Vitruvio per "spazio dei segni per le stazioni", l'esposizione continua in maniera ancora meno chiara: secondo Vitruvio la sua fonte ascriveva le retrogradazioni planetarie ad una strana «oscurità (*obscuritas*)» causata dalla lontananza del Sole che impediva ai pianeti di avanzare nel loro moto. È possibile che Vitruvio abbia frainteso considerazioni come quelle riportate da Seneca circa il fatto che noi "non vediamo" il reale moto dei pianeti per motivi che coinvolgono anche il Sole e abbia contaminato gli argomenti eliocentrici della sua fonte attraverso i concetti a lui familiari di "luce" e "oscurità", ascrivendogli un effetto dinamico sui moti planetari.

D'altra parte, in quest'ottica resta accettabile anche l'interpretazione alternativa che abbiamo proposto a valle delle testimonianze di Seneca e Plutarco: Vitruvio potrebbe alludere all'opposizione tra Sole e pianeta esterno nelle regioni

di retrogradazione, viste come "buie" per l'interposizione della Terra. Le due soluzioni sono cinematicamente equivalenti e entrambe compatibili con le fantasiose contaminazioni di Vitruvio; eventuali elementi discriminanti vanno ricercati negli aspetti dinamici della teoria.

Proseguendo nel brano i dettagli forniti da Vitruvio sull'interazione tra Sole e pianeti risolvono ogni dubbio. Innanzitutto Vitruvio insiste sull'attrazione che il Sole esercita sui pianeti, contaminando però la fonte con considerazioni sul calore associato alla luce solare.¹⁹ Più avanti in un passo parallelo a quello di Plinio ritroviamo i misteriosi "raggi triangolari":

La potente forza del Sole attira a sé i pianeti con raggi estesi a forma di triangolo e come se li frenasse e trattenesse quando corrono in avanti non permette loro di avanzare ma [li costringe] a ritornare verso di sé e ad essere in un *signum* dell'altro triangolo. Forse si vorrà sapere perché il Sole nei suoi ardori attiri indietro il quinto *signum*, invece che nel secondo o terzo, che sono più vicini. Esporrò in qual modo ciò sembri accadere. I suoi raggi si estendono nell'universo lungo linee a forma di triangolo con lati eguali. Ciò si estende né più né meno che al quinto segno da sé.

Per comprendere questo passo è essenziale capire il senso in cui viene usato il termine *signum*, lasciato da Russo in latino. In una prima accezione *signum* indica i segni zodiacali, e così è stato solitamente inteso dagli studiosi. Tuttavia un'altra possibilità, suggerita da Russo, è che *signum* sia un calco del greco σημειον, che come abbiamo visto era il termine tecnico utilizzato per indicare i punti nella geometria euclidea. A partire da questa osservazione e dall'uso che Vitruvio fa degli ordinali *secundum*, *tertium* ecc. Russo conclude che Vitruvio sta cercando di riferire la costruzione geometrica mostrata in Fig. 1.2: le «linee a forma di triangolo con lati eguali» non sono altro che raggi di una circonferenza centrata sul Sole e percorsa dai pianeti lungo la loro orbita. La costruzione in Fig. 1.2 mostra come tale orbita possa essere costruita con una successione di piccoli tratti, ciascuno dei quali risulta dalla composizione di due spostamenti simultanei: uno lungo la tangente dell'orbita (direzione lungo la quale il pianeta continuerebbe a muoversi in assenza dell'azione del Sole, come dice Plinio) e un altro diretto verso il Sole. Questa interpretazione chiarisce anche cosa sia lo "spazio dei segni per le stazioni" menzionato da Vitruvio nel passo precedente: doveva trattarsi dei cosiddetti punti stazionari ove i pianeti invertono il loro moto, dato che il segno zodiacale in cui avvengono stazioni e retrogradazioni cambia di volta in volta.

Sembra quindi che Vitruvio descriva essenzialmente lo stesso meccanismo che abbiamo dedotto dal brano di Plutarco, a conferma dell'idea che tutte le fonti analizzate finora riferiscano concetti propri di una teoria eliocentrica fondata sull'interazione gravitazionale tra i corpi, in cui le orbite circolari dei pianeti sono il risultato della composizione di un moto inerziale rettilineo e dell'attrazione del Sole centrale. Tale teoria dovrebbe risalire al II sec. a.C. e non poteva non essere nota a Ipparco che, verosimilmente, aveva contribuito alla sua formulazione.

¹⁹L'effetto del Sole sui pianeti viene paragonato a quello che il calore ha sulle piante da frutto e sul vapore acqueo, che vanno verso l'alto e appaiono dunque "attratti" dal Sole. Si noti che la connessione luce-calore è presente anche in Plinio, che attribuisce al Sole una «forza ardente».

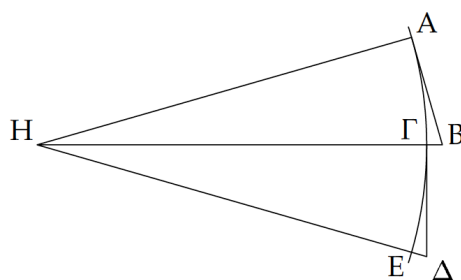


Figura 1.2: Il significato dei "raggi triangolari" di Vitruvio. Immagine tratta dall'edizione inglese di Russo (2010).

Un'ultima osservazione a sostegno dell'attribuzione ad Ipparco di una teoria dinamica della gravità. Tolomeo attribuisce a Ipparco la scoperta della precessione degli equinozi, effetto derivante da un moto periodico dell'asse terrestre con periodo pari a circa 26.000 anni. Si tratta di un moto così lento che le misure disponibili ad Ipparco potevano mostrarne solo una porzione di pochi gradi, da cui sarebbe difficile estrapolare l'esistenza di un moto circolare uniforme in assenza di una teoria dinamica. Al contrario, equipaggiati di una visione dinamica, l'esistenza di un moto di precessione può essere dedotta dall'osservazione di una semplice trottola, gioco all'epoca abbastanza diffuso da essere menzionato da Callimaco nei suoi epigrammi.

1.6 Seleuco e la Prova dell'Eliocentrismo

Come abbiamo visto, nel periodo ellenistico l'eliocentrismo non era un'idea rimasta isolata ma aveva dato luogo a sviluppi che, nelle loro linee generali, è stato possibile ricostruire. A prescindere da tali sviluppi, che abbiamo associato alla figura di Ipparco, sappiamo da Plutarco che nello stesso periodo l'ipotesi eliocentrica aveva avuto almeno un altro sostenitore:

Doveva pensare [Timeo] che la Terra fosse stata progettata non confinata e stabile ma rivolgentesi e ruotante, come successivamente affermarono Aristarco e Seleuco, il primo assumendolo solo per ipotesi e Seleuco invece dimostrandolo?

Alla luce del significato delle *ipotesi* discusso precedentemente, la distinzione fatta da Plutarco appare molto significativa, e sottintende che Seleuco abbia dedotto i moti della Terra da qualche altro fenomeno. Su cosa poteva essere basata la dimostrazione di Seleuco?

Di Seleuco di Babilonia abbiamo pochissime notizie. Strabone lo annovera tra i matematici caldei ed ci dice che Ipparco lo considerava un'autorità sullo studio delle maree. Da Aezio sappiamo inoltre che era un sostenitore dell'infinità dell'universo. Quest'ultima testimonianza è in linea con la supposta adesione all'eliocentrismo, che, come si legge nell'introduzione dell'*Arenario*, aveva portato Aristarco ad ampliare enormemente le dimensioni del cosmo. Per quanto riguarda

gli studi sulle maree effettuati nel periodo ellenistico la principale fonte a nostra disposizione è la *Geographia* di Strabone, opera risalente all'inizio del I sec. d.C..

Strabone ci dice che all'argomento si era interessato già Eratostene, che ascriveva il fenomeno all'attrazione esercitata dalla Luna sulla Terra e che contestava su questa base la dimostrazione della sfericità della Terra fornita da Archimede. Da questa semplice osservazione possiamo dedurre che:

- Lo studio delle maree era condotto non solo a livello empirico e qualitativo, ma posto in relazione con i risultati propri della scienza esatta ellenistica, di cui Eratostene era un esponente di primo piano.
- Nel III sec. a.C. l'interazione tra astri diversi era già stata ipotizzata in almeno un caso. Complementando la testimonianza di Strabone con quella di Plutarco, deduciamo che nel II sec. a.C. era possibile immaginare un'interazione *reciproca* tra corpi astronomici. D'altra parte la dimostrazione di Archimede della sfericità della Terra si basa solo sull'ipotesi che la forza di gravità agisca simmetricamente in tutte le direzioni. È abbastanza immediato a questo punto invertire il ragionamento e dedurre dall'evidente forma sferica di Sole e Luna che anche questi corpi, come la Terra, esercitano un'attrazione verso il proprio centro, come esplicitamente osservato da Plutarco sempre nel *De facie*:

Come infatti il Sole attira a sé le parti di cui consiste, così anche la Terra [...].

Da Strabone sappiamo anche che un'opera sulle maree era stata scritta nel I sec. a.C. da Posidonio, noto anche per i suoi interessi astronomici. L'opera è perduta, ma ci restano al riguardo tre importanti testimonianze: una descrizione fenomenologica fatta dallo stesso Strabone, alcuni passi di Plinio nel II libro delle *Naturalis Historiae* e un resoconto di Prisciano Lidio, filosofo neoplatonico vissuto nel VI secolo d.C... Dallo studio di tali testimonianze si evince che nell'opera di Posidonio era esposta una teoria delle maree di tipo lunisolare, che attribuiva cioè un ruolo sia al Sole che alla Luna. Alla luce dell'interruzione degli studi scientifici di cui abbiamo parlato, è verosimile pensare che tale teoria fosse stata sviluppata non più tardi del II sec. a.C., e che dunque fosse nota a Seleuco. Questi, secondo Strabone, aveva studiato in particolare il ciclo annuale delle disuguaglianze diurne delle maree dell'odierno Mare Arabico, un fenomeno che, in quanto annuale, è difficilmente spiegabile senza riconoscere un ruolo al Sole.

Come abbiamo visto, nello stesso periodo era stata elaborata una teoria eliocentrica che, nella nostra ricostruzione, era basata sull'equilibrio tra attrazione gravitazionale e forza centrifuga. Se lo studio delle maree aveva suggerito un'attrazione esercitata dal Sole sulla Terra, è possibile che l'analogia della fionda sia stata estesa al sistema Sole-Terra, con la Terra ad assumere il ruolo di sasso parzialmente deformabile.²⁰ In un caso del genere, si vedrebbe il sasso deformarsi

²⁰È curioso d'altra parte diverse testimonianze risalenti al III e al V sec. d.C. attribuiscono a Posidonio l'opinione che la Terra abbia la forma di una fionda: l'unica spiegazione possibile è che gli autori successivi, perduta ormai l'idea dei moti della Terra, abbiano frainteso Posidonio che, presumibilmente, si riferiva proprio all'analogia dinamica riportata da Plutarco.

lungo la direzione della fune, per effetto della tensione del filo da un lato e della forza centrifuga dall'altro: poiché le maree solari hanno l'effetto di innalzare il livello delle acque verso il Sole e nella direzione opposta, esse forniscono una solida prova a sostegno del moto di rivoluzione della Terra.

Inoltre l'attrazione esercitata dalla Luna sulla Terra, dimostrata dalle maree lunari, pone il problema del perché non sia la Terra a cadere sulla Luna. È abbastanza naturale immaginare che anche relativamente alla Luna la Terra sia sottoposta a una forza centrifuga, ovvero che Terra e Luna siano entrambe in rotazione intorno a un centro comune. Questa possibilità emerge direttamente dall'analogia della fionda, se si osserva che un fromboliere non rimane mai perfettamente immobile ma deve tracciare anch'egli una piccola circonferenza, opponendosi al peso che sta per lanciare. Insistendo sull'analogia, il centro comune si dovrebbe trovare più vicino al corpo di massa maggiore e il candidato ideale risulterebbe il baricentro del sistema, concetto ampiamente sviluppato nel III secolo a.C. da Archimede. Inoltre il centro di gravità si potrebbe identificare con i «punti incorporei» menzionati da Plutarco, che, per inciso, utilizza il già discusso termine *σημεῖον*. In una configurazione come quella descritta, esattamente come il fromboliere e la sua fionda, anche la Terra e la Luna si trovano sempre a fronteggiarsi, in posizioni opposte rispetto al comune centro di rotazione. Si spiegherebbe così la seguente testimonianza di Aezio (I-II sec. d.C.):

Seleuco il matematico, facendo muovere anch'egli la Terra, dice che la rivoluzione della Luna si contrappone ad un moto vorticoso della Terra.

La ricostruzione proposta rende conto in maniera coerente sia della contrapposizione sia del «moto vorticoso», altrimenti difficilmente interpretabile.

1.7 Stelle e Comete

In questa sezione discuteremo brevemente altre testimonianze a proposito di stelle e comete, due argomenti che, pur non avendo necessariamente un legame diretto con l'ipotesi eliocentrica, arricchiscono il quadro dei risultati raggiunti dall'astronomia ellenistica.

Sfera delle Stelle Fisse Nel corso di circa ventiquattro ore le stelle appaiono compiere una rotazione rigida da est a ovest intorno a un asse fisso, mantenendo inalterate le posizioni reciproche e, dunque, la forma delle costellazioni. Un moto di questo tipo suggerisce naturalmente l'idea che a muoversi sia l'intero cielo, concepito come una sfera materiale in cui sono incastonate le singole stelle, che non sono animate di moto proprio ma ereditano il movimento dalla sfera materiale su cui giacciono. Tale modello, che fu già adottato da Parmenide e, successivamente, da Platone e Aristotele, permette di rendere conto anche delle variazioni stagionali delle costellazioni osservabili a patto di postulare, come farà Tolomeo, un'altra rotazione più lenta, in verso opposto, che si compie in circa trecentosessantacinque giorni. La sfera delle stelle fisse costituisce anche un limite naturale all'estensione dell'universo, che viene così immaginato come uno spazio chiuso e sferico al cui centro si trova, immobile, la Terra.

È evidente che mettere in discussione il moto apparente delle stelle, attribuendo le variazioni suddette a presunti moti della Terra, fa perdere qualunque funzione alla sfera delle stelle fisse. Come accennato precedentemente, già alcuni Pitagorici ed Eraclide Pontico avevano attribuito una rotazione diurna alla Terra e lo stesso Eraclide aveva ritenuto, coerentemente, che l'universo fosse infinito, sostenendo inoltre che ogni astro costituisse un mondo a sé dotato della propria atmosfera. Abbiamo visto inoltre come l'ipotesi eliocentrica aveva condotto Aristarco, se non ad abolire la sfera delle stelle fisse, ad ampliarne le dimensioni al punto tale che l'orbita terrestre sarebbe in rapporto a questa come «il centro della sfera rispetto alla sua superficie». Sorvolando sull'inesattezza formale di tale asserzione, che Archimede individua appunto come bersaglio polemico, è chiaro che secondo Aristarco le stelle si trovano su una sfera di raggio incommensurabilmente più grande di qualunque lunghezza osservabile e misurabile. Pensare che tali dimensioni siano troppo grandi per essere stimate è a un passo dal considerare la sfera delle stelle fisse solo un utile artificio per indicare l'insieme delle direzioni, senza esprimersi sulle distanze effettive.

Nel II sec. a.C. abbiamo due esempi di abolizione, di fatto, della sfera delle stelle fisse. Il primo è Seleuco che, come abbiamo già ricordato, è citato da Aezio insieme a Eraclide come sostenitore dell'infinità dell'universo.

L'altro caso importante è quello di Ipparco, che secondo Plinio aveva redatto il suo catalogo stellare perché i posteri potessero rilevare eventuali spostamenti delle stelle. Queste secondo Ipparco erano solo apparentemente fisse per l'enorme distanza che le separa da noi, tale da rendere gli spostamenti troppo lenti per essere osservabili nell'arco di una vita umana. Ciò rappresenta un'ulteriore prova indiretta del fatto che Ipparco avesse aderito all'ipotesi eliocentrica di Aristarco che, come abbiamo visto, necessariamente portava con sé l'ampliamento dell'universo.

Infine Gemino (I sec. a.C.) nell'*Introduzione ai Fenomeni* ci conferma che, in un modo nell'altro, nel periodo ellenistico il passo decisivo fu effettivamente compiuto: egli introduce infatti la sfera delle stelle fisse sottolineando che si tratta solo di un oggetto convenzionale privo di realtà fisica, essendo le stelle in realtà ad una distanza variabile dalla Terra.

Comete Le apparizioni cometary sono fenomeni assai peculiari, che non a caso hanno attirato l'attenzione dell'uomo da tempi assai più antichi di quelli di cui ci stiamo occupando.²¹ Aristotele, ad esempio, le considerava dei fenomeni meteorologici, dovuti all'infiammarsi di parti alte dell'atmosfera causato dal calore del Sole. Fino alla prima età moderna, alle comete è sempre stato attribuito un significato nefasto, essenzialmente a causa della loro apparente imprevedibilità: esse sono infatti visibili solo per brevi periodi di tempo, cioè quando raggiungono il perigeo, e differiscono l'una dall'altra sia nel moto che nell'aspetto. In particolare le orbite cometary sono generalmente assai più eccentriche di quelle dei pianeti, fortemente inclinate rispetto all'eclittica e con periodi variabili da pochi anni a diverse migliaia. Di conseguenza un'astronomia puramente descrittiva non può

²¹In Scozia sono state trovate incisioni rupestri raffiguranti comete risalenti al II millennio a.C., mentre nell'Area di Foppe, vicino Brescia, ce ne sono alcune risalenti alla tarda Età del Ferro.

contenere una teoria delle comete, il cui moto può essere studiato solo se si ha a disposizione una teoria dinamica della gravitazione: non a caso uno dei primi grandi successi della teoria newtoniana fu la previsione dovuta ad Halley del ritorno della cometa che porta il suo nome. Nell'ambito di una teoria dinamica della gravità il moto delle comete diventa infatti accomunabile a quello dei pianeti in virtù del potere unificante della teoria, che permette di descrivere in maniera analoga fenomeni all'apparenza del tutto diversi.

Alla luce di queste considerazioni, è significativa la testimonianza di Seneca che scrive:

Questi infatti [Apollonio di Minda] sostiene che i Caldei collocano le comete nel numero dei pianeti e conoscono le loro orbite. [...]

Apollonio di Minda sostiene un'opinione diversa [da altri]: dice infatti che una cometa non deriva da molti pianeti ma che molte comete sono pianeti. «Una cometa non è», dice, «una falsa apparenza né un'estensione di fuoco in vicinanza di due stelle, ma un astro vero e proprio, come il Sole e la Luna. La sua forma non è racchiusa in un cerchio, ma più slanciata e estesa in lunghezza. Peraltro la sua orbita non è [tutta] visibile: attraversa le regioni superiori dell'universo e appare solo quando arriva nel punto più basso della sua orbita».

Il passo, per quanto leggermente deformato, è chiaro: la «forma più slanciata ed estesa in lunghezza» si riferisce non al corpo della cometa, ma alla sua orbita ellittica, mentre le «regioni superiori dell'universo» e il «punto più basso» sono rispettivamente le parti di quest'orbita lontane e vicine alla Terra; ricordiamo inoltre che uno dei «Caldei» era il già menzionato Seleuco di Babilonia. L'adesione di Seleuco all'ecliocentrismo e il fatto che le comete fossero collocate «nel numero dei pianeti» suggerisce che anche nel caso delle orbite planetarie si sia arrivati, nel II sec. a.C., alla conclusione che queste fossero ellittiche e non circolari come ipotizzato circa un secolo prima da Aristarco. Del resto laddove si abbia a disposizione una teoria delle coniche come quella formulata da Apollonio di Perga nel III sec. a.C. è naturale pensare a delle ellissi davanti al fallimento delle orbite circolari nel rendere conto delle osservazioni, esattamente come fece Keplero all'inizio dell'età moderna.

La testimonianza di Seneca non è isolata, ma trova eco in Aezio, che attribuisce ad alcuni Pitagorici l'opinione che le comete siano astri dello stesso tipo dei pianeti, in Plinio, secondo cui «alcune [comete] si muovono come pianeti, altre restano immobili» e in Manilio (I sec. a.C.), secondo il quale le comete sono periodicamente avvicinate e allontanate dal Sole.

In definitiva possiamo concludere che sul finire dell'età aurea della scienza ellenistica si era verosimilmente giunti ad elaborare una teoria eliocentrica dinamica in cui i pianeti percorrono orbite ellittiche. Chiaramente la difficoltà maggiore nell'accettare questa ricostruzione è l'assenza di simili idee nell'opera di Tolomeo. Vedremo nei prossimi capitoli come debba interpretarsi questa circostanza.

Capitolo 2

L'Astronomia Tolemaica

2.1 Vita e Opere di Tolomeo

A dispetto dell'enorme importanza dell'*Almagesto* nella storia dell'astronomia e della scienza in generale, di Claudio Tolomeo non si sa quasi nulla. Il poco che si può dire sulla sua vita è deducibile dal contenuto delle sue opere, la cui stessa cronologia tuttavia resta in parte dubbia.

Si stima che Tolomeo sia vissuto tra il 100 d.C. e il 170 d.C., principalmente sulla base delle osservazioni astronomiche che Tolomeo nell'*Almagesto* afferma di aver compiuto personalmente: la prima è un'opposizione di Saturno risalente al 127 d.C., l'ultima è una massima elongazione di Mercurio del 141 d.C..¹ Tutte queste osservazioni sono state fatte ad Alessandria d'Egitto, che nel II sec. d.C., seppur in declino, era ancora il principale centro culturale del Mediterraneo e non vi sono motivi per dubitare del fatto che Tolomeo vi abbia vissuto per buona parte della sua vita.

La produzione di Tolomeo è vasta e copre ambiti molto diversi. Il più antico scritto tolemaico che ci è pervenuto è anche l'unico di cui si ha una datazione certa: si tratta della cosiddetta *Iscrizione Canopica*, un testo contenente i valori di alcuni parametri astronomici impresso su un monumento dedicato al "Dio Sapiente" posto nel 146/147 d.C. a Canopo, città ad ovest della foce del Nilo.²

Di poco posteriore deve essere l'*Almagesto*, l'opera più nota di Tolomeo. Le tavole astronomiche che accompagnano i modelli geometrici costruiti nell'*Almagesto* sono sparse in varie parti dell'opera, e fu probabilmente per facilitarne l'uso e la consultazione che Tolomeo redasse le cosiddette *Tavole Pratiche*, che fornivano in

¹Tolomeo nell'*Almagesto* utilizza il calendario egiziano, in cui l'anno si compone di 365 giorni divisi in 12 mesi di 30 giorni ciascuno più 5 giorni intercalari. Gli anni vengono contati con riferimento al sovrano in carica secondo lo schema seguente: [nome del sovrano]+[anno del regno]+[mese]+[giorno]. Ad esempio il primo giorno del calendario di Tolomeo, utilizzato a più riprese nell'*Almagesto* come tempo iniziale nella descrizione dei moti celesti, è Nabonassar 1 Thoth 1. Nel seguito tutte le date saranno riportate seguendo il nostro calendario gregoriano, introdotto in Europa nel 1582. Per maggiori dettagli sulla cronologia tolemaica si veda ad es. Pedersen 1974.

²Hamilton, Swerdlow e G. J. Toomer (1987) hanno dimostrato che tale iscrizione precede la composizione dell'*Almagesto*, in cui Tolomeo menziona e corregge i valori riportati nell'iscrizione. Il testo dell'*Iscrizione Canopica* è tradotto e discusso in Jones (2005). Per un inquadramento di tali iscrizioni nel contesto storico-culturale dell'epoca si veda Domenech 2013, pp. 1-55.

maniera compatta i parametri essenziali per il calcolo delle posizioni di Sole, Luna e pianeti, per la previsione delle prime e ultime visibilità delle stelle principali e delle eclissi di Sole e Luna. Parte del successo dell'*Almagesto* fu dovuto proprio alla facilità d'uso delle relative *Tavole Pratiche*, che ebbero un'enorme diffusione e costituirono la base per tutte le effemeridi compilate nel Medioevo arabo e latino fino all'affermarsi del modello copernicano. Le ultime opere astronomiche di Tolomeo sono le *Ipotesi Planetarie*, in cui viene proposto un modello cosmologico basato sulla teoria ad epicicli esposta nell'*Almagesto*, e le *Phaseis*, in cui si discute delle fasi stellari, argomento trattato nell'*Almagesto* in misura marginale. In sostanza si può dire che gran parte del lavoro astronomico di Tolomeo ruoti intorno all'*Almagesto*, rispetto al quale le restanti opere costituiscono aggiunte o modificazioni relativamente minori.

Le altre opere di Tolomeo che ci sono pervenute riguardano argomenti vari, più o meno connessi all'astronomia:

- L'*Harmonica* è un trattato sulla teoria musicale probabilmente contemporaneo all'*Iscrizione Canopica*.³
- I *Tetrabiblos* sono un trattato di astrologia in quattro libri, inteso da Tolomeo come il naturale complemento dell'*Almagesto*.
- L'*Analemma* e il *Planispherion* sono due opere di matematica applicata all'astronomia: nella prima si descrive una tecnica di misurazione degli angoli utile nella costruzione di meridiani, mentre il secondo è dedicato alle proiezioni stereografiche su cui si basava la progettazione degli astrolabi.
- La *Geographia*, che è essenzialmente un manuale per la stesura di carte geografiche.
- L'*Ottica*, di cui ci resta solo una parziale traduzione araba, in cui si discutono anche i fenomeni di riflessione e rifrazione.
- Un breve scritto filosofico intitolato *Sul Criterio e il Principio Regolatore*, incluso tra i manoscritti tolemaici, la cui attribuzione è però considerata dubbia da alcuni studiosi.

Nel resto del capitolo ci concentreremo sugli scritti astronomici di Tolomeo, in particolare, ovviamente, sull'*Almagesto*, facendo riferimento ad altre opere per evidenziare alcuni aspetti metodologici del lavoro di Tolomeo.

2.2 Matematica, Fisica e Metafisica

L'*Almagesto* si apre con una prefazione di carattere filosofico in cui Tolomeo espone le proprie idee circa i tipi di conoscenza accessibili all'uomo e classifica le discipline

³La datazione è basata su alcune analogie riscontrabili tra la parte finale dell'*Iscrizione* e il tema generale dell'*Harmonica*, oltre alla generale coerenza filosofica tra le due opere (vedi Domenech 2013, pp. 58-59). La pensa diversamente G. Toomer (1990), che pone l'*Harmonica* in coda alla produzione di Tolomeo.

attraverso le quali si può pervenire a tali conoscenze. L'obiettivo di Tolomeo in questa introduzione sembra essere personale e filosofico allo stesso tempo: da un lato vuole motivare al lettore la sua scelta di dedicarsi allo studio all'astronomia, dall'altro vuole inquadrare tale disciplina in una prospettiva filosofica più generale. Il punto di vista espresso da Tolomeo è un'ibridazione molto personale di concetti aristotelici e platonici in cui la matematica ricopre un ruolo di primaria importanza.

In particolare, ci interessa evidenziare analogie e differenze tra la visione di Tolomeo e quella degli scienziati ellenistici a proposito dei rapporti tra le scienze matematiche e le altre forme di conoscenza; tale visione, come vedremo, ha conseguenze importanti sull'approccio tolemaico allo studio dell'astronomia.

La Classificazione delle Conoscenze

Rivolgendosi al destinatario dell'opera, un certo Syrus, Tolomeo riconosce ai «veri filosofi» il merito di aver suddiviso la conoscenza, e dunque la filosofia, in teoretica e pratica, dichiarando subito una personale predilezione per la prima. La differenza sostanziale tra le due è che mentre nella filosofia pratica, come ad esempio nell'etica, l'esperienza può essere sufficiente a progredire nella conoscenza, al contrario la filosofia teoretica richiede uno studio assiduo per essere padroneggiata e dunque esercitata in maniera efficace.⁴

Tolomeo, seguendo Aristotele, afferma che tutto ciò che esiste si compone di materia ($\psi\lambda\eta$), forma ($\epsilon\iota\delta\omicron\varsigma$) e movimento ($\kappa\iota\nu\eta\sigma\iota\varsigma$). Ognuno di questi tre aspetti non può mai essere percepito separatamente dagli altri due e solo la ragione ($\lambda\omicron\gamma\omicron\varsigma$) può concepire e comprendere queste proprietà individualmente. Tale distinzione si riflette nelle tre categorie in cui è divisa la filosofia teoretica, ovvero fisica ($\phi\upsilon\sigma\iota\kappa\eta$), matematica ($\mu\alpha\theta\eta\mu\alpha\tau\iota\kappa\eta$) e teologia ($\theta\epsilon\omicron\lambda\omicron\gamma\iota\kappa\eta$). La fisica si occupa dell'aspetto materiale e perennemente mutevole del mondo sublunare secondo concetti quali caldo/freddo, pesante/leggero e simili. Ad un livello più astratto si trova la matematica, che utilizzando i metodi dell'aritmetica e della geometria indaga la forma e il movimento e permette di comprendere sia le forme mutevoli del mondo terrestre sia quelle eterne e immutabili del mondo celeste, anche prescindendo dall'aiuto dei sensi.⁵ La teologia si dedica infine dello studio del mondo secondo le categorie di causa, effetto, essere, potenza e altri concetti che oggi diremmo metafisici. In particolare, di pertinenza della teologia è lo studio della causa prima del movimento, ovvero, nei termini classici di Aristotele, del motore immobile dell'universo.

Per Tolomeo le tre branche della filosofia teoretica non godono dello stesso statuto epistemologico. La teologia e la fisica sono infatti viziate dalla natura invisibile o mutevole dei loro oggetti e possono pervenire ad una conoscenza del loro oggetto soltanto congetturale. Al contrario la matematica, a patto di seguirne

⁴Secondo Anatolio (III sec. d.C.) i peripatetici affermavano lo stesso a proposito della matematica, chiamata così proprio perché per essere capita aveva bisogno di essere studiata (Russo 2010, p. 224).

⁵È verosimile che Tolomeo si riferisca qui ai sensi in quanto organi ingannevoli, e non in quanto veicoli dei *phainomena*, i quali come vedremo conservano per Tolomeo un valore euristico nella costruzione delle teorie scientifiche.

i metodi in maniera rigorosa, permette di raggiungere conclusioni certe ed eterne, come si addice secondo Tolomeo alla vera conoscenza:⁶

the first two divisions of theoretical philosophy should rather be called guesswork than knowledge, theology because of its completely invisible and ungraspable nature, physics because of the unstable and unclear nature of matter; hence there is no hope that philosophers will ever be agreed about them; and that only mathematics can provide sure and unshakeable knowledge to its devotees, provided one approaches it rigorously.

Qui Tolomeo evidentemente si distingue da Aristotele, per il quale la teologia occupava un posto privilegiato nella filosofia e portava con sé un carattere di certezza al pari di tutte le altre discipline. Si avvicina invece alla concezione platonica della matematica come studio delle idee eterne che soggiacciono alla realtà fenomenica. Sottolinea che per Tolomeo le forme studiate dalla matematica sono *immanenti* alla realtà: la matematica dell'*Almagesto* descrive per Tolomeo qualcosa di *ontologicamente* reale, nascosto dietro i *phainomena*, i quali cadono sotto il dominio dei sensi ma sono in ultima analisi generati proprio da siffatte strutture matematiche.⁷

Tolomeo sviluppa questa visione evidenziando che la matematica può diventare uno strumento utile anche nello studio delle altre due discipline. Nella fisica aristotelica, a cui Tolomeo aderisce, la diversa natura dei corpi si manifesta nei rispettivi moti caratteristici, che si possono descrivere matematicamente. Allo stesso modo l'astronomia, che cade nell'ambito delle scienze matematiche, è la sola disciplina che permette di comprendere i movimenti dei corpi celesti, eterni e sempre identici a se stessi. Vi è tuttavia una differenza nei due casi: il carattere corruttibile e mutevole del mondo materiale fa sì che la conoscenza propria della fisica, anche laddove abbia una forma matematica, resti incerta, soggetta alla fallacia dei sensi e irrimediabilmente *fisica*; al contrario l'astronomia, rivolgendosi agli eterni e immutabili moti celesti, fondandosi sulla certezza del suo oggetto riesce ad elevarsi fino al dominio della *matematica*. Ed è proprio in virtù dello speciale statuto dell'astronomia che Tolomeo ha deciso di dedicare a questa disciplina i suoi studi.⁸

This is the reason which has moved us to devote ourselves - to the best of our abilities - to this pre-eminent science in general [i.e. mathematics], but particularly to that branch of it which is concerned with the knowledge of the divine and celestial bodies. For that alone is devoted to the investigation of the eternally unchanging. For that reason it too can be eternal and unchanging (which is a proper attribute of knowledge) in its own domain, which is neither unclear nor disorderly.

⁶G. J. Toomer 1984, p. 35. Qui e nel seguito laddove non siano disponibili traduzioni italiane dei testi greci si è scelto di riportarne la traduzione inglese, al fine di evitare ulteriori distorsioni.

⁷Si tratta evidentemente di una visione capovolta rispetto a quella odierna, in cui è la teoria matematica a costituire un'approssimazione rispetto ai fenomeni osservati; vedremo più avanti le profonde conseguenze di questo capovolgimento sul rapporto tra teoria e osservazioni.

⁸G. J. Toomer 1984, p. 36.

In altri termini, Tolomeo distingue sì le varie discipline filosofiche in base al loro oggetto di studio, ma incorpora l'epistemologia delle stesse nella propria classificazione, amalgamando così il piano ontologico e quello epistemologico.

Se quindi l'utilizzo del metodo logico-deduttivo resta per Tolomeo la cifra caratteristica delle scienze matematiche, la distanza tra matematica, fisica e metafisica si assottiglia. Tolomeo compie un passo di grande rilievo quando dice che la matematica è funzionale alla comprensione delle "causa prima" e innesta sul discorso matematico una forma di realismo che in epoca ellenistica era stata di pertinenza esclusiva della filosofia naturale. In un ipotetico dibattito tra realisti e strumentalisti, non vi è dubbio che Tolomeo militerebbe tra le fila dei realisti, coerentemente con il modo in cui mostra di intendere il rapporto tra matematica e fisica, tra modelli teorici e realtà fisica.⁹ È vero che Tolomeo mostra almeno in un paio di occasioni di essere consapevole della possibilità di descrivere gli stessi fenomeni in modi diversi e incompatibili, ma di fatto la libertà nella scelta del modello resta senza alcuna conseguenza pratica. Laddove si presenta tale ambiguità Tolomeo non fa altro che scegliere il modello da adottare in base a qualche principio fisico o metafisico, esorbitando inevitabilmente dal dominio dei *phainomena*. Una volta scelto il modello, Tolomeo mostra di darne un'interpretazione fisica, realista, dimenticandosi apparentemente della totale equivalenza che ipotesi differenti hanno sul piano fenomenico.¹⁰ Di fatto, in questi casi, sono la fisica e la teologia a venire in soccorso della matematica, in un'interazione che si rivela molto più reciproca di quanto Tolomeo non lasci trasparire nella sua prefazione.

Per contrasto, ricordiamo la testimonianza di Teone di Smirne, contemporaneo di Tolomeo, secondo cui Ipparco considerava lo studio delle diverse ipotesi equivalenti degno dell'attenzione di un matematico.¹¹ ebbene, questo studio chiaramente non rientra negli interessi di Tolomeo, che ha invece l'obiettivo di descrivere la struttura *reale* dell'universo in forma matematica, utilizzando la ragione (*λογος*) per ricondurre la varietà disordinata dei fenomeni alla semplicità di poche assunzioni fondamentali da cui i fenomeni possano essere dedotti logicamente. Questo programma emerge in vari punti dell'opera di Tolomeo, ma è espresso con estrema chiarezza nei primi paragrafi dell'*Harmonica*:

For in everything it is the proper task of the theoretical scientist to show that the works of nature are crafted with reason and with an orderly cause, and that nothing is produced by nature at random or just anyhow, especially in

⁹Se nell'*Almagesto* l'approccio realista alle teorie astronomiche resta in parte ambiguo, esso si manifesta in maniera del tutto chiara nelle posteriori *Ipotesi Planetarie*.

¹⁰La possibilità di spiegare in modi diversi le stesse apparenze assume in Tolomeo i tratti tipici delle *conoscenze fossili*, descritte in Russo 2015, poiché Tolomeo non sembra comprendere appieno il significato di *equivalenza* tra due modelli. Nel Libro III dell'*Almagesto*, dedicato alla teoria solare, dopo aver dimostrato in generale l'equivalenza tra eccentrici ed epicicli Tolomeo prosegue dimostrando una serie di risultati facendo uso di entrambi i modelli.

¹¹Theon of Smyrna 1979, p. 108: «Hipparchus made the remark that the reason why the same phenomena follow from such different hypotheses, that of eccentric circles and that of concentric circles and of epicycles, is worthy of the attention of the mathematician.»

its most beautiful constructions, the kinds that belong to the more rational of the senses, sight and hearing.¹²

Alla base degli studi matematici di Tolomeo vi è anche una dimensione etica che sembra allontanarlo ulteriormente dai suoi predecessori ellenistici. Ancora nella prefazione dell'*Almagesto* Tolomeo dice a proposito della matematica:¹³

With regard to virtuous conduct in practical actions and character, this science, above all things, could make men see clearly; from the constancy, order, symmetry and calm which are associated with the divine, it makes its followers lovers of this divine beauty, accustoming them and reforming their natures, as it were, to a similar spiritual state.

Per Tolomeo lo studio della matematica applicata alla musica e ai moti celesti è finalizzato in ultima analisi alla trasformazione virtuosa dell'anima umana. I perfetti rapporti tra le armonie musicali e le divine configurazioni dei corpi celesti debbono servire da esempio all'uomo, che nello studio dell'armonia e dell'astronomia può raggiungere uno stato spirituale di calma, ordine e regolarità.¹⁴

Del resto all'interazione tra Cielo e cose terrene Tolomeo dedicò il *Tetrabiblos*, descritto nell'introduzione come il naturale completamento dell'*Almagesto*:¹⁵

I metodi più importanti e autorevoli per ricavare il pronostico dallo studio delle stelle sono due, o Siro. Il primo per ordine ed efficacia ci porta alla conoscenza degli aspetti reciproci che in ogni momento il Sole, la Luna e i pianeti vengono ad assumere con la Terra, durante il loro movimento. Il secondo, con l'analisi delle caratteristiche naturali proprie degli aspetti stessi, studia le conseguenti modificazioni della materia. In un trattato a parte ho cercato di darti i più precisi ragguagli sul primo metodo, che si riferisce ad una scienza autonoma, di per sé degna di studio. Soltanto l'integrazione dei due metodi tuttavia garantisce risultati completi. Ora noi verremo ad esporti il secondo metodo, anche se non è autosufficiente come il primo, e lo affronteremo come si affronta l'indagine filosofica; chi cerca la verità perciò, tenendo presente la fragilità di uno studio così complesso e la difficoltà di

¹²Barker 2000, p. 23. Nella divisione delle discipline matematiche fatta da Gemino e ancora ricorrente al tempo di Tolomeo, l'astronomia e l'armonia avevano uno statuto epistemologico molto simile: entrambe rappresentavano la parte applicata delle due branche in cui si articolava la matematica pura, cioè la geometria e l'aritmetica, e in entrambi i casi si trattava di spiegare dei *phainomena* a partire da alcune ipotesi fondamentali. Nel caso dell'astronomia, la geometria si esplicava attraverso composizioni di moti circolari uniformi atti a descrivere i moti celesti. Nell'armonia i rapporti tra numeri interi si manifestavano nelle consonanze musicali che l'uomo percepisce come belle e gradevoli. Le due discipline si distinguevano tuttavia per il grado di certezza cui potevano pervenire (Feke 2018, pp. 175-217). Questo legame tra astronomia e armonia, risalente alla riflessione pitagorica e carico di misticismo, perdurerà fino all'inizio dell'età moderna, in particolare in Keplero.

¹³G. J. Toomer 1984, p. 37. Anche questa dimensione spirituale dell'astronomia è di forte ascendenza platonica, così come l'idea dell'astronomia quale veicolo per ascendere alle realtà sovrasensibili.

¹⁴Idee simili sono espresse nel *Timeo* di Platone, sempre a proposito dello studio dei corpi celesti (si veda ad es. *Timeo*, 47C-E).

¹⁵Feraboli 1985, p. 9. È significativo che esista una traduzione italiana dei *Tetrabiblos* e non dell'*Almagesto*, circostanza che illustra in maniera eloquente alcune delle tesi qui esposte.

cogliere la qualità della materia, non dovrà porre a confronto lo studio della seconda disciplina con l'assoluto rigore e coerenza della prima; d'altra parte, visto che la maggior parte degli eventi generali trae chiaramente la sua causa dallo spazio che ci circonda, non dovrà rifuggire da ogni possibile ricerca.

Ciò che garantì il successo del *Tetrabiblos*, divenuto il testo fondamentale dell'astrologia occidentale, fu probabilmente proprio la connessione con l'astronomia che pose l'opera su una base più "scientifica" di quella perpetrata dai "ciarlatani" contro cui Tolomeo polemizza. Ricordiamo che i primi oroscopi greci di cui abbiamo notizia risalgono al I sec. a.C., mentre l'astrologia sembra completamente estranea all'astronomia ellenistica.

Possiamo dire quindi che l'umile programma della matematica ellenistica, che si occupava di elaborare schemi teorici atti a *salvare i fenomeni*, si arricchisce in Tolomeo di connotazioni altre che ampliano il ruolo filosofico delle scienze matematiche e, in ultima analisi, si riflettono nel modo in cui Tolomeo intende il rapporto tra *ipotesi* e *fenomeni*.

Ipotesi e Fenomeni

Nell'*Almagesto* Tolomeo usa il termine *ipotesi* in un senso almeno duplice. Se da una parte υποθησες conserva il significato etimologico di fondamento, punto di partenza di una catena di deduzioni, dall'altro a questo primo significato se ne affianca un secondo traducibile più propriamente come *modello* o *sistema di spiegazione*; Tolomeo nell'*Almagesto* parla espressamente delle "ipotesi che abbiamo dimostrato",¹⁶ espressioni che non avrebbero alcun senso nel quadro epistemologico della scienza ellenistica, in cui la deduzione dei *phainomena* non diceva nulla su una presunta *verità* delle ipotesi poste.

È evidente quindi che le *ipotesi* di Tolomeo sono qualcosa di molto diverso dalle *ipotesi* di Aristarco, qualcosa che si avvicina di più all'utilizzo che spesso anche oggi si fa del termine ipotesi, ovvero di modello provvisorio di spiegazione che attende conferma o smentita dal verificarsi o meno di certe circostanze sperimentali. Un'ulteriore conferma di ciò si trova nel carattere proprio delle *ipotesi* dell'uno e dell'altro. Le affermazioni iniziali di Aristarco dicono qualcosa sull'attuale configurazione geometrica di Terra, Sole e Luna, hanno un carattere anche quantitativo, sono legate direttamente a dei *fenomeni* e possono essere dunque utilizzate come punto di partenza per delle deduzioni. Al contrario le *ipotesi* di Tolomeo nell'*Almagesto* hanno la funzione di inquadrare qualitativamente il modello, fornendo una cornice interpretativa ben definita alla fase successiva, ovvero la determinazione mediante osservazione dei parametri quantitativi della teoria.¹⁷ Gli esempi più eloquenti di questo approccio sono l'*ipotesi* sui moti circolari uniformi, su cui torneremo a breve, e quelle relative a eccentrici ed epicicli. In *Alm.* III.3, quando queste vengono introdotte per la prima volta in relazione al moto del Sole, leggiamo:

¹⁶cfr. G. J. Toomer, nota a pp. 23-24. Ad esempio in *Alm.* X.4: «Such, then, is the method by which we determined the type of [Venus] hypothesis and the ratios of its anomalies.»

¹⁷vedi *infra*, par. 2.4

But first 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. [...] The apparent irregularity [anomaly] in their motions is the result of the position and order of those circles in the sphere of each by means of which they carry out their movements, and in reality there is in essence nothing alien to their eternal nature in the "disorder" which the phenomena are supposed to exhibit. The reason for the appearance of irregularity can be explained by two hypotheses, which are the most basic and simple. [...] It will be shown that either of these hypotheses will enable [the planets] to appear, to our eyes, to traverse unequal arcs of the ecliptic (which is concentric to the universe) in equal times.

Nell'*Harmonica* troviamo altre indicazioni del modo in cui Tolomeo intende il rapporto tra *ipotesi* e *fenomeni*. Dopo aver introdotto il *kanon harmonikos*, cioè il monocordo usato sin dai pitagorici negli studi di acustica, che fornisce un ausilio laddove «le percezioni sono in difetto rispetto alla verità», Tolomeo scrive:¹⁸

The aim of the harmonicist would be to preserve in every way the rational hypotheses (υποθεσεις) of the *canon* as never in any way conflicting with sense perceptions according to the judgement of most people, just as the aim of the astronomer is to *preserve the hypotheses of the heavenly movements in agreement with their carefully observed courses*, these [hypotheses] themselves being taken *from the rough and ready phenomena*, but finding the points of detail as accurately as is possible through reason (λογος).

Per Tolomeo non si tratta dunque (solo) di *salvare i fenomeni*, ma di *salvare le ipotesi* sforzandosi attraverso la ragione di ricondurre i primi sotto il segno delle seconde. Potremmo dire che nel passaggio dalla scienza ellenistica a quella tolemaica il peso relativo di ipotesi e fenomeni all'interno della teoria scientifica si redistribuisce, pendendo in qualche modo a favore delle ipotesi che, come si è detto, assumono un nuovo carattere di realtà fisica. Tolomeo dichiara esplicitamente che l'ultima parola spetta all'accordo tra teoria e osservazione, laddove però questo accordo vi sia, le *ipotesi*, cioè i *modelli*, diventano delle affermazioni sulla realtà fisica materiale, e non solo convenienti schemi concettuali atti a descrivere i fenomeni. D'altra parte una posizione del genere appare naturale se all'astronomia si attribuisce un ruolo fondamentale nella riflessione teologica: sono i moti celesti infatti a dover indicare la via per lo studio del primo motore immobile dell'universo. In ultima analisi l'obiettivo dell'astronomia tolemaica non è quello di rendere conto dei fenomeni, oggetto dei fallaci sensi, ma giungere attraverso la ragione alla comprensione della struttura matematica della realtà.

Tolomeo sottolinea inoltre che le ipotesi/modelli sono suggerite dai fenomeni *immediati ed evidenti* (ολοσχερεστερον), e che in un secondo momento i dettagli (cioè altri fenomeni meno evidenti) andranno studiati attraverso il ragionamento logico-deduttivo.¹⁹ Anche qui, dunque, notiamo la differenza rispetto ai criteri che

¹⁸Solomon 1999, pp. 6-7.

¹⁹Un passo simile a quello citato, ma meno enfatico su questo punto, è presente anche in *Alm.* I.2. Dopo aver esposto il piano generale dell'opera, Tolomeo dice:

dettavano la scelta dei postulati in epoca ellenistica: due esempi lampanti sono i già menzionati postulati dell'idrostatica archimedeica, in sé per niente autoevidenti ma capaci di rendere conto di una gran quantità di fenomeni diversi e dunque adatti a costituire il punto di partenza della teoria, e le ipotesi sui pianeti di Aristarco, così poco evidenti da risultare per Tolomeo letteralmente inconcepibili.

2.3 La Struttura Generale del Cosmo

Come abbiamo già ricordato, l'universo tolemaico ha una struttura geocentrica, con la Terra posta immobile al centro di un cosmo finito delimitato dalla sfera delle stelle fisse. Tolomeo pone questo modello cosmologico alla base della teoria astronomica dell'*Almagesto* e vi dedica una parte del Libro I, sottolineando che discuterà di queste materie «for the sake of reminder»; intendiamo dunque che a suo avviso si trattava di nozioni generalmente accettate e condivise.

Anche qui l'aristotelismo di Tolomeo è evidente, tanto nello stile quanto negli argomenti. Dal nostro punto di vista la discussione di Tolomeo è interessante per tre motivi: in primo luogo, è un esempio lampante dell'ibridazione tolemaica tra matematica e fisica, in cui argomenti di carattere filosofico si affiancano ad analisi di carattere geometrico sui moti osservati; in secondo luogo, Tolomeo dedica qualche parola alle diverse opinioni avanzate sugli stessi argomenti prima di lui, tra le quali è possibile riconoscere tracce di idee risalenti al periodo ellenistico; infine su alcuni punti emerge chiaramente il regresso di Tolomeo rispetto ad alcuni risultati raggiunti secoli prima di lui.

Sfericità dell'Universo e Moti Circolari Uniformi

Tolomeo sostiene che la sfericità del cosmo sia stata suggerita in primo luogo dall'osservazione delle stelle circumpolari, quelle stelle che ad una data latitudine sono visibili tutto l'anno e che in un giorno compiono un moto circolare intorno allo stesso punto, identificato con il polo della sfera celeste.²⁰ Allontanandosi dal polo, le stelle appaiono compiere dei moti circolari sempre più ampi, fino a quelle stelle il cui moto è parzialmente invisibile perché passa al di sotto dell'orizzonte, in misura tanto maggiore quanto più ci si allontana dal polo celeste. Assunta la sfericità dell'universo, «in their subsequent investigation, they found that everything else accorded with it, since absolutely all phenomena are in contradiction to the alternative notions which have been propounded» (G. J. Toomer 1984, p. 38).

Una di queste proposte alternative è che le stelle si muovano in linea retta. Tolomeo respinge l'idea come assurda, evidenziando giustamente le contraddizioni in cui si incorre se si cerca di spiegare i moti *diurni* in questo modo. È possibile

We shall try to provide proofs in all of these topics by using as starting-points and foundations, as it were, for our search the *obvious* phenomena, and those observations made by the ancients and in our own times which are reliable. We shall attach the subsequent structure of ideas to this [foundation] by means of proofs using geometrical methods.

²⁰Chiaramente Tolomeo fa riferimento qui alle latitudini del mondo greco, e l'analisi che segue non si applica a osservazioni fatte in prossimità dei poli terrestri.

tuttavia che la fonte di Tolomeo si riferisse piuttosto ai moti stellari ipotizzati da Ipparco, così lenti da risultare inosservabili nell'arco di una vita umana e per rivelare i quali lo stesso Ipparco aveva redatto, secondo Plinio, il suo catalogo stellare. D'altra parte Tolomeo non mette mai in dubbio la realtà della sfera delle stelle fisse, laddove abbiamo visto che circa un secolo prima Gemino ne aveva ben chiara la natura puramente convenzionale.

La forma sferica è strettamente connessa ai moti circolari ed è l'unica capace di rendere conto dell'invariabilità delle dimensioni dei corpi celesti e delle posizioni stellari. Tolomeo nota un'eccezione nel fatto che le stelle appaiono più grandi quando sono basse sull'orizzonte e spiega tale effetto in maniera duplice, fisica e ottica allo stesso tempo: si tratterebbe infatti di esalazioni emanate dalla Terra che fanno apparire le stelle più grandi, come l'acqua fa con oggetti posti sul fondo di un recipiente.²¹

Tolomeo prosegue osservando che se l'universo non avesse una forma sferica, non si spiegherebbe perché le meridiane forniscono risultati corretti nella misura del tempo. Questa osservazione è molto interessante e riflette in un caso estremamente semplice un'interazione tra modelli teorici e fabbricazione di oggetti su cui torneremo nel prossimo capitolo.

Quanto detto sinora sarebbe più che sufficiente ad adottare l'ipotesi della sfericità del cosmo nella costruzione della teoria. Tuttavia Tolomeo continua adducendo altri argomenti di carattere filosofico ripresi direttamente da Aristotele, che tradiscono la natura essenzialmente spuria dell'astronomia tolemaica:

1. Il moto dei corpi celesti è fluido, costante e ininterrotto. Tra le figure piane un moto del genere è ascrivibile solo ai cerchi, tra le figure solide alla sfera.
2. Il cosmo nella sua interezza deve essere più grande di tutti i corpi che contiene e deve dunque avere la forma che racchiude il maggior volume possibile, ovvero quella sferica.
3. Il cielo è fatto di etere,²² che tra tutti i corpi è quello dalle componenti più fini e simili l'una all'altra. Corpi con parti simili devono avere superfici simili, e l'unica figura solida ad essere uguale in tutti i suoi lati è la sfera.
4. In natura tutte le cose terrene hanno parti costituenti di forma sferica ma eterogenee, mentre quelle celesti hanno componenti sferiche simili l'una all'altra: se così non fosse, non si spiegherebbe perché i corpi celesti hanno il medesimo aspetto da qualunque punto della Terra siano osservati. È dunque plausibile che anche l'etere che li circonda sia di forma sferica, e che si muova di moto circolare uniforme *in virtù dell'omogeneità delle sue componenti*.²³

²¹Nell'*Ottica* Tolomeo spiegherà lo stesso fenomeno in termini psicologici.

²²Nella fisica aristotelica l'*etere* o *quintessenza* è il quinto elemento dopo terra, acqua, aria e fuoco. Mentre questi sono propri del mondo sublunare, l'etere è caratteristico del mondo celeste.

²³Data l'oscurità e l'importanza di questo passo, lo riportiamo per intero (G. J. Toomer 1984, p. 40):

Similarly, nature formed all earthly and corruptible bodies out of shapes which are round but of unlike parts, but all aethereal and divine bodies out of shapes which are of like parts and spherical. For if they were flat or shaped like a discus they would

L'ultimo punto è di particolare importanza, poiché evidenzia come in Tolomeo il principio dei moti circolari uniformi sia intimamente legato alla concezione aristotelica del moto e della materia.²⁴ Tolomeo farà di tale principio il cardine della sua teoria, il criterio irrinunciabile a cui attenersi.²⁵ All'inizio del Libro IX, introducendo la teoria planetaria, Tolomeo lo dice chiaramente:²⁶

Now it is our purpose to demonstrate for the five planets, just as we did for the sun and moon, that all their apparent anomalies can be represented by uniform circular motions, since *these are proper to the nature of divine beings*, while disorder and nonuniformity are alien [to such beings]. Then it is right that *we should think success in such a purpose a great thing, and truly the proper end of the mathematical part of theoretical philosophy*.

Poco dopo, anticipando che i modelli planetari differiscono l'uno dall'altro sotto vari aspetti, Tolomeo sottolinea che l'uso dei moti circolari uniformi è il vero elemento unificante della sua teoria:

we know, finally, that some variety in the type of hypotheses associated with the circles [of the planets] cannot plausibly be considered strange or contrary to reason (especially since the phenomena exhibited by the actual planets are not alike [for all]); for, when uniform circular motion is preserved for all without exception, the individual phenomena are demonstrated in accordance with a principle which is more basic and more generally applicable than that of similarity of the hypotheses [for all planets].

Spesso si è detto che tutta l'astronomia greca, da Platone a Tolomeo, sia stata segnata dal medesimo programma di ricerca: salvare i fenomeni ricorrendo solo a moti circolari uniformi. Nel prossimo capitolo discuteremo dei dubbi sul ruolo di un simile programma nel quadro della scienza ellenistica; nel caso di Tolomeo è invece chiaro come il postulato sui moti circolari uniformi poggi su basi fisiche e metafisiche di carattere aristotelico.

not always display a circular shape to all those observing them simultaneously from different places on earth. For this reason it is plausible that the aether surrounding them, too, being of the same nature, is spherical, and because of the likeness of its parts moves in a circular and uniform fashion.

L'osservazione che i corpi hanno la stessa forma qualunque sia il punto di osservazione è interessante e costituirebbe in effetti un buon argomento a favore della sfericità dei corpi celesti. Tolomeo è però inconsistente con quanto osserva più avanti, in *Alm.* IX.1, ovvero che i corpi celesti (con l'eccezione della Luna) sono troppo lontani per mostrare una parallasse.

²⁴cfr. Aristotele, *De Caelo*, II.4

²⁵A rigore non sarebbe corretto parlare di una singola *teoria*, in quanto nell'*Almagesto* ogni corpo celeste è descritto da un modello a se stante che condivide con gli altri solo alcuni aspetti strutturali. Con quest'avvertenza, nel seguito useremo talvolta il singolare per comodità espositiva.

²⁶G. J. Toomer 1984, p. 420. La stessa idea viene espressa esplicitamente anche in *Alm.* III.1: «we think that the mathematician's task and goal ought to be to show all the heavenly phenomena being reproduced by uniform circular motions [...]» (G. J. Toomer 1984, p. 140). Questi passi confermano quanto abbiamo detto precedentemente a proposito del fine metafisico dell'astronomia tolemaica.

Sfericità, Centralità e Immobilità della Terra

Per dimostrare la sfericità della Terra Tolomeo ricorre ai classici argomenti astronomici basati sui tempi di osservazione delle eclissi di Luna e sull'aumento delle costellazioni circumpolari osservabili spostandosi verso nord. Nell'*Almagesto* Tolomeo non dà le dimensioni della Terra (problema che affronterà nella *Geographia*) limitandosi a dire che questa è «come un punto» rispetto alla distanza delle stelle fisse, un'espressione che ricorda quella usata da Aristarco nel suo trattato *Sulle dimensioni e le distanze del Sole e della Luna*. A sostegno di ciò viene ancora portato l'uso efficace di strumenti astronomici basati su tale assunzione e il fatto che in qualunque luogo della Terra il piano dell'orizzonte taglia il cielo in due parti identiche: se la Terra avesse dimensioni percepibili rispetto alla sfera celeste un piano tangente alla sua superficie dividerebbe il cielo in parti diseguali.

La centralità della Terra è dimostrata in maniera indiretta evidenziando come qualunque posizione diversa dal centro sarebbe incompatibile con le osservazioni degli equinozi, delle stelle fisse e delle eclissi di Luna.

Gli stessi argomenti astronomici sono usati per sostenere in prima battuta l'immobilità della Terra. Subito dopo Tolomeo passa ad argomenti fisici, ancora una volta di chiaro stampo aristotelico. La prima prova, molto confusa, è basata sulla teoria della gravitazione. Come si è già accennato, nella fisica aristotelica il moto naturale dei corpi pesanti è diretto verso il centro del cosmo, dunque la direzione di caduta dei corpi è in ogni punto perpendicolare al piano tangente in quel punto una sfera concentrica alla sfera celeste. L'esperienza mostra che effettivamente la gravità è sempre diretta verso il basso, cioè verso il centro della Terra. Per come intendiamo le parole di Tolomeo, abbiamo qui un altro argomento a sostegno della sfericità e della centralità della Terra, che sono già state dimostrate in base a ben più stringenti argomenti astronomici; non è chiaro dove intervenga in questo discorso l'immobilità della Terra. Aristotele forse aggiungerebbe che i corpi restano in quiete dopo aver raggiunto il loro luogo naturale, da cui deriverebbe l'immobilità della Terra. Tolomeo tuttavia omette questo dettaglio essenziale, rendendo questa prova assai poco convincente anche sul piano fisico. Ricordiamo comunque che le prove aristoteliche sulla sfericità della Terra erano diventate ormai obsolete dopo che Archimede, partendo da semplici ipotesi sulle interazioni elementari, aveva dimostrato la necessaria forma sferica di un fluido a riposo soggetto a una forza a simmetria sferica agente verso il centro.²⁷ In realtà l'intera teoria aristotelica degli elementi e dei moti naturali, ripresa da Tolomeo, era diventata insostenibile alla luce degli studi di pneumatica di Ctesibio di Alessandria e Filone di Bisanzio e dell'idrostatica archimedeica: la famosa "spinta di Archimede", ad esempio, dimostra chiaramente l'inesistenza di qualunque nozione di "leggerezza" opposta alla "gravità".

Il secondo argomento chiama in causa una presunta pressione esercitata sulla Terra dall'etere circostante. Tale pressione è molto elevata e agisce da tutte le direzioni, così da mantenere la Terra immobile nella sua posizione centrale. L'argomento, concepibile di per sé, è però in evidente contraddizione con il moto

²⁷Che tale ragionamento sia stato applicato anche alla Terra, considerata originariamente fluida, è attestato in almeno un caso nella *Bibliotheca Historica* di Diodoro Sicuro (I sec. a.C.) (Russo 2010, p. 350).

naturale dell'etere descritto precedentemente, che è circolare e non diretto verso il centro. Tolomeo complica ulteriormente il discorso aggiungendo alcune osservazioni poco chiare sui corpi leggeri che vanno verso l'alto.

Tolomeo passa poi ad attaccare «alcune persone» che hanno attribuito alla Terra un moto diurno:²⁸

But certain people, [propounding] what they consider a more persuasive view, *agree with the above*, since they have no argument to bring against it, but think that *there could be no evidence to oppose their view* if, for instance, they supposed the heavens to remain motionless, and the earth to revolve from west to east about the same axis [as the heavens], making approximately one revolution each day; or if they made both heaven and earth move *by any amount whatever*, provided, as we said, it is about the same axis, and in such a way as to preserve the overtaking of one by the other.

Abbiamo qui una chiara reminiscenza della relatività dei moti e dell'equivalenza fenomenica tra ipotesi differenti, nozioni interconnesse che sappiamo essere state ben comprese dagli scienziati ellenistici. La relatività dei moti è affermata nella maniera più generale, essendo ammessa qualunque combinazione tra i moti di Terra e Cielo che preservi le relazioni reciproche. È significativo inoltre che gli avversari di Tolomeo accettino l'immobilità della Terra non avendo al riguardo argomenti da opporre, sottolineando allo stesso tempo che non vi sono nemmeno evidenze contrarie alla loro visione: l'enfasi posta sulle apparenze, o potremmo dire sui *phainomena*, è coerente con l'approccio dei matematici ellenistici che abbiamo descritto nel capitolo precedente. Possiamo immaginare che i bersagli polemici di Tolomeo considerassero la loro visione più persuasiva perché si accompagnava all'ipotesi sul moto di rivoluzione della Terra, che permette di salvare i *phainomena* planetari in maniera più semplice: in tal caso si tratterebbe infatti di un argomento convincente ma non decisivo. Siamo però nel campo della speculazione, poiché Tolomeo non accenna mai nell'*Almagesto* al secondo moto della Terra. Abbiamo visto che in effetti argomenti decisivi contro il geocentrismo, e dunque contro l'immobilità della Terra, erano stati sollevati sul piano dinamico a metà del II sec. a.C. da Seleuco di Babilonia. Tuttavia l'*Almagesto* è completamente privo di idee dinamiche, essendo appunto i movimenti dei corpi celesti spiegati in termini aristotelici. Tutto lascia intendere dunque che Tolomeo stia riferendo idee risalenti al più al primo ellenismo; troveremo più avanti altre indicazioni del fatto che Tolomeo non fosse a conoscenza degli sviluppi più maturi della scienza ellenistica.

Lo stesso Tolomeo ammette d'altra parte che su base astronomica le due ipotesi sono del tutto equivalenti, e per sostenere la propria posizione è costretto a ricorrere nuovamente ad argomenti aristotelici:

However, they do not realize that, although *there is perhaps nothing in the celestial phenomena which would count against that hypothesis*, at least from simpler considerations, nevertheless from what would occur here on earth and in the air, one can see that such a notion is quite ridiculous.

²⁸G. J. Toomer 1984, p. 45.

Seguono una serie di scenari apocalittici che includono corpi smembrati o lasciati indietro dall'eventuale rotazione della Terra. Osserviamo che argomenti aristotelici di questo genere avrebbero potuto essere avanzati anche dagli avversari di Tolomeo, che parla al presente e difficilmente si sta riferendo a studiosi precedenti ad Aristotele. Di conseguenza appare significativo il fatto che secondo questi «non vi sono evidenze contrarie alla loro visione», mentre quelle descritte da Tolomeo sono per quest'ultimo delle prove a tutti gli effetti, apparentemente determinanti nella scelta del modello da adottare. Abbiamo dunque un'ulteriore indizio del fatto che la matematica e la fisica, amalgamate in Tolomeo, viaggiavano nel periodo ellenistico su due binari separati.

2.4 Teoria e Osservazione nell'*Almagesto*

Dopo aver descritto la struttura generale del cosmo e aver fornito nel Libro II alcune nozioni di astronomia sferica necessarie allo studio dei fenomeni dipendenti dal particolare punto di osservazione sulla superficie terrestre, nel Libro III Tolomeo comincia l'esposizione vera e propria della sua teoria astronomica.

L'ordine in cui Tolomeo presenta gli argomenti è progressivo e risponde a una logica molto didattica, che rende l'opera fruibile a chiunque abbia un minimo di familiarità con la geometria euclidea.²⁹ Il primo passo è sviluppare la teoria del Sole, preliminare sia alla teoria della Luna, esposta nel Libro IV e perfezionata nel Libro V, sia allo studio delle eclissi presentato nel Libro VI. I Libri VII e VIII sono dedicati alle stelle fisse e includono il catalogo stellare, che insieme alle posizioni della Luna verrà utilizzato per determinare le posizioni dei pianeti ai quali è dedicato il resto dell'opera. I Libri IX e X trattano il moto longitudinale, necessario per il Libro XII in cui si discutono retrogradazioni e massime elongazioni. Infine il Libro XIII è dedicato alle latitudini planetarie e ai relativi fenomeni di visibilità.

Nella sua esposizione Tolomeo segue uno schema che si ripete in maniera simile lungo tutto l'*Almagesto* per ognuno dei corpi celesti considerati:

1. Illustrazione qualitativa dei fenomeni da salvare;
2. Descrizione sommaria del modello geometrico utilizzato, che viene assunto a postulato senza dimostrazione;
3. Deduzione dei parametri del modello a partire da una ristretta selezione di osservazioni astronomiche;
4. Verifica che con tali parametri il modello descrive effettivamente i fenomeni osservati.

Come si vede, i modelli sono costruiti basandosi tanto sulle osservazioni quanto su scelte teoriche che, in ultima analisi, vengono validate dall'accordo con l'esperienza. Un'interazione siffatta tra teoria e osservazione, caratteristica del

²⁹ «We shall try to note down everything which we think we have discovered up to the present time; we shall do this as concisely as possible and in a manner which can be followed by those who have already made some progress in the field.» (G. J. Toomer, p. 37).

metodo scientifico, pone evidentemente una serie di problemi non banali circa il rapporto reciproco tra il piano teorico e quello empirico, soprattutto alla luce delle considerazioni svolte da Tolomeo nella prefazione dell'opera a proposito del grado di certezza raggiungibile nei vari ambiti della conoscenza.

Si è visto che per Tolomeo la matematica è l'unica disciplina che permette di raggiungere una conoscenza certa, e che l'astronomia, utilizzando i metodi della geometria per studiare i moti dei corpi celesti, eterni ed immutabili, può conseguire risultati che partecipano del carattere di certezza della matematica pura. Allo stesso tempo però l'astronomia è intesa da Tolomeo come una scienza empirica, basata sull'osservazione e dunque sui sensi, i quali sono irrimediabilmente affetti da un certo grado di incertezza. Questa doppia anima si traduce quindi in una contraddizione interna all'astronomia stessa: mentre i modelli astronomici *in sé* godono di uno statuto *matematico*, certo e incontrovertibile, i parametri numerici dedotti dall'osservazione, indispensabili per dare alle teorie astronomiche un carattere quantitativo, non potranno mai essere conosciuti con uguale certezza.

Nell'*Almagesto* Tolomeo si sofferma più volte sul problema dell'accuratezza delle osservazioni e sulle limitazioni imposte dagli strumenti di misura. In *Alm.* III.1 dopo aver sottolineato che nel caso di fenomeni periodici l'accuratezza dei tempi di ritorno migliora quanto più sono distanti nel tempo le osservazioni utilizzate per derivarli, Tolomeo dice:³⁰

Hence we must consider it sufficient if we endeavour to take into account only that increase in the accuracy of our hypotheses concerning periodic motions which can be derived from the length of time between us and those observations we have which are both ancient and accurate. We must not, if we can avoid it, neglect the proper examination [of such records]; but as for assertions of validity *for eternity*, or even for a length of time which is many times that over which the observation have been taken, we must consider such as alien to a love of science (*φιλοματειας*) and truth (*φιλαλητειας*).

Mentre la struttura qualitativa del modello è considerata certa ed eterna, i dettagli quantitativi, e dunque le previsioni che dal modello si possono derivare, hanno un carattere solamente approssimato, estraneo alle scienze matematiche.

Riteniamo che questa dicotomia tra aspetti qualitativi e quantitativi della teoria sia di grande importanza nell'annosa *querelle* sulla presunta fabbricazione delle osservazioni astronomiche riportate nell'*Almagesto*, questione che come abbiamo già ricordato fu sollevata per la prima volta da Delambre all'inizio del XIX secolo e indagata più a fondo da R. Newton negli anni settanta del XX secolo.

Delambre evidenziò innanzitutto come nonostante lungo tutto l'*Almagesto* Tolomeo sottolinei più volte l'importanza dell'accuratezza delle misure, soffermandosi anche sulla descrizione degli strumenti che dice di utilizzare, le informazioni che fornisce sono spesso piuttosto vaghe e mancano di dettagli essenziali sulle caratteristiche degli strumenti e sui procedimenti di misura. In *Alm.* IX.2 enumerando le difficoltà inerenti alle osservazioni planetarie, Tolomeo dice:³¹

³⁰G. J. Toomer 1984, p. 137.

³¹G. J. Toomer 1984, p. 421.

In general, observations [of planets] with respect to one of the fixed stars, when taken over a comparatively great distance, involve difficult computations and an element of guesswork in the quantity measured, unless one carries them out in a manner which is thoroughly competent and knowledgeable.

Di conseguenza, Tolomeo considera affidabili solo le osservazioni compiute in un certo modo:³²

The observations which we use for the various demonstrations are those which are most likely to be reliable, namely [1] those in which there is observed actual contact or very close approach to a star or the moon, and especially [2] those made by means of the astrolabe instruments.³³

Le caratteristiche della sfera armillare sono descritte in *Alm.* V.1, dove Tolomeo sottolinea che tale strumento è stato da lui costruito appositamente per compiere osservazioni della Luna. La descrizione è assai dettagliata, ma Tolomeo non ci dice nulla né sul raggio né sulla divisione in gradi, che sono i parametri essenziali per stimare la sensibilità dello strumento. Una contraddizione analoga si trova in *Alm.* I.12, dove Tolomeo descrive il cerchio meridiano che dice di aver utilizzato per la misura dell'inclinazione dell'eclittica: pur evidenziando che il cerchio riporta tante divisioni quante se ne possono incidere lungo il bordo dello strumento, non ci viene detto quante di queste divisioni c'erano sullo strumento da lui effettivamente utilizzato.³⁴ Tali omissioni contrastano drammaticamente con l'enfasi posta da Tolomeo lungo tutto l'*Almagesto* sugli errori di osservazione dovuti agli strumenti di misura.³⁵

Se queste incongruenze possono essere considerate di importanza minore, ascrivibili forse a una consapevolezza solo parziale dei problemi legati alle misure sperimentali, ben più gravi sono le anomalie riscontrabili nei *risultati* delle misure di Tolomeo. Nel caso del Sole e della Luna, Tolomeo prende come punto di partenza le teorie già formulate tre secoli prima da Ipparco, proponendosi di verificarle attraverso nuove misure e, eventualmente, di migliorarle. In entrambi i casi, con l'eccezione di una leggera rifinitura alla teoria lunare, Tolomeo afferma di aver trovato gli stessi risultati di Ipparco. Delambre trova sospetta questa circostanza, essendo l'incertezza sulle misure di Ipparco e Tolomeo abbastanza elevata da rendere estremamente improbabile un accordo *esatto* in tutti i casi. Delambre arriva dunque a chiedersi:³⁶

Tolomeo ha [realmente] osservato? E se le osservazioni che ci dice di aver fatto non fossero altro che calcoli svolti su delle tavole, esempi che gli servono

³²G. J. Toomer 1984, p. 423.

³³L'*astrolabio* di Tolomeo coincide con quello che oggi chiameremmo *sfera armillare*, e non ha nulla a che vedere con l'astrolabio piano di epoca medievale (cfr. G. J. Toomer 1984, nota a p. 217).

³⁴Subito dopo Tolomeo descrive anche il quadrante murale, un altro strumento da lui costruito allo stesso scopo e, a suo dire, più pratico del precedente. Anche di questo, tuttavia, non ci fornisce le informazioni più importanti (G. J. Toomer 1984, pp. 61-63).

³⁵Si vedano ad esempio G. J. Toomer 1984, pp. 131, 173, 190, 416, 419, 453.

³⁶Delambre 1817, p. xxvi.

a far comprendere meglio le sue teorie? [...] Mai si sarebbe sollevato il minimo dubbio al riguardo, se questi equinozi, confrontati con quelli dei moderni, non dessero all'anno una lunghezza che è impossibile da ammettere. Tutto si spiega, se tali equinozi sono dei calcoli spacciati per osservazioni reali.

In sostanza Delambre accusa Tolomeo di aver inventato osservazioni mai compiute, fabbricandone i risultati a partire da tavole o modelli preesistenti e facendo passare questi valori calcolati per conferme sperimentali della propria teoria.

Newton ha ripreso la tesi di Delambre, analizzando gran parte delle osservazioni astronomiche riportate nell'*Almagesto* e giungendo sistematicamente alla stessa conclusione: molte di queste sono state fabbricate a partire dalla stessa teoria che avrebbero dovuto corroborare. Il procedimento adottato da Newton per verificare l'autenticità di un'osservazione X che Tolomeo dice di aver eseguito è il seguente:³⁷

1. Si identificano delle osservazioni genuine compiute da altri astronomi e rilevanti per le teorie che Tolomeo vuole costruire.³⁸
2. Si calcolano i parametri tolemaici utilizzando queste osservazioni.
3. Si utilizza la teoria così costruita per prevedere quando si presenterà la particolare circostanza (equinozio, solstizio, massima elongazione ecc.) oggetto dell'osservazione X.
4. Si confronta il tempo così calcolato con quello attribuito da Tolomeo all'osservazione X.

Così facendo Newton ha trovato che in molti casi i valori calcolati e quelli "osservati" concordano fino all'ultima cifra sessagesimale riportata da Tolomeo; quando l'accordo non è esatto, la discrepanza è facilmente riconducibile ad arrotondamenti, troncamenti e altri problemi computazionali. Nei casi in cui un'analisi di questo genere non è possibile per mancanza di dati, Newton ha utilizzato le teorie odierne per stimare l'accuratezza delle osservazioni riportate da Tolomeo, trovando errori spesso inspiegabili sulla base delle sole incertezze sperimentali. In tutti i casi, comunque, le misure riportate da Tolomeo confermano brillantemente la sua teoria, anche laddove sappiamo che questa non avrebbe dovuto dare risultati corretti (e, di fatto, non li dava).³⁹

Il caso più eclatante è probabilmente quello delle misure di equinozi e solstizi.⁴⁰ Tali misure sono indispensabili per stimare la lunghezza dell'anno tropicale, un parametro essenziale per la costruzione dell'intera teoria tolemaica, e sono usate da Tolomeo per verificare il valore dell'anno tropicale misurato da Ipparco, pari a $365 + 1/4 - 1/300 \simeq 365,246666$ giorni.⁴¹ Usando una versione leggermente

³⁷Newton 1977, p. 343.

³⁸Dato che Tolomeo sembra aver fabbricato anche osservazioni altrui, sempre utilizzando la propria teoria, l'unico modo certo per valutare l'affidabilità di un'osservazione pretolemaica è incrociarla con altre testimonianze indipendenti.

³⁹Una sintesi delle osservazioni esaminate da Newton è in Newton 1977, pp. 341-349.

⁴⁰Per maggiori dettagli si veda Newton 1977, pp. 75-102

⁴¹Per una storia della misura della lunghezza dell'anno tropicale si veda Meeus e Savoie 1992.

Tabella 2.1: Tempi di equinozi e solstizi osservati da Tolomeo a confronto con i tempi calcolati a partire dalla teoria moderna. Gli orari calcolati sono relativi al meridiano passante per Alessandria d'Egitto (Newton 1977, p. 87).

Tolomeo		Teoria Moderna	
Data	Ora	Data	Ora
25 Settembre 132	14	24 Settembre 132	9.9
26 Settembre 139	07	25 Settembre 139	2.5
22 Marzo 140	13	21 Marzo 140	9.4
25 Giugno 140	02	23 Giugno 140	14.0

corretta della teoria di Newcomb, Newton ha stimato il momento dell'occorrenza degli equinozi e dei solstizi riportati da Tolomeo, ottenendo i risultati mostrati in Tab. 2.1.⁴² Come si vede, *tutti* i tempi dati da Tolomeo sono in ritardo di più di un giorno rispetto a quelli "corretti": 28 ore nel caso degli equinozi, 36 per il solstizio. Si tratta di un errore enorme se si tiene conto della semplicità della misura, che già al tempo di Eutemone e Metone, nel V sec. a.C., era compiuta con un'accuratezza di circa 7 ore.⁴³ In Tab. 2.2 sono invece riportati i valori che si ottengono sommando ai tempi misurati dai predecessori di Tolomeo il numero di anni che li separano da quest'ultimo moltiplicato per 365,246666 giorni: come si vede, arrotondando il risultato all'unità più vicina si ottiene *esattamente* il valore della "misura" di Tolomeo. Notiamo che prima di dare i risultati delle proprie "osservazioni" Tolomeo non manca mai di sottolinearne l'accuratezza.⁴⁴

those [equinox observations] which we ourselves have made *with the greatest accuracy*... we observed, again *very securely*, that the autumnal equinox occurred on Athyr 9 [139 Sept. 26]... the solstice which we determined *as accurately as possible*... We determined *securely* that the [summer solstice] in the above-mentioned 463rd year from the death of Alexander occurred on Mesore 11/12 [140 June 24/25] about 2 hours after midnight.

In una situazione del genere, i dubbi sollevati da Newton appaiono insomma più che fondati.

Newton sottolinea che il modello tolemaico, per quanto approssimato, avrebbe potuto fornire previsioni più accurate se solo i parametri fondamentali fossero stati calcolati a partire da osservazioni genuine.⁴⁵ Inoltre le osservazioni a disposizione di Tolomeo coprivano una base temporale molto più ampia di quella accessibile a Ipparco, circostanza che gli avrebbe consentito almeno di migliorare i valori dei parametri solari e lunari compiendo semplici misure, indipendentemente da qualunque schema teorico:⁴⁶ alla luce di simili "occasioni mancate" e, peggio

⁴²Newton sottolinea che la bontà del metodo è confermata dal fatto che i suoi calcoli sono in ottimo accordo con un gran numero di osservazioni risalenti a secoli prima di Tolomeo.

⁴³Newton 1977, pp. 80-84. Questa stima è stata fatta da Newton in base alla moderna teoria solare. Lo stesso Tolomeo ci dice che nel II sec. a.C. Ipparco avrebbe attribuito alle proprie misure un'incertezza di 6 ore (G. J. Toomer 1984, p. 133).

⁴⁴G. J. Toomer 1984, pp. 137-138.

⁴⁵Newton 1977, pp. 354-356.

⁴⁶Questa osservazione, come abbiamo già accennato, è fatta dallo stesso Tolomeo in *Alm.* III.1.

Tabella 2.2: Tempi di equinozi e solstizi fabbricati da Tolomeo (Newton 1977, p. 90).

Osservazione Iniziale			Tempo Fabbricato		
Data	Ora	Anni Trascorsi	Data	Ora	Orario Riportato
27 Settembre -146	00	278	25 Settembre 132	13,8	14
27 Settembre -146	00	285	26 Settembre 139	07,2	07
24 Marzo -145	06	285	22 Marzo 140	13,2	13
27 Giugno -431	06	571	25 Giugno 140	02,3	02

ancora, di palesi errori da parte di Tolomeo, Newton ne mette in discussione il valore scientifico *tout court*.⁴⁷ Dopo aver sottolineato l'influenza che l'*Almagesto* ha avuto sugli sviluppi successivi dell'astronomia, Newton conclude in modo lapidario:⁴⁸

La *Syntaxis*⁴⁹ ha fatto più danni all'astronomia di qualunque altro lavoro mai scritto, e sarebbe meglio per l'astronomia se non fosse mai esistito. Tolomeo non è dunque il più grande astronomo dell'antichità, ma qualcosa di molto più inusuale: il truffatore di maggior successo nella storia della scienza.

Le tesi di Newton sono state accolte favorevolmente da alcuni, con scetticismo da molti. Indubbiamente la *vis polemica* che caratterizza il suo lavoro non ne ha favorito la diffusione: pur non esprimendosi sul movente, Newton non ha dubbi nel considerare l'opera di Tolomeo una frode sotto tutti i punti di vista.

Un caso simile ma comunemente riconosciuto riguarda la misura della distanza media della Luna.⁵⁰ Come sottolineato da Toomer, il valore ottenuto da Tolomeo di circa 60 raggi terrestri è abbastanza accurato, ma è il risultato di una serie di errori che si cancellano miracolosamente. Da ciò Toomer deduce che probabilmente questa misura risale ad Ipparco, che secondo Plutarco fu il primo ad osservare che la parallasse lunare è misurabile⁵¹ e che aveva scritto, come Aristarco, un'opera intitolata *Sulle dimensioni e distanze del Sole e della Luna*.

Un altro esempio acclarato di appropriazione indebita da parte di Tolomeo è il catalogo stellare incluso nella parte centrale dell'*Almagesto*. Grasshoff (1990) ha dimostrato che le coordinate stellari fornite da Tolomeo sono il risultato di un semplice calcolo basato su un precedente catalogo redatto da Ipparco tre secoli prima: in sostanza Tolomeo si è limitato ad aggiungere alle coordinate di Ipparco un valore fisso di 2°40' in longitudine per tenere conto della precessione degli equinozi, dichiarando tuttavia di aver compiuto le osservazioni personalmente. In

⁴⁷Newton 1977, pp. 356-369.

⁴⁸Newton 1977, p. 379.

⁴⁹Newton, per ovvi motivi, si rifiuta di chiamare l'*Almagesto* con questo nome.

⁵⁰Si veda G. J. Toomer 1984, pp. 251-252. Tolomeo afferma tra le altre cose di aver trovato per via osservativa che il diametro apparente della Luna coincide con quello del Sole quando la Luna si trova all'apogeo, contrariamente «ai modelli dei suoi predecessori» (verosimilmente Ipparco) secondo i quali tale uguaglianza si verificava alla distanza media. Come osserva Toomer alla nota 53, l'osservazione di Tolomeo è palesemente contraddetta dall'esistenza delle eclissi anulari.

⁵¹Plutarco, *De facie*, 921D

questo modo Tolomeo "conferma" il valore di 1° /secolo della costante di precessione, da lui stesso (sotto)stimato.

Secondo Grasshoff il rapporto tra teoria e osservazione in Tolomeo è qualificabile come *Razionalismo Olistico* e rappresenta una precisa scelta metodologica dettata dalla mancanza di strumenti appropriati per l'analisi delle incertezze sperimentali.⁵² Data una certa previsione teorica e un set di misure sperimentali tutte diverse tra loro, come stabilire se la teoria in esame è confermata o smentita? Chiaramente i metodi statistici standard permettono di stimare l'affidabilità di un insieme di misure a partire dalle misure stesse. Secondo Grasshoff Tolomeo avrebbe operato una selezione arbitraria dei dati sperimentali, accettando come valide solo quelle osservazioni che combaciavano con le previsioni della sua teoria; in altri termini, Tolomeo ha usato la teoria che dichiara di voler convalidare attraverso le osservazioni come criterio di validazione delle osservazioni stesse. Il carattere *olistico* è dato dal fatto che in ultima analisi è l'accordo generale tra le varie parti della teoria, tutte interconnesse l'una all'altra, a garantirne la validità.⁵³ Per contrasto, l'approccio di Ipparco allo stesso problema così come emerge dalle testimonianze di Tolomeo è chiamato da Grasshoff *Empirismo Radicale*, in quanto pone l'accento sulle incertezze delle misure limitandosi a porre dei limiti inferiori o superiori laddove non sia possibile determinare con certezza il valore di un certo parametro. È questo il caso della costante di precessione, che per Ipparco ha un valore solamente *non inferiore* a 1° /secolo.⁵⁴

From this we find that 1° rearward motion takes place in approximately 100 years, as Hipparchus too seems to have suspected, according to the following quotation from his work "On the length of the year": «For if the solstices and equinoxes were moving, from that cause, *not less* than $1/100$ th of a degree in advance [i.e. in the reverse order] of the signs, in the 300 years they should have moved *not less* than 3° .»

Lo stesso empirismo è alla base della "confusione" che Tolomeo ascrive ad Ipparco a proposito della lunghezza dell'anno tropicale.⁵⁵ Ipparco aveva sospettato sulla base delle proprie misure che l'anno tropicale non avesse una lunghezza costante, ma alla luce delle incertezze sperimentali ammette di non poter giungere a tale conclusione:⁵⁶

For, in his treatise "On the displacement of the solstitial and equinoctial points", he first sets out those summer and winter solstices which he considers to have been observed accurately, in succession, and himself admits that these do not display enough discrepancies to allow one to use them to assert the existence of any irregularity in the length of the year. He comments on them as follows: «Now from the above observations it is clear that the differences in the year length are very small indeed. However, in the

⁵²Per maggiori dettagli si veda Grasshoff 1990, pp. 198-216.

⁵³Vedremo più avanti che anche nella *Geografia* Tolomeo manifesta un approccio che potremmo definire olistico, in cui la visione d'insieme sul mondo conosciuto è più importante dei dettagli sulle singole parti.

⁵⁴G. J. Toomer 1984, p. 328.

⁵⁵G. J. Toomer 1984, p. 131.

⁵⁶G. J. Toomer 1984, p. 133.

case of the solstices, I have to admit that both I and Archimedes may have committed errors of up to a quarter of a day in our observations and calculations [of the time]. 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 one side to the other». ⁵⁷

Tolomeo attribuisce queste variazioni a errori di osservazione e dichiara di aver confermato la costanza della lunghezza dell'anno tropicale lui stesso, sulla base delle proprie misure. ⁵⁸ Si è già visto come abbia poi "verificato" il valore di tale lunghezza. ⁵⁹

Senza dubbio il problema evidenziato da Grasshoff di come valutare l'accordo tra teoria e osservazione alla luce delle incertezze sperimentali è molto serio. Ma se la sua interpretazione giustifica in qualche modo la *selezione* dei dati, resta ugualmente sospetta la *fabbricazione* di misure mai effettuate. Rispetto a questo problema, molte delle argomentazioni addotte da Newton appaiono in effetti difficilmente contestabili. In particolare, resta forte lungo tutto l'*Almagesto* l'impressione che Tolomeo sia in un certo senso *partito dalla fine*, ovvero che abbia costruito a tavolino dei modelli geometrici conformi ad alcuni principi filosofici generali, utilizzando dei parametri *quasi* corretti e *limando* poi le osservazioni per confermare la teoria risultante. Un approccio del genere, dettato secondo Grasshoff da una necessità metodologica, appare piuttosto come una deliberata scelta teorica peraltro coerente sul piano filosofico con la concezione tolemaica del rapporto tra struttura matematica della realtà e percezioni sensibili: i passi riportati precedentemente mostrano come per Tolomeo *l'esistenza* di una struttura matematica costituita da moti circolari uniformi sottostante le apparenze fosse più certa di qualunque dato sperimentale. D'altra parte se è vero che la precisione degli strumenti dell'epoca era più che sufficiente per mostrare le lacune della teoria tolemaica, è altrettanto vero che si trattava di risultati notevolissimi dopo tre secoli di interruzione dell'attività scientifica. Verosimilmente al tempo di Ipparco simili discrepanze tra teoria e osservazioni sarebbero state inaccettabili dalla comunità dei matematici, ma all'epoca di Tolomeo il rigore della scienza ellenistica era un lontano ricordo.

⁵⁷Per quanto inessenziale ai fini della presente discussione, sottolineiamo che i sospetti di Ipparco erano ben fondati: precessione degli equinozi e non uniformità del moto solare fanno effettivamente variare la lunghezza dell'anno tropicale.

⁵⁸Toomer1984, pag. 136

⁵⁹La particolare attenzione posta da Ipparco sull'accuratezza dei dati sperimentali è confermata da numerose fonti, e non possiamo fare a meno di notare quanto un approccio del genere sia molto più vicino a quello della scienza moderna. Ciononostante, Grasshoff sostiene che fu proprio l'eccessivo empirismo a impedire a Ipparco di sviluppare una teoria planetaria, mentre l'approccio capovolto di Tolomeo avrebbe permesso a quest'ultimo di compiere un passo fondamentale nella storia dell'astronomia.

2.5 La Fonte di Tolomeo

Se si adotta l'ipotesi che l'*Almagesto* sia stato composto "partendo dalla fine", almeno per quanto riguarda le caratteristiche generali della teoria, si pone il problema di determinare quale sia la fonte a cui ha attinto Tolomeo nella stesura del suo trattato.⁶⁰ Nel caso del Sole e della Luna è lo stesso Tolomeo a indicarci la risposta richiamandosi esplicitamente alle teorie di Ipparco. Sempre Ipparco, come si è visto, è la fonte di Tolomeo per quanto riguarda la teoria della precessione e il catalogo stellare. È possibile che anche per la teoria planetaria Tolomeo abbia attinto al lavoro di Ipparco?

In prima battuta la risposta sembrerebbe negativa, in quanto Tolomeo stesso dichiara che *nessuno* prima di lui era riuscito a descrivere i complicati moti planetari utilizzando solo moti circolari uniformi. Dopo aver elencato le difficoltà connesse alla formulazione di una teoria planetaria di questo tipo, Tolomeo fa riferimento esplicitamente ad Ipparco:⁶¹

Hence it was, I think, that Hipparchus, being a great lover of truth, for all the above reasons, and especially because he did not yet have in his possession such a groundwork of resources in the form of accurate observations from earlier times as he himself has provided to us, although he investigated the theories of the Sun and Moon, and, to the best of his ability, demonstrated with every means at his command that they are represented by uniform circular motions, did not even make a beginning in establishing theories for the five planets, *not at least in his writings which have come down to us.*

Le difficoltà sottolineate da Tolomeo sono reali, ed è verosimile che se Ipparco riuscì a formulare una teoria planetaria quantitativa ciò sia avvenuto nel periodo della maturità, cioè quando svolse la sua attività astronomica a Rodi.⁶² Tolomeo lavorò con ogni probabilità ad Alessandria, che come si è visto cadde sotto il controllo dei Romani ben prima di Rodi. In particolare si è detto come cambiò la gestione della Biblioteca, che senza dubbio rappresentava la fonte principale a cui Tolomeo attinse nella stesura delle sue opere: possiamo essere certi che dopo le persecuzioni del biennio 145-144 a.C. si interruppe anche il lavoro di raccolta dei testi cominciato due secoli prima da Zenodoto. Come si è già accennato, data la sua importanza strategica per i Romani Rodi mantenne buoni rapporti con la capitale per circa un altro secolo, per essere infine saccheggiata anch'essa nel 43 a.C.. Non si può dunque escludere che gli ultimi scritti di Ipparco, di cui abbiamo trovato tracce in autori pretolemaici di lingua latina, non siano mai giunti ad Alessandria, tramandandosi almeno per qualche tempo meglio nel mondo latino che in quello greco. L'avvertenza di Tolomeo circa la possibilità che taluni scritti

⁶⁰Chiaramente si potrebbe trattare anche di più fonti. Con quest'avvertenza, nel seguito per comodità continueremo a usare il singolare.

⁶¹G. J. Toomer 1984, p. 421.

⁶²L'ultima osservazione compiuta da Ipparco (a Rodi) riportata nell'*Almagesto* è datata 126 a.C.. Una lista di tutte le osservazioni di Ipparco menzionate da Tolomeo nell'*Almagesto* è in Neugebauer 1975, p. 276. Notiamo inoltre che gli unici studiosi interessati all'astronomia di cui abbiamo notizia dopo Ipparco sono Gemino e Posidonio, entrambi attivi a Rodi nel I sec. a.C.. Tale circostanza suggerisce che dopo l'annessione romana dell'Egitto proprio Rodi sia diventata il centro principale degli studi astronomici.

non siano giunti fino a lui potrebbe dunque essere stata dettata da qualcosa di più di una semplice cautela formale.⁶³ Questa idea sembra confermata dal fatto che in *Alm.* III.1 Tolomeo cita testualmente un estratto da una *Lista dei propri scritti* redatta dallo stesso Ipparco, che oltre ai titoli delle opere ne conteneva anche una breve descrizione.⁶⁴ Se Tolomeo avesse considerato tale lista esaustiva, per sostenere il proprio primato sarebbe stato sufficiente appellarsi ad essa; la sua osservazione fa pensare, al contrario, che lo stesso Tolomeo ne sospettasse l'incompletezza.

Tale circostanza è suggerita anche dal fatto che Ipparco conosceva la diottra, strumento di osservazione ignoto a Tolomeo ma descritto da Erone, suo contemporaneo: deduciamo dunque che quest'ultimo aveva accesso ad opere di Ipparco ignote a Tolomeo.

Tolomeo continua descrivendo i risultati raggiunti da Ipparco e dai suoi contemporanei:

All that he did was to make a compilation of the planetary observations arranged in a more useful way, and to show by means of these that [1] the phenomena were not in agreement with the hypotheses of the astronomers of that time. For, we may presume, he thought that one must not only show [2] that each planet has a twofold anomaly, or that [3] each planet has retrograde arcs which are not constant, and [4] are of such and such sizes (whereas the other astronomers had constructed their geometrical proofs on the basis of a single unvarying anomaly and retrograde arc); nor [that it was sufficient to show] that [5] these anomalies can in fact be represented either by means of eccentric circles or by circles concentric with the ecliptic, and carrying epicycles, or even by combining both, [6] the ecliptic anomaly being of such and such a size, and the synodic anomaly of such and such (for these representations have been employed by almost all those who tried to exhibit the uniform circular motion by means of the so-called "Aeon-tables", but their attempts were faulty and at the same time lacked proofs: some of them did not achieve their object at all, the others only to a limited extent); but, [we may presume], he reckoned that one who has reached such a pitch of accuracy and love of truth throughout the mathematical sciences will not be content to stop at the above point, like the others who did not care [about the imperfections]; rather, that anyone who was to convince himself and his future audience must demonstrate the size and the period of each of the two anomalies by means of well-attested phenomena which everyone agrees on, must then combine both anomalies, and discover the position

⁶³La tesi secondo cui Tolomeo non era a conoscenza di tutte le opere di Ipparco è sostenuta in Russo 1994, da cui sono tratti gli argomenti di questa sezione.

⁶⁴Il passo è il seguente (G. J. Toomer 1984, p. 139):

And when he more or less sums up his opinions in his "list of his own writings", he says: «I have also composed a work on the length of the year in one book, in which I show that the solar year (by which I mean the time in which the sun goes from a solstice back to the same solstice, or from an equinox back to the same equinox) contains 365 days, plus a fraction which is less than 1/4 by about 1/300th of the sum of one day and night, and not, as the mathematicians suppose, exactly 1/4-day beyond the above-mentioned number [365] of days.»

and order of the circles by which they are brought about, and the type of their motion; and finally must make practically all the phenomena fit the particular character of the arrangement of circles in his hypothesis.⁶⁵ And this, I suspect, appeared difficult even to him.

Tolomeo in questo passo sembra contraddire quanto ha dichiarato poco sopra: da quanto riporta è evidente che almeno a livello qualitativo erano stati individuati gli elementi essenziali per costruire una teoria planetaria non molto dissimile da quella dell'*Almagesto*. In particolare, Tolomeo ascrive ad Ipparco alcuni risultati di enorme importanza:

1. Organizzazione dei dati sperimentali, un'essenziale operazione di *riduzione* indispensabile per poter formulare qualunque teoria astronomica.⁶⁶ Tale operazione non avrebbe senso se non fosse legata al tentativo di dare alla teoria una forma quantitativa.
2. Dimostrazione che le teorie precedenti erano in errore, grazie alla riorganizzazione dei dati di cui sopra.
3. Dimostrazione che i pianeti hanno una doppia anomalia, con annesso il calcolo della lunghezza variabile degli archi retrogradi.
4. Calcolo dell'anomalia zodiacale e dell'anomalia eliaca, ovvero dei parametri fondamentali per la descrizione geocentrica dei moti planetari.

Sulla base di questi risultati, ci sembra di poter dire che Ipparco aveva ben più che *iniziato* a costruire una teoria planetaria; azzarderemmo anzi a dire che si era messo su un'ottima strada. In ogni caso è quantomeno curioso che Tolomeo nell'introduzione della parte più originale della sua teoria astronomica si dilunghi così tanto sui risultati (non) raggiunti da un suo predecessore attivo tre secoli prima di lui. Ci sembra più coerente dedurre dalla digressione di Tolomeo che ci fosse almeno il *sospetto* che una tale teoria planetaria esistesse, e che su questo punto Tolomeo stia prendendo posizione affermando il proprio primato.

Si è visto d'altra parte che le testimonianze pretolomaiche suggeriscono l'esistenza al tempo di Ipparco di una teoria planetaria eliocentrica. Ciò sembrerebbe a prima vista contraddire l'ipotesi che sia proprio Ipparco la fonte di Tolomeo. Tuttavia la teoria astronomica esposta nell'*Almagesto* contiene diversi elementi che in una prospettiva geocentrica appaiono del tutto arbitrari o casuali, ma che diventano naturali laddove si adotti un modello eliocentrico.⁶⁷

⁶⁵In *make practically all the phenomena fit the particular character of the arrangement of circles in his hypothesis* riecheggia l'approccio capovolto tra ipotesi e fenomeni di cui abbiamo parlato precedentemente.

⁶⁶Secondo Toomer, questa riorganizzazione consisteva verosimilmente nell'esprimere le date delle osservazioni babilonesi secondo il calendario egiziano, particolarmente utile in astronomia in quanto cont un numero invariabile di giorni che permetteva di stimare facilmente gli intervalli temporali tra le diverse osservazioni. Per una simile operazione di riduzione svolta da Ipparco nel caso delle osservazioni di eclissi lunari, si veda Neugebauer 1975, pp. 320-321.

⁶⁷Rawlins (1987) ha mostrato come alcune incongruenze della teoria tolemaica, in particolare relativamente all'orbita di Marte, risultino comprensibili solo se riferite ad un originario modello eliocentrico.

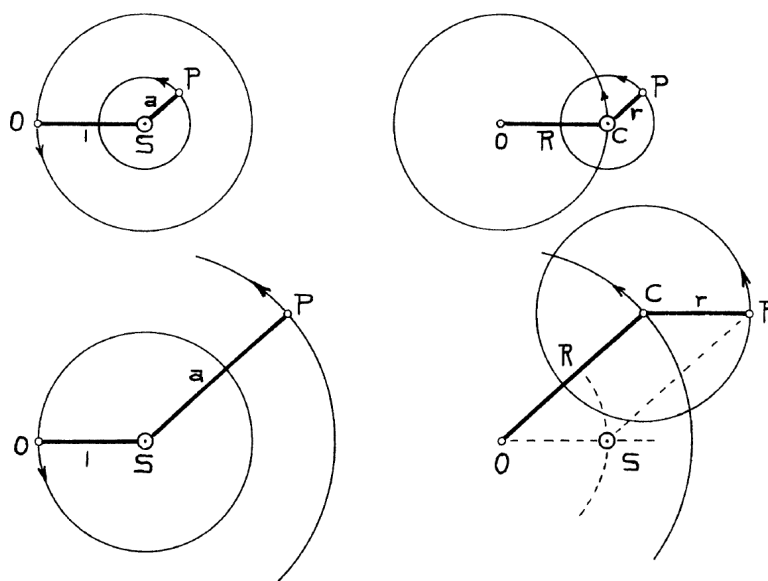


Figura 2.1: Conversione da un modello eliocentrico ad uno geocentrico. Immagine tratta da Neugebauer 1975, p. 1246.

Notiamo innanzitutto che passare da un modello planetario eliocentrico ad uno geocentrico è un'operazione elementare, che consiste in un semplice cambio di riferimento (vedi Fig. 2.1): il risultato che si ottiene sia per i pianeti interni che per quelli esterni è una configurazione ad epicicli. Nel caso dei pianeti interni l'interpretazione del risultato è immediata: l'orbita della Terra intorno al Sole diventa quella del Sole intorno alla Terra, rappresentata dal deferente, e l'orbita eliocentrica del pianeta interno si identifica con l'epiciclo. Nel caso dei pianeti esterni l'interpretazione è meno immediata, ma comunque elementare e si ottiene dal caso precedente semplicemente scambiando i ruoli di epiciclo e deferente: il deferente ora rappresenta l'orbita eliocentrica del pianeta esterno, mentre l'epiciclo coincide con l'orbita eliocentrica della Terra.

Dall'interpretazione eliocentrica dei vari elementi di un modello ad epicicli si evince che i rapporti tra i raggi di epiciclo e deferente di un dato pianeta traducono i rapporti tra le distanze dal Sole della Terra e del pianeta considerato. Chiaramente man mano che si considerano pianeti più esterni, da Marte a Saturno, il deferente dovrebbe aumentare di dimensioni mentre l'epiciclo dovrebbe restare costante. Nel modello di Tolomeo si ha invece una situazione diversa: il deferente è mantenuto costante e posto uguale a 60 parti per tutti i pianeti, fungendo da norma rispetto a cui sono espresse tutte le distanze, mentre il raggio degli epicicli dei pianeti esterni diminuisce all'aumentare della distanza da Sole: ciò è ovviamente lecito laddove si mantengono costanti i rapporti. Tenuto conto di ciò, dai parametri tolemaici è possibile calcolare le distanze eliocentriche dei vari pianeti. Se indichiamo con a il semiasse maggiore dell'orbita ellittica eliocentrica dei vari pianeti, misurati in Unità Astronomiche in modo tale che $a = 1$ sia la distanza media Terra-Sole, se r e R sono raggi dell'epiciclo e del deferente dei un

Tabella 2.3: Distanze eliocentriche dei pianeti nella teoria moderna e ricavati dai parametri dell'*Almagesto* (Neugebauer 1975, p. 146).

-	Moderna		<i>Alm.</i>
Pianeta	a	r	r
Mercurio	0.3871	23°14'	22°30'
Venere	0.7233	43°24'	43°10'
Marte	1.5237	39°22'	39°30'
Giove	5.2028	11°32'	11°30'
Saturno	9.5388	6°17'	6°30'

dato pianeta, si ha che $a = r/R$ per i pianeti interni e $a = R/r$ per quelli esterni. Utilizzando la norma $R = 60$ otteniamo le formule $a = r/60$ per i pianeti interni e $a = 60/r$ per quelli esterni. I risultati che si ottengono sono mostrati in Tabella 2.3. Come si vede, la teoria di Tolomeo rappresenta in maniera accurata l'ordine di grandezza del sistema solare.

In *Alm.* IX.3 Tolomeo utilizza delle relazioni tra numeri interi che legano i tempi di ritorno in longitudine e in anomalia dei vari pianeti con quelli del Sole per calcolare i moti medi dei pianeti. Se N è un numero intero di anni tropicali, R un numero intero di ritorni in longitudine e A un numero intero di ritorni in anomalia, per i pianeti interni si ha $N = R$, per quelli esterni $N = R + A$. Tali relazioni erano di origine babilonese e sono riportate per specifici valori dei parametri N , R e A nei cosiddetti *Goal-Year Text* babilonesi.⁶⁸ Queste relazioni tra periodi sono in realtà la realizzazioni particolari di relazioni geometriche di parallelismo che Tolomeo utilizza sistematicamente nella costruzione delle sue teorie planetarie. Nel caso dei pianeti interni, tali relazioni sono conseguenza del fatto che la longitudine media del pianeta (ovvero la direzione in cui è visto il centro dell'epiciclo) coincide con la longitudine del Sole Medio.⁶⁹ Nel caso dei pianeti esterni, la condizione è che il raggio dell'epiciclo sia sempre parallelo alla direzione Terra-Sole Medio. Tali vincoli di parallelismo si ottengono naturalmente nella conversione da modello eliocentrico a modello geocentrico (vedi Fig. 2.1), mentre in un modello puramente geocentrico andrebbero dimostrate attraverso delle osservazioni. Tuttavia Tolomeo le assume sin dal principio, attribuendole ad Ipparco; il fatto che questi avesse verosimilmente elaborato una teoria eliocentrica avvalorava l'idea che tali relazioni derivino in effetti da un modello eliocentrico convertito.

Ovviamente se si assume che la teoria tolemaica sia stata costruita a partire da osservazioni genuine, questi elementi non sono altro che indicazioni della bontà del modello; se si immagina invece, come abbiamo motivo di fare, che Tolomeo abbia tratto le caratteristiche generali dei suoi modelli da una fonte precedente, gli stessi elementi suggeriscono che la teoria esposta dalla fonte di Tolomeo avesse un carattere eliocentrico di cui sono sopravvissute delle *tracce* nei modelli tolemaici. In tal caso Ipparco risulterebbe riabilitato come candidato, ma si dovrebbe al

⁶⁸Per uno studio dettagliato dei *Goal Year Text* si veda Gray 2009.

⁶⁹Il Sole Medio è un corpo fittizio che segue il moto che il Sole avrebbe se mi muovesse uniformemente alla sua velocità media.

contempo ipotizzare che Tolomeo abbia in qualche modo frainteso la sua fonte interpretando in chiave geocentrica una teoria eliocentrica. È possibile che sia avvenuto qualcosa del genere? Sarebbe forse difficile da credere, se non avessimo un eclatante precedente di questo tipo nell'ambito della geografia matematica.

Un Errore di Tolomeo⁷⁰

Mentre la geografia intesa come descrizione empirica della Terra è una disciplina antica forse quanto l'uomo stesso, la geografia matematica come teoria scientifica nacque nel periodo ellenistico con l'utilizzo sistematico di appositi strumenti di rilevamento e di sistemi di coordinate atti a individuare univocamente qualunque punto della superficie della Terra, rappresentata matematicamente come una sfera. Internamente al modello matematico era possibile calcolare, ad esempio, la durata delle ore di luce e di buio per ogni latitudine e giorno dell'anno, spiegare così i diversi climi e, soprattutto, disegnare delle carte che conservassero le informazioni relative alle coordinate dei vari luoghi.

Come si può facilmente intuire, astronomia e geografia sono discipline strettamente connesse l'una all'altra: l'inclinazione dell'eclittica rispetto all'equatore terrestre, ad esempio, è un parametro fondamentale nella definizione delle zone climatiche, i cui confini ancora oggi sono individuati da paralleli definiti su base astronomica. Altri esempi importanti di interazione tra le due discipline sono i metodi di misura della latitudine e della longitudine: la prima si può ricavare dall'osservazione dell'elevazione del polo celeste sull'orizzonte, la seconda dalle differenze tra i tempi locali di osservazione di una medesima eclissi lunare.⁷¹ Analogamente, molte osservazioni astronomiche dipendono dal luogo di osservazione sulla superficie terrestre, argomento a cui peraltro era dedicato, come si è detto, il Libro II dell'*Almagesto*.

Una figura di primo piano nello sviluppo della geografia matematica ellenistica fu il già menzionato Eratostene di Cirene, a cui si deve la creazione dello stesso termine *geografia*. Il risultato più importante per cui è ricordato Eratostene è senza dubbio la celebre misura del raggio terrestre, basata sulla particolare configurazione Terra-Sole al momento del solstizio d'estate. Non ci è pervenuta l'opera in cui Eratostene descriveva la sua misura, ma la maggioranza delle fonti concorda nel riferire un risultato di 252.000 stadi, corrispondente a una lunghezza del grado di meridiano di 700 stadi.⁷²

Un illustre successore di Eratostene fu Ipparco, a cui è attribuita la paternità del già menzionato metodo di misura delle longitudini basato sulle eclissi di Luna.

Astronomia e geografia ebbero anche destini simili: entrambe le discipline videro in Ipparco l'ultimo esponente di rilievo, per entrare poi in un lungo periodo

⁷⁰Il contenuto di questa sezione è tratto da Russo 2013, cui si rimanda per maggiori dettagli.

⁷¹Poiché tutti i meridiani sono equivalenti, l'unica grandezza fisica realmente misurabile è la differenza di longitudine tra due luoghi; lo zero si può fissare arbitrariamente, e in epoca ellenistica era uso porlo in corrispondenza di Alessandria o di Rodi.

⁷²Molto si è dibattuto sul valore da attribuire allo stadio di Eratostene. La maggior parte degli studiosi concorda sul valore di 157.5 m, a cui corrisponde una circonferenza terrestre di circa 39.700 km. Se questa stima è corretta, la misura di Eratostene aveva un'errore inferiore all'1%, coerentemente con l'interpretazione di Russo secondo cui la misura fu effettuata grazie a una campagna di rilevamenti commissionata dai Tolomei.



Figura 2.2: L'Italia disegnata in base ai dati di Tolomeo. Figura tratta da Russo 2013, p. 139.

di crisi in cui la geografia tornò ad essere una disciplina essenzialmente empirico-descrittiva. Questa situazione durò fino al II sec. d.C., quando nella *Geographia* Tolomeo recuperò parzialmente i metodi della geografia matematica ellenistica.

Nell'opera di Tolomeo sono fornite le coordinate di 6345 luoghi e le distanze espresse in stadi tra varie località poste sullo stesso parallelo. Queste ultime provenivano verosimilmente dall'opera di Eratostene, che ancora non conosceva il metodo delle eclissi di Ipparco per la misura delle differenze di longitudine. Non tutti i luoghi riportati da Tolomeo sono identificabili, ma dove è possibile verificare l'accuratezza delle coordinate si trova che mentre le latitudini non presentano particolari errori sistematici, le longitudini sono tutte dilatate di un fattore pari a circa 1,428: l'effetto è molto evidente su carte geografiche disegnate a partire dai dati di Tolomeo, che appaiono "stirate" in direzione est-ovest (Fig. 2.2).

Tolomeo inoltre vuole esprimere le differenze di longitudine in gradi. Partendo dalle distanze in stadi di Eratostene, per effettuare la conversione usa un valore del grado di meridiano pari a 500 stadi, una misura che prima di lui era stata adottata anche da Posidonio, nel I sec. a.C., e da Marino di Tiro, autore attivo all'inizio del II sec. d.C. contro cui Tolomeo polemizza più volte nella sua *Geographia*. La conseguenza netta è un rimpicciolimento della Terra, la cui circonferenza passa dai 252.000 stadi di Eratostene ai 180.000 di Posidonio, Marino e Tolomeo.

La circostanza che $700/500 = 1,4 \simeq 1,428$ fa sì che, assumendo lo stesso valore per gli stadi di Eratostene e Tolomeo, qualunque esso sia, la dilatazione delle longitudini e la contrazione del grado di meridiano si compensano mantenendo invariati i valori delle distanze lungo i paralleli fornite da Eratostene: è evidente dunque che si tratta di due manifestazioni diverse di uno stesso errore.

Tolomeo si propone di misurare l'estensione in longitudine dell'ecumene, cioè la parte della Terra abitata e abitabile, che per Tolomeo era delimitata a ovest dalle cosiddette Isole Fortunate e a est da alcune località cinesi non facilmente

identificabili. L'origine dell'errore di Tolomeo sta nell'aver identificato le Isole Fortunate con l'arcipelago delle Canarie, a sud-ovest della penisola iberica.⁷³ Tuttavia, a prescindere dalle enormi conseguenze di questo errore, la parte che più ci interessa viene poco dopo, quando Tolomeo si propone di calcolare la differenza di longitudine tra il meridiano delle Isole Fortunate e quello della capitale della Cina, correggendo la stima effettuata precedentemente da Marino di Tiro. Il procedimento seguito da Tolomeo è il seguente:

1. L'itinerario complessivo, dalle Canarie alla Cina, è suddiviso in dodici tratti;
2. Per ciascuno dei tratti è riportata prima la lunghezza in stadi data da Marino e poi è introdotta una correzione, anche grande, motivata in maniera grossolana (ad esempio dimezzando il valore dato da Marino alla luce della non linearità del percorso);
3. Le distanze sono convertite in gradi di longitudine usando la conversione di 500 stadi $\rightarrow$ 1°;
4. Si sommano i dodici valori così ottenuti.

Così facendo, Tolomeo ottiene un'ampiezza di 177°15', che sommati ai 2°45' che separano la capitale della Cina dalle località più orientali danno esattamente 180°.

Il procedimento descritto lascia pochi dubbi sul fatto che, anche qui, Tolomeo sia *partito dalla fine*, manipolando i dati per ottenere un'estensione dell'ecumene pari proprio a 180°. Restano aperte due domande: da dove viene il valore di 180°? E perché Tolomeo vi crede così fermamente?

La risposta a entrambe le domande ci viene data dallo stesso Tolomeo al principio dell'opera, dove sono dichiarati i fini della materia trattata:

La geografia [...] differisce dalla corografia in quanto la corografia, come disciplina, si occupa delle singole località ciascuna di per sé indipendentemente dalle altre, registrando praticamente tutto fino ai dettagli (per esempio porti, paesi, distretti, rami dei fiumi, e così via), mentre l'essenza della geografia è mostrare il mondo conosciuto come entità singola e continua. [...] Il fine della corografia è rivolgersi a qualche parte, come quando si rappresenta un orecchio o un occhio. Ma [lo scopo] della geografia è una visione generale, come quando si rappresenta una testa intera. In tutte le immagini proposte occorre necessariamente *disporre per prima cosa le parti principali in modo opportuno* [...].

In questo passo possiamo rinvenire chiaramente l'approccio che nell'ambito dell'astronomia Grasshoff ha definito *olistico*. Poco più avanti Tolomeo chiarisce che nella stesura di carte bisogna ricorrere tanto a misure sia terrestri che astronomiche, sostenendo poi la superiorità di queste ultime:

Il rilevamento mostra le posizioni reciproche dei luoghi attraverso la semplice misura delle distanze, il metodo astronomico mediante strumenti per osservare gli astri e misurare le ombre; il secondo è autosufficiente e più sicuro, il primo è più grossolano e ha bisogno dell'altro.

⁷³In questa identificazione Tolomeo segue autori a lui precedenti, tra cui Plinio il Vecchio.

Nell'*Almagesto* Tolomeo dice che l'ecumene si estende in longitudine su metà del globo terrestre poiché alle due estremità la stessa eclissi è osservata a dodici ore di distanza.⁷⁴ La fiducia che Tolomeo riponeva nel metodo astronomico è dunque alla base della sua convinzione della bontà del valore adottato.

Alla luce della superiorità del metodo astronomico, poco più avanti Tolomeo chiarisce cosa intende per *disporre per prima cosa le parti principali in modo opportuno*:

Bisogna usare prima le osservazioni astronomiche e poi i resoconti di viaggi. [...] Poiché il solo Ipparco ci ha trasmesso per poche città, rispetto alle tante da catalogare nelle opere di geografia, l'elevazione del polo boreale [ossia la latitudine], notando quelle che si trovano sullo stesso parallelo, [...] gran parte delle distanze e soprattutto quelle da oriente a occidente ci sono state trasmesse in modo più grossolano, non per negligenza di coloro che si erano dedicati alle ricerche, ma forse perché non avevano ancora capito l'utilità di indagini più scientifiche e perché non avevano osservato più eclissi lunari allo stesso tempo in luoghi diversi [...]. È perciò ragionevole per chi intenda praticare la geografia seguendo [i principi fin qui esposti] usare prima in cartografia, come fondamentali, i dati ottenuti attraverso le osservazioni più accurate, e poi adattare a questi i dati di altro tipo, finché le posizioni relative tra loro e con i dati principali non siano nel migliore accordo possibile con i resoconti più attendibili.

Il procedimento seguito da Tolomeo è dunque chiaro. Mentre le latitudini erano note con sufficiente accuratezza, non valeva lo stesso per le longitudini, che necessitavano dunque di un'elaborazione. Tale elaborazione doveva partire dal dimensionare «l'intera testa» (cioè l'estensione dell'ecumene) utilizzando dati certi (cioè astronomici), usando in un secondo momento misure terrestri per determinare le distanze intermedie. Così facendo, la sovrastima dell'estensione angolare dell'ecumene si è propagata sulle distanze tra le località intermedie, che sono state determinate dividendo i 180° a disposizione in maniera proporzionale alle distanze in stadi lungo i paralleli riportate da Eratostene, dilatando il tutto del medesimo fattore. Dalla dilatazione in longitudine segue infine la sottostima del grado di meridiano, probabilmente arrotondato a 500 stadi, e la relativa contrazione della circonferenza terrestre.

Come Russo dimostra correggendo l'errore di Tolomeo, le Isole Fortunate da questi identificate con le Canarie erano in realtà le Piccole Antille, arcipelago a nord della costa del Venezuela: erano queste le isole che Ipparco considerava l'estremità occidentale dell'ecumene, da cui il valore di 180° adottato erroneamente da Tolomeo, che ovviamente non aveva idea esistessero isole abitate al di là dell'Atlantico.⁷⁵

Abbiamo dunque un esempio in cui Tolomeo, fraintendendo una fonte ellenistica, verosimilmente proprio Ipparco, ha avviato una reazione a catena di errori

⁷⁴G. J. Toomer 1984, p. 75. Come osserva Russo, data la difficoltà di un'osservazione del genere è probabile che questa misura sia stata ottenuta sommando più differenza di longitudine misurate con il metodo di Ipparco.

⁷⁵Questa conclusione ha ovviamente conseguenze molto importanti sulle idee normalmente diffuse a proposito dei contatti tra civiltà europee e americane, per le quali rimandiamo a Russo 2013.

dagli esiti sorprendenti in cui, al di là dei fraintendimenti, ritroviamo il suo approccio "capovolto", che ricopre peraltro un ruolo determinante nella propagazione dell'errore iniziale.

Tornando all'astronomia, forse ora appare meno inverosimile che Tolomeo possa aver frainteso una precedente fonte eliocentrica, traendo da questa le caratteristiche generali dei suoi modelli, reinterpretandola in chiave geocentrica e manipolando a posteriori i dati per confermare una propria teoria rispondente a specifici principi filosofici. Non troviamo credibile, tuttavia, che Tolomeo abbia coscientemente alterato la propria fonte, ribaltando un modello eliocentrico sulla base di idee personali e intestandosene poi la paternità. Così come ha adottato l'estensione dell'ecumene di Ipparco senza poter minimamente immaginare che questa nascondeva l'esistenza di luoghi abitati al di là dell'Atlantico, è similmente possibile che Tolomeo abbia concepito le caratteristiche generali del proprio modello senza sapere di star attingendo a una fonte eliocentrica. Non è detto infatti che l'eventuale eliocentrismo della fonte di Tolomeo fosse immediatamente riconoscibile. Si è già sottolineato che eliocentrismo e geocentrismo sono approcci cinematicamente equivalenti, e se ci si pone l'obiettivo di rappresentare i *phainomena*, com'era prassi della scienza ellenistica, utilizzare un riferimento geocentrico diventa inevitabile qualunque sia la natura originaria del proprio modello. In tal caso l'equivoco apparirebbe assai più naturale.

Nel prossimo capitolo cercheremo di rendere plausibile l'ipotesi che le cose siano andate esattamente come descritto. A differenza di quanto fatto sinora, la nostra ricostruzione non si baserà su fonti indirette, frammenti letterari, citazioni o allusioni ad opere perdute, ma sull'esistenza di uno strabiliante congegno meccanico ritrovato ai primi del '900 sui fondali del Mar Mediterraneo, non lontano dalle coste di una piccola isola greca chiamata Anticitera.

Capitolo 3

Tolomeo, l'Eliocentrismo e la *Sphairopoia*

Nell'estate del 1900 al largo delle coste dell'isola di Anticitera un gruppo di cacciatori di spugne in immersione si imbatté casualmente nel relitto di una grande nave. All'interno di questa e nella zona circostante il naufragio furono ritrovati una gran quantità di oggetti di varia natura: statue, gioielli, utensili, vasellame e molto altro. Grazie alla presenza tra i ritrovamenti di alcune monete è stato possibile datare il naufragio intorno al 60 a.C., mentre le grandi dimensioni della nave suggeriscono che il disastro avvenne durante un viaggio da un grande porto del Mediterraneo orientale (Pergamo, Efeso, Rodi, Kos o Delo) verso uno dei principali porti romani (Napoli, Ostia o Brindisi).

Tra gli oggetti ritrovati nel relitto vi erano i frammenti di quella che oggi è conosciuta come Macchina di Anticitera, un congegno meccanico risalente al II sec. a.C. che secondo le moderne ricostruzioni aveva la funzione di simulare il moto longitudinale di Sole, Luna e pianeti, di prevedere l'occorrenza di eclissi solari e lunari e di fornire altre informazioni di carattere calendariale. Essendo il più antico planetario mai ritrovato, la Macchina di Anticitera costituisce evidentemente un reperto inestimabile nella ricostruzione dei risultati raggiunti dalla tecnologia e dall'astronomia ellenistiche. Nonostante della macchina originaria ci siano rimasti solo pochi frammenti, le indagini ai raggi X condotte negli ultimi anni hanno permesso di ricostruire con sufficiente chiarezza gran parte della struttura interna e delle funzioni della Macchina, rispetto alle quali oggi, al netto di alcuni dettagli, vi è un generale consenso da parte degli studiosi. Determinanti in tal senso sono state le iscrizioni di contenuto astronomico riportate sulla Macchina, che incidentalmente la rendono un reperto sia testuale che tecnologico.

La struttura ad ingranaggi della Macchina di Anticitera presenta forti analogie con i modelli ad epicicli utilizzati da Tolomeo nell'*Almagesto*. D'altra parte la stessa esistenza di un congegno del genere smentisce inequivocabilmente le dichiarazioni di Tolomeo circa l'assenza di una precedente teoria planetaria, senza la quale la progettazione di una macchina di tale complessità non sarebbe possibile. Il fatto che la Macchina di Anticitera preceda l'*Almagesto* di circa tre secoli pone dunque inevitabilmente una serie di interrogativi: Tolomeo era a conoscenza dell'esistenza di oggetti di questo genere? Se sì, è lecito considerare la teoria esposta nell'*Almagesto* pienamente originale?

Prima di rispondere a questi interrogativi, che si intrecciano con quelli sollevati alla fine del capitolo precedente, è opportuno soffermarsi sul significato che un congegno come la Macchina di Anticitera doveva avere nel quadro generale dell'astronomia ellenistica. Pur non potendo stimare quanto fossero comuni oggetti di questo genere, diversi elementi suggeriscono che la Macchina non costituiva un esempio eccezionale, ma che rappresentava il culmine di una pratica che affondava le sue radici nelle origini stesse dell'astronomia matematica greca. In questo capitolo vedremo come un'analisi del rapporto tra astronomia, geometria e meccanica permetta di chiarire alcune caratteristiche dello sviluppo dell'astronomia nel periodo compreso tra il IV e il II sec. a.C.. Solo dopo aver discusso tali questioni di carattere generale, ci concentreremo sulle caratteristiche della Macchina di Anticitera e sulle analogie riscontrabili con i modelli tolemaici, provando così a rispondere agli interrogativi che avremo lasciato in sospeso.

3.1 Scienza e Tecnica

Una caratteristica fondamentale della scienza ellenistica che non abbiamo ancora discusso è lo strettissimo rapporto che questa intratteneva con le applicazioni tecnologiche. Tale legame merita di essere evidenziato, in realtà, solo alla luce della divisione che si è creata nella scienza contemporanea tra ricerca "fondamentale" e ricerca "applicata". Senza addentrarci in un'analisi delle ragioni e delle criticità di tali separatismi, ci basti notare che fino a un paio di secoli fa una divisione del genere non aveva motivo di esistere né sul piano disciplinare né su quello professionale, essendo ricerca teorica e applicazioni tecniche aspetti complementari di un discorso unitario. Più in generale, non sembra troppo azzardato sostenere che al principio lo studio della natura sia stato motivato non tanto dal desiderio dell'uomo di *conoscere* la natura quanto dalla volontà di *dominarla*, e che solo ad uno stadio già molto avanzato del suo sviluppo la scienza poté permettersi di assumere un carattere (anche) speculativo. In ogni caso la storia della scienza mostra come le applicazioni tecnologiche abbiano sempre rappresentato uno stimolo imprescindibile per la ricerca teorica, che nutrendosi delle sfide provenienti dalle necessità materiali dell'uomo si è sforzata di trovare soluzioni e concettualizzazioni nuove, le quali generalizzandosi hanno poi permesso di progredire tanto nella tecnica quanto nella scienza cosiddetta "fondamentale".¹

Risalendo alle origini della scienza ellenistica, il legame con la tecnologia assume dei tratti ancora più fondamentali, costituendo un ingrediente essenziale per la nascita stessa della scienza esatta. Come si è già accennato, la scienza ellenistica nacque dall'incontro tra la cultura greca classica e le conoscenze empiriche tramandatesi per millenni negli antichi regni egiziani e mesopotamici, civiltà presso cui la tecnologia aveva raggiunto livelli notevoli pur mancando di qualunque struttura teorica sottostante. D'altra parte andando ancora più indietro nel tempo si può dire che la tecnologia, intesa come creazione consapevole di strumenti atti

¹Gli esempi di questa virtuosa interazione reciproca tra scienza e tecnologia sono innumerevoli e coprono tutto l'arco della storia della scienza. Si veda ad es. Russo, <https://anticiteraorg.files.wordpress.com/2018/12/Scienza-e-tecnologia-1.pdf>, da cui sono tratte alcune delle riflessioni sviluppate in questo paragrafo.

a modificare il mondo circostante per finalità utili all'uomo, sia antica quanto il genere *Homo*.² Non a caso in antropologia la creazione di utensili via via più complessi è uno dei parametri essenziali per tracciare l'evoluzione biologica e culturale dell'essere umano. A ben vedere, tra la tecnologia propria degli uomini primitivi e quella che portò alla costruzione delle piramidi c'è una differenza solamente quantitativa, frutto di una lentissima accumulazione durata decine di migliaia di anni. In epoca ellenistica accadde invece qualcosa di radicalmente nuovo, un salto qualitativo identificabile nella nascita di teorie scientifiche che descrivevano in forma astratta, attraverso modelli teorici consapevolmente costruiti, vasti insiemi di fenomeni, naturali e non. Una teoria scientifica infatti non si limita a descrivere fenomeni "esterni" che l'uomo osserva passivamente, ma può modellare efficacemente anche attività tecnologiche che coinvolgono oggetti creati dall'uomo e i relativi fenomeni, che, spesso, in natura sarebbero impossibili o molto difficili da osservare. Si pensi ad esempio ai celebri specchi ustori di Archimede, che sfruttano in maniera congiunta il fenomeno della riflessione, osservabile in qualunque specchio d'acqua, e le proprietà focali dei parabolidi: se da un lato è evidente che l'idea di creare uno specchio di forma parabolica difficilmente potrebbe sorgere in mancanza di una teoria delle coniche, dall'altro si può immaginare che sia stata proprio l'idea di creare specchi che concentrassero i raggi luminosi in un solo punto a motivare lo studio di curve che godessero di opportune proprietà *focali*.³ In questo senso, il rigore delle dimostrazioni proprie della scienza ellenistica assume il suo significato più pieno proprio alla luce delle applicazioni tecnologiche che possono derivarne: d'altra parte non sarebbe di grande utilità costruire complesse catene di deduzioni logiche per arrivare ad affermazioni ovvie o verificabili direttamente, mentre il rigore delle dimostrazioni è essenziale per ottenere affermazioni attendibili su oggetti non ancora realizzati o fenomeni non ancora osservati. Una progettazione scientifica diventa inoltre imprescindibile laddove si vogliono esportare i propri risultati a contesti diversi, operazione molto più difficile con una tecnologia puramente empirica. In definitiva la *tecnologia scientifica*, caratterizzata dall'avvalersi di una progettazione effettuata all'interno delle teorie scientifiche, appare intrinsecamente legata alla stessa struttura metodologica della scienza esatta.⁴

La conferma di questo stretto rapporto è data anche dal fatto che molte delle scienze esatte ellenistiche erano direttamente legate a particolari settori produttivi e originariamente portavano il nome di *τεχνη*, traducibile come *arte*, *perizia*, legata al *costruire*. Molto spesso erano gli oggetti stessi a dare il nome alla *τεχνη* corrispondente. L'*ottica* (*η οπτική τεχνη*), letteralmente "scienza della visione" o "arte delle cose visive", permetteva la progettazione di strumenti per le osservazioni

²Allargando un po' la definizione, si può dire che forme rudimentali di tecnologia si trovano anche in altri primati. Gli scimpanzé, ad esempio, ricavano bastoncini di piccole dimensioni da rami più grandi per poterli inserire nei formicai, da cui estraggono in questo modo una gran quantità di formiche che divorano con gusto.

³Purtroppo è impossibile stabilire quale idea abbia storicamente preceduto l'altra. Siamo nel campo della speculazione, ma coerentemente con quanto sosterremo più avanti, propendiamo per la seconda ipotesi.

⁴Per una panoramica dei risultati raggiunti dalla tecnologia scientifica ellenistica si veda Russo 2010, pp. 123-168.

astronomiche e il rilevamento topografico, e da essa derivavano la *catottrica* (η κατοπτρική τεχνη), l'"arte degli specchi", e la *scenografia*, che includeva le tecniche prospettiche usate in pittura e negli scenari teatrali. La *meccanica* (η μηχανική τεχνη) era la "scienza delle macchine" ma anche l'"arte di costruire macchine", in particolare quelle usate per il sollevamento dell'acqua e di carichi solidi. L'idrostatica aveva immediate applicazioni nell'ambito dell'ingegneria navale.

Anche la matematica, che nell'immaginario moderno sarebbe il prototipo della scienza "pura", in epoca ellenistica era una scienza *del fare* in quanto manteneva uno stretto rapporto con la pratica del disegno.⁵ Il fatto che la geometria euclidea si sia limitata nelle sue costruzioni all'uso di rette e circonferenze non è dovuto infatti a una strana forma masochismo, né tantomeno a motivi estetico-filosofici, ma è il riflesso del fatto che gli *Elementi* sviluppano la teoria scientifica del disegno con riga e compasso, di cui rette e circonferenze rappresentano gli analoghi teorici. Tale impostazione è confermata in primo luogo dal carattere dei primi postulati, che affermano semplicemente la fattibilità delle operazioni elementari realizzabili con riga e compasso, e in secondo luogo dalla natura intrinsecamente costruttiva di tutte le dimostrazioni successive. Mentre nella matematica moderna le costruzioni sono spesso utilizzate per dimostrare l'*esistenza* di un certo oggetto precedentemente definito, il costruttivismo euclideo era invece legato all'effettiva eseguibilità del relativo disegno con riga e compasso, i quali diventavano così anche degli insostituibili strumenti di calcolo la cui accuratezza rimase ineguagliata fino alla prima età moderna.⁶ Vediamo dunque che anche nel caso della matematica l'influenza tra strutture teoriche e strumenti tecnici è bidirezionale: riga e compasso motivano l'adozione di rette e circonferenze, che sviluppandosi all'interno della teoria permettono a riga e compasso di arrivare ben oltre le loro destinazioni iniziali di strumenti da disegno. Inoltre, come vedremo meglio più avanti, la forma assunta dalla matematica ellenistica avrà ovvie ripercussioni su tutte le altre scienze esatte che di tale matematica assumono il linguaggio, in particolare sull'astronomia e sulla meccanica.

Questo rapporto inscindibile tra scienza (ἐπιστήμη) e tecnica (τεχνη) nel pensiero greco, di difficile traduzione in qualsiasi altra lingua che utilizzi le stesse parole con significati diversi, aveva dei riflessi importanti anche sul piano strettamente epistemologico. Una qualunque teoria scientifica era infatti validata tanto dalla capacità di *salvare i fenomeni* quanto dalla sua utilità nella progettazione di oggetti realizzabili e funzionanti. D'altra parte è evidente a prescindere dalla lingua che *riprodurre* un fenomeno, laddove possibile, sia una forma molto avanzata di *comprensione* del fenomeno stesso, e proprio su questa idea si fonda in ultima analisi il metodo sperimentale. Questo legame tra comprensione e riproduzione-attualizzazione nel pensiero greco è descritto mirabilmente da Heidegger in *Linguaggio Tramandato e Linguaggio Tecnico*:⁷

⁵Qui usiamo il termine *matematica* nella più ristretta accezione moderna.

⁶Per una discussione approfondita sui metodi di calcolo analogici e digitali, che pone anche questioni d'attualità in una prospettiva storica assai più ampia, si veda l'articolo di Russo su <https://anticiteraorg.files.wordpress.com/2018/03/alcune-osservazioni.pdf>

⁷Heidegger 1997, pp. 38-39. Ringrazio Dario Cotugno per avermi segnalato questo passo. Si veda anche la voce *Technique* in Brisson e Pradeau 1998, pp. 53-55, che chiarisce il ruolo

Τεχνη vuol dire: intendersi di qualcosa, e precisamente nella produzione di qualcosa. Ora, per avere un'autentica visione della τεχνη, pensata in modo greco, come pure per avere una comprensione adeguata della tecnica successiva e di quella moderna, tutto sta nel pensare la parola greca nel suo senso greco, e nell'evitare di interpretarla introducendovi rappresentazioni successive e attuali. Τεχνη: l'intendersi di produrre. Intendersi è una modalità del conoscere, dell'aver-capito e del sapere. Secondo l'esperienza greca, il tratto fondamentale del conoscere risiede nel dischiudersi, nel rendersi-manifesto di ciò che ci sta davanti come presente. Allo stesso modo il pro-durre, pensato in senso greco, non significa qualcosa come il fabbricare, il manipolare e l'operare, bensì quello che dice letteralmente la nostra parola tedesca *her-stellen*, "produrre": addurre [*stellen*] qui davanti, pro-[*her*-], vale a dire nella manifestazione, come un qualcosa, ciò che prima non ci stava davanti come presente. Detto in breve e in modo incisivo: τεχνη *non è un concetto del fare, bensì un concetto del sapere.*

Detto in altri termini, la *creazione* è una forma di *comprensione*. Si può dire che un tratto peculiare della scienza esatta, che la distingue rispetto ad altre scienze empiriche, sia proprio questo carattere semitautologico che le consente di formulare affermazioni *vere* più su ciò che *crea* che non su ciò che *osserva*: ed è proprio in questo amalgama di conoscenza e di creazione, di επιστημη e di τεχνη, che risiede gran parte della sua efficacia. Viene in mente, in un diverso contesto, l'identificazione vichiana tra *verum* e *factum* su cui si fonda la *Scienza Nuova*, secondo la quale l'uomo può conoscere con certezza solo il prodotto della propria stessa opera, da cui la conseguenza che la natura *in sé*, che per Vico è opera di Dio, sfugge inevitabilmente alla comprensione dell'uomo.

Un effetto collaterale importante di questo impianto epistemologico è la naturale tendenza dell'uomo a descrivere il mondo nei termini della propria tecnologia, in un curioso capovolgimento dialettico che ha assunto forme diverse a seconda delle diverse concettualizzazioni che nel tempo si sono susseguite: nel XVIII secolo era comune la metafora del Dio orologiaio, associata al meccanicismo newtoniano; nel XIX secolo gli studi di termodinamica legati alla prima rivoluzione industriale portarono al centro della scena il concetto di energia; nel XX secolo gli studi informatici hanno individuato nella teoria dell'informazione un nuovo linguaggio unificante.

Ma d'altra parte ci potremmo chiedere più in generale: cosa significa *comprendere* qualcosa? Non è facile dare una risposta, ma nell'ambito delle scienze esatte il rivolgimento della tecnica sulla natura che abbiamo descritto sembra essere un elemento essenziale di ciò che intendiamo per "comprensione". A tal proposito ci sembra molto pertinente la riflessione sul linguaggio sviluppata da Jaynes nel suo saggio sull'origine della coscienza.⁸ Jaynes osserva come il linguaggio umano si costruisca essenzialmente attraverso catene di metafore, che partendo da dati concreti ascendono via via verso concetti più astratti, ivi compresi i concetti

fondamentale della τεχνη nella comprensione del mondo secondo Platone. Ringrazio Nicolas Beaufrepère per questa segnalazione.

⁸Jaynes 1976, pp. 70-91.

scientifici. La comprensione è dunque strettamente connessa alla generazione di nuove metafore:⁹

Che cosa tentiamo realmente di fare quando cerchiamo di capire qualcosa? Come bambini che si sforzano di descrivere oggetti strani, quando cerchiamo di capire una cosa cerchiamo di trovare una metafora per quella cosa. Non una metafora qualsiasi, ma una metafora con qualcosa di più familiare e di più comprensibile alla nostra attenzione. *Comprendere una cosa significa pervenire a una metafora per quella cosa, sostituendo ad essa qualcosa di più familiare.* E la sensazione di familiarità non è che la sensazione del comprendere. [...] Diciamo di capire un aspetto della natura quando possiamo dire che esso è simile a un qualche modello che ci è familiare. [...] Una teoria è dunque una metafora fra un modello e dei dati di esperienza. E capire è, nella scienza, sentire una somiglianza fra dati complessi e un modello familiare.¹⁰

E cosa ci può essere di più familiare di ciò che noi stessi abbiamo creato? In questo senso *leggere* la natura attraverso la tecnologia che si è sviluppata sostanzialmente allo studio della natura stessa appare l'esito naturale del processo conoscitivo.

A prima vista si potrebbe pensare che l'astronomia, essendo per antonomasia la scienza di ciò che è distante e, dunque, incontrollabile, si sottragga a questa relazione dialettica tra conoscenza e tecnica. In parte è certamente così, non essendo possibile *costruire* un sistema solare nello stesso senso in cui si *costruisce* uno specchio parabolico. Eppure, come vedremo, anche gli astronomi ellenistici trassero profitto dall'ausilio della *manifestazione presente* propria della *τεχνη* cui fa riferimento Heidegger. Anzi, riteniamo che questa dimensione assunse un'importanza ancora maggiore alla luce dell'inafferabilità dell'oggetto proprio dell'astronomia, la quale divenne pienamente scienza proprio quando si staccò dalla pura *osservazione* per entrare nel dominio della *riproduzione*. In tale processo un ruolo cruciale fu svolto dall'affascinante pratica della *sphairopoiia*.

3.2 La *Sphairopoiia*

In prima battuta la *sphairopoiia* (σφαίροποια, traducibile come "costruzione di sfere") si può intendere come la pratica di costruire modelli ridotti del Cielo e/o della Terra, che ne imitino la geometria e/o i movimenti.¹¹ Gli esempi più semplici sono i globi celesti e le sfere armillari, che si limitano a fornire una rappresentazione della volta celeste. Un esempio più complesso è dato invece dalla Macchina di Anticitera, in cui treni di ingranaggi connessi ad un unico input fanno

⁹Jaynes 1976, p. 75.

¹⁰Riteniamo sia da leggere in questi termini la famosa massima di Feynman secondo cui nessuno ha davvero *compreso* la meccanica quantistica, una teoria che in effetti manca totalmente di modelli *familiari* a cui appoggiarsi. Se questa mancanza sia o meno un carattere ineliminabile della teoria quantistica è una questione molto ampia e dibattuta, che non affronteremo in questa sede.

¹¹Evans e Berggren 2006, pp. 43-48, 243-249.

muovere contemporaneamente un gran numero di puntatori che rappresentano i corpi celesti o indicano un certo insieme di informazioni su un apposito quadrante.

È verosimile che l'idea di rappresentare il cosmo su una sfera abbia origini molto antiche, e che nei suoi aspetti qualitativi una pratica del genere si accompagnò allo stesso affermarsi tra il VI e il V sec. a.C. dell'idea della sfericità del Cielo e della Terra.¹² Tuttavia l'uso fatto dagli autori più tardi del termine *sphairopoia* mostra come questo era arrivato col tempo ad assumere una gamma di significati molto più vasta. Oltre a quello già menzionato, se ne possono individuare altri tre:¹³

1. Un particolare modello meccanico. In questo senso metonimico lo utilizza Teone di Smirne, quando afferma (a nostro avviso poco credibilmente) di aver costruito una *sphairopoia* del cosmo costituito da semisfere annidate l'una nell'altra, a immagine di quello descritto da Platone nel *Mito di Er* in chiusura della *Repubblica*.¹⁴ Del resto, come abbiamo già visto, questa identificazione tra l'atto del costruire e l'oggetto costruito era comune ad altre τεχνες greche.
2. Una teoria sulla struttura del cosmo, che può essere o meno in accordo con la natura o con la verità. In XVI.27-29 Gemino riferisce l'opinione di Omero e di altri poeti antichi secondo cui la Terra sarebbe piatta ed estesa lungo tutto l'universo, e che gli abitanti delle zone più esterne sarebbero bruciati dal Sole all'alba e al tramonto. Gemino evidenzia che tale nozione «è estranea alla *sphairopoia* in accordo con la natura» (της δε κατα φυσιν σφαιροποιας αλλοτρια). Poco prima Gemino dice che Cratete di Tebe, filosofo cinico del IV sec. a.C., avrebbe detto lo stesso di coloro che vivono in prossimità dei tropici, trasferendo le opinioni degli antichi alla «*sphairopoia* che si accorda con la verità» (την κατ' αληθειαν σφαιροποιας αλλοτρια). È evidente che in questi usi del termine *sphairopoia* il piano *costruttivo* (ποιητικος) si sovrappone a quello *fenomenico*.
3. Un particolare sistema sferico effettivamente esistente in natura. In XII.23 Gemino dice che «c'è una certa *sphairopoia* appropriata per ciascun pianeta» che rende conto di moti diretti, stazioni e retrogradazioni.¹⁵ Analogamente, in XIV.9, Gemino dice che «a causa di tale *sphairopoia*, non tutte le stelle sorgono e tramontano ogni notte», riferendosi alle stelle che di notte si trovano al di sotto dell'orizzonte e a quelle che risultano visibili solo poco prima dell'alba e poco dopo il tramonto. Nello stesso senso, in XVI.19,

¹²Notiamo che probabilmente l'idea della sfericità del Cielo è stata concepita prima di quella della Terra, come del resto è naturale se si pensa ai *phainomena* associati all'uno e all'altra. Secondo Cicerone (*De Republica*, I, 22) Talete fu il primo a rappresentare il cielo su un globo celeste.

¹³Evans e Berggren 2006, pp. 52-53.

¹⁴Teone, *La Matematica Utile per Comprendere Platone*, III.16. Platone, *Repubblica*, 614-617. Notiamo tra l'altro che su questa falsariga si muoverà Eudosso nel suo modello a sfere omocentriche.

¹⁵Nell'*Introduzione ai Fenomeni* Gemino parla dei moti di stelle, Sole e Luna ma non dei pianeti, salvo qualche accenno come quello qui menzionato. In I.17 Gemino dice che questo argomento sarà trattato «altrove», verosimilmente in un'opera apposita che non ci è pervenuta.

Gemino invoca la «*sphairopoiia* del cosmo» per motivare il fatto che, pur non avendo testimonianze dirette, si può affermare con certezza che agli antipodi debba esistere una zona della Terra avente lo stesso clima dell'area mediterranea. In tutti questi casi è evidente che Gemino non si sta riferendo a modelli astratti, ma all'attuale configurazione dell'universo.

Indubbiamente un uso così ampio del termine *sphairopoiia* induce a riflettere sul ruolo che tale pratica aveva nel quadro generale dell'astronomia ellenistica.

Alla luce di quanto detto a proposito dell'involuppo di *επιστημη* e di *τεχνη* caratteristico della scienza esatta ellenistica, riteniamo che la *sphairopoiia* ricoprì un ruolo di primo piano nel quadro epistemologico dell'astronomia dell'epoca, svolgendo una funzione di raccordo tra il piano dei *phainomena* e quello della teoria. Come le applicazioni tecnologiche costituivano in altre scienze esatte il banco di prova di una data teoria (parallelamente alla sua capacità di salvare i fenomeni) così in astronomia un ruolo analogo era ricoperto da modelli meccanici in scala ridotta, ai quali le teorie astronomiche potevano applicarsi esattamente. Fermo restando l'imperativo di salvare i fenomeni, cioè di accordare la teoria con le osservazioni, porre al centro del discorso non i moti celesti in sé, ma una loro riproduzione in scala ridotta pienamente controllabile permetteva di aggirare parzialmente i vincoli di tempo e visibilità connessi alle osservazioni astronomiche, oltre a fornire ovviamente una visione sintetica e chiarificatrice della teoria stessa, utile eventualmente anche per scopi divulgativi. Gli usi e l'utilità della *sphairopoiia* nel quadro generale dell'astronomia greca sono mirabilmente descritti da Aujac:¹⁶

Gusto per la speculazione geometrica, riferimento costante a ciò che è prodotto dalla mano dell'uomo, questi sono i due poli tra i quali si è accesa la scintilla e si è intensificata la corrente della ricerca scientifica nell'antica Grecia. [...] facendo appello senza esitazione al *savoir-faire* degli artigiani, [i Greci] hanno voluto fabbricare delle repliche [del cosmo] sulle quali, come il creatore del mondo, potessero agire e, soprattutto, che permettevano di offrire una visione sintetica delle loro concezioni. In questi tentativi di spiegazione e di ri-creazione del mondo, la sfera ha giocato un ruolo primordiale: la sfera, oggetto geometrico senza dubbio [...] ma anche oggetto materiale. [...] Studiare le proprietà della sfera servendosi della geometria, verificarle e cercarne nuove applicazioni grazie ai modelli ridotti, tali sono i passi che hanno condotto i Greci ad ottenere della Terra e del Cielo una conoscenza che, ancora oggi, ci confonde di ammirazione.

Riteniamo dunque che lo sviluppo dell'astronomia greca vada letto in stretta connessione con l'evoluzione della *sphairopoiia*, cioè, in senso lato, con l'evoluzione delle arti meccaniche.

3.3 Astronomia, Geometria, Meccanica

L'immagine dell'astronomia greca che emerge da tali considerazioni è dunque un'immagine composita, in cui lo studio dei moti celesti si lega inscindibilmente

¹⁶Aujac 1993, p. 7.

ad altre due discipline: la geometria, che ne costituisce il linguaggio primario, e la meccanica, attraverso la pratica della *sphairopoia*. A queste potremmo aggiungere anche l'ottica, necessaria nell'interpretazione dei *phainomena* in relazione all'osservatore.¹⁷ Tralasciando l'ottica, i cui elementi fondamentali furono posti da Euclide al principio del III sec. a.C. e rimasero sostanzialmente invariati fino al tempo di Tolomeo, in questo paragrafo evidenzieremo le influenze reciproche che si determinarono nello sviluppo dell'astronomia tra lo studio dei corpi celesti, la geometria e la meccanica. Vedremo come nella loro stessa struttura metodologica e concettuale queste tre discipline fossero in epoca ellenistica strettamente legate tra loro, a conferma della generale omogeneità tra le scienze esatte che è riassunta nell'accezione greca del termine *matematica*. Vedremo così all'opera in questo esempio specifico la relazione dialettica tra *ἐπιστήμη* e *τέχνη* che abbiamo descritto precedentemente.

La Geometrizzazione dell'Astronomia

Si è già detto che il titolo originale dell'*Almagesto* era *Mathematike Syntaxis* (Μαθηματικὴ Σύνταξις), "Trattato Matematico", a conferma del fatto che ancora al tempo di Tolomeo vi era una radicata identificazione tra geometria e astronomia, tanto che per molto tempo i due termini furono usati in maniera quasi interscambiabile. Tale identificazione non è ovviamente casuale, e se da un lato riflette chiaramente i metodi utilizzati dall'astronomia nello studio dei moti celesti, dall'altro rivela un legame molto più profondo riconducibile all'origine stessa dell'astronomia come scienza esatta. Coerentemente con la denominazione di *matematiche*, il vero elemento comune e omogeneizzante tra le scienze esatte era, appunto, la matematica, intesa sia come linguaggio che come *logica* (λογος), ovvero come strumento attraverso cui si articolava il metodo dimostrativo.

Chiaramente non è possibile individuare puntualmente il momento della *nascita* di una scienza. Se dovessimo tuttavia indicare un atto primordiale, il primo seme che germogliando diede vita all'astronomia greca come la conosciamo, indicheremmo questo breve passo tratto dalla *Repubblica* di Platone:¹⁸

Se intendiamo, dunque, rivolgere la naturale intelligenza dell'anima al suo fine più opportuno attraverso lo studio dell'astronomia, procederemo, così come in geometria, *per mezzo di problemi*, e lasceremo perdere i corpi celesti.¹⁹

¹⁷Ricordiamo in particolare il fondamentale risultato sulla relatività dei moti espresso nella proposizione 51 dell'*Ottica* di Euclide (cfr. *supra*) Notiamo inoltre che, non a caso, molti scienziati ellenistici lavorarono in almeno due di questi campi.

¹⁸Platone, *Repubblica*, 529C

¹⁹Questo passo è stato commentato da molti e interpretato in modi diversi. Una rassegna di alcune delle letture proposte è in Bulmer-Thomas 1984. Segnaliamo la traduzione che di queste righe dà Giovanni Reale, nell'edizione *Bompiani* della *Repubblica*:

E allora - conclusi - studieremo l'astronomia, facendone lo stesso uso che abbiamo fatto della geometria, cioè sfruttando la sua capacità di suscitare problemi. E per il resto dovremo lasciar perdere gli astri del cielo, se davvero, applicandoci all'autentica astronomia, vorremo strappare quella facoltà naturale della nostra anima che è la ragione dalla sua condizione di inattività, trasformandola in qualcosa di utile.

In queste poche frasi, che Platone fa pronunciare a Socrate, è condensato a nostro avviso il programma di tutta l'astronomia greca. Sul piano generale, è enunciato chiaramente lo sdoppiamento del piano di discorso caratteristico di tutte le scienze esatte, che evitano di parlare direttamente dei fenomeni («lasciemo perdere i corpi celesti») per rivolgersi al piano astratto dei modelli e degli enti teorici. In particolare, il fatto che l'astronomia debba procedere «per mezzo di problemi» (προβλημασιν), come la geometria, istituisce un'identificazione che persisterà per tutto lo sviluppo dell'astronomia greca e anche oltre. L'identità strutturale e metodologica tra astronomia e geometria è sancita dall'uso del termine *problema*: negli *Elementi* di Euclide, posteriori alla *Repubblica* di una cinquantina d'anni, i *problemi* (προβλήματα) sono un tipo di proposizione che consiste nella descrizione di una figura geometrica con proprietà assegnate, seguite dalla costruzione della figura e dalla dimostrazione che la figura costruita effettivamente soddisfa le proprietà richieste. Tali proposizioni si distinguono dai *teoremi* (θεωρήματα), che consistono nella dimostrazione che determinate proprietà ne implicano altre e sono seguiti dalla sola dimostrazione. I due tipi di proposizioni erano caratterizzati dalla diverse formule di chiusura: "come si doveva fare" (οπερ εδει ποιεσαι) nel caso dei problemi, "come si doveva dimostrare" (οπερ εδει δειξει) nel caso dei teoremi.²⁰

Possiamo dunque parafrasare Platone dicendo che l'astronomia deve procedere attraverso costruzioni geometriche che soddisfino le proprietà mostrate dai moti dei corpi celesti: è importante però che l'accento cada più sulle costruzioni geometriche che non su quanto si può effettivamente osservare tra i cieli stellati.²¹ Questa sfumatura è espressa anche dal fatto che Platone rivolge allo studio dell'astronomia l'*intelletto* (φρονημα), cioè la facoltà umana che per Platone è rivolta allo studio delle *idee*. Ciononostante è lo stesso Platone nel *Timeo* a sottolineare l'importanza di avere una rappresentazione *visiva* dei moti celesti, senza la quale ogni discorso sarebbe vano.²²

Ma le danze di questi astri e i loro incontri, i ritorni (επανακυκλησεις) e gli avanzamenti (προχωρησεις) nelle loro orbite, e quali dèi si incontrino in congiunzione e quali siano in opposizione, e come si passino avanti e dietro l'un l'altro, coprendosi a vicenda, e in quali tempi si nascondano a noi, e di nuovo apparendo mandino terrori e segni delle cose future a quanti non sanno calcolarne i movimenti, spiegare tutte queste cose sarebbe vana fatica

Ci sembra interessante notare quanto il significato del passo appaia distorto, evidentemente alla luce dell'interpretazione idealista che spesso si è data del pensiero platonico. Di diverso stampo appare invece l'interpretazione della scuola francese, come emerge dalle traduzioni di Luc Brisson. Ciò suggerisce che sarebbe probabilmente illuminante una rilettura del pensiero classico libera da pregiudizi, che lo possa mettere in connessione con la successiva nascita della scienza esatta che di tale riflessione è uno dei prodotti principali.

²⁰Russo 2010, p. 61. In una nota Russo specifica che Euclide non distingue i due tipi di proposizioni con questi due termini, che sono invece utilizzati da Proclo e Pappo, e a maggior ragione non sappiamo se Platone utilizzava *problema* in questa precisa sfumatura. Essendo comunque esplicito il riferimento alla geometria, si può interpretare questo passo anche pensando più genericamente a delle "dimostrazioni" senza alterarne il significato complessivo.

²¹Questa insistenza è stata talvolta interpretata come una forma di antiempirismo. Vedremo a breve cosa secondo noi intendeva Platone con questa precisazione.

²²*Timeo*, 40D

senza avere davanti agli occhi dei modelli che imitino (μιμηματων) questi [stessi] movimenti.

È evidente che Platone si sta qui riferendo a specifici fenomeni astronomici, tra cui in particolare le retrogradazioni planetarie, e all'utilità di quella che si chiamerà *sphairopoiia* nello studio e nella rappresentazione di tali moti. Vediamo dunque che già in Platone era presente l'idea di rappresentare non solo la sfera celeste, ma i suoi *movimenti* attraverso dei modelli ridotti. Va da sé che tali modelli debbano basarsi su una qualche teoria, e che costituirebbero dunque una rappresentazione sintetica di quelle costruzioni geometriche di cui ha parlato nella *Repubblica*. Poco prima di quest'ultimo passo Platone sottolinea che la spiegazione dei moti planetari sarebbe così complessa che costerebbe «più fatica dello stesso argomento per cui è detta»,²³ ma che ciononostante «pochi di molti» conoscono i periodi planetari e «mediante l'osservazione misurano i loro rapporti con numeri»:²⁴ si tratta evidentemente di studi più tecnici non pertinenti alla discussione di Platone, ma che, possiamo immaginare, erano condotti con l'ausilio delle rappresentazioni visuali di cui sopra.

Nel passo della *Repubblica* che abbiamo riportato Socrate indica come dovrebbe procedere l'astronomia dopo aver criticato il modo in cui questa viene praticata al suo tempo. Glaucone, il suo interlocutore nel dialogo, ritiene che l'astronomia porti l'anima a guardare verso l'alto, ovvero, nei termini platonici, a rivolgersi al mondo delle Idee, ma Socrate non crede che l'astronomia dei suoi contemporanei assolva realmente a questo compito:

Ecco: nel modo in cui trattano [l'astronomia] ora coloro che la innalzano a filosofia, essa fa proprio rivolgere lo sguardo in giù. [...] C'è pericolo che tu creda che, se uno contempla a viso all'insù vari ornamenti di un soffitto e ne acquista qualche vaga conoscenza, sia l'intelletto, ma non gli occhi a consentirgli questa contemplazione. Ora, tu forse giudichi bene e io da sciocco. Al contrario di te, io non riesco a pensare che esista un'altra disciplina che faccia volgere in sù lo sguardo dell'anima se non quella dell'essere e dell'invisibile; e se uno cerca di apprendere una cosa sensibile, guardando in sù a bocca aperta o in giù a occhi chiusi, io sostengo che non potrà mai veramente apprendere, perché *nessuna di queste cose può dar luogo a scienza* (επιστημην), e che l'anima sua non guarda in alto, ma in basso, anche se egli apprende stando supino, disteso a terra o nuotando in mare.

Qui Socrate vuole sottolineare che l'astronomia deve cercare di cogliere attraverso l'intelletto gli eterni movimenti celesti, e non accontentarsi di ciò che cade sotto il solo dominio dei sensi: solo così l'uomo potrà raggiungere una vera conoscenza (επιστημην). Ma a cosa si sta riferendo Socrate quando contesta l'astronomia del suo tempo? I «vari ornamenti di un soffitto» fanno pensare allo studio delle costellazioni, e poco dopo ne abbiamo la conferma:

Questi ornamenti disposti nel cielo, poiché stanno trapunti su uno sfondo visibile, bisogna sì giudicarli i più belli e considerarli i più regolari tra

²³ *Timeo*, 38D-E

²⁴ *Timeo*, 39C-D

simili oggetti, ma molto inferiori ai veri, riguardo a quei movimenti che la vera velocità e la vera lentezza compiono, secondo il vero numero e in tutte le vere figure, l'una rispetto all'altra, con sé trasportando ciò che contengono, ossia oggetti che si possono cogliere con la ragione e con il pensiero, dianoeticamente, ma non con la vista. [...] gli ornamenti del cielo devono servire da esempi per poter studiare quegli altri oggetti. Un caso simile sarebbe quello di chi trovasse dei disegni tracciati con particolare maestria da Dedalo o da qualche altro artista o pittore. Vedendoli, un esperto di geometria li giudicherebbe bellissimi d'esecuzione, ma stimerebbe ridicolo esaminarli seriamente per cogliervi il vero concetto dell'eguaglianza o del doppio o di qualche altro rapporto. [...] non credi che chi è realmente astronomo si troverà in una situazione identica, quando guarderà il moto degli astri?

Subito dopo, Socrate dà l'indicazione che abbiamo già menzionato su come dovrebbe procedere l'astronomia. Dunque per Platone l'astronomo non deve limitarsi alla descrizione delle apparenze, ma deve usare ciò che vede per cogliere *dianoeticamente*, cioè col pensiero, i reali movimenti del cosmo. In questa operazione la $\tau\epsilon\chi\nu\eta$, coerentemente col significato che Platone le attribuisce,²⁵ deve giocare e giocherà un ruolo essenziale.

Astronomia Sferica e Globi Celesti

Il primo a seguire parzialmente le indicazioni di Platone fu il suo discepolo Eudosso di Cnido, nella cui opera sembrano coesistere il vecchio e il nuovo corso dell'astronomia.²⁶

L'uranografia criticata da Socrate sembra infatti essere proprio l'argomento principale di un'opera di Eudosso intitolata *Fenomeni* che non ci è pervenuta, ma il cui contenuto è deducibile dal celebre poema di Arato che su tale opera era basato e che fu poi analizzato criticamente da Ipparco nel II sec. a.C.. Alcuni passi riportati testualmente da Ipparco danno un'idea del suo contenuto:²⁷

C'è una certa stella che rimane sempre nello stesso posto; questa stella è il polo dell'universo.²⁸

Tra le Orse c'è la coda del Drago, l'ultima stella del quale si trova sopra la testa dell'Orsa Maggiore. Essa fa il giro intorno alla testa dell'Orsa Minore e poi si distende sotto i suoi piedi. Facendo qui un altro giro alza di nuovo la testa e la tiene in avanti.

²⁵Brisson e Pradeau (1998, p. 53), «nella filosofia platonica [...] la tecnica è il paradigma del rapporto che l'uomo intrattiene con tutti gli oggetti».

²⁶Pare che Eudosso abbia avuto un ruolo importante anche nel passaggio dalla matematica ellenica a quella ellenistica. Si devono a lui una formulazione rigorosa del metodo di esaustione, che verrà ripreso da Archimede un secolo dopo, un primo tentativo di assiomatizzazione della geometria e le basi per la definizione euclidea di proporzione. Purtroppo nessuna delle sue opere ci è pervenuta, dunque non è possibile stimare con precisione i suoi risultati.

²⁷Questi passi sono riportati in Evans e Berggren 2006, p. 5 e in Berggren e Thomas 2000, pp. 7-8.

²⁸Ipparco contesta quest'affermazione evidenziando che il polo celeste all'epoca non era occupato da alcuna stella.

Su di questo [il tropico del Capricorno] ci sono la parte di mezzo dell'Ariete, i piedi dell'Acquario [...], l'albero di Argo, la schiena e il petto del Centauro, il Lupo e il pungiglione dello Scorpione. Poi [il cerchio] si congiunge con la parte di mezzo dell'Ariete attraverso il Sagittario.

Pare dunque che nei *Fenomeni* Eudosso descrivesse in maniera qualitativa la forma delle costellazioni e la loro collocazione sulla sfera celeste: un ottimo esempio del tipo di astronomia contestato da Platone. Tuttavia Eudosso impostò il problema in un modo leggermente diverso, seguendo il consiglio di Platone sull'utilità di una rappresentazione visiva: secondo Cicerone si deve infatti a Eudosso la costruzione del primo globo celeste con incise i paralleli celesti e costellazioni, e dunque il primo esempio effettivo di *sphairōpoia*.²⁹ Se diamo credito a questa testimonianza, allora l'oggetto delle descrizioni di Eudosso avrebbe potuto essere non il cielo osservabile *in sé*, ma la sua riproduzione sul globo celeste, davanti al quale l'osservatore assume, come dice Aujac, la prospettiva del creatore. Rispetto al cielo effettivamente osservabile, dunque, su un globo del genere la forma delle costellazioni apparirebbe riflessa come in uno specchio. Si può immaginare che questa circostanza sia stata alla base del titolo di un'altra opera di Eudosso che trattava gli stessi argomenti dei *Fenomeni* ed era intitolata, appunto, *Lo Specchio*. È un'ipotesi suggestiva ma speculativa, tuttavia ci risulta difficile immaginare un altro motivo per cui un'opera astronomica potesse portare un titolo del genere. In ogni caso, resta indubbio che un globo celeste con sopra incise costellazioni e paralleli celesti sarebbe stato di estrema utilità nel lavoro svolto da Eudosso.³⁰

D'altro canto Eudosso è ricordato anche per essere il primo ad aver elaborato un modello geometrico che tenti di spiegare i moti di Sole, Luna e cinque pianeti, seguendo di fatto il programma indicato da Platone. Nel sistema di Eudosso, che fu ripreso da Callippo ed elaborato ulteriormente da Aristotele, ad ogni pianeta erano associate delle sfere centrate sulla Terra, posta immobile al centro del cosmo. In totale vi erano 27 sfere omocentriche che ruotavano uniformemente intorno ad assi non paralleli, che imprimevano ai pianeti una traiettoria ad otto detta *ippopeda* che ne spiegava qualitativamente le retrogradazioni.³¹

Dopo questi primi passi di Eudosso la geometrizzazione dell'astronomia fu portata a compimento tra la fine del IV e l'inizio del III sec. a.C., periodo a cui risalgono i lavori di Autolico di Pitane e di Euclide. Nell'opera di questi autori vediamo l'astronomia configurarsi specificamente come studio geometrico della sfera, intesa espressamente come modello matematico della volta celeste.

Di Autolico ci sono rimasti due trattati, *Sulla Sfera in Movimento* e *Su Levate e Tramonti Eliaci*, che costituiscono le più antiche opere greche di astronomia matematica pervenuteci. In esse vediamo all'opera per la prima volta il metodo dimostrativo che ci è familiare dagli *Elementi* di Euclide, applicato a proposizioni di geometria sferica con immediate applicazioni ai movimenti della sfera delle stelle fisse. Nella *Sfera in Movimento* Autolico tratta principalmente fenomeni

²⁹Cicerone, *De Republica*, I, 22.

³⁰La maggior parte degli studiosi ritiene affidabile la testimonianza di Cicerone, ma non è possibile confermarla o smentirla in alcun modo. Si veda Dekker 2007 per maggiori dettagli.

³¹Per uno studio dettagliato dei sistemi di Eudosso, Callippo e Aristotele si veda Schiaparelli 1874.

legati alla rotazione diurna intorno a un asse che è inclinato rispetto all'orizzonte, ovvero, più genericamente, rispetto a un piano che divide la sfera in parte visibile e parte invisibile. In *Levate e Tramonti Eliaci* viene trattata in maniera rigorosa la variazione annuale di visibilità delle stelle fisse, che non vengono chiamate per nome ma individuate in base alla latitudine celeste di ciascuna.

Quello delle fasi stellari era un argomento di enorme importanza pratica per l'agricoltura e la navigazione, e non a caso già nel VII sec. a.C. il più antico poema greco giunto sino a noi (ad esclusione dei poemi omerici), *Le Opere e i Giorni* di Esiodo, tratta tra gli altri proprio di questo tema. Qui Esiodo si riferisce ai momenti in cui certe stelle particolarmente luminose sorgono poco prima del Sole (*levata eliac*) o tramontano poco prima che il Sole sorga (*tramonto eliac*) per indicare i momenti adatti alla semina e al raccolto.³² Una funzione simile era svolta anche dai cosiddetti *parapegma*, dei calendari stellari con annesse previsioni meteorologiche basate su levate e tramonti eliaci di varie stelle nel corso dell'anno, redatti già nel V sec. a.C. da Metone, Eutemone e Democrito.³³ È evidente dunque che l'opera di Autolico costituiva un tentativo di rendere rigoroso attraverso l'approccio geometrico lo studio di fenomeni che già da secoli erano noti e utilizzati nell'organizzazione del lavoro e della vita pubblica. È verosimile che molte delle proposizioni di Autolico siano state scoperte prima su globi celesti e solo successivamente dimostrate rigorosamente. Un esempio è la proposizione IX, secondo cui dati due punti della sfera celeste che sorgono contemporaneamente, quello posto più a nord tramonterà più tardi: basta uno sguardo ad una sfera rotante per convincersi di questo risultato, la cui dimostrazione geometrica è invece assai più ardua.

Euclide, di poco posteriore ad Autolico, trattò gli stessi argomenti nei *Fenomeni*, un'opera con la stessa impostazione assiomatica degli *Elementi* in cui viene affrontato il problema della durata del giorno al variare della località, ricondotto al calcolo dei tempi di levata di archi dell'eclittica. Lo stesso problema era stato già affrontato dai matematici babilonesi utilizzando metodi aritmetici, e secondo Berggren l'obiettivo dei *Fenomeni* era proprio dimostrare geometricamente le assunzioni implicite alla base di tali metodi.³⁴ In Euclide non vi sono più riferimenti espliciti alla volta celeste, e l'astronomia si è ormai identificata totalmente con lo studio della sfera.

Gli stessi argomenti saranno trattati e ampliati da Teodosio di Bitinia (II sec. a.C.), autore di un'opera matematica intitolata *Sferica* e di due trattati più espressamente astronomici *Sulle Abitazioni* e *Sui Giorni e le Notti*, in cui per la prima volta vengono trattati i diversi moti stellari osservabili dalle varie latitudini. Sidoli e Saito hanno analizzato in dettaglio il ruolo delle costruzioni e dei diagrammi nella *Sferica* di Teodosio, concludendo che anch'egli fece uso di

³²Esiodo, *Le Opere e i Giorni*, 383-384: «Quando le Pleiadi, figlie di Atlante, si innalzano nel cielo, tu comincia il raccolto, e quando tramontano, comincia a coltivare il campo».

³³La redazione di *parapegma* accompagna tutto lo sviluppo dell'astronomia greca, e molti astronomi realizzarono una propria versione. L'*Introduzione ai Fenomeni* di Gemino si conclude ad esempio con una compilazione basata sui lavori precedenti di Metone, Eutemone, Democrito, Eudosso, Callippo e Dositeo (Evans e Berggren 2006, pp. 231-240).

³⁴Per maggiori dettagli si veda Berggren e Thomas 2000, pp. 1-18.

globi celesti nella stesura del suo trattato:³⁵

Nonostante l'opera sia strutturata come un trattato puramente deduttivo, essa fu scritta da e per persone che usavano oggetti materiali come ausilio nelle loro investigazioni degli aspetti matematici del cosmo. In quanto trattato elementare, la *Sferica* non solo sviluppa i teoremi necessari per la comprensione della geometria della sfera, ma imposta anche una serie di problemi che sarebbero stati utili a chiunque avesse voluto risolvere problemi di geometria sferica disegnando diagrammi su un globo reale.

Riteniamo dunque che i globi celesti, la forma più elementare di *sphairopoiia*, abbiano avuto un ruolo importante già agli albori dell'astronomia matematica greca. Non a caso a tutte le opere che abbiamo descritto farà ricorso Gemino nella sua *Introduzione ai Fenomeni*, riferendosi spesso ai globi celesti nell'illustrazione dei relativi argomenti, sottintendendo nel lettore una certa familiarità con questi oggetti. Lo stesso fa Strabone, che descrivendo le conoscenze astronomiche necessarie agli studenti di geografia sottolinea che questi non devono essere esperti di astronomia, ma nemmeno così pigri da non aver mai visto ed esaminato un globo celeste e i cerchi iscritti su di esso.³⁶

Un'eco dell'uso di globi celesti si trova ancora in Tolomeo, che nel Libro II dell'*Almagesto*, dedicato appunto all'astronomia sferica, parla di *sphaira recta* e *sphaira obliqua* per distinguere i diversi movimenti del cielo osservabili rispettivamente vicino e lontano dai poli. Verosimilmente gli aggettivi *recta* e *obliqua* si riferiscono all'inclinazione variabile di un globo celeste sul suo supporto, che permette di simulare facilmente il moto della volta celeste com'è osservabile alle varie latitudini; abbiamo già visto poi come l'uso della sfera armillare è portato da Tolomeo a sostegno della centralità e delle ridotte dimensioni della Terra.

In tutti i casi visti sinora la *sphairopoiia* ha avuto un ruolo solamente rappresentativo della *geometria* del cosmo, un modello ridotto che all'occorrenza era possibile muovere manualmente. Non siamo ancora dunque nell'ambito proprio della meccanica, intesa come la costruzione di macchine funzionanti che imitino i *movimenti* dei corpi celesti. Perché questo divenisse possibile, era necessario che la tecnologia si sviluppasse ulteriormente, come accadde nel corso del III sec. a.C..

Moti Circolari Uniformi, Epicicli e Ingranaggi

Nel corso del III sec. a.C. si assiste a una trasformazione dei modelli teorici utilizzati nella descrizione dei moti planetari: le sfere di Eudosso, Callippo e Aristotele lasciarono il posto a modelli ad eccentrici/epicicli. Prima di Ipparco l'unico nome associato esplicitamente all'utilizzo di tali metodi è quello di Apollonio di Perga, a cui Tolomeo in *Alm.* XII.1 ascrive la dimostrazione di un teorema sulle stazioni planetarie.

Quali furono i motivi che condussero a questa evoluzione? Non è possibile dare una risposta certa, ma si può supporre che un ruolo sia stato svolto dalla

³⁵Sidoli e Saito 2009, p. 607. Qui *problemi* è utilizzato nella specifica accezione euclidea illustrata precedentemente.

³⁶Strabone, *Geographia*, I.12

sistematizzazione della geometria svolta da Euclide negli *Elementi*, che come si è detto sviluppavano la teoria del disegno con riga e compasso. Alla luce di ciò, non stupisce che l'astronomia ellenistica si sia sviluppata secondo metodi che mettevano a frutto le potenzialità intrinseche del linguaggio matematico in cui erano formulate, nel quale i cerchi svolgevano un ruolo fondamentale: l'uso dei moti circolari permetteva di utilizzare algoritmi di calcolo basati su operazioni elementari eseguibili con riga e compasso. Per quanto riguarda l'accuratezza di tali algoritmi, basti notare, come ha fatto per primo Schiaparelli, che la decomposizione in deferenti ed epicicli è equivalente alla moderna espansione in serie di Fourier.³⁷

È importante sottolineare questo punto, essendo diffusa l'opinione secondo cui l'astronomia greca fu segnata in maniera indelebile da pregiudizi di carattere metafisico che ne limitarono il potenziale sviluppo. Solitamente l'origine di tali vincoli si fa risalire a Platone, il quale avrebbe assegnato all'astronomia il compito di "salvare i fenomeni" utilizzando, appunto, solo moti circolari uniformi. Innanzitutto troviamo difficile credere che un astronomo come Ipparco, ad esempio, abbia aderito alle prescrizioni metafisiche date da un filosofo vissuto 200 anni prima di lui, il quale, da quanto ne sappiamo, non effettuò mai alcuna osservazione astronomica. In secondo luogo, se Platone avesse proposto a un principio di questo tipo, ci aspetteremmo di trovarne cenni nei suoi scritti, ma non è così: in tutta l'opera di Platone non vi è alcun riferimento al principio dei moti circolari uniformi, che viene anzi esplicitamente violato nel già menzionato *Mito di Er*.³⁸

L'errata ricostruzione è basata su una testimonianza di Simplicio (VI sec. d.C.), che nel *Commentario al De Caelo di Aristotele* cita come fonte al riguardo Sosigene, filosofo peripatetico del II sec. d.C., che riferisce parole di Eudemo, discepolo di Aristotele e autore di una (perduta) *Storia dell'Astronomia*. Sorvolando sull'attendibilità di una testimonianza di terza mano di un autore vissuto 900 anni dopo i fatti di cui parla, Knorr (1990) ha analizzato la questione in un certo dettaglio, giungendo alla conclusione che l'unica fonte di Simplicio a proposito del principio dei moti circolari uniformi è in realtà Sosigene, e non Eudemo, il quale sarebbe stato (forse) un testimone più attendibile. Ricordiamo che il principio secondo cui i corpi celesti si muovono di moto circolare è esplicitamente enunciato da Aristotele, di cui Sosigene era un tardo seguace.³⁹ Appare dunque molto plausibile che Sosigene, alla luce del fatto che l'astronomia si fosse sviluppata nei secoli successivi utilizzando metodi che effettivamente prevedevano la scomposizione in moti circolari, abbia reinterpretato tali metodi in chiave aristotelica, laddove alla base c'erano le ragioni puramente tecniche che abbiamo descritto.⁴⁰ Non a caso

³⁷Schiaparelli 1874, p. 5: «E comprenderemo ancora la necessità e la ragione di quella grande molteplicità di sfere, che a torto fu rimproverata da chi non ne intendeva l'ufficio; e che parve cosa degna di riso e di compassione alla nostra epoca, la quale, senza saperlo, nelle teorie planetarie fa uso degli epicicli a decine e a centinaia, nascondendoli sotto il titolo di termini periodici di serie infinite.»

³⁸*Repubblica*, 616B-617C. Nel mito le tre Moire muovono il cosmo attraverso dei colpi ripetuti e in particolare la terza sembra imprimere un moto di tipo oscillatorio, probabilmente al fine di riprodurre le retrogradazioni planetarie.

³⁹*De Caelo*, I.2 e II.3-12

⁴⁰Ricordiamo anche che, come già evidenziato, l'idrostatica archimedeica e la pneumatica di Ctesibio e Filone avevano destituito di fondamento la fisica aristotelica, in cui rientrava anche il principio dei moti circolari.

Sosigene visse nello stesso periodo di Tolomeo, nel quale come abbiamo già visto l'utilizzo di moti circolari uniformi pure era legittimato su basi essenzialmente metafisiche. Possiamo dunque supporre che la visione di Tolomeo era abbastanza comune tra i tardi seguaci dell'aristotelismo. Altri autori che enunciano esplicitamente tale principio sono Gemino, che lo ascrive però ai Pitagorici, Teone di Smirne, che pure riferisce le opinioni del peripatetico Adrasto, e Proclo, filosofo neoplatonico vissuto nel V sec. d.C..

Osserviamo che il principio dei moti circolari uniformi include in sé due affermazioni distinte: una sulla *geometria* dei moti elementari (= moti circolari), l'altra sulla loro *cinematica* (= moti uniformi). Distinguere questi due aspetti è fondamentale soprattutto alla luce del disaccoppiamento tra centro geometrico e centro "cinematico" che avverrà in Tolomeo con l'introduzione del punto equante. Tutto quanto abbiamo detto a proposito dell'uso di riga e compasso pertiene solo alla prima di queste caratteristiche e non tocca la seconda; in altri termini, le decomposizioni in cerchi permettono di ricostruire le *traiettorie* dei corpi celesti ma non dicono nulla sulle loro *leggi orarie*. Se vogliamo mettere in discussione l'origine metafisica delle scelte proprie dell'astronomia ellenistica dobbiamo domandarci se anche l'uniformità non sia stata dettata da motivi di carattere tecnico e non filosofico.

A ben vedere in effetti anche Aristotele parla sì di moti circolari, ma mai di moti circolari *uniformi*. Certo si può pensare che l'uniformità sia sottintesa come inferenza dall'evidente moto uniforme della volta celeste nel suo complesso, e d'altra parte sono uniformi i moti delle sfere omocentriche che Aristotele eredita da Callippo ed Eudosso. In ultima analisi dunque è relativamente al modello di Eudosso che bisogna porsi la domanda sull'origine del postulato di uniformità.

Purtroppo la scarsità di informazioni su Eudosso non ci permette di indagare come vorremmo le origini del suo modello. Sappiamo tuttavia che prima di giungere all'Accademia di Platone Eudosso studiò con Archita di Taranto, amico di Platone ed erede della tradizione pitagorica conosciuto soprattutto per i suoi studi di meccanica. In particolare, secondo Diogene Laerzio, Archita fu il primo a connettere tra loro geometria e meccanica: da un lato, applicò la meccanica alla geometria usando linee generate da figure in moto nella costruzione dei due medi proporzionali tra due grandezze (problema equivalente alla duplicazione del cubo); dall'altro fu il primo a trattare questioni meccaniche utilizzando principi matematici.⁴¹ Non sappiamo se Eudosso abbia costruito effettivamente un modello meccanico del suo sistema a sfere omocentriche, tuttavia ci sembra verosimile che il principio dei moti uniformi affondi le sue radici nell'arte della meccanica, in vista dell'idea di riprodurre meccanicamente i moti celesti.⁴²

⁴¹ *Vitae Philosophorum*, VIII, 79-83.

⁴² Anche Schiaparelli ritiene verosimile che Eudosso e Callippo si siano giovati dell'ausilio della *sphairopoia*: (Schiaparelli 1874, p. 48)

Eudosso e Callippo non ebbero strumenti esatti, non ebbero il soccorso della trigonometria; aiutandosi però con costruzioni grafiche, e forse anche con quel ramo della meccanica cui i Greci davano il nome di *sferopea*, e che sembra fosse allora assai più necessario e più importante che non adesso, essi riuscirono ad acquisire un'idea esatta del movimento risultante dalla combinazione di tante sfere, e seppero adattarne la disposizione ai fenomeni.

Il più antico scritto di meccanica pervenutoci sono le *Questioni Meccaniche*, un'opera tramandata all'interno del corpus aristotelico ma la cui paternità è molto dibattuta. La maggior parte degli studiosi la ascrive alla prima scuola peripatetica alla luce di alcune analogie lessicali con opere di Aristotele, il che corrisponderebbe ad una datazione tra la fine del IV sec. a.C. e l'inizio del III sec. a.C.; più di recente Winter (2007) ha sostenuto che l'opera risalga proprio ad Archita.⁴³ In ogni caso nessuno studioso ha sostenuto date posteriori ai primi anni del III sec. a.C..⁴⁴

Le *Questioni Meccaniche* si compongono di 35 domande e risposte che affrontano diversi problemi pratici che coinvolgono i concetti di leva, equilibrio, vantaggio meccanico, attrito e inerzia.⁴⁵ L'opera si apre con delle considerazioni di carattere generale estremamente interessanti:⁴⁶

La natura spesso opera in senso contrario al nostro vantaggio. Essa infatti agisce in maniera semplice e sempre uguale a se stessa, mentre il nostro vantaggio cambia in molti modi. Quando, allora, dobbiamo produrre un effetto contrario alla natura, siamo in svantaggio, a causa della difficoltà, e [a tal fine] è richiesta una certa arte (τεχνης). Chiamiamo *macchina* (μηχανήν) uno strumento che ci aiuta nelle difficoltà. È vero ciò che scrisse il poeta Antifone: «Attraverso l'arte vinciamo le cose in cui siamo sottomessi alla natura». Di questo tipo sono quelle cose in cui ciò che è minore vince il maggiore, e le cose di peso inferiore spostano quelle di peso maggiore, e chiamiamo *meccanici* tutti i problemi di questo tipo. La meccanica non è ristretta solo a problemi fisici, ma assomiglia sia alla fisica che ai teoremi di matematica: il come è chiaro attraverso la matematica, il cosa attraverso la fisica.⁴⁷ Tra i problemi di questo tipo c'è quello della leva, poiché è strano che un grande peso possa essere mosso da una piccola forza, e ciò anche quando è coinvolto anche il peso della stessa leva. Infatti lo stesso peso, che un uomo non potrebbe muovere senza una leva, lo sposta facilmente se applica il peso su una leva. Alla base di tutti questi fenomeni c'è il cerchio: e ciò è naturale, non essendo strano che lo stupefacente emerga da qualcosa di ancor più stupefacente, e non c'è niente di più stupefacente della coincidenza degli opposti. Il cerchio è fatto di opposti: esso è fatto al tempo stesso di quiete e di moto, che hanno una natura contraria l'una all'altro.

⁴³La posizione di Winter, per quanto isolata, appare convincente, ed è basata essenzialmente sul fatto che Vitruvio nel *De Architectura* attinge evidentemente alle *Questioni Meccaniche* e verosimilmente ne conosceva l'autore. Lo stesso Vitruvio elenca al principio del Libro VII i più importanti meccanici dell'antichità, tra cui necessariamente deve esserci l'autore delle *Questioni Meccaniche*: procedendo per esclusione e dall'analisi di alcuni elementi dell'opera, Winter individua in Archita l'unico possibile candidato.

⁴⁴Una sintesi delle varie posizioni in merito è in J. Evans e C. C. Carman 2000, pp. 147-149

⁴⁵È degno di nota il Problema 10, in cui troviamo una principio di distinzione tra i concetti di peso e massa inerziale: (Winter 2007, p. 17) «Why is an empty balance beam easier to move than a weighted one? In the same way also a wheel or any such thing, the heavier is harder than the smaller and lighter. This is true not only opposite the weight, but sideways. Opposite to its tilt it is harder to move anything, but there is no tilt sideways.».

⁴⁶Winter 2007, pp. 1-3. Traduzione leggermente modificata.

⁴⁷Qui *fisica* va letto nel senso di *filosofia naturale*, come abbiamo illustrato nel par. 1.3.

Dunque secondo l'autore tutta la meccanica può essere ridotta di fatto allo studio delle proprietà del cerchio:

Dunque, come abbiamo detto, non ci sorprende che [il cerchio] sia il principio primo di tutte le meraviglie. Tutto ciò che riguarda la bilancia è risolto dal cerchio; tutto ciò che riguarda la leva è risolto dalla bilancia, e praticamente tutto ciò che concerne il movimento meccanico è risolto dalla leva.

L'autore procede osservando come spostandosi dal centro all'estremità ogni punto del cerchio si muova ad una diversa velocità, e che punti diametralmente opposti di un cerchio che ruota hanno velocità uguali e contrarie. In virtù di tale proprietà, è possibile connettere tra loro più cerchi in modo tale che il secondo cerchio si muova in verso opposto al primo, il terzo nello stesso verso del primo e così via, «come quelli posti in alcuni templi»: si tratta della prima illustrazione che abbiamo del principio di funzionamento degli ingranaggi e del primo esempio attestato del loro utilizzo. Vediamo inoltre che il concetto di vantaggio meccanico è già espresso molto chiaramente, seppure in un linguaggio non matematico.

I seguenti punti sono particolarmente rilevanti ai fini della nostra ricostruzione:

1. Anche se l'opera non ha una struttura pienamente assiomatico-deduttiva, molte caratteristiche la qualificano come un precedente importante che va proprio in tale direzione. Anche se non si parla mai esplicitamente di ruote dentate, è evidente che i cerchi di cui parla l'autore sono degli enti teorici corrispondenti a degli ingranaggi.⁴⁸ Coerentemente, sin dal principio la meccanica è stata concepita in stretta connessione con la matematica, ritenuta essenziale nelle dimostrazioni che coinvolgono, appunto, enti teorici e non ingranaggi reali. Dal lessico matematico sono d'altra parte ripresi i termini specifici *προβλήματα* e *θεωρήματα*, che abbiamo già discusso, e, in parte, il metodo dimostrativo. È inoltre interessante il fatto che laddove una domanda non trovi risposta secondo il principio posto, quello del cerchio, l'autore lo dichiara placidamente: un passo di enorme importanza che marca la differenza tra una teoria scientifica e un generico sistema filosofico.⁴⁹
2. Anche in meccanica, come in geometria e in astronomia, il cerchio ha assunto subito un ruolo fondamentale. Vi è dunque una complessiva coerenza tra le strutture concettuali delle tre discipline.
3. È espresso chiaramente il fatto che in un ingranaggio i vari punti si muovono a diverse velocità: si tratta di una proprietà cruciale che, come vedremo, verrà utilizzata nella Macchina di Anticitera per ottenere moti non uniformi a partire da un input uniforme.

⁴⁸Il fatto che non si parli esplicitamente di denti ha portato alcuni storici ad interpretare gli strumenti di cui parla l'autore come "cerchi a frizione", curiosi oggetti che oltre a non avere alcun riscontro nel resto della storia della tecnologia, difficilmente potrebbero far muovere alcunché.

⁴⁹Si veda ad esempio il Problema 32 (Winter 2007, p. 34): «Why do objects thrown stop? Is it because the projective force leaves off? Counter-pull? Slope, if it be greater than the throwing force? Or is it foolish to mull such an impasse, absent the principle?».

Nel corso del III sec. a.C, i meccanici alessandrini svilupperanno molte delle idee esposte nelle *Questioni Meccaniche* e daranno all'arte meccanica una forma pienamente scientifica. In particolare numerose fonti riferiscono vari esempi di utilizzo di ruote dentate risalenti a questo periodo.⁵⁰

Particolarmente rilevante in questo campo fu il lavoro di Archimede: nonostante dei suoi scritti di meccanica ci sia pervenuto solo il trattato *Sull'equilibrio delle figure piane*, sappiamo da Pappo e Plutarco che aveva risolto il problema di calcolare la forza necessaria a sollevare un dato peso, cioè era in grado di costruire macchine con un vantaggio meccanico dato. Per quanto riguarda le connessioni tra problemi meccanici e problemi geometrici, i primi passi fatti da Archita troveranno un'esemplare continuazione nel *Metodo*, in cui Archimede utilizza sistematicamente considerazioni meccaniche nella deduzione di risultati geometrici che solo in un secondo momento saranno poi dimostrati rigorosamente «all'interno del contesto dimostrativo».⁵¹ A proposito del rapporto tra meccanica e geometria, osserviamo che tra il XVI e il XIX secolo è fiorita la ricerca intorno a congegni meccanici finalizzati alla costruzione di curve con particolari proprietà, spesso in connessione con particolari applicazioni tecnologiche.⁵² In effetti proprio in età moderna il termine *meccanica* ha assunto accanto al significato originario di *scienza delle macchine* anche quello di *studio del moto*. Conti riassume bene il profondo legame che sussiste in generale tra meccanica e geometria:⁵³

Il pantografo trasforma una curva in un'altra curva.⁵⁴ A ben pensarci, questo fatto è vero per tutti i meccanismi, anche quelli che non sono costruiti per disegnare curve, anche quelli il cui funzionamento non appare, a prima vista, minimamente legato ad alcuna curva. Se un punto del meccanismo segue un percorso "semplice" allora un altro punto può descrivere un altro percorso molto più complesso o difficile da ottenere direttamente, sì che vien voglia di dire che un meccanismo è *un congegno che trasforma una curva in un'altra curva*.

L'idea di ottenere curve complesse a partire da movimenti semplici raggiunse già in età ellenistica livelli di sviluppo notevolissimi proprio nella pratica della *sphairopoiia*, alla quale non a caso molte fonti associano proprio il nome di Archimede.⁵⁵ Proclo ci dice senza dare ulteriori dettagli che Archimede si dedicò a tale branca della meccanica,⁵⁶ mentre Pappo riferisce che secondo Carpo di Antiochia Archimede aveva composto un'unica opera di meccanica intitolata *Sulla Sphairopoiia*.⁵⁷ Tali testimonianze trovano un ulteriore riscontro in Cicerone,

⁵⁰J. Evans e C. C. Carman 2000.

⁵¹Archimede 2013, p. 101.

⁵²Un esempio su tutti è quello della macchina a vapore, in cui si vuole che un'asta si muova di moto rettilineo alternato con il minore attrito possibile. Una prima soluzione al problema fu data nel 1784 da James Watt, che utilizzò tre aste incernierate in cui gli unici punti fissi erano le estremità delle aste più esterne. Si veda Conti e Giusti 1992, pp. 36-39

⁵³Conti e Giusti 1992, p. 34.

⁵⁴Il pantografo è uno strumento da disegno che ingrandisce o rimpicciolisce di un certo fattore un disegno dato.

⁵⁵Evidentemente laddove si parli di moti è del tutto irrilevante che la curva ottenuta meccanicamente sia tracciata o meno su supporto cartaceo.

⁵⁶*Commento al I libro degli Elementi di Euclide*, 41, 16

⁵⁷*Collezioni Matematiche*, VIII, 3

che nel *De Republica* fa raccontare a Sulpicio Gallo che il generale Marcello a seguito del sacco di Siracusa portò a Roma come bottino due esemplari di *sphairopoia* costruiti proprio da Archimede: un globo celeste, che Marcello fece esporre pubblicamente nel tempio della Virtù, e un esemplare più complesso in cui erano mostrati i moti di Sole, Luna e pianeti e il meccanismo alla base delle eclissi.⁵⁸

L'invenzione di Archimede è da ammirarsi in quanto egli aveva escogitato in qual modo una sola *conversio* potesse riprodurre i diversi e vari percorsi, con moti tra loro contrastanti.

Anche nelle *Discussioni Tuscolane* Cicerone insiste sull'unicità del meccanismo del planetario di Archimede:⁵⁹

In realtà, quando Archimede racchiuse in una sfera i movimenti della Luna, del Sole e dei cinque pianeti, fece lo stesso di colui che nel *Timeo* edificò l'universo, il dio di Platone, e cioè che in un'unica *conversio* regolasse movimenti molto diversi per lentezza e velocità. E se questo nel nostro universo non può avvenire senza la divinità, neanche nella [sua] sfera Archimede avrebbe potuto imitare i medesimi movimenti senza un'intelligenza divina.⁶⁰

Fino a non molto tempo fa la testimonianza di Cicerone era stata accolta dagli studiosi con un certo scetticismo e inclusa nel novero della vasta aneddotica sulla figura di Archimede. La situazione è cambiata radicalmente quando nuovi studi condotti sulla Macchina di Anticitera hanno permesso di ricostruirne in dettaglio la struttura e il funzionamento, portando alla luce un meccanismo che rispecchia esattamente la descrizione data da Cicerone.

Alla luce di tutte le considerazioni fatte riteniamo che l'evoluzione dell'astronomia ellenistica tra il IV e il II sec. a.C. sia pienamente comprensibile solo se posta in connessione con gli sviluppi che nello stesso periodo interessarono la geometria, in quanto linguaggio nel quale l'astronomia era formulata, e la meccanica, in virtù del ruolo svolto dalla pratica della *sphairopoia*, prima ad un livello elementare con i globi celesti e successivamente mediante l'uso di ingranaggi complessi. Una visione del genere è del tutto coerente con l'omogeneità strutturale e metodologica che caratterizzava le tre discipline in età ellenistica e mostra in particolare che non è necessario ricorrere ad argomenti di carattere filosofico per spiegare l'adozione di moti circolari uniformi, una scelta tecnica fondamentale che affonda le sue radici nelle forme teoriche storicamente assunte dalla geometria e dalla meccanica. Le motivazioni filosofiche addotte da autori successivi appaiono dunque come interpretazioni personali fatte da chi, a secoli di distanza, descrive o fa uso di modelli della cui origine si era ormai persa memoria. Vedremo le profonde conseguenze che la personale interpretazione di Tolomeo ha avuto sullo sviluppo dell'astronomia occidentale.

⁵⁸ *De Republica*, I, 22. Traduzione tratta da Russo 2010, p. 109.

⁵⁹ *Tusculanae Disputationes*, I, XXV, 63.

⁶⁰ Russo (comunicazione privata) ha rintracciato in questa osservazione di Cicerone il primo apparire della metafora dell'orologio divino, che tanto successo avrà nei secoli successivi.

3.4 La Macchina di Anticitera

La Macchina di Anticitera, unico esemplare antico di *sphairopoia* parzialmente giunto fino a noi, è un congegno meccanico risalente al II sec. a.C. che rappresenta una prova diretta dell'altissimo livello raggiunto dalla tecnologia ellenistica. Originariamente la Macchina conteneva più di 30 ingranaggi, suddivisi in treni di varia estensione e azionati da un singolo input esterno.⁶¹ In totale ci sono rimasti 82 frammenti, che vanno da un'estensione minima di pochi millimetri a un massimo di 10 centimetri, che in origine erano parte dei meccanismi dedicati al Sole, alla Luna e ai cicli temporali mostrati sulla parte posteriore della Macchina.⁶² Le iscrizioni riportate in vari punti del congegno e la geometria complessiva del meccanismo indicano inequivocabilmente che originariamente erano mostrati anche i moti dei pianeti. La struttura meccanica era costituita da un unico ingranaggio più grande corrispondente al Sole, a cui erano connessi tutti gli altri treni secondari; l'unico input esterno era dato attraverso una manopola connessa a questo singolo ingranaggio principale.

In questo paragrafo, dopo aver descritto sommariamente le caratteristiche generali della Macchina di Anticitera, illustreremo più in dettaglio il funzionamento del cosiddetto *pin-slot device*, un meccanismo incluso tra i frammenti rimasti e che nella Macchina aveva l'obiettivo di riprodurre l'anomalia lunare. Tale espediente, che, come vedremo, riproduceva esattamente la teoria lunare di Ipparco (e ripresa da Tolomeo), realizzava meccanicamente il programma astronomico che Simplicio e altri tardi commentatori avevano fatto risalire a Platone: utilizzare moti circolari uniformi per riprodurre le anomalie dei moti celesti. Avremo così un esempio concreto dell'interazione che abbiamo discusso tra astronomia e *sphairopoia* e un'ulteriore dimostrazione del significato non metafisico del principio dei moti circolari uniformi. Vedremo infine come gli stessi stratagemmi meccanici utilizzati nel caso della Luna fossero naturalmente estendibili al caso dei pianeti, e le conseguenze di ciò sull'interpretazione generale della Macchina di Anticitera.⁶³

Aspetto, Funzioni e Finalità della Macchina

La Macchina di Anticitera era uno strumento portatile, di dimensioni contenute (330 mm in altezza x 180 mm in larghezza x 80 mm in profondità), costruito prevalentemente in bronzo, con un rivestimento esterno probabilmente in legno (Fig. 3.1). La Macchina aveva un fronte e un retro chiaramente individuati da delle aperture in cui erano alloggiate due placche in bronzo rimovibili che fungevano da copertura per la parte interna. Oltre a proteggere la parte principale del meccanismo, le coperture portavano inciso sulla parte interna una sorta di manuale d'istruzioni: sulla placca anteriore erano riassunti i fenomeni astronomici mostrati dalla Macchina, su quella posteriore erano descritte le funzioni dei vari quadranti e il modo in cui la macchina andava utilizzata. Ponendosi di fronte alla

⁶¹Si veda Seiradakis e Edmunds 2018 per uno schema completo degli ingranaggi.

⁶²Una descrizione dettagliata di tutti i frammenti è in Freeth, Jones et al. 2008

⁶³Per una panoramica generale molto aggiornata sulla Macchina di Anticitera si veda la revisione in Seiradakis e Edmunds 2018, dalla cui bibliografia sono tratte molte delle informazioni di questo paragrafo. Una bella monografia dedicata alla Macchina di Anticitera è Jones 2017



Figura 3.1: Riproduzione virtuale di come doveva apparire dall'esterno la Macchina di Anticitera. Immagine tratta da Seiradakis e Edmunds 2018.

Macchina, sulla destra c'era una manopola che, azionata dall'utente, metteva in moto contemporaneamente tutte le parti del meccanismo.

Sul lato anteriore (Fig. 3.2) vi erano sette lancette che mostravano i moti longitudinali di Sole, Luna e pianeti su una scala graduata, suddivisa in 12 sezioni di 30° corrispondenti ai segni zodiacali. All'esterno di questa prima scala ne era posta una seconda, che rappresentava il calendario egiziano e portava 365 incisioni divise in 12 mesi più 5 giorni intercalari. Come abbiamo già accennato, il calendario egiziano era usato spesso in astronomia in quanto aveva mesi e anni di durata fissa, e risultava dunque estremamente utile nel calcolo degli intervalli temporali, che erano dunque leggibili sulla scala calendariale più esterna attraverso il puntatore solare. Quest'ultimo, oltre a rappresentare la posizione del Sole lungo l'eclittica sulla scala zodiacale, scandiva così anche gli intervalli di tempo su cui erano calibrati tutti i moti mostrati dal meccanismo. Data la differenza tra anno egiziano e anno tropicale, che differivano di circa 6 ore, il primo "rimaneva indietro" di circa un giorno ogni quattro anni; per ovviare a questo problema, la scala più esterna era regolabile dall'utente, che poteva ruotarla liberamente per adattarla alla sottostante scala zodiacale. Sopra e sotto il quadrante principale era presente anche un *parapegma*, molto simile a quello incluso da Gemino nell'*Introduzione ai Fenomeni*, referenziato mediante una quarantina di lettere distribuite lungo tutta la scala zodiacale. La latitudine che meglio si adatta alle informazioni mostrate dal *parapegma* coincide con quella di Rodi.

Sul retro della Macchina (Fig. 3.3), in alto e in basso, c'erano due grandi spirali

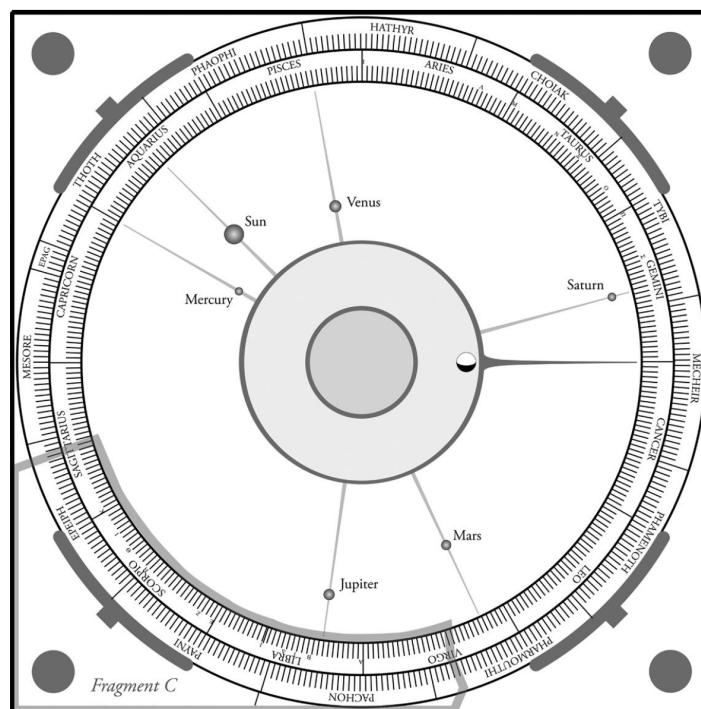


Figura 3.2: Il quadrante anteriore della Macchina di Anticitera con i puntatori di Sole, Luna e pianeti. Sono distinguibili la scala interna, con i nomi dei segni zodiacali, e quella esterna con i mesi del calendario egiziano. Immagine tratta da Jones 2017, p. 57.

incise su una superficie in bronzo che mostravano dei cicli temporali lunisolari. Entrambe erano percorse da due puntatori che funzionavano in maniera simile al lettore di un giradischi: i puntatori erano cioè liberi di scorrere radialmente su un supporto fissato e all'estremità portavano delle puntine che si inserivano nelle scanalature delle spirali. Azionando il meccanismo il puntatore ruotava e attraverso la puntina era obbligato a seguire l'andamento della propria spirale, allungandosi dall'interno verso l'esterno. Quando un puntatore arrivava al termine esterno della propria spirale, era l'utente a doverlo riportare manualmente alla posizione iniziale.

La spirale superiore era suddivisa in 235 celle corrispondenti ad altrettanti mesi lunari e rappresentava il ciclo di Metone. I nomi dei mesi riportati nella spirale erano quelli caratteristici del calendario di Corinto e delle relative colonie.⁶⁴ All'interno della spirale di Metone erano presenti anche due quadranti circolari più piccoli, entrambi divisi in quattro settori: uno rappresentava il ciclo di Callippo, pari a quattro cicli di Metone, e l'altro un ciclo di quattro anni associato ai giochi panellenici di Olimpia, Delfi, Nemea e Corinto. Oltre a questi erano riportati anche i giochi di Haileia, che si tenevano a Rodi. Trattandosi di giochi di minore importanza, questa è un'altra indicazione del legame della Macchina con quest'isola.

La spirale inferiore era suddivisa in 223 celle, anch'esse corrispondenti ai mesi

⁶⁴È interessante notare che prima dell'assedio romano tra le colonie di Corinto figurava anche Siracusa, dove fu attivo Archimede pochi decenni prima della fabbricazione della Macchina.

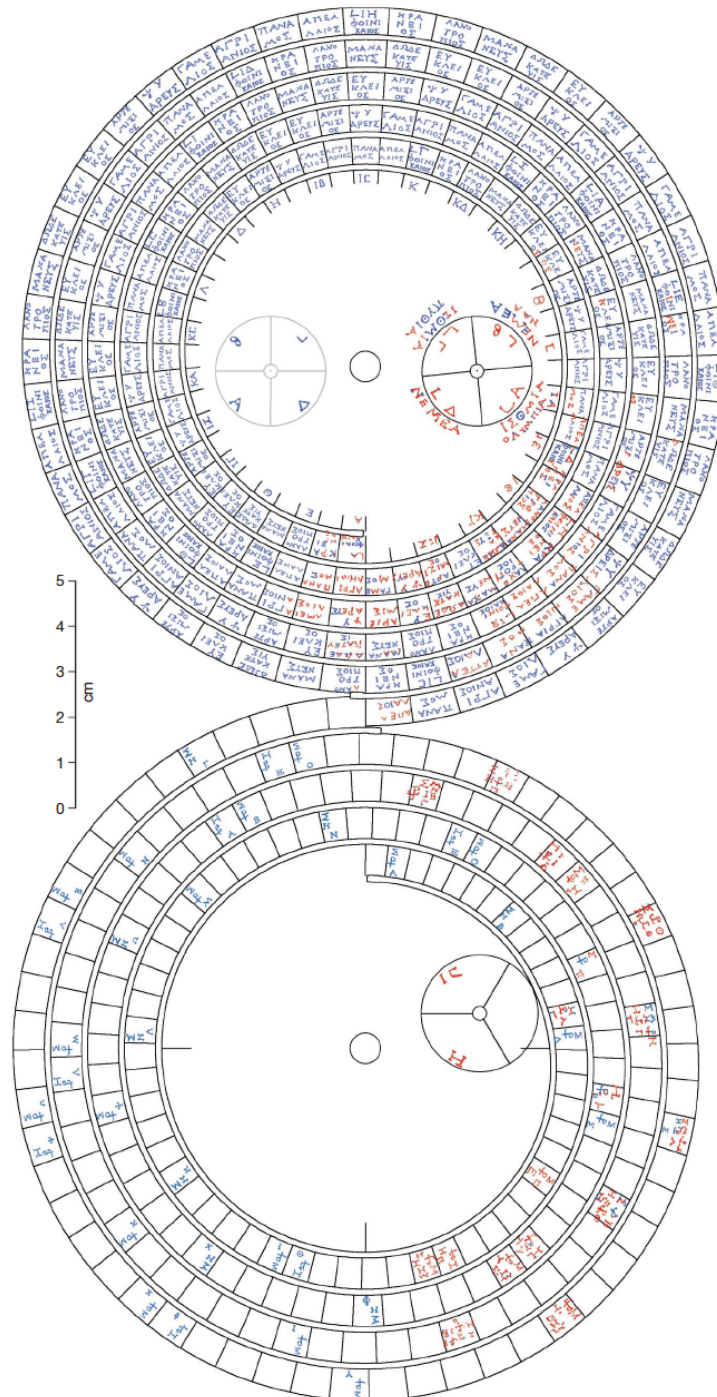


Figura 3.3: Le due spirali sul lato posteriore della Macchina di Anticitera. Immagine tratta da Freeth, Jones et al. 2008.

lunari, e rappresentava il ciclo di Saros. Il mese e l'ora di massimo delle eclissi di Sole e di Luna erano indicate da apposite scritte nelle celle opportune, alcune delle quali rimandavano informazioni aggiuntive fornite in altre iscrizioni poste al di sotto della spirale. Anche all'interno di questa era presente un quadrante ausiliario più piccolo che mostrava il ciclo di Exeligmos, un ciclo di 54 anni corrispondente a 3 cicli di Saros, diviso in 3 settori. Di questi il primo era vuoto e gli altri due riportavano i numeri 8 e 16: poiché un Ciclo di Saros era di circa 8 ore più breve di 223 mesi lunari esatti, il puntatore sul quadrante di Exeligmos indicava le ore da aggiungere all'orario mostrato nelle celle della spirale di Saros.

Come si vede, la Macchina di Anticitera forniva in maniera compatta una grande varietà di informazioni, alcune di interesse pratico (come i *parapegma*), altre relative a tradizioni portanti della cultura greca (come il calendario dei giochi panellenici) e altre di carattere prettamente astronomico. Certamente si trattava di un oggetto pregiato, come dimostra anche il resto del contenuto della nave che la trasportava, e la varietà di tecniche e conoscenze implicate nella progettazione e nella costruzione di un oggetto del genere suggeriscono che vi abbiano collaborato più persone (almeno due, a giudicare dal fatto che le iscrizioni sulla copertura posteriore sono di mano diversa da tutte le altre).

Sulle finalità della Macchina è possibile solo fare delle ipotesi. La maggioranza degli studiosi concorda sul fatto che la Macchina avesse soprattutto uno scopo didattico e/o divulgativo, incorporando lo stato dell'arte dell'astronomia consolidata dell'epoca. Soprattutto in un contesto pedagogico la Macchina avrebbe fornito un supporto prezioso, ma ovviamente non sostituibile alla formazione matematica necessaria ad aspiranti astronomi professionisti. A tal proposito, è stato notato un forte parallelismo tra le informazioni mostrate dalla Macchina e il contenuto dell'*Introduzione ai Fenomeni* di Gemino, un testo di livello elementare indirizzato probabilmente a giovani studenti che necessitavano solo di una formazione astronomica di base.⁶⁵ A conferma dell'uso non professionale della Macchina vi sono gli inevitabili difetti di costruzione di un congegno tanto complesso e alcuni limiti intrinseci della Macchina: sappiamo ad esempio che i denti degli ingranaggi avevano una forma triangolare, il che dava inevitabilmente dei problemi di incastro che andavano risolti muovendo il meccanismo in avanti ripetutamente. Ciò detto, la Macchina rappresentava senza dubbio uno strumento eccezionale capace in particolare di fornire previsioni senza necessità di ricorrere a riga, compasso o tavole numeriche e può a ragione essere considerato il più antico calcolatore di cui si abbia notizia.

Il *Pin-Slot Device*⁶⁶

Il *pin-slot device* che riproduceva l'anomalia lunare nella Macchina di Anticitera si componeva di quattro ingranaggi, che nello schema generale generalmente accettato sono indicati con le sigle e5, e6, k1 e k2 (Fig. 3.4). Nella Macchina questi quattro ingranaggi avevano tutti lo stesso numero di denti (50), ma condizione sufficiente al funzionamento del meccanismo è che siano uguali a due a due, cioè

⁶⁵Jones 2017, p. 238.

⁶⁶Il contenuto di questa sezione è tratto in gran parte da C. Carman, Thorndike e J. Evans 2012.

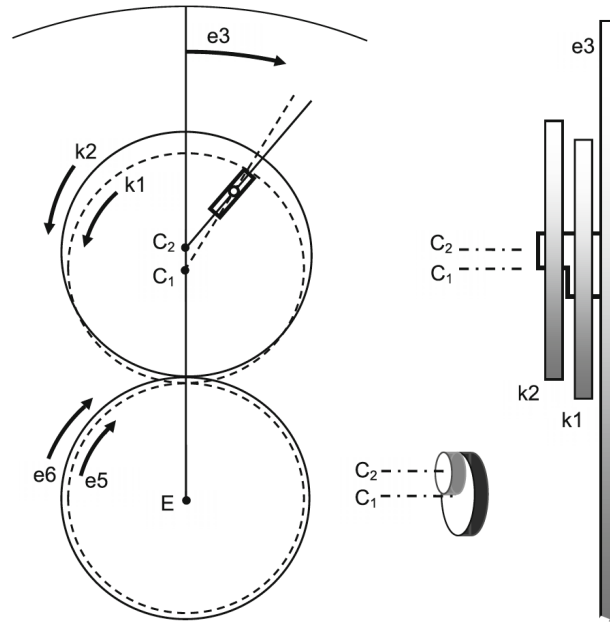


Figura 3.4: Il *pin-slot device* utilizzato nella Macchina di Anticitera per riprodurre l'anomalia lunare. Immagine tratta da C. Carman, Thorndike e J. Evans 2012.

che $e5 = k1$ ed $e6 = k2$. Gli ingranaggi $k1$ e $k2$ sono vincolati a un ingranaggio più grande, $e3$, concentrico a $e5$ ed $e6$ ma libero di ruotare indipendentemente da questi.

Per il momento supponiamo stazionario l'ingranaggio $e3$. L'input iniziale arriva da $e5$, che ruota alla frequenza siderale media della Luna, ω_{si} , e mette in moto $k1$ che quindi ruota intorno a C_1 alla stessa frequenza di $e5$. L'ingranaggio $k2$, di centro C_2 , è montato sopra $k1$ mediante un perno a gradino in modo tale che i due centri C_1 e C_2 siano leggermente sfalsati. L'ingranaggio $k1$ ha una puntina sporgente (il *pin*) che ingaggia una fessura radiale in $k2$ (lo *slot*), che viene così trascinato da $k1$ quando quest'ultimo è in movimento. A causa dell'eccentricità di $k1$ e $k2$, la puntina pur ruotando uniformemente (intorno a C_1), nel corso della rotazione si troverà a distanze variabili da C_2 , imprimendo così a $k2$ una rotazione *non* uniforme intorno al proprio centro. La rotazione di $k2$ risulterà più rapida quando la puntina si trova più vicino a C_2 (nella parte alta di Fig. 3.4) e più lenta quando si trova più lontano da C_2 (nella parte bassa di Fig. 3.4). L'effetto complessivo su $k2$ è dunque una variazione periodica quasi-sinusoidale della velocità angolare. Il moto non uniforme di $k2$ è trasmesso infine ad $e6$, centrato su E ma libero di ruotare indipendentemente da $e5$. Il risultato netto del *pin-slot device* è dunque quello di trasformare il moto uniforme in ingresso ($e5$) in un moto *non* uniforme intorno allo stesso asse ($e6$), imprimendo una variazione periodica di velocità.

L'anomalia generata attraverso il *pin-slot device* è equivalente a quella prevista da una generica teoria ad epicicli/eccentrici.

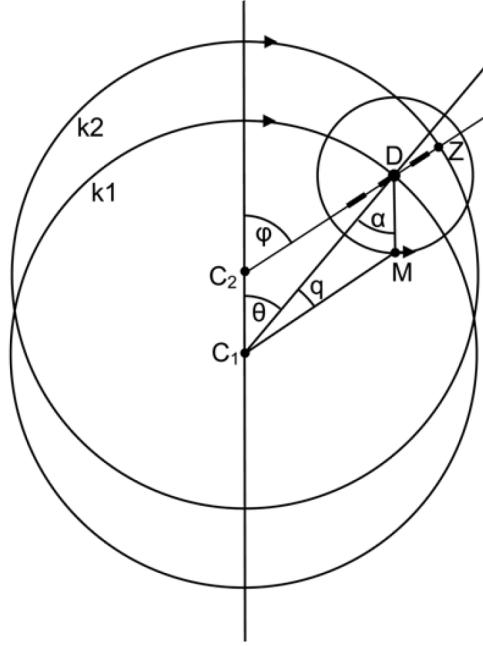


Figura 3.5: Dimostrazione dell'equivalenza tra *pin-slot device* e modello ad epicicli. Immagine tratta da C. Carman, Thorndike e J. Evans 2012.

Per dimostrare tale equivalenza, cominciamo considerando il modello ad epicicli mostrato in Fig. 3.5. C_1 è la posizione della Terra, il cerchio $k1$ è il deferente della Luna e il punto D si muove in senso orario alla frequenza siderale media della Luna ω_{si} , corrispondente a un mese siderale medio; l'angolo θ quindi cresce linearmente nel tempo. La Luna è rappresentata dal punto M , che si muove lungo l'epiciclo in senso antiorario alla stessa velocità angolare di D , sicché in ogni istante $\alpha = \theta$. L'angolo q è detto da Tolomeo *prostaferesi* ed è pari alla differenza tra le posizioni angolari di M e di D (visti dalla Terra). La Luna è osservata nella direzione C_1M e si trova quindi ad un angolo rispetto all'apogeo pari a $\theta + q$.

Supponiamo ora che la stessa figura rappresenti il *pin-slot device* della Macchina di Anticitera: $k1$ ruota uniformemente intorno a C_1 e D rappresenta il perno che ingaggia l'ingranaggio $k2$ e scorre lungo la fessura in direzione C_2D . Se nel *pin-slot device* si usa una distanza C_1C_2 uguale a DM , cioè pari al raggio dell'epiciclo nel relativo modello geometrico, si forma un parallelogramma C_2DMC_1 che pur cambiando forma durante la rotazione manterrà sempre valida la relazione $\phi = \theta + q$. In altri termini, il moto angolare di Z visto da C_2 sarà uguale al moto di M visto da C_1 , cioè l'ingranaggio $k2$ riproduce esattamente il moto angolare della Luna nel modello ad epicicli così com'è osservato dalla Terra.

Il modello ad epicicli mostrato in Fig 3.5 è equivalente ad un modello eccentrico in cui la Luna si muove di moto uniforme intorno a un punto C_3 posto al di sotto di C_1 , a patto che l'eccentricità della Luna sia pari al raggio dell'epiciclo, cioè che $C_1C_3 = DM$ (Fig. 3.6). Analogamente al caso precedente, si forma anche qui un parallelogramma C_1DMC_3 e per un osservatore posto in C_1 risulteranno

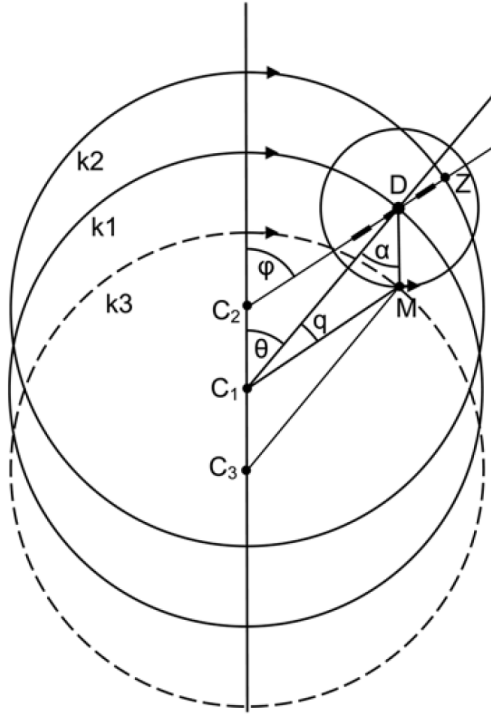


Figura 3.6: Dimostrazione dell'equivalenza tra *pin-slot device* e modello ad eccentrici. Immagine tratta da C. Carman, Thorndike e J. Evans 2012.

equivalenti i moti angolari di M lungo l'epiciclo e lungo la circonferenza k3. Per la proprietà transitiva concludiamo che il *pin-slot device* riproduce gli stessi moti angolari di un modello eccentrico.

La teoria lunare di Ipparco era basata su un modello ad epicicli come quello descritto e includeva anche la rotazione uniforme della linea degli apsidi. Nella teoria il periodo dell'anomalia lunare, il cosiddetto mese *anomalistico*, era dato dal tempo impiegato dalla Luna per tornare nella stessa posizione *rispetto alla Terra*, cioè ad esempio per andare da apogeo ad apogeo. In virtù dell'avanzamento della linea degli apsidi il mese anomalistico è quindi leggermente più lungo del mese *siderale*, definito invece dal ritorno della Luna nella stessa posizione *rispetto alle stelle fisse*.⁶⁷ Nella Macchina di Anticitera la linea degli apsidi era rappresentata dall'ingranaggio e3, e il periodo dell'anomalia era ottenuto semplicemente montando gli ingranaggi k1 e k2 direttamente sopra e3 (Fig. 1.4). Tale ingranaggio si muoveva ad una frequenza ω_A corrispondente alla velocità di rotazione della linea degli apsidi lunare, in direzione *opposta* a quella di k1 e k2, sicchè in un riferimento esterno k1 ruotava alla frequenza $\omega_{si} - \omega_A = \omega_{an}$. L'ingranaggio e3 aveva dunque la funzione di convertire il mese siderale in mese anomalistico;

⁶⁷Facciamo presente che nessuno di questi due periodi coincide con il mese lunare comunemente adottato, detto mese *sinodico*, che riguarda il tempo di ritorno della stessa fase lunare e dunque dipende dalle posizioni relative di Terra, Sole e Luna. Questo è il mese usato normalmente nei calendari e mostrato sulla Macchina di Anticitera dalle due spirali posteriori. Secondo le stime moderne i valori medi dei tre periodi sono i seguenti: mese sinodico $\simeq 29.530588$ giorni, mese siderale $\simeq 27.321661$ giorni, mese anomalistico $\simeq 27.554551$ giorni. Come si vede, gli ultimi due differiscono di meno di 6 ore.

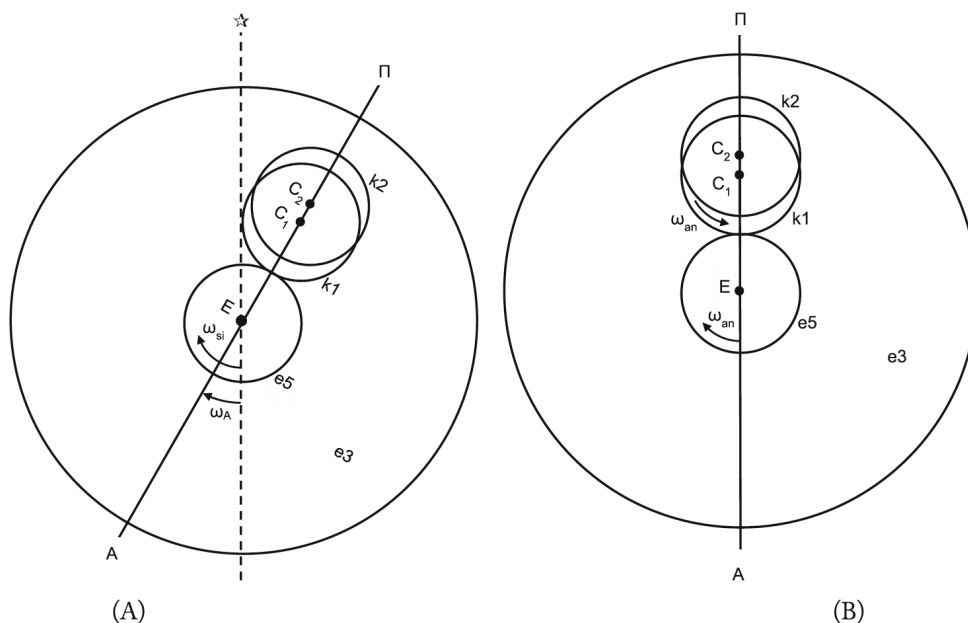


Figura 3.7: (A) Il *pin-slot device* nel visto nel sistema di riferimento della scatola che contiene la il meccanismo. (B) Lo stesso meccanismo nel sistema di riferimento dell'ingranaggio e3 in cui la linea degli apsi AOCII è stazionaria. Immagine tratta da J. Evans e C. C. Carman 2000.

come si vede, lo stratagemma consiste essenzialmente nel generare il moto di $k1$ direttamente nel sistema di riferimento mobile individuato dalla linea degli apsi. Concludiamo quindi che il *pin-slot device* nella Macchina di Anticitera costituiva una rappresentazione meccanica completa della teoria lunare di Ipparco.

Una domanda che potrebbe sorgere a questo punto è la seguente: sono venuti prima i modelli ad eccentrici/epicicli o il *pin-slot device*? Alla luce di quanto detto nei paragrafi precedenti, riteniamo che la domanda sia mal posta. Non è possibile infatti a nostro avviso determinare una sola direzione di influenza tra la meccanica e l'astronomia, ma le due discipline vanno viste come strettamente interagenti e connesse l'una all'altra. Ci limitiamo ad evidenziare alcuni aspetti che emergono dal confronto tra modello geometrico e modello meccanico.

Entrambi gli espedienti, come si è visto, risolvono il problema generale di ottenere moti non uniformi utilizzando solo moti circolari uniformi, ma non sono tuttavia del tutto equivalenti. I modelli ad eccentrici/epicicli prevedono infatti una variazione della distanza della Luna-Terra che dovrebbe risultare in una variazione periodica delle dimensioni apparenti della Luna molto maggiore di quella effettivamente osservabile; il *pin-slot device* risolve questo problema trasferendo il moto non uniforme su una circonferenza centrata sulla Terra, dunque il risultato era un moto circolare a velocità variabile. Possiamo dire dunque che la soluzione meccanica è in questo caso più accurata di quella geometrica, o meglio, in un approccio strumentale, che la Macchina mostrava solo ed esclusivamente i fenomeni che la teoria si proponeva di salvare, eliminando ciò che le era estraneo, ovvero le variazioni di distanza.

Notiamo inoltre che mentre l'introduzione di eccentrici ed epicicli è avvolta nel

mistero e sappiamo di un loro uso in epoca ellenistica solo da fonti successive di dubbia attendibilità, le già discusse *Questioni Meccaniche* contengono *in nuce* tutti gli ingredienti necessari all'implementazione del *pin-slot device*. Oltre all'ovvia concatenazione di ingranaggi, il perno di k_1 che ingaggia la fessura scorrendo lungo il raggio di k_2 sfrutta esattamente la proprietà del cerchio evidenziata esplicitamente dall'autore delle *Questioni Meccaniche*.⁶⁸

Nessuna coppia di punti su una linea tracciata come raggio dal centro si muove allo stesso passo, ma quello che si trova più lontano si muove più rapidamente: a questo che sono dovute molte delle notevoli proprietà che sorgono dal movimento del cerchio.

Riconosciuta questa proprietà fondamentale, non era così lontana l'idea di utilizzare un movimento continuo lungo il raggio per far muovere un dato cerchio ad un velocità variabile nel tempo, esattamente come avviene nel *pin-slot device* e come richiede una descrizione dei moti planetari.

Ipparco e i Moti Planetari

È impossibile determinare con certezza chi abbia progettato e costruito la Macchina di Anticitera. La data di costruzione, il probabile luogo di partenza della nave che la trasportava, i riferimenti a Rodi e il fatto che la Macchina incorporava la teoria lunare di Ipparco rendono inverosimile che questi non vi fosse legato in qualche modo. Abbiamo visto inoltre che in base alla testimonianza di molte fonti pretolemaiche Ipparco era giunto nell'ultima parte della sua vita ad elaborare una teoria planetaria eliocentrica. Questa circostanza è compatibile con le caratteristiche della Macchina di Anticitera?

Ribadiamo innanzitutto che l'obiettivo di un congegno come la Macchina di Anticitera era chiaramente quello di mostrare i moti osservati dalla Terra, e non sarebbe stato di alcuna utilità mostrare i moti planetari in un qualunque altro sistema di riferimento. Inoltre come sul piano dei fenomeni il discrimine tra geocentrismo ed eliocentrismo deve cercarsi sul piano dinamico, analogamente se vogliamo indagare la natura della teoria riflessa nella Macchina dobbiamo concentrarci non tanto su come i moti erano *mostrati*, bensì su come questi erano *generati*. In altri termini ciò che conta è la struttura meccanica, in particolare quella dei meccanismi relativi ai moti planetari.

Come abbiamo già detto, gli ingranaggi originariamente dedicati alla rappresentazione dei moti planetari non sono sopravvissuti, ma recentemente sono state avanzate diverse proposte su come un meccanismo planetario avrebbe potuto integrarsi all'interno della Macchina. Tra le ricostruzioni proposte, ci riferiremo a quella di C. Carman, Thorndike e J. Evans (2012), che ha il pregio di utilizzare esattamente gli stessi espedienti che erano certamente utilizzati nel caso della Luna, e si è dimostrata capace di riprodurre le retrogradazioni planetarie nel caso di Marte.⁶⁹

⁶⁸Winter 2007, p. 2.

⁶⁹Si veda Wright 2012 per una panoramica delle ricostruzioni sinora proposte.



Figura 3.8: Il Frammento A della Macchina di Anticitera, in cui è riconoscibile l'ingranaggio solare a quattro bracci.

Il primo ingrediente è ovviamente il *pin-slot device*, necessario a generare le variazioni di velocità. Nel caso della Luna il fatto che l'anomalia da riprodurre fosse relativa alla linea degli apsi si rifletteva nel fatto che gli ingranaggi k1 e k2 erano montati direttamente sull'ingranaggio e3, che fungeva da sistema di riferimento rispetto al quale si generava l'anomalia. Un elemento su cui tutti gli studiosi concordano è che il meccanismo planetario fosse connesso direttamente all'ingranaggio centrale, essenzialmente per motivi legati allo spazio disponibile: è evidente cioè che *manca qualcosa* proprio in prossimità dell'ingranaggio principale. Nella ricostruzione di Carman et al. il meccanismo planetario non è semplicemente collegato a quello principale, ma vi era direttamente *montato sopra*, sicché l'ingranaggio solare (indicato nello schema generale con la sigla b1) svolge per i pianeti un ruolo analogo a quello svolto dalla linea degli apsi (ingranaggio e3) rispetto alla Luna. L'ingranaggio b1 all'interno non è pieno, ma ha una struttura a croce composta da quattro bracci, come la ruota di un carrozza (vedi Fig. 3.8): la ricostruzione di Carman et al. giustifica tale economia, poiché tre bracci sono dedicati ai pianeti esterni e il quarto ai due pianeti interni. Analogamente al caso lunare, dunque, l'ingranaggio solare definisce il sistema di riferimento in cui viene generata l'anomalia. Anche se questo aspetto non è evidenziato da Carman et al., un meccanismo come quello da loro proposto sarebbe una forte indicazione dell'esistenza di un modello eliocentrico sottostante la progettazione della macchina, un modello cioè in cui le retrogradazioni sono legate *causalmente* alle posizioni relative di pianeta, Sole e Terra.

Più in generale, osserviamo che laddove si vogliano mostrare *contemporaneamente* tutti i moti planetari attraverso un unico input, ciò che è essenziale sono i rapporti tra i periodi dei vari pianeti, che si traducono nei treni di ingranaggi che li realizzano meccanicamente. L'input iniziale dato dall'utente definisce quindi l'unità di misura temporale fondamentale rispetto alla quale tutti i moti rappresentati devono essere espressi. Se sul piano teorico le unità di misura sono tutte tra di loro equivalenti, è evidente che sul piano meccanico non tutte le scelte sono realizzabili con la stessa facilità. L'anno solare definisce ovviamente l'unità di misura più naturale, essendo l'unico parametro che compare nella descrizione geocentrica di tutti i moti planetari, e nella Macchina di Anticitera, come abbiamo già detto, l'unico input era dato proprio all'ingranaggio solare. Non è un caso, d'altra parte, che dopo la Macchina di Anticitera bisognerà aspettare l'affermarsi della teoria eliocentrica all'inizio dell'età moderna per essere di nuovo in grado di costruire dei planetari.

Alla luce di tutte queste considerazioni, non possiamo far altro che considerare la Macchina di Anticitera un'ulteriore indicazione (che si aggiunge a quelle già discusse precedentemente) dell'esistenza di una teoria eliocentrica risalente al II sec. a.C., coerentemente con le evidenze circostanziali che legano la costruzione della Macchina al nome di Ipparco.

3.5 Tolomeo e la *Sphairopoia*

Possiamo ora tornare a parlare di Tolomeo e dell'*Almagesto*, riprendendo la domanda che abbiamo lasciato in sospeso all'inizio di questo capitolo: Tolomeo sapeva dell'esistenza di oggetti come la Macchina di Anticitera?

La risposta ce la dà lo stesso Tolomeo nelle *Ipotesi Planetarie*. Nell'introduzione dell'opera Tolomeo si rivolge a Siro, lo stesso destinatario dell'*Almagesto*, ricapitolando quanto fatto nell'opera precedente:⁷⁰

We have worked out, Syrus, the models (υποθησεις) of heavenly motions through the books of the *Mathematical Syntaxis*, demonstrating by arguments, concerning each example, both the logicity and agreement everywhere with the phenomena, with a view to a presentation of uniform and circular motion which necessarily was to arise in things taking part in eternal and orderly motion and that are not capable to undergo increase or decrease in any way.

Qui abbiamo un ulteriore esempio dell'uso fatto da Tolomeo del termine *ipotesi* e della sua personale interpretazione metafisica dei moti circolari uniformi. Tolomeo continua specificando l'obiettivo che si propone nelle *Ipotesi Planetarie*:

Here we have taken on the task to set out the thing itself briefly, so that it can be more readily comprehended by both ourselves and by those choosing to arrange the models in an instrument (οργανοποιων), either doing this in a more naked way by restoring each of the motions to its respective epoch by hand, or through a mechanical approach, combining the models with one another and with the motion of the whole.

⁷⁰Hamm 2011, pp. 44-45.

Tolomeo si propone quindi di fornire indicazioni utili a rappresentare meccanicamente i modelli da lui precedentemente elaborati nell'*Almagesto* e sottolinea che ciò risulta utile anche a "noi stessi", presumibilmente riferendosi a chi ha una formazione matematica che gli permette di comprendere tali modelli anche a prescindere da una loro visualizzazione concreta. Tolomeo distingue esplicitamente due possibilità di realizzazione: una in cui le singole parti sono mosse a mano dall'utente, l'altra, più "meccanica", in cui tutte le parti si muovono contemporaneamente, come accade nella Macchina di Anticitera.⁷¹

Subito dopo Tolomeo ci fa capire che quella di rappresentare meccanicamente i moti celesti era una pratica comune, criticando il modo in cui la *sphairopoiia* era praticata solitamente:

Indeed, this is not the accustomed manner of *sphairopoiia*; for this [sort of manner], apart from failing to represent the models, presents the phenomenon only, and not the underlying [reality], so that the craftsmanship, and not the models, becomes the exhibit. But rather [the manner] where the different motions under our view are arranged together with the anomalies that are apparent to observers and subject to uniform and circular courses, even if it is not possible to intertwine them all in a way that is worthy of the aforementioned, but [instead] having to exhibit each [model] separately in this way.

Poiché Tolomeo si propone di rappresentare i moti celesti esattamente come sono descritti dai suoi modelli, si risolve ad utilizzare la versione più semplice della *sphairopoiia*.⁷²

Concerning the positions and arrangement of the circles causing the anomalies, we will apply the simpler version in respect to the method of instrument-making (*οργανοποιας*), even if some small variations will follow, and moreover we fit the motions to the circles themselves, as if they are freed from the spheres that contain them so that we can gaze upon the visual impact of the models bare and unconcealed.

La descrizione della *sphairopoiia* criticata da Tolomeo rispecchia esattamente il funzionamento della Macchina di Anticitera, che all'esterno rappresentava «solamente i fenomeni» e all'interno conteneva combinazioni di ingranaggi estremamente complesse «che esibivano l'abilità del costruttore». Assumeremo quindi la Macchina di Anticitera come modello di riferimento per i congegni cui fa riferimento Tolomeo. Si impongono a questo punto una serie di considerazioni.

Innanzitutto Tolomeo conosceva bene la pratica della *sphairopoiia* e dalla descrizione che ne dà non sembra stia parlando di cose lette o sentite: verosimilmente aveva visto personalmente e avuto la possibilità di studiarne in dettaglio uno o

⁷¹Il termine utilizzato da Tolomeo, *organopoiia*, richiama una simile distinzione tra *organi* e *macchine* fatta già da Vitruvio nell'Introduzione al Libro X del *De Architectura*.

⁷²D'altra parte il fatto che i moti siano ottenuti tutti da un unico input mobile è intrinsecamente in contrasto con l'idea aristotelica del primo motore immobile, cui Tolomeo aderisce. Del resto, come evidenzia Hamm (2016, p. 423), pur scegliendo la via più semplice Tolomeo dà solo istruzioni molto sommarie, indice del fatto che lui stesso non fosse in grado di costruire quello che proponeva ai suoi lettori.

più esemplari. Mentre ad esempio la testimonianza di Cicerone è evidentemente quella di qualcuno che abbia al più visto l'oggetto in funzione, dall'esterno, le parole di Tolomeo suggeriscono che quest'ultimo abbia avuto la possibilità di osservarne la complessa struttura interna. Non abbiamo alcuna notizia di congegni ad ingranaggi di questo tipo risalenti al II sec. d.C., ma verosimilmente all'epoca di Tolomeo si erano perse da tempo le conoscenze tecniche necessarie alla costruzione di un planetario come quello di Anticitera. Di conseguenza dobbiamo supporre che si trattava di oggetti risalenti al più tardi al I sec. a.C., periodo in cui abbiamo notizia da Cicerone di un planetario utilizzato o costruito da Posidonio.⁷³

Non è difficile immaginare che un planetario potesse sopravvivere più facilmente di un testo astronomico specialistico in cui si discutevano i moti planetari. Si è già detto d'altra parte come opere divulgative facilmente fruibili si tramandarono meglio dei testi di carattere tecnico, e un planetario utilizzabile semplicemente per fare delle dimostrazioni rientrerebbe nella stessa dinamica. Nel caso della Macchina di Anticitera, come si è visto, si trattava di uno strumento che non richiedeva particolari conoscenze per essere utilizzato e apprezzato, e non a caso al momento del naufragio che ne ha permesso la parziale sopravvivenza la Macchina era in viaggio quasi un secolo dopo la sua fabbricazione. Il fatto che fosse trasportata insieme ad altri oggetti di grande pregio, unito alla testimonianza di Cicerone sul bottino del generale Marcello, indica che il valore materiale e ornamentale di un planetario fosse riconoscibile anche da chi non ne comprendeva pienamente il valore scientifico, che d'altra parte nei dintorni di Roma nel 60 a.C. probabilmente nessuno avrebbe potuto apprezzare. Notiamo inoltre che dopo la diffusione dell'astrologia in tutto il Mediterraneo durante il I sec. a.C., un meccanismo capace di prevedere i moti planetari non poteva che assumere un valore inestimabile per la compilazione degli oroscopi. Ricordiamo che Tolomeo all'astrologia dedicò il *Tetrabiblos*.

Chiaramente la difficoltà più grande nell'accettare l'idea che Tolomeo avesse a disposizione un meccanismo simile alla Macchina di Anticitera sorge dalla sua esplicita affermazione sull'inesistenza di una teoria planetaria. Abbiamo già notato la contraddizione presente nell'*Almagesto* tra il «non aver nemmeno iniziato» a elaborare una teoria planetaria e i risultati di Ipparco elencati dallo stesso Tolomeo, che qui sembra contraddirsi nuovamente. Tuttavia se dal nostro punto di vista risulta impensabile costruire un planetario senza avere a disposizione un modello teorico, non è detto che lo stesso fosse vero agli occhi di Tolomeo.

Un congegno come la Macchina di Anticitera costituiva in effetti la realizzazione più piena del programma dell'astronomia ellenistica di *salvare i fenomeni*. Tuttavia nella visione realista di Tolomeo ciò evidentemente non era sufficiente a considerare un congegno come la Macchina una rappresentazione *fedele* dei moti planetari. Un fatto del genere non sorprende, alla luce di quanto detto sul rapporto tra modelli

⁷³ *De Natura Deorum*, II, XXXIV, 88. Il fatto che il livello astronomico di Posidonio sembri incompatibile con il contenuto astronomico di un planetario non smentisce necessariamente questa testimonianza, poiché la copia di un oggetto meccanico può farsi per imitazione senza bisogno di intenderne il contenuto scientifico e il fatto che Posidonio fosse attivo a Rodi lo pone in continuità con gli ultimi astronomi ellenistici di cui abbiamo notizia, attivi nella regione del Mediterraneo orientale. Tuttavia una trasmissione di conoscenze tanto complesse per pura imitazione non può che morire nell'arco di un paio di generazioni.

(ipotesi) e realtà (fenomeni) in Tolomeo, per il quale una *vera* rappresentazione non avrebbe dovuto "solamente" *salvare i fenomeni*, ma anche (e soprattutto) *esibire le ipotesi*, che costituivano affermazioni sulla «realtà sottostante». Ci sembra che la critica di Tolomeo alla *sphairopoia* costituisca a tal proposito una dichiarazione epistemologica difficilmente equivocabile, e denoti più chiaramente che mai il profondo regresso metodologico che lo separa dai suoi predecessori ellenistici. D'altra parte l'approccio realista di Tolomeo si manifesterà limpidamente nel seguito delle *Ipotesi Planetarie*, quando costruirà il suo modello cosmologico basato sulla concatenazione degli epicicli dei vari pianeti. Si ha dunque la curiosa sensazione che proprio quella che ad occhi moderni appare la genialità di un congegno come la Macchina di Anticitera, considerato oggi il più antico calcolatore di cui si abbia notizia, costituisca per Tolomeo motivo di insoddisfazione.⁷⁴ Questa distorsione è un'ovvia conseguenza del fatto che mentre la scienza moderna è figlia di un recupero della scienza ellenistica, con cui si trova quindi in continuità, è evidente che a Tolomeo mancano gli strumenti concettuali per apprezzare un congegno che è il prodotto di una cultura scientifica e tecnologica fuori dalla sua portata, a causa del tracollo culturale che da questa lo separa.

È dunque verosimile che Tolomeo non avrebbe considerato la Macchina di Anticitera una testimonianza dell'esistenza di una teoria planetaria. Tuttavia, se come stiamo assumendo Tolomeo ebbe la possibilità di osservare e studiare la struttura meccanica di un planetario, alla luce di tutti i dubbi emersi a proposito delle procedure da lui adottate nella costruzione dei suoi modelli astronomici, non possiamo non porci la domanda: è possibile che Tolomeo abbia tratto le caratteristiche generali della sua teoria astronomica dallo studio di un congegno simile alla Macchina di Anticitera? Diversi altri elementi sembrano indicare una risposta affermativa.

Anomalie, Deferenti ed Epicicli

Nell'*Almagesto* Tolomeo ascrive ai pianeti due anomalie: un'anomalia «rispetto allo zodiaco», dipendente dalla longitudine media, e un'anomalia «rispetto al Sole», dipendente dalla posizione relativa di Sole e pianeta. La prima è responsabile del moto non uniforme del centro del deferente, ed è ascritta all'eccentricità di quest'ultimo rispetto alla Terra. La seconda è responsabile delle retrogradazioni ed è descritta mediante epicicli. L'espressione «anomalia rispetto al Sole» solitamente si interpreta come un'allusione al fatto che le retrogradazioni avvengono sempre quando il pianeta si trova in opposizione rispetto al Sole, una circostanza ovvia in un modello eliocentrico che nell'*Almagesto* viene implementata mediante le relazioni di parallelismo che abbiamo già discusso.⁷⁵ La ricostruzione dei meccanismi planetari della Macchina di Anticitera proposta da Carman et al. si basa precisamente su questa circostanza e infatti gli autori sottolineano esplicitamente che⁷⁶

⁷⁴È un po' come se oggi qualcuno aprendo un televisore si lamentasse del fatto di non trovarvi dentro persone in carne ed ossa.

⁷⁵vedi *supra* par. 2.5

⁷⁶J. Evans e C. C. Carman 2000, pp. 162-163.

non è necessario sapere nulla di epicicli ed eccentrici per giungere a tale soluzione meccanica. È sufficiente sapere che il moto retrogrado di un pianeta è *un'anomalia rispetto al Sole* e che il *pin-slot device* può essere usato per introdurre un'oscillazione in un movimento uniforme.

Come abbiamo visto, Carman et al. di fatto interpretano letteralmente l'espressione «anomalia rispetto al Sole» montando il *pin-slot device* direttamente sull'ingranaggio solare, che definisce il sistema di riferimento in cui viene generata l'anomalia. È curioso che la loro soluzione si basi sulla realizzazione concreta di una locuzione utilizzata da Tolomeo tre secoli dopo la costruzione della Macchina. Questa scelta lessicale è in realtà abbastanza oscura, poiché con «anomalia rispetto al Sole» Tolomeo indica in generale l'intero moto lungo l'epiciclo e fa riferimento esplicito alla posizione del Sole solo quando deve indicare il punto medio delle retrogradazioni. L'espressione diventa invece chiarissima se si immagina che Tolomeo l'abbia dedotta dall'osservazione di un meccanismo simile a quello proposto da Carman et. al., in cui effettivamente il moto dei pianeti è in ogni istante «anomalo rispetto al Sole», che è rappresentato dall'ingranaggio sottostante.⁷⁷

Sempre sul piano lessicale, ricordiamo che nell'*Almagesto* non esiste alcun termine specifico per indicare il *deferente*, che è una parola di origine medievale. Tolomeo parla in realtà solamente del "cerchio che trasporta l'epiciclo". Il verbo utilizzato da Tolomeo è $\varphi\epsilon\rho\epsilon\iota\nu$, che significa appunto "portare, trasportare", ed era utilizzato in contesto meccanico per indicare il trasporto di *qualcosa*. Ad esempio è ricorrente nelle *Questioni Meccaniche*, dove viene usato anche l'analogo sostantivo $\varphi\omicron\rho\alpha$ per indicare il "trasporto di qualcosa sulle spalle".⁷⁸ Considerato che nella visione di Tolomeo i moti circolari sono i moti naturali dei corpi celesti (nell'*Almagesto*) o eventualmente dovuti all'anima che li muove (nelle *Ipotesi Planetarie*), è evidente che per lui nulla dovrebbe *trasportare* alcunché. Dobbiamo intendere quindi l'espressione di Tolomeo come una metafora, che come tutte le metafore si deve basare su un riferimento concreto, quello che Jaynes chiama il *metaferente*.⁷⁹ Anche qui, la scelta lessicale diventa chiara se si immagina che Tolomeo avesse in mente effettivamente degli ingranaggi che *trasportavano* altri ingranaggi. D'altra parte ciò è coerente con l'uso del termine *epiciclo*, che letteralmente significa "il cerchio che sta sopra", e si adatta perfettamente all'immagine di un ingranaggio che "sta sopra" un altro ingranaggio.

Si potrebbe obiettare che anche altri autori utilizzano la stessa terminologia. Se si escludono gli autori posteriori a Tolomeo, l'unico che resta (a quanto ci risulta) è Teone di Smirne, un suo contemporaneo.

Ricordiamo che nell'*Almagesto* Tolomeo afferma di aver ricevuto alcune osservazioni astronomiche da un certo Teone, che alcuni studiosi hanno identificato proprio con Teone di Smirne,⁸⁰ il che indicherebbe un rapporto diretto tra i due. Anche se tale identificazione è incerta, sono evidenti le analogie tra le loro

⁷⁷Per una discussione sull'uso ambiguo di Tolomeo del termine *anomalia* si veda G. J. Toomer 1984, p. 21.

⁷⁸cfr. ad esempio il Problema 29. Per una discussione generale si veda la nota 5 in Winter 2007, p. 4. Abbiamo già incontrato il termine $\varphi\omicron\rho\alpha$ nel passo di Plutarco, dove l'abbiamo tradotto come "spinta" (vedi *supra*, par. 1.5).

⁷⁹Jaynes 1976, p. 71.

⁸⁰Si veda ad esempio Pedersen 1974, p. 13 e relativa nota di Jones a p. 455.

impostazione filosofiche, in particolare a proposito del principio dei moti circolari uniformi che come abbiamo visto era assunto anche dal loro contemporaneo Sosigene. Nella sua opera Teone espone in maniera qualitativa molte delle idee sviluppate matematicamente da Tolomeo, ed è qui che si trovano i già menzionati riferimenti alla *sphairopoia*. È interessante notare poi che anche in Teone sono riconoscibili tracce di eliocentrismo:⁸¹

For in animate beings, the life center, that is to say, of the animal, as a living thing, is different from the center of the body. For example, for us who are, as we have said, both humans and alive, the center of life is in the always warm and always moving heart, and because of this the source of all the faculties of the soul, the cause of life and of all movement from one place to another, the source of our desires, of our imagination and intelligence. The center of our body is different: it is situated towards the navel. Likewise, if we judge the largest, most worthy and most divine things, like the smallest, fortuitous and mortal, the center of the body of the universal world will be the cold and immobile earth, but the center of the world, judging it as world and as a living thing, will be in the sun which is in some way the heart of the universe and in which it is said the soul of the world took birth in order to penetrate and extend itself to its furthest ends.

Considerando tutti questi elementi, ci sembra difficile considerare Tolomeo e Teone di Smirne del tutto indipendenti l'uno dall'altro, e riteniamo che la nostra analisi possa applicarsi ugualmente a entrambi.

Deferente o Quadrante?

Nell'*Almagesto* Tolomeo si propone di descrivere solo i moti angolari dei corpi celesti come sono osservati dalla Terra, senza considerare in alcun modo le distanze non essendoci a suo avviso alcun modo di determinarle. Ritene infatti che l'unico modo possibile per misurare le distanze sia la parallasse, e l'unico corpo celeste con una parallasse osservabile ad occhio nudo è la Luna, di cui infatti Tolomeo stima la distanza. Il problema relativamente agli altri corpi è aggirato con quella che può apparire una soluzione ovvia, ovvero assumendo il raggio del deferente come norma ed esprimendo tutte le lunghezze in rapporto a questo. Abbiamo già detto che Tolomeo adotta dunque un deferente uguale per tutti i pianeti. Sottolineando però che i pianeti si trovano a distanze diverse dalla Terra, lascia intendere che quella del deferente fissato sia una soluzione di carattere matematico che non rispecchia la realtà fisica delle distanze planetarie.

D'altra parte rappresentare tutti i pianeti su un singolo "deferente" è esattamente quello che si dovrebbe fare se si volessero rappresentare i pianeti su un singolo quadrante, come sono mostrati ad esempio sul lato anteriore della Macchina di Anticitera. Se si rappresentano tutti i modelli dell'*Almagesto* contemporaneamente, è difficile non notare una somiglianza con le immagini tomografiche della Macchina di Anticitera che mostrano l'ingranaggio centrale (il deferente) con intorno i vari treni di ingranaggi più piccoli (gli epicicli).

⁸¹Theon of Smyrna 1979, p. 121.

È il caso di sottolineare che anche laddove si abbia a disposizione un modello eliocentrico, se si vuole costruire un congegno meccanico come la Macchina di Anticitera la configurazione "ad epicicli" su un singolo "deferente" si rivela necessaria per rappresentare accuratamente i moti angolari: l'alternativa sarebbe rappresentare il sistema solare *in scala*, il che risulterebbe in un oggetto decisamente poco maneggevole e probabilmente inutilizzabile. Abbiamo già detto che i modelli dell'*Almagesto* forniscono una buona stima dell'ordine di grandezza del sistema solare, poiché per ciascun pianeta i rapporti tra raggi di epicicli e deferenti per ogni pianeta sono rispecchiano abbastanza accuratamente i rapporti tra i semiassemi maggiori delle orbite eliocentriche di Terra e pianeta.⁸² Tuttavia nelle *Ipotesi Planetarie* Tolomeo dimostra di non essere pienamente cosciente del fatto che tali rapporti sono essenziali per conservare l'accordo con le osservazioni, poiché elaborando il modello cosmologico basato sulla continuità degli epicicli abbandona il deferente comune che funge da norma e attribuisce ad ogni pianeta un deferente di raggio diverso, *lasciando però inalterato il relativo epiciclo*, privando il suo modello di qualunque legame con i fenomeni. Pur adottando l'approccio della continuità degli epicicli, avrebbe potuto riscalarlo tutti i modelli opportunamente per conservare i rapporti, ma non l'ha fatto. Tale circostanza ci porta a dubitare che la scelta del deferente-norma nell'*Almagesto* sia stata pienamente deliberata e cosciente, e avvalora l'idea che sia stata il risultato di un'imitazione, tradita dall'incapacità di Tolomeo di apportarvi una semplice modifica.⁸³

Ci sembra verosimile dunque che chi progettò la macchina studiata da Tolomeo era già arrivato a stimare le dimensioni del sistema solare al tempo conosciuto. D'altra parte è sufficiente l'*idea* eliocentrica per poter effettuare questa stima, esattamente come fece Copernico nel XVI secolo dopo aver tratto l'ipotesi eliocentrica dalla lettura dagli antichi testi.⁸⁴ Ricordiamo inoltre che la misura dell'unità astronomica era uno degli obiettivi dell'unica opera di Aristarco pervenutaci. Ci sembra dunque inverosimile che il passo di Copernico non fu effettivamente compiuto dagli ultimi astronomi ellenistici, le cui misure si ritrovano camuffate (e presumibilmente leggermente alterate) nei rapporti tra "deferenti" ed "epicicli" dei modelli di Tolomeo.

L'Anomalia Solare

L'unico modello in tutto l'*Almagesto* che non fa uso di epicicli è quello del Sole, per il quale Tolomeo adotta un modello eccentrico. Nel Libro III, dopo aver dimostrato l'equivalenza tra i due modelli e dimostrato (inutilmente) una serie di risultati utilizzandoli entrambi, Tolomeo scrive:⁸⁵

⁸²vedi *supra*, par. 2.5

⁸³Notiamo inoltre che nelle *Ipotesi Planetarie* Tolomeo ordina anche i pianeti interni. Curiosamente in una prospettiva geocentrica "sbaglia" poiché pone Mercurio più vicino di Venere, "indovinando" invece l'ordine eliocentrico.

⁸⁴Un caso analogo è quello della misura del raggio terrestre, in cui è essenziale l'*ipotesi* che la Terra abbia forma sferica. Senza quest'idea, gli stessi *phainomena* possono essere interpretati in maniera totalmente diversa, come effettivamente fecero gli astronomi cinesi che considerando la Terra piatta credettero di misurare la distanza del Sole (Rovelli 2014, pp. 106-107).

⁸⁵G. J. Toomer 1984, p. 153.

Having set out the above preliminary theorems, we must add a further preliminary thesis concerning the apparent anomaly of the sun. *This has to be a single anomaly*, of such a kind that the time taken from least speed to mean shall always be greater than the time from mean speed to greatest, for we find that this accords with the phenomena.

Che il Sole debba avere una sola anomalia è assunto, laddove invece andrebbe dimostrato attraverso delle osservazioni. Anche la circostanza descritta da Tolomeo sui tempi di percorrenza del Sole andrebbe verificata con delle osservazioni che Tolomeo non riporta. In ogni caso Tolomeo si risolve ad usare per il Sole il modello eccentrico invocando un principio di semplicità:

Now this could be represented by either of the hypotheses described above, though in case of the epicyclic hypothesis the motion of the sun on the apogee arc of the epicycle would have to be in advance. However, it would seem more reasonable to associate it with the eccentric hypothesis, since that is simpler and is performed by means of one motion instead of two.

Un simile criterio di semplicità è enunciato da Tolomeo anche poco prima:⁸⁶

And in general, we consider it a good principle to explain the phenomena by the simplest hypotheses possible, in so far as there is nothing in the observations to provide a significant objection to such a procedure.

Un approccio del genere apparirebbe abbastanza credibile se Tolomeo non si contraddicesse all'inizio del Libro XIII, dove sviluppa la sua complicatissima teoria delle latitudini planetarie:⁸⁷

Now let no one, considering the complicated nature of our devices, judge such hypotheses to be over-elaborated. For it is not appropriate to compare human [constructions] with divine, nor to form one's beliefs about such great things on the basis of very dissimilar analogies. For what [could one compare] more dissimilar than the eternal and unchanging with the ever-changing, or that which can be hindered by anything with that which cannot be hindered even by itself? Rather, one should try, as far as possible, to fit the simpler hypotheses to the heavenly motions, but if this does not succeed, [one should apply hypotheses] which do fit. For provided that each of the phenomena is duly saved by the hypotheses, why should anyone think it strange that such complications can characterise the motions of the heavens when their nature is such as to afford no hindrance, but of a kind to yield and give way to the natural motions of each part, even if [the motions] are opposed to one another? [...] *We see that in the models constructed on earth the fitting together of these [elements] to represent the different motions is laborious, and difficult to achieve in such a way that the motions do not hinder each other, while in the heavens no obstruction whatever is caused by such combinations.* Rather, we should not judge 'simplicity' in heavenly things from what appears to be simple on earth, especially when

⁸⁶G. J. Toomer 1984, p. 136.

⁸⁷G. J. Toomer 1984, pp. 600-601.

the same thing is not equally simple for all even here. For if we were to judge by those criteria, nothing that occurs in the heavens would appear simple, not even the unchanging nature of the first motion, since this very quality of eternal unchangingness is for us not [merely] difficult, but completely impossible. Instead [we should judge 'simplicity'] from the unchangingness of the nature of things in the heaven and their motions. In this way all [motions] will appear simple, and more so than what is thought "simple" on earth, since one can conceive of no labour or difficulty attached to their revolutions.

Qui abbiamo un altro riferimento alla *sphairopoia* e un'ulteriore conferma della visione generale di Tolomeo. Per quanto riguarda l'anomalia solare, riteniamo che Tolomeo non abbia seguito alcun criterio di semplicità, bensì che anche qui abbia imitato la soluzione adottata da un congegno meccanico. Nella Macchina di Anticitera infatti l'anomalia solare era resa utilizzando non combinazioni di ingranaggi, ma una divisione non uniforme della scala zodiacale.⁸⁸

Nella Macchina di Anticitera il puntatore solare si muoveva dunque come quello che Tolomeo chiama Sole medio, poiché l'anomalia era espressa tramite la scala zodiacale. La nostra ricostruzione spiegherebbe così anche il ruolo privilegiato di questo corpo fittizio nell'*Almagesto*, utilizzato come riferimento da Tolomeo anche laddove avrebbe potuto usare il Sole vero, avendo egli stesso elaborato una teoria solare.⁸⁹ Chiaramente un vantaggio dell'uso del Sole medio sta nel fatto che questo percorre angoli uguali in tempi uguali fungendo così anche da misura temporale, esattamente come il puntatore solare della Macchina di Anticitera in riferimento alla scala calendariale egiziana. Una spaziatura non uniforme della scala zodiacale influenzerebbe anche la lettura dei moti planetari, ed è forse a questa circostanza che si riferisce Tolomeo quando descrive la prima anomalia dei pianeti come anomalia "rispetto allo zodiaco".

Il Punto Equante

Generalmente il punto equante è considerato il principale contributo di Tolomeo all'astronomia matematica greca. In base alla sua testimonianza, sembra infatti che modelli ad eccentrici/epicicli fossero già stati sviluppati al tempo di Ipparco, senza tuttavia riuscire a rendere conto delle retrogradazioni planetarie. In particolare, dalle parole di Tolomeo sembra che i problemi fossero dati dalla lunghezza variabile degli archi retrogradi e dalla loro spaziatura non uniforme lungo l'eclittica. Come mostra molto chiaramente J. Evans (1984) entrambi questi problemi vengono risolti dall'introduzione del punto equante, che rappresenta dunque l'elemento determinante per il successo della teoria tolemaica. Ciononostante, Tolomeo non afferma a tal proposito nessun primato particolare, e molti elementi rendono l'origine del punto equante molto misteriosa. Lo stesso Tolomeo, dopo aver

⁸⁸Si veda C. Carman, Thorndike e J. Evans 2010 per maggiori dettagli.

⁸⁹Neugebauer (1975, p. 171) spiega così la scelta di Tolomeo: «...it is the postulate of the uniformity of circular motions that introduces into planetary theory the mean sun as the fundamental point of reference.». Siamo d'accordo con Neugebauer, ma il moto uniforme non era quello postulato metafisicamente, bensì quello rappresentato dall'input di un congegno meccanico.

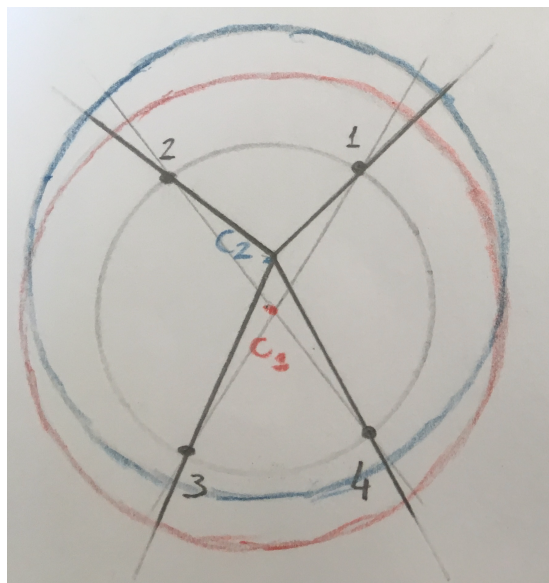


Figura 3.9: *Pin-slot device* e punto equante. La circonferenza rossa, di centro C_1 , corrisponde all'ingranaggio k_1 , che ruota uniformemente. La circonferenza blu, di centro C_2 , corrisponde all'ingranaggio k_2 . I punti 1, 2, 3 e 4 sono posizioni del perno uscente da k_1 tali che l'intervallo temporale tra le posizioni 1 e 2 coincide con quello tra le posizioni 3 e 4.

descritto il fallimento di Ipparco nell'elaborare una teoria planetaria, ammette in realtà di non riuscire a spiegare bene da dove sia venuta questa strana idea:⁹⁰

The point of the above remarks was not to boast [of our own achievement]. Rather, if we are at any point compelled by the nature of our subject to use a procedure not in strict accordance with theory (for instance, [...] [if we are compelled] to make some basic assumptions which we arrived at not from some readily apparent principle, but from a long period of trial and application, [...] we may [be allowed to] accede [to this compulsion], since we know that this kind of inexact procedure will not affect the end desired; and we know too that assumptions made without proof, provided only that they are found to be in agreement with the phenomena, could not have been found without some careful methodological procedure, even if it is difficult to explain how one came to conceive them (for, in general, the cause of first principles is, by nature, either non-existent or hard to describe).

Qui Tolomeo si sta riferendo evidentemente al punto equante, che rende conto dei fenomeni suddetti, ma rappresenta una parziale violazione dei principi aristotelici (o, dovremmo dire, tolemaici). Ancora una volta Tolomeo si contraddice da solo in poche righe, dicendo, da una parte, di essere giunto a tali assunzioni attraverso «un lungo periodo di prove e applicazioni», e dall'altra che queste non possono che essere il risultato di «un'attenta procedura metodologica», di cui però «è difficile spiegare l'origine». A meno di sofismi, Tolomeo sta dicendo al lettore di fidarsi di lui, perché l'importante è che il modello funzioni.

⁹⁰G. J. Toomer 1984, p. 422.

L'introduzione del punto equante consiste essenzialmente in un disaccoppiamento tra il centro geometrico del deferente e il punto rispetto a cui è uniforme il moto del centro dell'epiciclo. Tale disaccoppiamento è esattamente ciò che si verifica nel *pin-slot device* nella Macchina di Anticitera. Nella configurazione mostrata in Fig. 3.4, l'ingranaggio k2, di centro C_2 , è trascinato dal perno dell'ingranaggio k1, che si muove di moto uniforme. Di conseguenza ogni punto dell'ingranaggio k2 si muoverà su una traiettoria circolare, di centro C_2 , ma con un moto che è uniforme rispetto al punto C_1 : identificando quindi l'ingranaggio k2 con un deferente tolemaico, C_1 assume esattamente la stessa funzione del punto equante.

Sostenere che Tolomeo abbia tratto l'idea del disaccoppiamento tra centro geometrico e centro del moto uniforme dal *pin-slot device* equivale a sostenere che il planetario da lui osservato utilizzasse le stesse soluzioni meccaniche che abbiamo trovato nella Macchina di Anticitera, il che può sembrare abbastanza azzardato. Osserviamo tuttavia che il *pin-slot* è un meccanismo molto versatile, che ha la funzione di introdurre un'anomalia e può essere modulato a seconda delle necessità. Il fatto che si basi su proprietà dei moti circolari che, come abbiamo visto, erano note sin dagli albori della scienza meccanica rende verosimile che si trattasse di una strategia costruttiva standard; sicché bisognerebbe parlare forse di *meccanismi pin-slot*, al plurale, intendendo cioè una classe di meccanismi piuttosto che un singolo congegno. In ogni caso lo stesso Tolomeo ci dà motivo di pensare che lui stesso conoscesse il *pin-slot device*, quando nelle *Ipotesi Planetarie*, rivolte idealmente a costruttori di planetari, fornisce i moti planetari medi in due forme diverse. La prima è uguale a quella fornita nell'*Almagesto* e fa uso delle relazioni babilonesi tra anno tropicale, periodo longitudinale e periodo anomalistico dei pianeti che abbiamo già discusso.⁹¹ Tali periodi sono detti da Tolomeo *periodi semplici*. La seconda invece fa uso dei cosiddetti *periodi composti*, che sono approssimazioni di combinazioni lineari dei periodi semplici, fornite direttamente da Tolomeo senza esplicitarne la costruzione.⁹² Nel caso dei pianeti interni la differenza tra periodo anomalistico semplice e complesso sta nel sistema di riferimento: il primo è valutato rispetto al riferimento mobile dell'epiciclo, il secondo rispetto all'equinozio di primavera, e i due differiscono solamente per l'aggiunta dell'anno solare. Si dà il caso che nella ricostruzione di Carman et al. tale periodo complesso è esattamente quello che serve a implementare il *pin-slot device* per i pianeti interni. Evans e Carman commentano tale coincidenza così:⁹³

Non è mai stato chiaro perché Tolomeo abbia introdotto tale periodo [complesso]. Ma se Tolomeo sta pensando che i costruttori useranno il *pin-slot device*, allora capiamo il motivo. Ciò suggerisce una tradizione continua dell'utilizzo di meccanismi *pin-slot* durata almeno dal tempo della Macchina di Anticitera (II sec. d.C?) fino all'epoca di Tolomeo (II sec. d.C.).

Anche qui, alla luce del tracollo culturale che si ebbe tra II sec. a.C. e II sec. d.C., riteniamo più verosimile che Tolomeo abbia tratto questi periodi complessi dallo studio di antiche macchine.

⁹¹vedi *supra*, par. 2.5

⁹²Questi periodi complessi sono discussi in Hamm 2011, pp. 172-174 e in Duke 2009.

⁹³J. Evans e C. C. Carman 2000, p. 165.

Notiamo che la soluzione del punto equante così com'è implementata da Tolomeo fa nascere il sospetto che sia stata decisa a priori, come altri aspetti dei suoi modelli. Tolomeo infatti non postula dal principio la condizione che il punto equante debba essere in posizione simmetrica rispetto alla Terra, ma deduce questa circostanza nel caso di Venere dalle osservazioni di massima elongazione.⁹⁴ A priori si potrebbe avere una situazione non simmetrica, ma le osservazioni riportate da Tolomeo forniscono una distanza Terra-punto equante *esattamente* doppia rispetto alla distanza Terra-centro del deferente. Per i tre pianeti esterni invece Tolomeo dice:⁹⁵

For the other three, Mars, Jupiter and Saturn, the hypothesis which we find for their motion is the same [for all] and like that established for the planet Venus, namely one in which the eccentre on which the epicycle centre is always carried is described on a centre which is the point bisecting the line joining the centre of the ecliptic and the point about which the epicycle has its uniform motion; for in the case of each of these planets too, using rough estimation, the eccentricity one finds from the greatest equation of ecliptic anomaly turns out to be about twice that derived from the size of the retrograde arcs at greatest and least distances of the epicycle.

Non ci sono forniti dettagli di alcun tipo, né calcoli, né osservazioni, ma il risultato conferma essenzialmente quanto già trovato per Venere. Osserviamo ora che:

1. Nel determinare i parametri dei modelli di Venere, tra cui in particolare l'eccentricità del deferente, Tolomeo utilizza due osservazioni di massima elongazione che afferma di aver compiuto lui stesso *a 37 giorni di distanza*, cioè il 18 Novembre e il 25 Dicembre del 136 d.C.. Ciò è chiaramente impossibile, e non vi è dubbio che almeno una delle due osservazioni sia fabbricata.⁹⁶
2. Come nota Newton, la distanza Terra-punto equante ottenuta da Tolomeo è uguale all'eccentricità del Sole calcolata da Ipparco (e adottata poi da Tolomeo). In altri termini l'anomalia del centro dell'epiciclo di Venere coincide con l'anomalia solare, cioè i due moti sono cinematicamente equivalenti rispetto alla Terra anche se geometricamente le due orbite non coincidono. Tenendo conto della fabbricazione delle osservazioni, possiamo considerare questa un'altra indicazione del fatto che la fonte di Tolomeo fosse eliocentrica.

In sostanza ci sembra ci siano sufficienti ragioni per considerare il punto equante di Tolomeo non del tutto originale.

Tutte le ricostruzioni finora proposte dei meccanismi planetari hanno implementato teorie ad epicicli semplici, cioè con archi retrogradi sempre uguali

⁹⁴Neugebauer 1975, pp. 152-169.

⁹⁵G. J. Toomer 1984, p. 480.

⁹⁶È curioso che secondo Neugebauer Tolomeo «usa il termine *massima elongazione* solo in senso vago», con l'obiettivo di ottenere risultati simmetrici rispetto a quelli di precedenti osservazioni di Teone (nota in Neugebauer 1975, p. 153). Neugebauer mostra poi che in effetti le date fornite da Tolomeo non corrispondono in nessuno dei due casi alle massime elongazioni di Venere nel 136 d.C.. A noi sembra tuttavia che «massima elongazione» abbia un significato estremamente preciso e poco flessibile.

ed uniformemente spaziatì lungo l'eclittica. È evidente che qualunque lavoro di ricostruzione si basa su quale teoria immaginiamo fosse nota all'epoca della costruzione della Macchina. Finora gli studiosi si sono basati essenzialmente sulla testimonianza di Tolomeo e nessuno ha cercato di implementare una teoria che includesse anche un punto equante. Tuttavia la connessione che abbiamo descritto tra punto equante e *pin-slot device*, a nostro avviso, non indica tanto che tale riproduzione sia possibile, ma fa emergere una possibilità molto più interessante.

In base alla definizione che ne dà Tolomeo, il punto equante costituisce senza dubbio un concetto teorico abbastanza contorto: il fatto che un punto si muova di moto circolare, ma uniformemente rispetto a un punto che non coincide con il centro dell'orbita è innegabilmente qualcosa di molto perverso. Non a caso, il punto equante per tutto il Medioevo e fino a Copernico ha costituito motivo di forte insoddisfazione tra gli astronomi. A posteriori, in un'ottica moderna, lo riconosciamo come soluzione efficace al problema delle anomalie planetarie perché "mima" all'insaputa di Tolomeo il fuoco vuoto di un'ellisse kepleriana.⁹⁷ Ci possiamo allora chiedere: come interpreteremmo il *pin-slot device* indipendentemente dal concetto di punto equante? Presumibilmente penseremmo che in età ellenistica si fosse iniziato a comprendere qualcosa di simile alle prime due leggi di Keplero, come del resto è suggerito dal disegno mostrato in Fig. 3.9, in cui i raggi uscenti da C_2 ricordano molto i raggi vettori oggetto della II legge di Keplero. Nel caso particolare del meccanismo lunare è immediato identificare il punto C_2 con la Terra, posta in un fuoco dell'ellisse, e il punto C_1 con il secondo fuoco. Coerentemente la nostra ricostruzione dei fatti, riteniamo che così in effetti vada interpretata l'esistenza del *pin-slot device*, essendo illogico proiettare all'indietro un astruso concetto elaborato tre secoli dopo da un astronomo di livello inferiore.

La Macchina di Anticitera costituisce dunque a nostro avviso una forte indicazione dell'esistenza di orbite ellittiche nell'astronomia ellenistica, elemento che si aggiunge alle testimonianze pretolemaiche discusse in precedenza.⁹⁸ In particolare, si trova confermata e ampliata la tesi di Russo sull'origine degli epicicli tolemaici.⁹⁹ Tuttavia se supponiamo che a Tolomeo non siano giunti testi che esponevano esplicitamente una teoria planetaria, come abbiamo fatto,¹⁰⁰ dobbiamo concludere che il fraintendimento si innestò sulla *sphairopoia*, nascendo dall'osservazione di ingranaggi che realizzavano meccanicamente le decomposizioni dei moti celesti in moti circolari.

⁹⁷Si veda ad esempio Hoskin 2009, p. 44.

⁹⁸cfr. *supra* il passo di Seneca alla fine del par. 1.7.

⁹⁹Russo 2010, p. 325: «La crisi del metodo scientifico aveva finito con il fare interpretare "realisticamente", cioè come affermazioni sulla natura anziché interne a un modello, le affermazioni scientifiche sopravvissute. Nel caso dell'astronomia, in particolare, mentre le decomposizioni dei moti dei pianeti effettuate nel primo ellenismo erano state modelli matematici utilizzati come sistemi di calcolo, in età imperiale fu assegnata una realtà fisica a ciascun moto componente, interpretando anche le sfere omocentriche di Eudosso come sfere materiali.»

¹⁰⁰vedi *supra*, par. 2.5

Conclusione

Ci sembra opportuno a questo punto tracciare un quadro complessivo dello sviluppo dell'astronomia greca, da Platone fino a Tolomeo, tenendo conto delle tesi qui esposte. Lo faremo nella maniera più semplice, cioè ripercorrendo le tappe essenziali di tale sviluppo secondo la ricostruzione dei fatti svolta nei capitoli precedenti. Il lettore giudicherà se troverà convincente la nostra ricostruzione.

Platone (IV sec. a.C.) fu il primo ad indicare esplicitamente che l'astronomia dovesse configurarsi come uno studio geometrico dei movimenti celesti. Il significato attribuito da Platone alla $\tau\epsilon\chi\nu\eta$ portava con sé naturalmente l'idea che tale studio geometrico dovesse accompagnarsi alla riproduzione meccanica dei moti osservati, ovvero alla creazione di un oggetto che incorporasse e rendesse manifesto ciò che era stato conquistato mediante l'intelletto. In questo modo già ai suoi albori l'astronomia greca fu posta in stretta connessione con la geometria e la meccanica, entrambe discipline ben note a Platone. Il legame tra geometria e meccanica fu sviluppato in particolare da Archita (IV sec. a.C.), contemporaneo e amico di Platone.

Il programma platonico accompagnò tutto lo sviluppo dell'astronomia greca. Eudosso, Autolico ed Euclide (IV-III sec. a.C.), i primi astronomi matematici di cui abbiamo notizia, gettarono le basi dell'astronomia sferica sviluppando la teoria della sfera come oggetto matematico e facendo uso di globi celesti nell'intuizione e nell'illustrazione dei loro risultati. Ad Eudosso, che studiò sia con Archita che con Platone, si deve anche il primo modello geometrico dei moti planetari, basato sull'uso di sfere omocentriche.

Con la nascita della scienza esatta nel III sec. a.C. l'astronomia continuò a svilupparsi secondo le linee tracciate da Platone, avvalendosi dei metodi geometrici sviluppati in particolare negli *Elementi* di Euclide e dei progressi dell'arte meccanica. Le tecniche del disegno effettuato con riga e compasso e della costruzione di macchine ad ingranaggi determinarono il passaggio dai modelli sferici di Eudosso a quelli che facevano uso di composizioni di moti circolari. Un ruolo importante nel passaggio da modelli qualitativi a teorie scientifiche quantitative fu svolto anche dall'incontro tra i metodi geometrici propri della matematica greca e gli algoritmi aritmetici che caratterizzarono lo sviluppo dell'astronomia babilonese, di cui si trovano indizi già nel lavoro di Euclide.

Grazie anche agli studi di ottica condotti dallo stesso Euclide, che chiarirono il carattere relativo del moto, all'inizio del III sec. a.C. Aristarco di Samo riuscì a spiegare le retrogradazioni planetarie basandosi sull'ipotesi eliocentrica, ipotesi che aveva già avuto dei precedenti importanti in età prescientifica e non rappresentava di certo un'idea nuova. Il modello eliocentrico rese possibile la costruzione dei

primi planetari funzionanti, circostanza che nel quadro epistemologico tracciato da Platone non poteva non costituire un'ulteriore conferma della bontà dell'ipotesi eliocentrica, che consentì anche di stimare le distanze planetarie e di porre un limite inferiore alle dimensioni dell'universo. Numerosi fonti letterarie testimoniano che alla costruzione di planetari si dedicò in particolare Archimede (III sec. a.C.), figura che rappresenta in maniera esemplare l'intreccio di geometria, meccanica e astronomia che stiamo descrivendo.

Dopo l'annessione romana dell'Egitto il centro dell'astronomia ellenistica si spostò da Alessandria alle regioni del Mediterraneo orientale. Qui fu attivo negli ultimi anni della sua vita Ipparco (II sec. a.C.), il quale giunse ad elaborare una teoria eliocentrica dinamica che oltre ad un principio di inerzia (sul quale si trovano riflessioni importanti già nelle *Questioni Meccaniche*, risalenti al più all'inizio del III sec. a.C.) includeva anche orbite ellittiche e quella che sarà chiamata II legge di Keplero. Ciò appare naturale laddove si trovi la necessità di correggere le orbite circolari (ipotizzate inizialmente da Aristarco) e si abbia a disposizione una teoria delle coniche come quella elaborata da Apollonio di Perga nel III sec. a.C.. Un ruolo determinante nell'affermarsi dell'ipotesi eliocentrica fu svolto anche dagli studi sulle maree di Seleuco (II sec. a.C.), che rivolgendosi a fenomeni dinamici evidenziarono inequivocabilmente la presenza del moto terrestre. Verosimilmente anche Ipparco si dedicò alla *sphairopoia*, pratica che aveva raggiunto il livello testimoniato dalla Macchina di Anticitera.

Con il crollo culturale avvenuto alla fine del II sec. a.C. nessuno fu in grado di raccogliere l'eredità scientifica di Ipparco e della tradizione astronomica ellenistica. Nel giro di qualche decennio i planetari diventarono vestigia di antiche conoscenze ormai irraggiungibili a causa della perdita del metodo scientifico, oggetti che continuavano tuttavia a suscitare ammirazione e meraviglia da parte di chi non poteva più comprenderne l'origine. Fu proprio questo status a facilitarne la trasmissione rispetto ai testi astronomici che dei planetari costituivano il fondamento.

In età imperiale lo studio dei planetari e delle antiche teorie astronomiche fece nascere il mito dei moti circolari uniformi, interpretazione personale di chi non era più in grado di comprendere l'origine di precise scelte teoriche e tecnologiche. In particolare Tolomeo (II sec. d.C.) elaborò dei modelli astronomici descritti nell'*Almagesto* a partire dall'osservazione di un planetario simile alla Macchina di Anticitera. Il divario culturale che lo separa dai suoi predecessori ellenistici gli impedì di vedere che dietro quel meccanismo si nascondeva una visione dei moti celesti fatta di orbite ellittiche eliocentriche. Non essendo in grado di comprendere ciò che aveva davanti, Tolomeo diede alla sua teoria un'impostazione geocentrica e attribuì un'esistenza reale ai moti componenti rappresentati dagli ingranaggi, ascrivendo anche agli astronomi ellenistici dei fantomatici modelli "ad epicicli". L'impostazione filosofica di Tolomeo e, in particolare, la sua visione del rapporto tra teoria e fenomeni lo portarono ad alterare le osservazioni astronomiche che nell'*Almagesto* dice di aver compiuto, ponendo dunque su una base illusoria lo sviluppo dell'astronomia dei successivi quattordici secoli.

Riteniamo che la ricostruzione proposta tenga conto in maniera coerente di tutte le fonti dirette e indirette a nostra disposizione. In particolare, il legame tra Tolomeo e la *sphairopoia* spiega in maniera naturale molte caratteristiche oscure

della teoria astronomica esposta nell'*Almagesto*, una su tutte l'introduzione del punto equante.

Passiamo ora ad alcune osservazioni che derivano da tale ricostruzione.

Il regresso metodologico riscontrabile in Tolomeo e il fatto che appiano fabbricate anche osservazioni astronomiche elementari che erano svolte con una buona accuratezza già dal V sec. a.C. (come la misura di solstizi ed equinozi) fa pensare che Tolomeo non abbia mai realmente osservato, non essendone in grado. Pur non avendo alcun modo di dimostrarlo, riteniamo verosimile che Tolomeo abbia utilizzato la macchina che aveva a disposizione anche per simulare le osservazioni che dice di aver fatto. Tale macchina, risalendo almeno a tre secoli prima, doveva ormai essere inaffidabile e fornire dei risultati molto poco accurati. Questa dinamica spiegherebbe la strana circostanza per cui i modelli tolemaici in linea di principio potrebbero dare risultati molto migliori di quelli effettivamente riportati da Tolomeo.

Il fatto che il concetto di "epiciclo" come lo usa Tolomeo sia stato concepito da tardi commentatori che hanno interpretato realisticamente quelli che erano solo termini di uno sviluppo in serie fa evaporare in un colpo l'annoso dibattito su strumentalismo e realismo nell'astronomia greca. Tale dibattito ruota infatti intorno alla testimonianza di Tolomeo e dei suoi contemporanei, secondo i quali gli stessi moti erano descritti utilizzando modelli diversi ed equivalenti solo per quanto concerne il moto angolare. La connessione dell'astronomia con la *sphairopoia* che abbiamo descritto fa emergere invece la possibilità che tali modelli alternativi si riferissero a diverse soluzioni meccaniche esplorate da chi aveva l'obiettivo di rappresentare i moti celesti su un quadrante. Questa interpretazione trova conferma nella stessa Macchina di Anticitera, che incorpora al suo interno sia modelli "ad epicicli" (Luna e pianeti, verosimilmente) sia modelli "eccentrici" (Sole).

La connessione che abbiamo stabilito tra fuochi di un'ellisse e *pin-slot device* apre inoltre la strada a nuove ricostruzioni dei meccanismi planetari della Macchina di Anticitera, ricostruzioni che si riveleranno probabilmente più semplici di quelle realizzate sinora che hanno tentato di rappresentare teorie "ad epicicli" a nostro avviso mai esistite.

Concludiamo con una riflessione di carattere generale. Nel suo bellissimo libro sulla Macchina di Anticitera Jones (2017, p. xi) scrive:

Prosegue fruttuosamente il lavoro su molti aspetti della Macchina, ma rispetto alle domande principali probabilmente ad oggi abbiamo imparato tutto ciò che possiamo dai frammenti rimasti. Resta la possibilità di trovare nuovi frammenti.

Riteniamo che la ricerca storica possa giovare tanto di nuove evidenze quanto di nuove *visioni*, che fanno emergere connessioni e significati anche tra le evidenze empiriche note da molto tempo. Speriamo che il presente lavoro possa rappresentare un esempio in tal senso. Molti studiosi si sono dedicati tanto allo studio dell'*Almagesto* quanto a quello della Macchina di Anticitera, ma la fede nel progresso continuo ha impedito di vedere quelle che, a nostro avviso, sono evidenze della superiorità dell'astronomia ellenistica su quella tolemaica, che della prima

costituisce un parziale e distorto recupero. Guardare l'astronomia precedente attraverso gli occhi di Tolomeo è un grave errore, che rischia di condizionare anche la comprensione di un oggetto dal valore inestimabile come la Macchina di Anticitera, rarissima testimonianza diretta dell'epoca d'oro dell'astronomia ellenistica.

Bibliografia

- Archimede (1974). *Opere*. A cura di Attilio Frajese. UTET.
- (2013). *Metodo*. A cura di F. Acerbi. Bollati Boringhieri.
- Aujac, G. (1970). «La Sphéropée, ou la Mécanique au Service de la découverte du Monde.» In: *Revue d'Histoire des Sciences et de Leurs Applications* 23.2, pp. 93–107. DOI: 10.3406/rhs.1970.3119.
- (1993). *La Sphère, Instrument au Service de la Découverte Du Monde. D'Autolycos de Pitane à Jean de Sacrobosco*. Paradigme.
- Barker, A. (2000). *Scientific Method in Ptolemy's Harmonics*. Cambridge University Press.
- Berggren, J. L. e R. S. D. Thomas (2000). *Euclid's Phaenomena. A Translation and Study of a Hellenistic Treatise in Spherical Astronomy*. Vol. 29. History of Mathematics Sources. American Mathematical Society, London Mathematical Society.
- Brisson, L. e J-F. Pradeau (1998). *Le Vocabulaire de Platon*. Ellipses.
- Bulmer-Thomas, I. (1984). «Plato's Astronomy». In: *The Classical Quarterly* 34.1, pp. 107–112.
- Carman, C., A. Thorndike e J. Evans (2010). «Solar Anomaly and Planetary Displays in the Antikythera Mechanism». In: *Journal for the History of Astronomy* not,
- (2012). «On the Pin-and-slot Device of the Antikythera Mechanism with a New Application to the Superior Planets». In: *Journal for the History of Astronomy*.
- Conti, F. e E. Giusti (1992). *Oltre il Compasso. La Geometria delle Curve*. Scuola Normale Superiore.
- Copernico, N. (1979). *Opere*. A cura di F. Barone. UTET.
- Dekker, E. (2007). «Geaturing the First Greek Celestial Globe». In: *Globe Studies* 55-56, pp. 133–152.
- Delambre, J-B. (1817). *Histoire de l'Astronomie Ancienne*. Courcier.
- Dell'Isola, F. et al. (2016). «Some Cases of Unrecognized Transmission of Scientific Knowledge: From Antiquity to Gabrio Piola's Peridynamics and Generalized Continuum Theories». In: Springer, pp. 77–128.
- Dicks, D. R. (1960). *The Geographical Fragments of Hipparchus*. The Athlon Press.
- Dijsterkuis, E. J. (1989). *Archimede*.
- Domenech, C. T. (2013). «Claudius Ptolemy and Self-promotion a Study on Ptolemy's Intellectual Milieu in Roman and Alexandria». Tesi di dott. Universitat de Barcelona.

- Duke, D. (2009). «Mean Motions in Ptolemy's *Planetary Hypotheses*». In: *Archive for History of Exact Sciences* 63, pp. 635–654.
- Evans, J. (1984). «On the Function and the Probable Origin of Ptolemy's Equant». In: *American Journal of Physics* 52.12, pp. 1080–1089.
- Evans, J. e J. L. Berggren (2006). *Gemino's Introduction to the Phenomena*. Princeton University Press.
- Evans, J. e C. C. Carman (2000). «Mechanical Astronomy: A Route to the Ancient Discovery of Epicycles and Eccentrics». In: *From Alexandria Through Baghdad. Sources and Studies in the Ancient Greek and Medieval Islamic Mathematical Sciences in Honor of J. L. Berggren*. A cura di N. Sidoli e G. Van Brummelen. Springer.
- Fekete, J. (2018). *Ptolemy's Philosophy. Mathematics As a Way of Life*. Princeton University Press.
- Feraboli, S. (1985). *Le Previsioni Astrologiche*. A. Mondadori.
- Freeth, T., Y. Bitsakis et al. (2006). «Decoding the Ancient Greek Astronomical Calculator Known As the Antikythera Mechanism». In: *Nature* 444.7119. Con *Supp. Inf.*, pp. 587–591. DOI: 10.1038/nature05357.
- Freeth, T., A. Jones et al. (2008). «Calendars with Olympiad Display and Eclipse Prediction on the Antikythera Mechanism». In: *Nature*.
- Grasshoff, G. (1990). *The History of Ptolemy's Star Catalogue*. Springer-Verlag.
- Gray, J. M. K. (2009). «A Study of Babylonian Goal-Year Planetary Astronomy». Tesi di dott. Durham University.
- Hamilton, N. T., N. M. Swerdlow e G. J. Toomer (1987). «The 'Canobic Inscription': Ptolemy's Earliest Work». In: *From ancient omens to statistical mechanics: essays on the exact sciences*.
- Hamm, E. A. (2011). «Ptolemy's Planetary Theory: An English Translation of Book One, Part A of the Planetary Hypotheses with Introduction and Commentary». Tesi di dott. University of Toronto.
- (2016). «Modeling the Heavens: *Sphairopoia* and Ptolemy's Planetary Hypotheses». In: *Perspectives on Sciences* 24.4, pp. 416–424.
- Heath, T. (1913). *Aristarchus of Samos, the Ancient Copernicus*. Dover Publications.
- Heidegger, M. (1997). *Linguaggio Tramandato e Linguaggio Tecnico*. A cura di C. Esposito. Edizioni ETS.
- Hoskin, M. (2009). *Storia dell'Astronomia*. Milano: BUR Rizzoli.
- Jaynes, J. (1976). *Il Crollo della Mente Bicamerale e l'Origine della Coscienza*. Adelphi.
- Jones, A. (2005). «Ptolemy's *Canobic Inscription* and Heliodorus' Observation Reports». In: *SCIAMVS* 6, pp. 53–97.
- (2017). *A Portable Cosmos*. Oxford University Press.
- Knorr, W. R. (1990). «Plato and Eudoxus on the Planetary Motions». In: *Journal for the History of Astronomy* 21.4, p. 331.
- Meeus, J. e D. Savoie (1992). «The history of tropical year». In: *Journal of the British Astronomical Association*, pp. 40–42.
- Neugebauer, O. (1975). *A History of Ancient Mathematical Astronomy*. Springer.
- Newton, R. R. (1977). *The Crime of Claudius Ptolemy*. The Johns Hopkins University Press.

- Pedersen, O. (1974). *A Survey of the Almagest*. A cura di A. Jones. Springer.
- Rawlins, D. (1987). «Ancient Heliocentrists, Ptolemy, and the Equant». In: *American Journal of Physics* 55.3, pp. 235–239.
- Rovelli, C. (2014). *Che Cos'è la Scienza. La Rivoluzione di Anassimandro*. Mondadori.
- Russo, L. (1994). «The Astronomy of Hipparchus and His Time: a Study Based on Pre-Ptolemaic Sources.» In: *Vistas in Astronomy* 38, pp. 207–248.
- (2010). *La Rivoluzione Dimenticata. Il Pensiero Scientifico Greco e la Scienza Moderna*. Milano: Feltrinelli.
- (2013). *L'America Dimenticata. I Rapporti tra le Civiltà e un Errore di Tolomeo*. Mondadori University Press.
- (2015). *Stelle, Atomi e Velieri. Percorsi di Storia della Scienza*. Mondadori Università.
- Russo, L. e S. M. Medaglia (1996). «Sulla presunta accusa di empietà ad Aristarco di Samo». In: *Quaderni Urbinati di Cultura Classica* 53.82, pp. 113–121.
- Schiaparelli, G. V. (1874). «Le Sfere Omocentriche di Eudosso, di Callippo e di Aristotele». In: *Hoepli*.
- Seiradakis, J. H. e M. G. Edmunds (2018). «Our Current Knowledge of the Antikythera Mechanism». In: *Nature Astronomy* 2.1, pp. 35–42. DOI: 10.1038/s41550-017-0347-2.
- Sidoli, N. e K. Saito (2009). «The Role of Geometrical Construction in Theodosius's Spherics». In: *Archive for History of Exact Sciences* 63.6, pp. 581–609.
- Solomon, J. (1999). *Ptolemy's Harmonics*. Brill.
- Theon of Smyrna (1979). *Mathematics Useful for Understanding Plato*. Wizards Bookshelf.
- Toomer, G. J. (1984). *Ptolemy's Almagest*. Duckworth.
- Toomer, G.J. (1990). «Ptolemy». In: *Dictionary of Scientific Biography*. Charles Coulston Gillispie.
- Winter, T. N. (2007). *The Mechanical Problems in the Work of Aristotle*. University of Nebraska-Lincoln, Faculty Publications.
- Wright, T. (2012). «The Front Dial of the Antikythera Mechanism». In: *Explorations in the History of Machines and Mechanisms*. A cura di T. Koetsier e F. Ceccarelli. Vol. 15. History of Mechanisms and Machine Science, pp. 279–292.