INTRODUZIONE

DALLA VISIONE DEL MONDO TRADIZIONALE ALLA TEORIA COPERNICANA

Tutto il dramma della vita di Galileo nasce e si sviluppa sullo sfondo dello scontro fra la visione del mondo ancora prevalente al suo tempo, quella "aristotelico-tolemaica", fatta propria dalla Chiesa cattolica nel periodo medievale e la nuova concezione dell'universo, di cui la pubblicazione del *De Revolutionibus* di Copernico segna il punto di partenza. Per una giusta valutazione di questo dramma e dei fattori che hanno influito sulla sua conclusione, ci sembra quindi necessario richiamare in questa introduzione (necessariamente in forma estremamente schematica) la genesi e le caratteristiche di queste due diverse rappresentazioni del mondo, insieme con i primi segni forieri del futuro aperto contrasto, culminato con la condanna e l'abiura di Galileo.

1. *Dalla cosmologia aristotelica al sistema tolemaico*

Quello che è spesso chiamato "sistema aristotelico-tolemaico" risulta in realtà dall'unione di due concezioni profondamente diverse. La prima, elaborata dal grande filosofo greco Aristotele, rappresenta un tentativo di spiegazione del mondo dal punto di vista fisico (o della cosiddetta "filosofia della natura"). La seconda, sviluppata circa mezzo millennio più tardi dal famoso geografo e astronomo greco Tolomeo, costituisce invece (almeno nel suo movente originario) un tentativo di spiegazione puramente matematica del moto dei corpi celesti.

Secondo Aristotele (384-321 a.C.), l'universo, di dimensioni finite, consta di due parti nettamente distinte: il mondo dei corpi celesti e quello dei corpi sublunari. Questi ultimi sono formati

dai quattro elementi (terra, acqua, aria e fuoco) ormai comunemente ammessi dai Greci, distinti in "pesanti" (terra e acqua) e "leggeri" (aria e fuoco), dotati rispettivamente di moti naturali rettilinei dall'alto verso il basso e dal basso verso l'alto. Il termine (o fine) di tali movimenti è il loro "luogo naturale", raggiunto il quale il moto cessa. Come risultato, il mondo sublunare risulta suddiviso in una sfera centrale, luogo naturale dell'elemento terra, più altri tre "gusci sferici", luoghi naturali – rispettivamente – dell'acqua, dell'aria e del fuoco.

La posizione della Terra (formata prevalentemente, anche se non esclusivamente[1], dell'elemento terra) al centro dell'universo e la sua immobilità, sono per Aristotele conseguenze necessarie di questa teoria dei moti e luoghi naturali, "confermate", come la teoria stessa, dall'esperienza sensibile.

Per quanto riguarda il mondo dei corpi celesti, che si muovono (sempre in base all'esperienza sensibile) di un moto circolare senza fine, e perciò naturale, esso non può essere costituito dai quattro elementi (che hanno – come sappiamo – moti naturali rettilinei), ma da un quinto elemento, esclusivamente celeste, l'"etere", dotato appunto di un movimento naturale circolare.

Data l'unicità di questo elemento e dato anche che il suo movimento circolare – a differenza di quelli naturali rettilinei dei quattro elementi sublunari – può continuare senza fine nello stesso senso, non esiste la possibilità di un moto contrario e quindi di una "opposizione", causa ultima di tutte le mutazioni. Perciò i corpi celesti – a differenza di quelli terrestri – sono immutabili (cioè "ingenerabili" e "incorruttibili"). E ciò è ancora una volta confermato – secondo Aristotele – dalle osservazioni compiute fin da epoche remotissime. Tutti gli apparenti fenomeni di mutazioni celesti (come la comparsa di nuove stelle o di comete) devono essere perciò ricondotti a fenomeni "meteorologici", appartenenti all'atmosfera terrestre.

Per quel che riguarda la disposizione e il movimento di questi corpi celesti, Aristotele, che non era un astronomo, accettò la teoria delle sfere concentriche di Eudosso[2], volta a dare una spiegazione dei complessi movimenti planetari, soprattutto delle

"retrogressioni" e "stasi" che essi manifestano. Fig. 1 e 2. Mentre si ignora la natura di queste sfere secondo Eudosso, Aristotele dette ad esse un significato fisico, considerandole cioè come sfere materiali composte di etere[3].

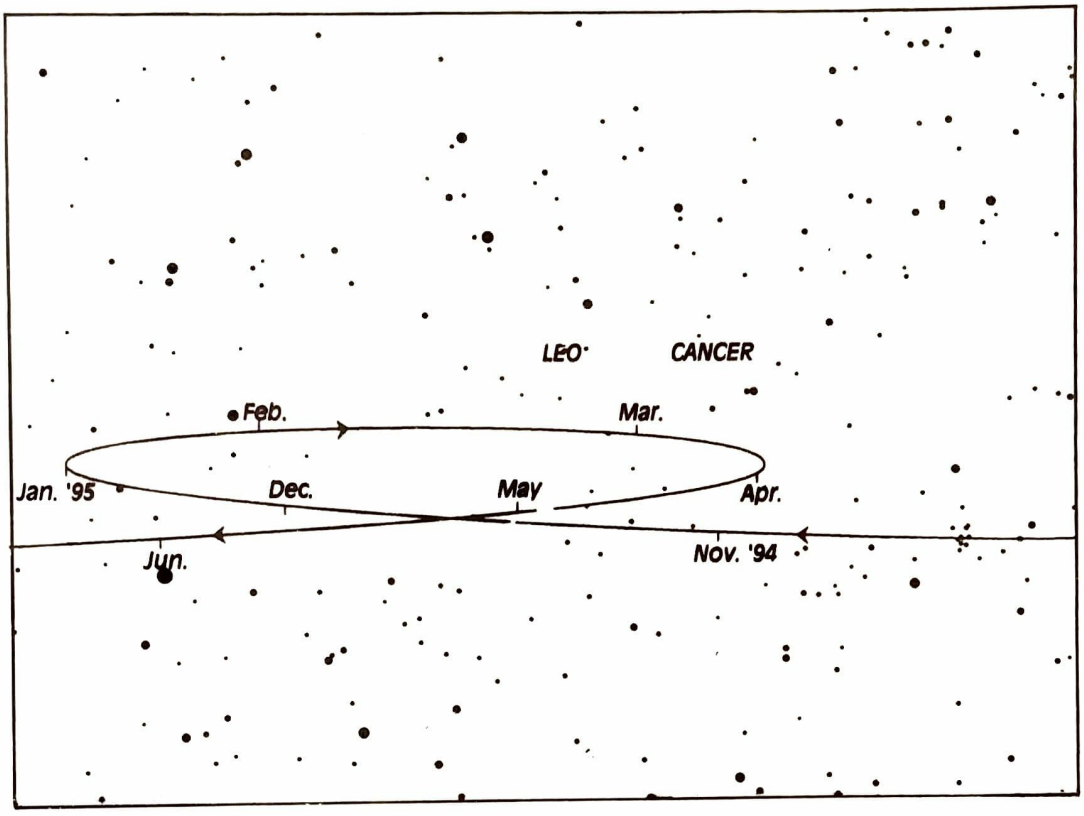

Fig. 1 – Il percorso apparente di Marte in cielo, con retrogradazione, dal Cancro al Leone, nel periodo novembre 1994 – giugno 1995. (Dal Programma *The Dance of the Planets).*

Restava il problema di spiegare perché il moto dei corpi celesti continui eternamente, senza principio e senza fine. Nel mondo sublunare, l'esistenza del moto è spiegata (nell'ambito della teoria delle quattro cause: materiale, formale, efficiente e finale) o come tendenza verso il luogo naturale di un dato corpo (nel caso di moto "naturale"), o come risultato delle azioni che si esercitano fra i vari corpi (nel caso del moto "violento"). Ma nel mondo celeste? Scartata (dopo un'adesione iniziale) l'idea platonica di un'"anima" del mondo, principio autonomo di movimento, e ignorando (come tutti gli altri Greci) il principio d'inerzia, Aristotele finì col

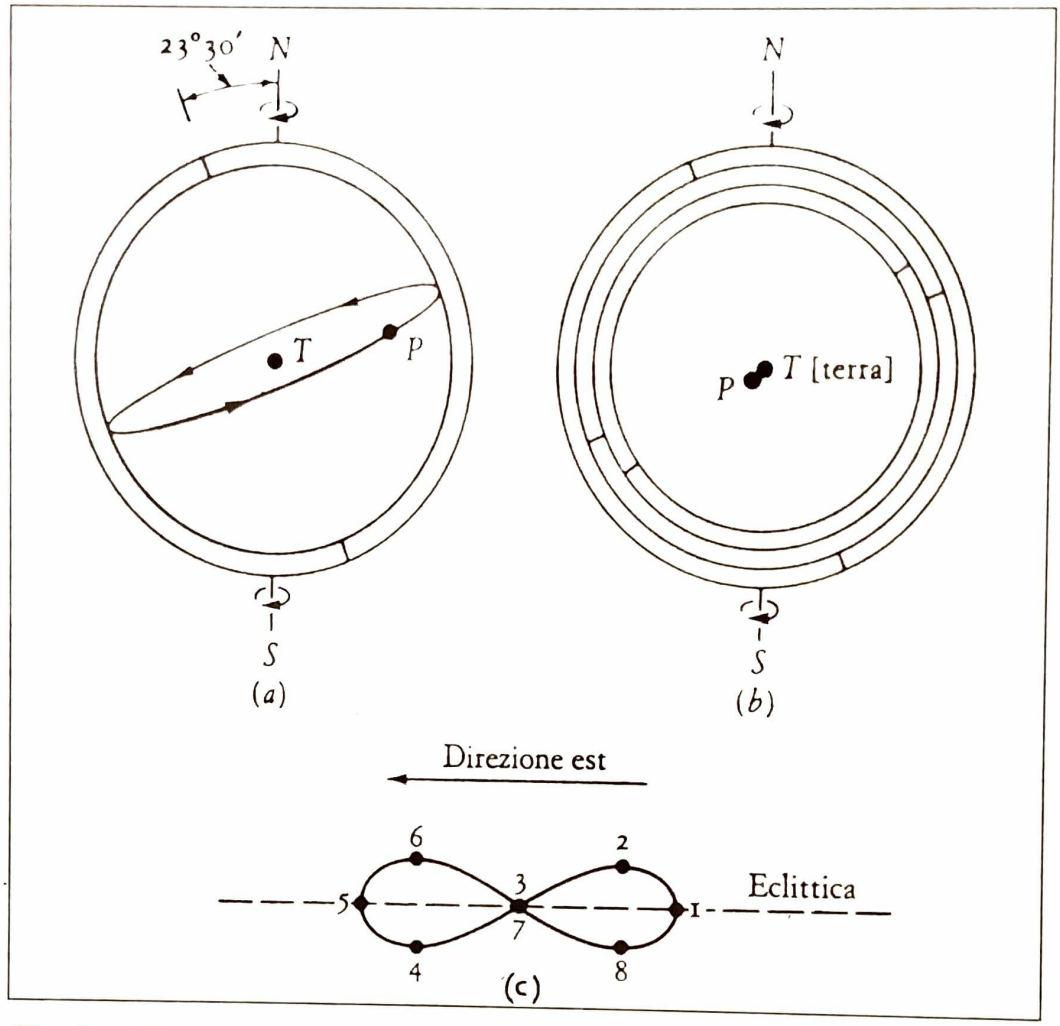

Fig. 2 – Sfere omocentriche. Nel sistema a due sfere (*a*), la sfera esterna produce la rotazione giornaliera e la sfera interna muove il pianeta (Sole o Luna) con velocità costante verso est attorno all'eclittica. Nel sistema a quattro sfere (*b*), il pianeta *P* giace fuori del piano del disegno, all'incirca su di una linea che va dalla Terra *T* all'occhio del lettore. Le due sfere più interne generano il moto a forma di nodo illustrato in (*c*), mentre le due sfere più esterne producono il moto giornaliero e lo scorrimento medio del pianeta in direzione est. (Da Kuhn 1972, 73 e 75).

trovare la causa dei movimenti celesti – com'è noto – in un'applicazione su scala cosmica del principio della causalità finale. Secondo lui, tutti i corpi celesti sono in definitiva mossi da un "primo motore immobile" che deve cioè avere in sé la causa ultima del movimento, come pura energia, pura attività, senza alcuna "passività" e quindi deve essere immateriale[4] e perfetto: Dio. D'altra parte, Dio non può muovere come causa "efficiente" (in base alla

fisica aristotelica, ad ogni azione di una causa efficiente corrisponde una reazione su di essa da parte del corpo mosso, ciò che implica una inevitabile "passività" nello stesso agente). Dio agisce invece come causa *finale* del moto, cioè come oggetto di desiderio, "amore".

È anche noto che – per giustificare questo desiderio o amore in corpi materiali quali le stelle e i pianeti – Aristotele deve postulare l'esistenza di tutta una serie di "primi motori immobili", immateriali ma finiti (chiamati in seguito "intelligenze" e che saranno spesso identificati – nel pensiero medievale cristiano – con gli angeli), nella sfera delle stelle fisse e in quelle inferiori dei pianeti. Capaci di attività di conoscenza e di amore, essi comunicano il loro desiderio di unione con Dio, essere perfetto e fine di tutte le cose, alla sfera su cui risiedono, dando così origine al suo movimento circolare, sempre teso verso la sua meta eternamente irraggiungibile.

Sintesi cosmologica grandiosa, senza dubbio, questa di Aristotele, che può spiegare il fascino che essa eserciterà – come vedremo – nel pensiero arabo e cristiano medievale e più oltre sino all'epoca di Galileo.

Un suo punto debole, tuttavia, non tardò a manifestarsi. Era la teoria delle sfere omocentriche che – come sappiamo – Aristotele aveva ripreso da Eudosso e Callippo, dandole un senso fisico e che si rivelò sempre più incapace di "salvare i fenomeni" celesti, come quello della variazione della grandezza apparente dei pianeti nel corso dell'anno, finendo con l'essere soppiantata dalla teoria tolemaica.

Com'è noto, l'elaborazione di questa nuova spiegazione matematica dei movimenti dei corpi celesti fu resa possibile dai passi giganteschi fatti dall'astronomia greca, con l'apporto di quella babilonese[5], nel periodo ellenistico – sia sul piano delle osservazioni che su quello della teoria matematica degli eccentrici e degli epicicli – soprattutto con Apollonio (262-190 a.C.) e poi con il grande astronomo Ipparco (?- 120 a.C.).

Con il suo sistema, contenuto in quella che è senza dubbio la più grande opera astronomica dell'antichità, la *Sintassi* (chiamata poi dagli arabi *Almagesto*), Tolomeo (fiorito intorno al 130 d.C.) dette la prima completa spiegazione di tutti i movimenti celesti,

anche dal punto di vista quantitativo, sulla base di una trattazione rigorosamente matematica[6].

Seguendo Aristotele, Ipparco e la grande maggioranza dei suoi precursori, anche Tolomeo afferma l'immobilità della Terra. A sostegno di questa sua posizione, egli adduce gli argomenti tradizionali della comune esperienza, come pure quelli della fisica aristotelica, che accetta in generale.

Ma Tolomeo si distacca decisamente da Aristotele per quanto riguarda la teoria delle sfere omocentriche. Al posto di essa introduce una spiegazione puramente matematica del moto dei pianeti, che riprende e perfeziona quella già proposta da Ipparco.

Tre principi stanno alla base di tale spiegazione.

1) *Principio dei moti eccentrici*: la Terra non è al centro delle orbite planetarie, ma in una posizione eccentrica rispetto ad esse, come indicato nella Fig. 3. Con questo principio veniva spiegata facilmente sia la variazione di luminosità dei pianeti nel corso dell'anno, sia l'apparente variazione della loro velocità (in particolare, la lunghezza ineguale delle quattro stagioni).

2) *Principio degli epicicli*: esso viene introdotto per rendere conto del fenomeno delle "stazioni" e "retrogradazioni" nel moto dei pianeti. A tale scopo, il moto di ciascun pianeta viene considerato come risultante di due o più moti circolari. Il pianeta ruota su un circolo detto *epiciclo,* il cui centro – a sua volta – si muove su un circolo più grande (*deferente*). Il centro del deferente può eventualmente ruotare su un ulteriore *deferente,* e così via. La traiettoria geometrica risultante dalla combinazione di questi due o più moti circolari, detta *epicicloide,* rendeva ragione delle «stazioni» e «retrogradazioni». Fig. 4. Ma restavano altre irregolarità da spiegare. A tale scopo Tolomeo introdusse un suo terzo principio.

3) *Principio dell'equante.* Esso è illustrato nella Fig. 5.

Questo principio – introdotto per rendere conto della variazione della velocità angolare dei pianeti nel corso dell'anno – contravveniva al principio tradizionale della spiegazione dei movimenti celesti come combinazione di moti circolari uniformi.

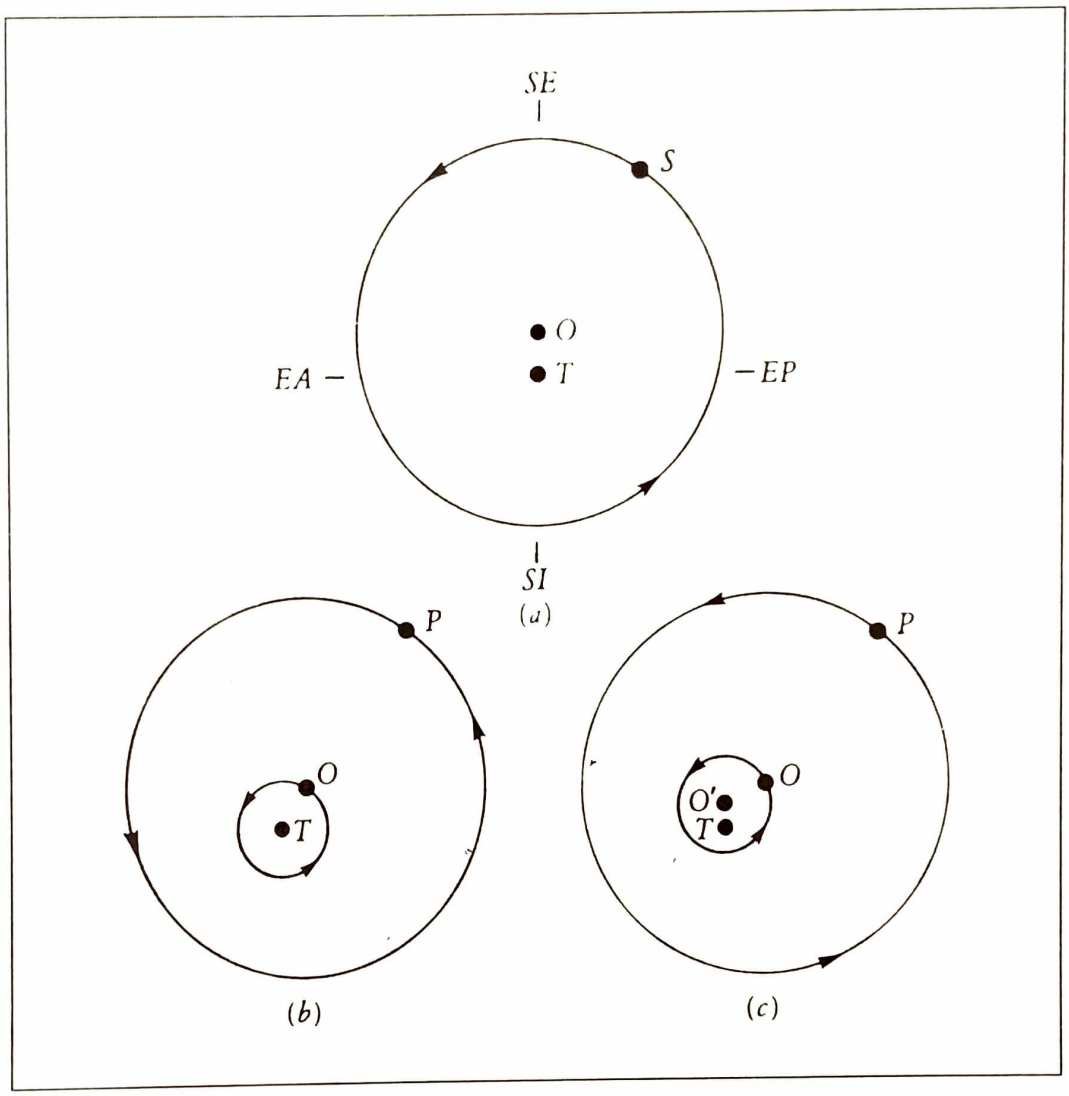

Fig. 3 – (*a*) Moto eccentrico semplice: il moto circolare del Sole intorno alla Terra non ha il suo centro in questa, è cioè *eccentrico* rispetto ad essa. (*b*) Eccentrico su deferente: mentre il pianeta P descrive il circolo che ha come centro il punto *O*, questo ruota a sua volta su un altro circolo (*deferente*), che ha come centro la Terra. (*c*) Eccentrico su eccentrico: in questo caso anche il centro del *deferente* non coincide con la Terra, ma è eccentrico rispetto ad essa. (Da Kuhn 1972, 90).

E lo stesso Copernico criticherà severamente Tolomeo proprio per questo motivo. Ma il principio dell'equante, unito agli altri due, permetteva finalmente la preparazione di tavole per la posizione dei corpi celesti, che erano in sufficiente accordo con i dati delle osservazioni. In particolare, il principio degli epicicli si rivelerà di una enorme duttilità. Variando opportunamente il raggio di

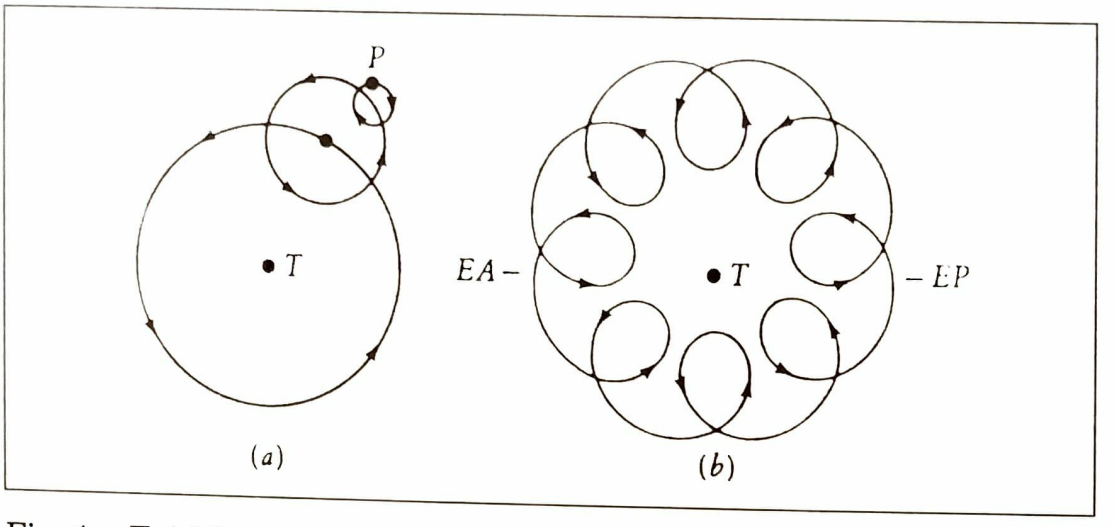

Fig. 4 – Epiciclo su epiciclo su deferente (a) e traiettoria tipica nello spazio (b), generata da questo sistema di cerchi compositi. Per semplicità si è disegnata una traiettoria che si chiude regolarmente su se stessa, il che non si verifica nel moto reale dei pianeti. (Da Kuhn 1972, 89).

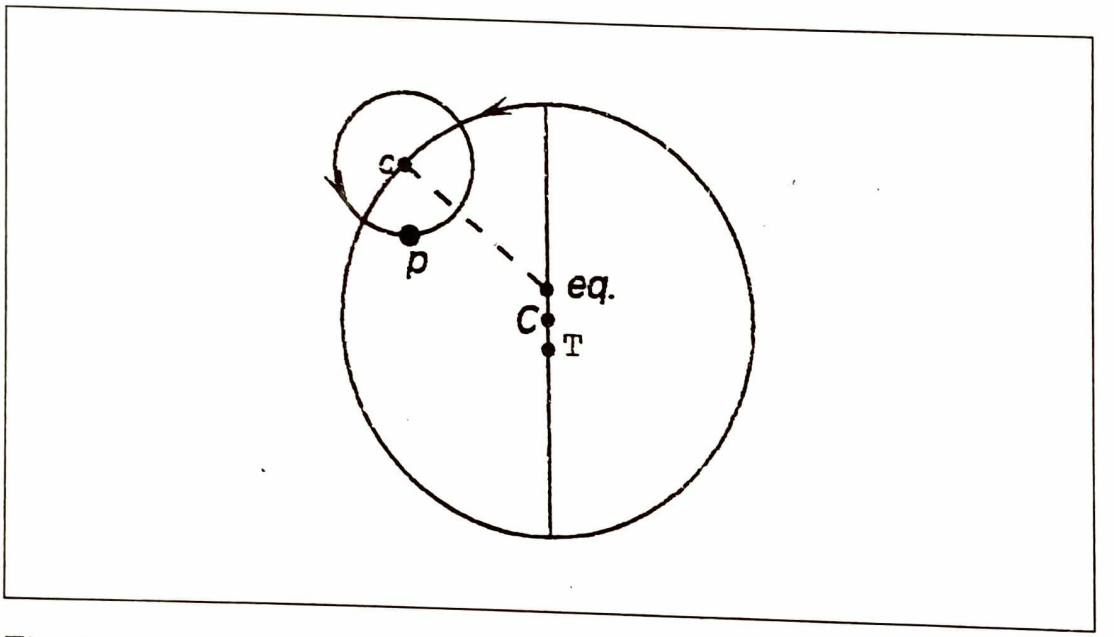

Fig. 5. – Principio dell'equante secondo Tolomeo. Il pianeta p si muove di moto circolare uniforme sull'epiciclo mentre il centro di questo c si muove sul deferente con una velocità angolare che è costante non rispetto al suo centro C, ma rispetto ad un punto eccentrico detto "equante", simmetrico rispetto alla Terra T, anch'essa eccentrica.

un epiciclo, come pure la direzione e la velocità del pianeta che si muove su di esso, o introducendo epicicli supplementari per ogni pianeta, si potevano correggere a piacere le imperfezioni delle orbite precedentemente calcolate. Per questo, «il sistema tolemaico rimase per più di 1400 anni l'alfa e l'omega dell'astronomia teorica»[7].

Per quanto Tolomeo non si fosse contentato di costruire questa teoria matematica ed avesse in un secondo tempo cercato di darle una veste fisica con il suo libro *Ipotesi dei pianeti*[8], per effetto dell'enorme influsso della *Sintassi* veniva ad approfondirsi ulteriormente la situazione già esistente di "divorzio" fra le vedute dei "filosofi della natura" e quelle degli "astronomi di professione". Mentre i primi si proponevano di conoscere la *struttura del mondo fisico* e la *causa* dei movimenti dei corpi celesti, i secondi si limitavano a formulare *schemi matematici* utili per il *calcolo* dei movimenti celesti, senza preoccuparsi troppo di dare a tali schemi una giustificazione "realistica".

In questa sommaria descrizione del pensiero cosmologico greco non può mancare un cenno alle teorie geocinetiche. Per quanto – come abbiamo già osservato – Aristotele e la maggioranza dei grandi astronomi greci avessero aderito al geocentrismo, nell'ambito del pensiero greco non mancarono varie concezioni geocinetiche. Tale era stata quella del moto della Terra, insieme con un'"anti-Terra", intorno a un "fuoco centrale" (da non confondere con il Sole) elaborata in seno alla Scuola Pitagorica da Filolao (circa 475 a.C.)[9]. In una successiva modifica di questa concezione, era stato eliminato il fuoco centrale come pure l'ipotesi dell'anti-Terra, rimettendo al centro dell'universo la Terra. Ma era stata conservata l'idea della rotazione di quest'ultima attorno al proprio asse in 24 ore. Un'idea che fu ripresa successivamente da un contemporaneo di Aristotele, Eraclide di Ponto (388-310? a.C.)[10].

Una vera teoria eliocentrica fu formulata meno di un secolo dopo da Aristarco di Samo (310-230 a.C.). Da un lato, il Sole diventa, per Aristarco, il centro dei movimenti di tutti i pianeti, compresa la Terra. Quest'ultima, d'altro lato, oltre al moto di rivoluzione intorno al Sole, conserva il moto di rotazione diurna attorno al proprio asse, già attribuitole da Filolao ed Eraclide. Invece le stelle fisse restano completamente immobili.

L'opera in cui Aristarco esponeva il suo sistema astronomico è andata perduta. Ma esistono numerose testimonianze antiche,

fra cui la più importante è quella di Archimede[11], contemporaneo più giovane di Aristarco, che attestano in maniera indubitabile come egli sia arrivato a quelle affermazioni fondamentali che 1800 anni dopo Copernico doveva far sue.

Resta tuttavia il fatto che nonostante l'esistenza di queste diverse teorie sul movimento della Terra, esse non ebbero successo (tranne rare eccezioni) fra i Greci. I motivi di questo insuccesso sono molteplici. Accanto a quelli basati sulla comune esperienza (la mancanza di qualsiasi percezione sensibile di questo moto; la non esistenza di tutta una serie di fenomeni che si supponeva sarebbero derivati da esso, come un vento impetuoso o lo spostamento del punto di caduta di un oggetto lanciato verticalmente, a ovest della verticale di lancio) c'erano – almeno per gli aristotelici – quelli che provenivano dalla teoria dei luoghi e moti naturali dei quattro elementi. In base ad essa, ambedue i movimenti della Terra venivano esclusi *a priori*, perché postulavano un moto *naturale rotatorio* delle particelle materiali che compongono la Terra, attorno al suo centro e non rettilineo verso di esso. Proprio per questo motivo, lo stesso Aristotele aveva rigettato la teoria del moto terrestre del pitagorico Filolao.

Ma a parte queste obiezioni del senso comune e della fisica aristotelica contro il movimento della Terra, c'era anche una reale difficoltà astronomica. Nel caso dell'esistenza di un moto terrestre, infatti, si sarebbe dovuto notare nel corso dell'anno uno spostamento della posizione delle stelle fisse sulla volta celeste, cioè il cosiddetto fenomeno della "parallasse stellare" (Fig. 6) che invece non si osservava.

Questo argomento, indipendente dalla fisica aristotelica, sembra sia stato preso in considerazione dallo stesso Aristarco, che avrebbe spiegato la mancanza della parallasse stellare come dovuta alle enormi dimensioni dell'universo e perciò alle immense distanze delle stelle fisse dalla Terra. Paragonato con tali distanze, il diametro dell'orbita terrestre intorno al Sole è di dimensioni trascurabili e perciò anche la parallasse si riduce praticamente a zero ed è quindi inosservabile.

D'altra parte, Aristarco non era riuscito a dare una formulazione matematica al suo sistema, mentre essa – come sappiamo – fu il grande risultato finale ottenuto dall'astronomia geostatica ellenistica. Era naturale quindi che la concezione di Aristarco

risultasse completamente eclissata dal successo del sistema tolemaico e che restasse tale anche nel periodo medievale, sia nel mondo culturale arabo che in quello dell'Europa occidentale cristiana.

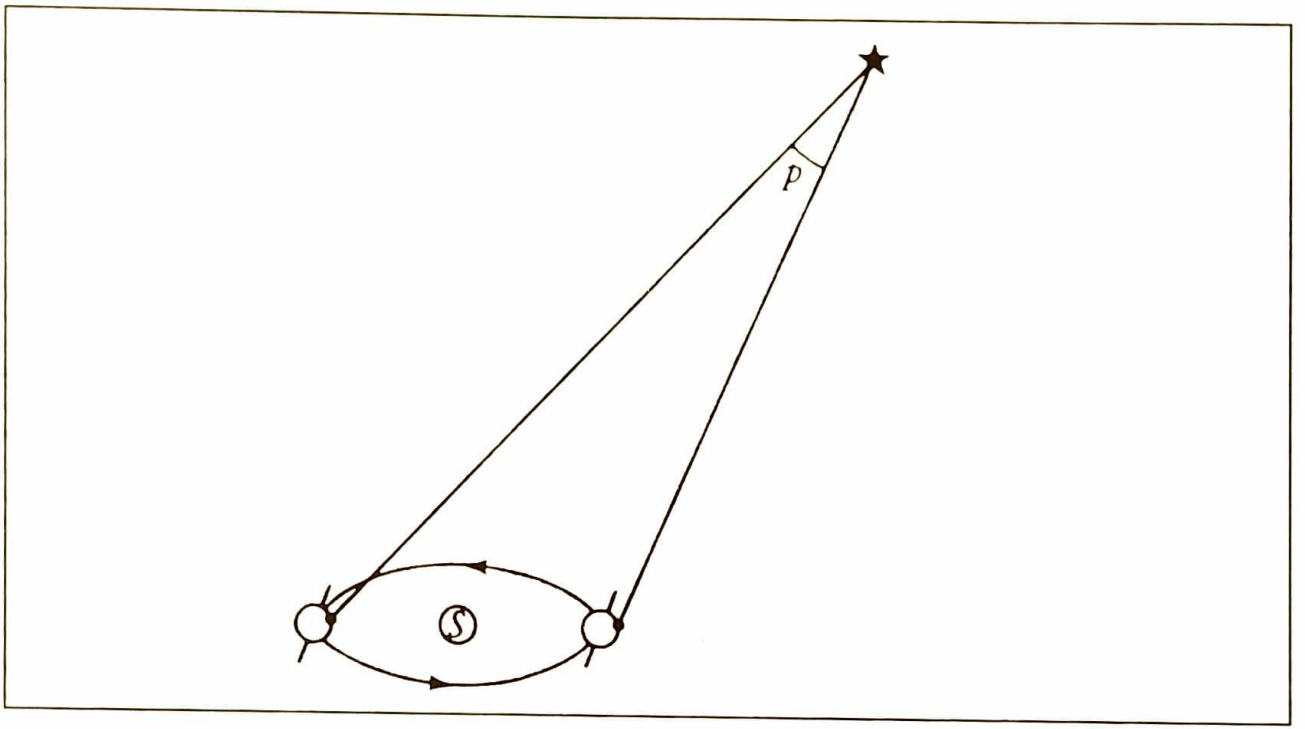

Fig. 6 – La parallasse annuale di una stella. Poiché la linea fra un osservatore terrestre e una stella fissa non rimane costantemente parallela a se stessa mentre la Terra si muove lungo la sua orbita, la posizione apparente della stella sulla sfera stellare dovrebbe cambiare di un angolo p nell'arco di sei mesi. (Da Kuhn 1972, 209).