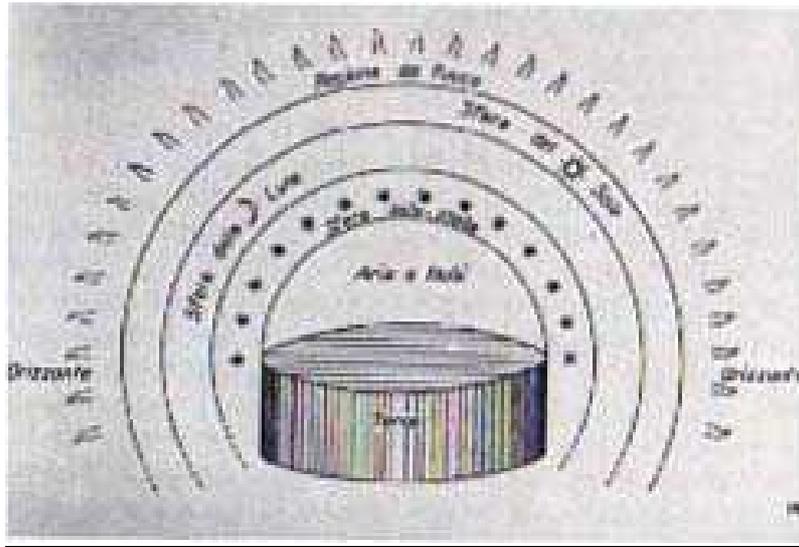
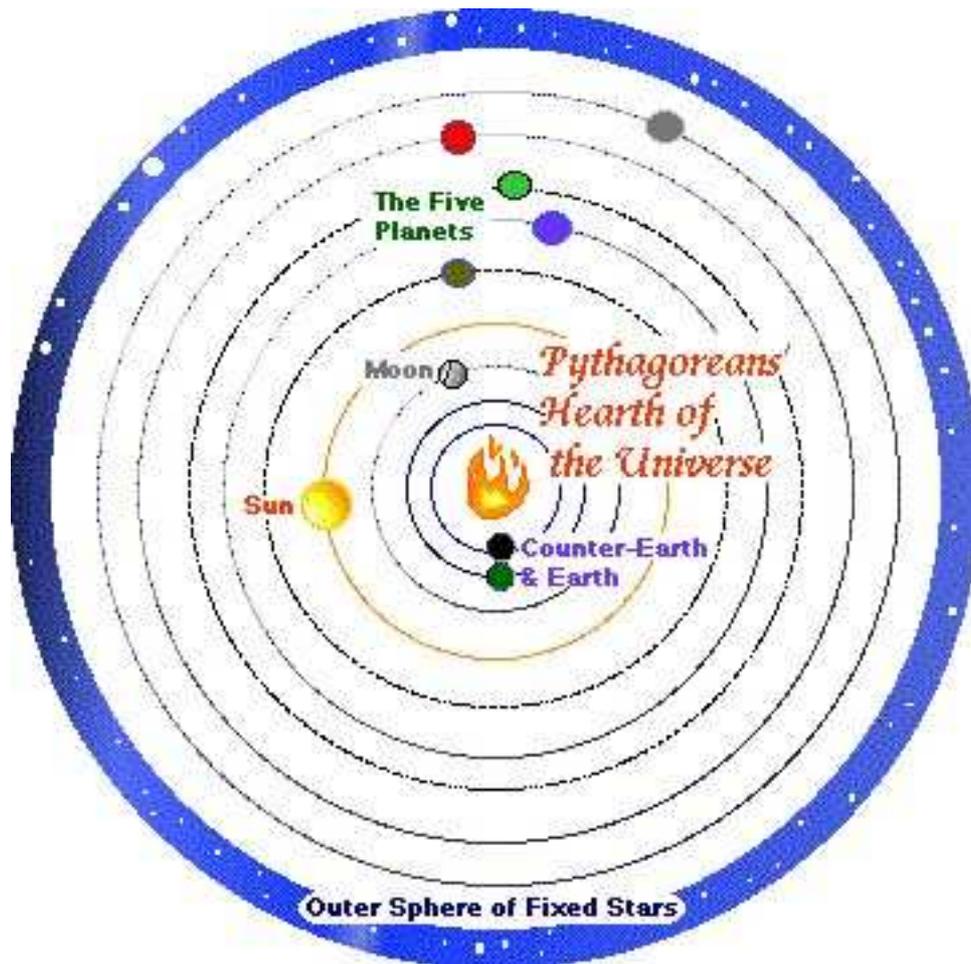


TALETE - ANASSIMANDRO E LA TERRA PIATTA



L'UNIVERSO DEI PITAGORICI E DI FILOLAO



METONE ED EUTEMONE

Diamo gli anni dal 470 al 400 a.C. come quelli tra i quali si estese la vita di **Metone** e quelli dal 460 al 390 per la vita del suo discepolo e collaboratore **Eutemone**.

Questi due astronomi vengono spesso citati assieme. Due sono i contributi fondamentali che vengono loro attribuiti e che li fanno considerare tra gli iniziatori dell'astronomia scientifica greca: l'osservazione del solstizio estivo del 432 a.C. e l'introduzione del ciclo lunisolare di 19 anni. Il primo contributo fa parte del primo tentativo (di cui si abbia notizia) di stabilire la durata dell'anno conteggiando il numero di giorni che intercorrevano tra solstizi ed equinozi. Tolomeo dice nell'*Almagesto* che il solstizio estivo osservato fu *durante l'arcontato di Apseudes*, il mattino del 21esimo giorno del mese egizio di Phamenoth (27 giugno del 432 a.C.). Questa osservazione è molto importante perchè venne usata da generazioni di astronomi successive. Per quanto riguarda la durata delle stagioni, ci si rifà ad un papiro del II secolo d.C. che viene denominato *Ars Eudoxii*, considerato una specie di brogliaccio di esercitazioni sull'opera di Eudosso e che attribuisce ai due la misura della durata delle stagioni in giorni, a cominciare dall'estate, con i valori 90, 90, 92 e 93. La maggior parte dei commentatori tende a prestare poca fede sui dati di questo papiro posteriore a Metone di più di 600 anni. Si tende a ritenere che la prima effettiva misura di durata delle stagioni sia quella eseguita da **Callippo** un secolo dopo Metone. L'indagine astronomica sulla durata dell'anno e delle singole stagioni doveva comunque già essere stata affrontata ai tempi di Metone ed Eutemone, perchè misurando le durate delle stagioni si poteva verificare l'assioma della uniformità del moto solare. A questo proposito va ricordato che nell'astronomia greca si ebbe fin dagli inizi, il sospetto latente, che perdurò fino ai tempi di Ipparco, circa una **durata variabile dell'anno tropico**.

Diodoro Siculo dice che il ciclo lunisolare di 19 anni venne introdotto da Metone pure nel 432. Abbiamo visto che era stato introdotto (ed adottato) in Babilonia una cinquantina di anni prima. Non si è in grado di stabilire se Metone lo apprese dai Babilonesi o se fu il frutto di suoi studi. La eguaglianza tra il numero di giorni di 235 mesi lunari e il numero di giorni di 19 anni non deve essere stata di molto difficile determinazione, per cui ad essa potrebbe essere pervenuto Metone indipendentemente. Le città greche non lo adottarono con uniformità. Si limitarono a tenerne conto per tenere sotto controllo le intercalazioni dei mesi. Ma inizialmente la scoperta di questo ciclo fu molto celebrata ad Atene. Si dice che il numero che ogni anno aveva nel ciclo venisse esposto nel Partenone su un'iscrizione d'oro, dando con ciò origine alla denominazione di **numero d'oro**.

(Ancora oggi del ciclo di Metone viene tenuto conto dalla Chiesa nel calcolo della data della Pasqua, in funzione di alcune costanti, tra le quali anche il numero d'oro. Per una convenzione stabilita da **Dionigi il Piccolo**, l'anno 1 a.C. corrisponde all'anno di inizio del ciclo di Metone numero 1.

(Dionigi, monaco di origine orientale vissuto a Roma a cavallo tra il V e il VI secolo della nostra era, è ricordato, tra l'altro, per aver riformato il sistema di datazione a partire dalla nascita di Gesù Cristo, data che venne da lui fissata al 25 dicembre dell'anno 758 dalla fondazione di Roma, introducendo con ciò un errore di calcolo di circa 5 anni).

Allora, il numero d'oro di un anno qualunque (che è il numero d'ordine dell'anno all'interno del ciclo) è dato dal resto della divisione di (anno + 1) per 19. Per esempio, per l'anno 2000 abbiamo: $(2000 + 1) / 19 = 105$ con resto 6: siamo cioè nel 105° ciclo di Metone, e il numero d'oro per l'anno 2000 è il 6.

PLATONE

Occorre a questo punto dare qualche notizia su Platone per la grande influenza (sia positiva che negativa) che le sue idee ebbero sullo sviluppo dell'astronomia. Platone nacque ad Atene intorno al 427 a.C, e vi morì intorno al 347. Partecipò alle guerre peloponnesiache (Atene contro Sparta) dal 409 al 404. Ritornato ad Atene, subì una grave delusione a causa delle degenerazioni della vita politica ateniese e, soprattutto, per la condanna a morte che venne inflitta al suo amico Socrate nel 399 a.C. Lasciata Atene, viaggiò in Egitto, in Sicilia e in Magna Grecia, dove venne a conoscenza delle dottrine pitagoriche e ciò rappresentò una svolta fondamentale nel suo pensiero per la attitudine di rispetto che acquisì verso gli studi matematici.

Ritornato ad Atene nel 387 a. C. fondò, su un terreno che era appartenuto a un certo Academos, una Scuola, che venne detta Accademia.

Attraverso l'insegnamento della scienza e della filosofia, egli sperava di svolgere opera di educazione sulle giovani generazioni per prepararle alla gestione della cosa pubblica con uno standard ben diverso da quello che lo aveva così tanto disgustato. L'Accademia platonica prosperò ad Atene fino all'anno 527 d.C., quando venne chiusa per ordine dell'imperatore **Giustiniano**, perché non poteva più essere tollerata quale istituzione pagana. Venendo ora, in breve, all'insegnamento di Platone, ci limitiamo soltanto ad accennare, per sommi capi, all'influenza che esso ebbe sulla matematica e l'astronomia (ricordiamo che a quel tempo l'astronomia era un ramo della matematica). Platone aveva il convincimento secondo cui la matematica costituiva la scienza che esercitava i più benefici influssi nell'educazione di un giovane. Sulla porta dell'Accademia aveva fatto porre la scritta : "*Chi non è edotto in geometria non entri qui*". Egli concentrò la sua attenzione sul concetto di prova e raccomandava di dare accurate definizioni per quanto riguardava sia le ipotesi che le tesi dei teoremi da dimostrare. Tutti i commentatori sono concordi nel ritenere che i più importanti lavori matematici del IV secolo a.C. furono eseguiti da amici o allievi di Platone.

Per quanto riguarda le sue concezioni astronomiche, queste comprendevano anzitutto la nozione di sfere cristalline, quindi solide, che trasportavano nei loro movimenti attorno alla Terra, naturalmente immobile al centro del cosmo, in successione la Luna, il Sole, Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno e da ultimo la sfera delle stelle fisse. Riteneva che la luce mostrata dalla Luna fosse luce riflessa dal Sole. Infine, per Platone erano assolutamente indiscutibili gli assiomi pitagorici (1) della circolarità dei moti di tutti gli astri (il cerchio era la figura geometrica che maggiormente racchiudeva i caratteri della perfezione) e (2) della loro uniformità. Come si vede, quindi, le concezioni astronomiche di Platone erano sostanzialmente quelle dei Pitagorici. Dove Platone proponeva innovazioni rispetto a Pitagora era nell'esortare gli astronomi a escogitare rigorosi metodi matematici che avrebbero permesso di spiegare le irregolarità (stazionamenti, moti retrogradi e apparenti variazioni di velocità) che venivano riscontrate nei moti planetari, **salvando i fenomeni**, cioè preservando i due assiomi pitagorici di cui sopra. Di questa esortazione è testimone lo storico Eudemo, secondo cui Platone propose agli astronomi "*. . . di trovare con quali supposizioni di movimenti regolari ed ordinati si potessero rappresentare le apparenze osservate nei moti dei pianeti . . .*". Questo fu il grande contributo di Platone all'astronomia perchè fu l'oggetto dell'astronomia nei secoli successivi.

Infine, riteniamo utile accennare a una disputa circa una possibile adesione di Platone, negli ultimi anni della sua vita, al sistema di Filolao, e perfino all'idea di un moto della Terra sul suo asse. In un passo della sua opera **Timeo** è detto che "*. . . la Terra nostra nutrice si avvolge intorno all'asse che è esteso per tutto l'universo, e Dio la fece guardiana della notte e del giorno . . .*". Da molti, antichi e moderni, l'aver associato le due frasi "*si avvolge intorno all'asse che è esteso per tutto l'universo* e "*e Dio la fece guardiana della notte e del giorno*", rappresenta una adesione all'idea di moto di rotazione. Aristotele, nel **De Coelo** afferma "*. . . alcuni, pur mettendo la Terra*

nel centro, la fanno rivolgersi intorno all'asse che attraversa il mondo, come sta scritto nel Timeo . . .". Ma altri autori, parimenti antichi e moderni, hanno espressamente criticato questa interpretazione. Per quanto riguarda la sua supposta adesione alle idee di Filolao, si ha un passo delle *Questioni platoniche* di Plutarco, in cui si legge: ". . . Teofrasto scrive che Platone, divenuto vecchio, si pentì di aver posta la Terra nel luogo centrale dell'universo . . .". Questa affermazione gode ancora oggi di credibilità, perchè Teofrasto, tra i più autorevoli discepoli di Platone (e in seguito seguace di Aristotele al Lyceum), autore di una *Storia dell'astronomia*, è considerato una fonte autorevole.

EUDOSSO

Eudosso di Cnido (410 - 350 a.C. circa) frequentò con molta probabilità sia Platone che Aristotele. Le notizie che possediamo su di lui ci vengono da Simplicio, oltre che da Aristotele. Quest'ultimo, di un paio di generazioni più giovane, molto probabilmente ebbe scambi culturali con Eudosso. Simplicio parla di Eudosso nel suo commentario al *De coelo* di Aristotele. Si rifà anche a un libro di **Sosigene**, un filosofo peripatetico del II secolo d.C. Sosigene, a sua volta, aveva commentato Eudosso attraverso una *Storia dell'astronomia* scritta da **Eudemo**, contemporaneo di Aristotele.

I due grandi interessi di Eudosso furono la matematica e l'astronomia. Abbiamo notizia di due opere di Eudosso di argomento astronomico (entrambe perdute): *I fenomeni*, una descrizione sistematica della sfera celeste e delle costellazioni (a quest'opera si ispirò **Arato di Soli** per scrivere un poema in versi, dello stesso titolo e argomento). L'altra opera, anch'essa perduta, fu **Delle velocità**. In essa era descritta una pietra miliare nella storia dell'astronomia, il cosiddetto sistema delle **sfere omocentriche**, cioè il primo approccio su basi scientifiche a una strutturazione geometrica del cosmo nel suo complesso.

Della sua vita si sa che fu a Taranto dove studiò matematica sotto la guida di Archita. Si sa di un suo soggiorno in Egitto dove compì studi di astronomia. Al suo ritorno in Grecia si stabilì a Cizico dove fondò una scuola che si dice aver goduto di una certa fama. Dopo un soggiorno ad Atene, in cui venne con tutta probabilità in contatto con Platone, si stabilì definitivamente nel suo luogo natale, Cnido dove svolse attività astronomica e di insegnamento presso un suo osservatorio.

Eudosso diede un importante contributo alla matematica con la teoria delle **grandezze incommensurabili** (una definizione negli *Elementi* di **Euclide**, fu da **Archimede** attribuita ad Eudosso, e il famoso matematico **Dedekind** affermò che trasse ispirazione da Eudosso per la sua teoria delle **sezioni** nel campo dei numeri razionali). Un altro importante contributo alla matematica fu il suo **metodo di esaustione**, un metodo di calcolo con il quale venivano risolti certi specifici problemi (ad esempio, il calcolo dell'area di un cerchio per confronto con aree successive di poligoni inscritti, aventi numero sempre maggiore di lati).

Il grande contributo di Eudosso all'astronomia fu l'ideazione del sistema delle sfere omocentriche. Come accennato, si tratta della prima ipotesi strutturale geometrica di visione del sistema solare (a quel tempo, dell'intero cosmo). Incominciamo a descrivere come Eudosso concepiva il sistema per la Luna. Si osservi la **figura 16** che descrive il sistema per la Luna. La Terra è al centro. La sfera (sezione sferica solida) (a), verde, ha fissate su di sé le stelle e ruota da est a ovest in un giorno, rispetto all'asse PP_1 . La sfera (anch'essa sezione sferica solida) (b), viola, ruota nello stesso senso della sfera (a) ma con un periodo di 18.6 anni. L'asse di questa sfera è imperniato nei punti M,N della sfera (a), ed è inclinato rispetto all'asse di questa sfera di 24° (valore dell'obliquità ai tempi di Eudosso). La sfera (c), infine, gialla, ruota in senso contrario a quello delle altre due nel periodo di un mese lunare. L'asse di questa terza sfera è imperniato nei punti R'S' della sfera (b) ed è inclinato di circa 5° rispetto all'asse di quest'ultima. La Luna è fissata sull' "equatore" della sfera (c).

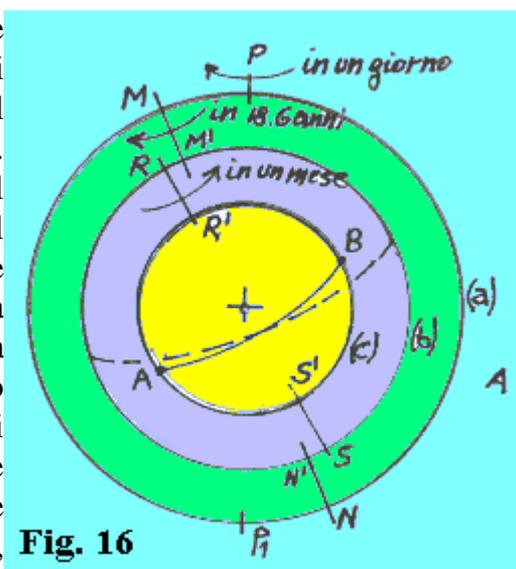


Fig. 16

Allora, l'osservatore al centro del sistema riceverà la sensazione:

- del moto mensile della Luna, dalla rotazione della sfera (c), sul percorso AB
- del moto di retrogradazione dei nodi lunari sull'eclittica, dalla rotazione della sfera (b)
- del moto giornaliero della Luna dalla rotazione della sfera (a)

Questa descrizione dei moti della Luna consentiva ad Eudosso di dare una spiegazione anche delle eclissi. I nodi lunari erano i punti nei quali avveniva, ad ogni mese lunare, l'attraversamento dell'eclittica da parte della Luna (per la rotazione della sfera (c)). Se capitava che la Luna fosse in fase di plenilunio durante questi attraversamenti, si aveva una eclisse lunare. Se invece avveniva che la Luna durante gli attraversamenti era in fase di novilunio, allora si potevano avere eclissi di Sole (per queste ultime, però, si tende a ritenere che ai tempi di Eudosso le idee fossero ancora piuttosto confuse: non si aveva ancora chiaro per quale ragione una stessa eclisse poteva essere totale per una località e solamente parziale per un'altra). Inoltre, il sistema forniva la spiegazione anche del perché le eventuali successive eclissi lunari avvenivano in segni zodiacali successivi in senso retrogrado (a causa della retrogradazione della sfera (b)).

Lo stesso sistema di tre sfere veniva usato da Eudosso per spiegare i movimenti del Sole, con queste differenze: (1) la sfera (b), anziché ruotare in senso retrogrado con periodo di 18,6 anni, ruotava in senso diretto con periodo di un anno e (2) la sfera (c) anziché essere inclinata di 5° era inclinata di circa 1° . Evidentemente qui c'è una visione erronea da parte di Eudosso perché, (per lo meno in quella fase iniziale di concezione del sistema delle sfere omocentriche), per giustificare i movimenti del Sole avrebbero dovuto bastare due sole sfere, la prima per giustificare il moto diurno, e la seconda per giustificare il moto diretto con periodo annuo lungo l'eclittica. Invece Eudosso introdusse anche per il Sole una terza sfera con le caratteristiche dette. Ciò faceva sì che il Sole assumeva anche una oscillazione annua in latitudine celeste e questo sembra sia dovuto a una opinione abbastanza consolidata all'epoca di Eudosso (e che si protrasse anche nei secoli successivi fino a estinguersi solo con Tolomeo). Lo stesso Aristotele, che elaborò in seguito a suo modo il sistema di Eudosso, accettava il moto del Sole in latitudine.

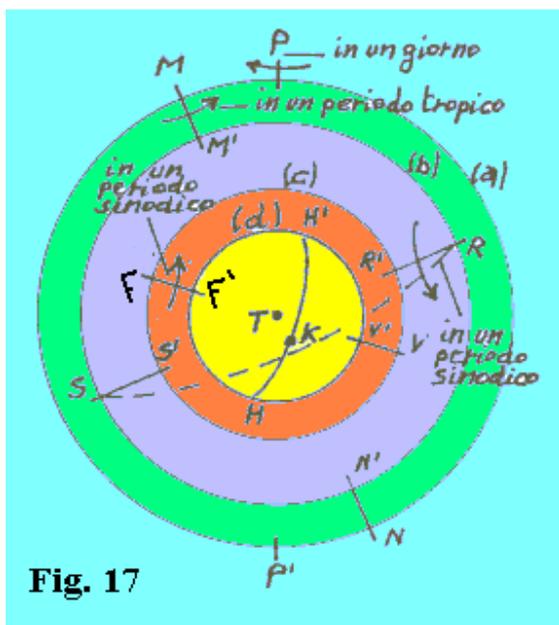


Fig. 17

La spiegazione dei moti planetari veniva data da Eudosso secondo un sistema di quattro sfere per ogni pianeta. Le due più esterne erano analoghe alle sfere (a) e (b) della figura 16, con la differenza che la sfera (b) aveva rotazione secondo il moto diretto, e con periodo pari al periodo tropico di ogni pianeta. Le sfere (c) e (d) vennero introdotte per spiegare le fasi di retrogradazione. Come si vede dalla **figura 17**, l'asse della sfera (c) è posto nel piano dell'eclittica, va ad impennarsi nei punti R ed S della sfera (b) e ruota con periodo pari al periodo sinodico del pianeta. La sfera (d) ha l'asse scostato rispetto all'asse della (c) di una quantità di cui diremo tra poco, e ruota pure con periodo pari al periodo sinodico del pianeta, ma in senso contrario rispetto a quello della sfera (c). Il pianeta si trova sull'"equatore" della sfera (d).

Siccome l'effetto di queste due sfere era quello di far descrivere una figura "ad otto" (la famosa "ippopeda", secondo Simplicio, il percorso addestrativo per i cavalli), il risultato di questa costruzione è che il pianeta doveva apparire agli occhi dell'osservatore geocentrico, muoversi

secondo il moto diurno per la sfera (a), muoversi lungo l'eclittica per la sfera (b), e contemporaneamente alternare fasi di moto retrogrado, di stazionamenti, di sollevamenti e abbassamenti rispetto all'eclittica, per l'azione combinata delle sfere (c) e (d). L'angolo tra gli assi delle due sfere era responsabile, secondo proporzionalità diretta, della larghezza dell'ippopeda.

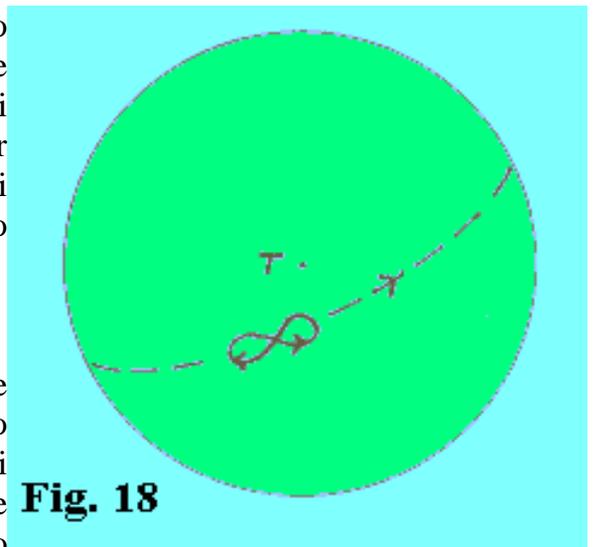


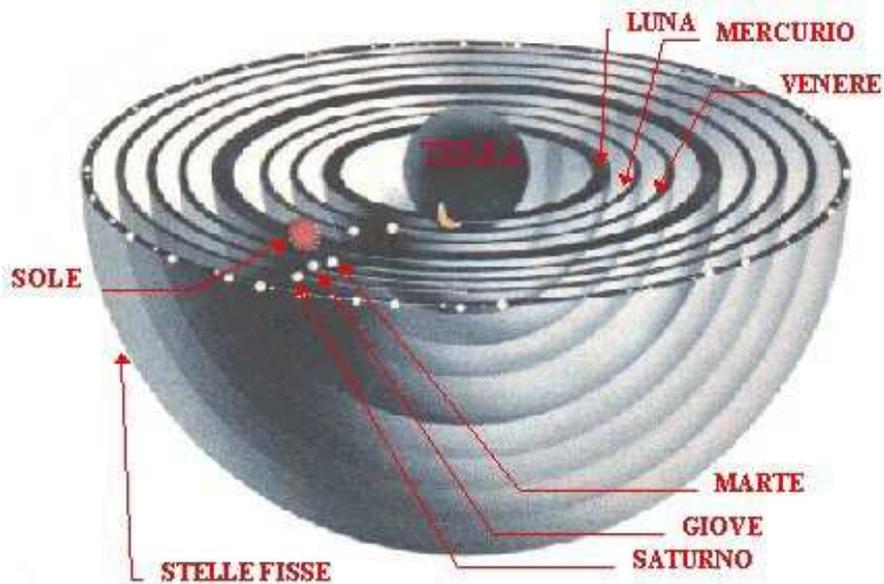
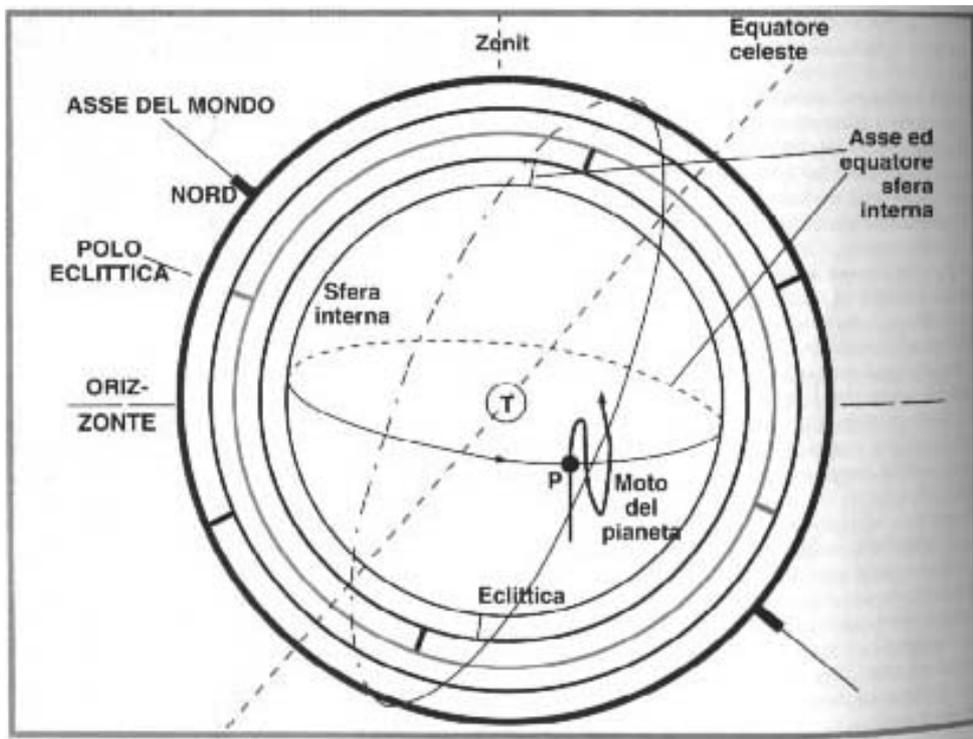
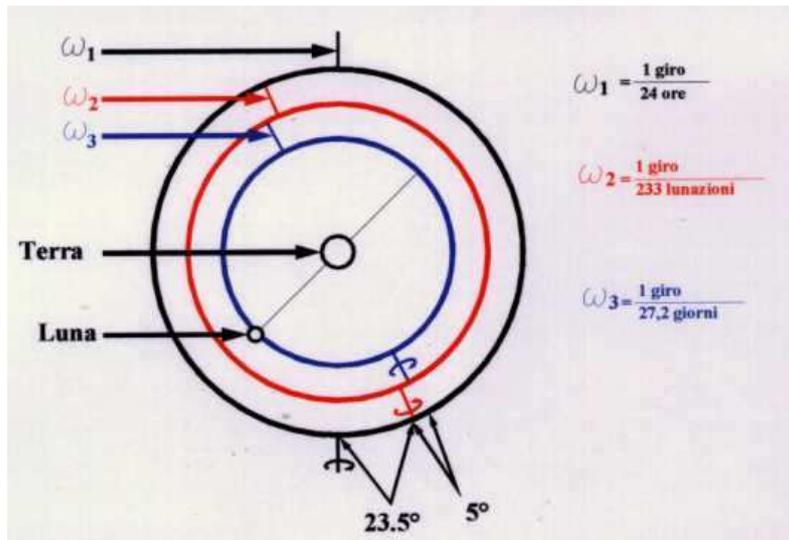
Fig. 18

I commentatori moderni hanno osservato che per Venere e Marte le caratteristiche di moto dei due pianeti erano tali che il modello di Eudosso non era in grado di produrre alcun moto retrogrado. Appare poco probabile che nel proporre il suo modello, Eudosso stesso sia stato

fermamente convinto della sua validità nello spiegare tutte le incongruenze che si osservavano nei moti planetari, specialmente dal punto di vista quantitativo. Più probabile è l'opinione che egli lo abbia concepito come un punto di partenza, per la teoria planetaria.

Aristotele dice nella *Metafisica* che la modifica apportata da Callippo al sistema di Eudosso consistette nell'aggiungere una quinta sfera a Mercurio, Venere e Marte, e due ulteriori sfere ciascuno, ai sistemi di Luna e Sole. Quanto alle ragioni di queste aggiunte di sfere, Simplicio dice che con esse venivano spiegate le anomalie solare e lunare, mentre per le sfere aggiunte a Mercurio, Venere e Marte egli si limita a dire che Eudemo, a suo tempo, aveva dato le ragioni.

Anche Aristotele intervenne nel modificare il sistema di Eudosso, e diede anche la ragione del suo intervento: Egli volle che i sistemi di quattro sfere concepiti da Eudosso per ogni pianeta venissero integrati in un **unico sistema**. Per ottenere ciò si doveva superare l'inconveniente che derivava dal fatto che all'occhio dell'osservatore geocentrico i movimenti di un pianeta, ad esempio Mercurio, sarebbero apparsi falsati dai movimenti prodotti dai sistemi di sfere successivi. Allora, Aristotele propose che tra un sistema di quattro sfere di un pianeta (sfere che Aristotele chiamava **deferenti**, in quanto generatrici dei moti originari del pianeta) e il sistema interno adiacente di altrettante quattro sfere deferenti, venisse interposto un sistema di tre sfere dette (sempre da Aristotele) **reagenti**, così chiamate in quanto ciascuna di esse, ruotando in maniera contraria a quella delle tre sfere deferenti più interne del sistema superiore, annullava gli effetti del loro moto. In totale quindi Aristotele proponeva un sistema di 56 sfere. Il fatto che un maestro dell'autorità di Aristotele sia intervenuto, pur apportando modifiche, ma accettando il principio basilare delle sfere omocentriche, dimostra che si ebbe una certa fase iniziale durante la quale il sistema di Eudosso godette di favorevole accoglienza, non fosse altro che per la originalità della concezione, supportata indubbiamente dalla fama di eminente matematico di cui godeva Eudosso. Simplicio dice che il primo a rendersi conto della incapacità del sistema a spiegare le variazioni di distanza dei pianeti, indicate dalle loro variazioni di luminosità (chiaramente percepibili per Venere e Marte), e della incapacità anche a spiegare le variazioni di distanza della Luna, (indicate dal fatto che si avevano eclissi di Sole anche anulari), fu **Autolico di Pitane**. Si tende a pensare invece che in un ambiente così vivacemente speculativo come quello della comunità culturale greca, le critiche non abbiano tardato a fiorire, addirittura fin dai tempi di Aristotele e dello stesso Eudosso. Il concetto di sfere cristalline recanti i pianeti sul loro equatore invece rimase per quasi duemila anni.



CALLIPPO

Poniamo le date del 370 e del 310 a.C. come date di estensione della vita di **Callippo di Cizico**, avvertendo che si tratta di date stimate.

Simplicio ci informa che, insieme con **Polemarco**, Callippo fu discepolo di Eudosso in Atene.

Callippo è ricordato per aver eseguito una misura di durata delle stagioni, che risultò più precisa di quella eseguita un secolo prima da Metone. I valori di Callippo furono di 94 giorni per la primavera, 92 per l'estate, 89 per l'autunno e 90 per l'inverno. Come si vede, il totale di 365 giorni esatti risente ancora di imprecisione. Altra sua importante innovazione astronomica fu l'aver adattato il ciclo di Metone al cosiddetto **periodo (ciclo) di Callippo**. Questo fu sostanzialmente un ciclo di quattro periodi metonici. La maggiore accuratezza derivava dal fatto che in esso, per la prima volta nell'astronomia greca, si faceva uso della durata dell'anno di 365.25 giorni. Quindi il ciclo di Callippo aveva la durata di $4 \cdot 235 = 940$ mesi lunari, ma con una diversa distribuzione tra mesi di 29 e mesi di 30 giorni, rispetto al ciclo di Metone. Anziché avere secondo il ciclo di Metone 440 mesi di 29 giorni e 500 mesi di 30, che portava ad un totale di 27760 giorni, il ciclo di Callippo stabiliva 441 mesi di 29 giorni e 499 di 30, per un totale di 27759 giorni. E questo ciclo si accordava esattamente con una durata annua di 365.25, perché $365.25 \cdot 19 \cdot 4 = 27759$. Il ciclo di Callippo venne adottato da alcuni astronomi greci per servire come calendario. Tolomeo, ad esempio, cita un'occultazione delle Pleiadi osservata da Timocharis nel secolo III a.C. così: *Timocharis, che osservò ad Alessandria, registra quanto segue. Nel 47esimo anno del Primo Periodo di Callippo di 76 anni, nell'ottavo giorno di Anthesterion, verso la fine della terza ora [della notte], la metà meridionale della Luna fu vista coprire esattamente dalla terza parte alla metà delle Pleiadi.*

Si trattava dunque di un calendario scientifico, che veniva usato solo da alcuni astronomi, e non aveva relazione alcuna con il calendario ateniese, se non per il fatto che da quest'ultimo traeva i nomi dei mesi. Come abbiamo già avuto occasione di ricordare, gli astronomi erano costretti a ricorrere a questi calendari perchè i calendari civili usati dalle città greche erano amministrati in maniera enormemente disordinata. L'anno 1 del Primo Ciclo di Callippo venne posto al solstizio estivo dell'anno 330 a.C.

Questa prassi di rivolgersi ad altri calendari per fare riferimento ad eventi astronomici, la troviamo anche con Ipparco e con lo stesso Tolomeo. Ipparco, ad esempio, faceva uso del Ciclo di Callippo per riferirsi all'anno, mentre per il mese preferiva riferirsi a quello egizio. Questa modalità di usare nomi egizi per i mesi e Cicli di Callippo per gli anni cessò completamente con Tolomeo, che, come è noto, per scopi scientifici si riferiva totalmente al calendario egizio. Delle modifiche apportate da Callippo al sistema delle sfere omocentriche di Eudosso abbiamo già detto.

ARISTOTELE

Diamo brevemente alcune notizie sulla vita di **Aristotele** perchè il campo dello scibile da lui affrontato lo rende un vero caposaldo nella storia della scienza, non ultimo dell'astronomia. Egli nacque intorno all'anno 384 a.C. nell'isola di Stagira (Macedonia). Morì nell'anno 322 a.C. Il padre di Aristotele, ebbe un tale successo nell'espletamento della propria arte medica da essere chiamato dal re di Macedonia, Aminta III, a corte, alla capitale dello stato, Pella. Qui non è azzardato supporre che Aristotele abbia stretto amicizia, fin da bambino, con il figlio del re, **Filippo II**, suo coetaneo. Nel 367 a.C., all'età di 17 anni, Aristotele divenne allievo di **Platone**, all'Accademia di Atene, dove rimase per vent'anni, esercitando anche l'insegnamento. Nel 347 a.C. a causa dei suoi legami con Filippo di Macedonia (che nel frattempo aveva intrapreso una fase di espansionismo militare), Aristotele fu costretto a lasciare l'Accademia e Atene.

Nel 343 a.C. raggiunse la corte di Macedonia a Pella e rimase colà per sette anni. Alcuni hanno suggerito che egli abbia svolto le funzioni di tutore del giovane **Alessandro**, figlio di Filippo. Nel 339 a.C. in seguito alla non elezione alla direzione dell'Accademia (non è da escludere che si sia trattato di un vero e proprio sgarbo fatto dagli Ateniesi a Filippo), Aristotele si allontanò da Atene, recandosi alla sua isola natale, Stagira, e recando con sé una cerchia di sapienti. Nel 335 a.C., con il sostegno di Alessandro, che era succeduto al padre assassinato, fondò ad Atene una nuova scuola concorrente con l'Accademia, il **Lyceum**.

Dopo la morte di Alessandro, nel 323 a.C., essendo risorti in Atene sentimenti di avversione verso la Macedonia, Aristotele ritenne opportuno allontanarsene per stabilirsi in Calcide in una proprietà che era appartenuta a sua madre, e qui si spense l'anno seguente.

Dunque, con Eudosso si ebbe una prima realizzazione dell'esortazione di Platone a risolvere il problema di spiegare le apparenti imperfezioni nei moti dei pianeti tramite combinazioni di movimenti originari circolari e uniformi. Vedremo in seguito che questa esortazione di Platone verrà applicata più volte, centinaia di anni dopo, ad altre costruzioni geometriche dell'astronomia, da parte di altri astronomi greci.



ARISTARCO DI SAMO

Anche della vita di **Aristarco** non si sa quasi nulla, se non che nacque quasi certamente nell'isola di Samo intorno al 310 a.C., che morì intorno al 230 a.C., probabilmente ad Alessandria e che fu allievo di Stratone di Lampsaco, il successore di Teofrasto alla direzione del Lyceum di Atene. Si ritiene anzi che l'istruzione di Aristarco sia avvenuta addirittura ad Alessandria, dove l'intero corpo docente del Lyceum si era trasferito assieme a Stratone. Da Tolomeo sappiamo che osservò il solstizio estivo del 280 a.C. La stima di cui godette presso i contemporanei è attestata dal fatto che era chiamato "*il matematico*".

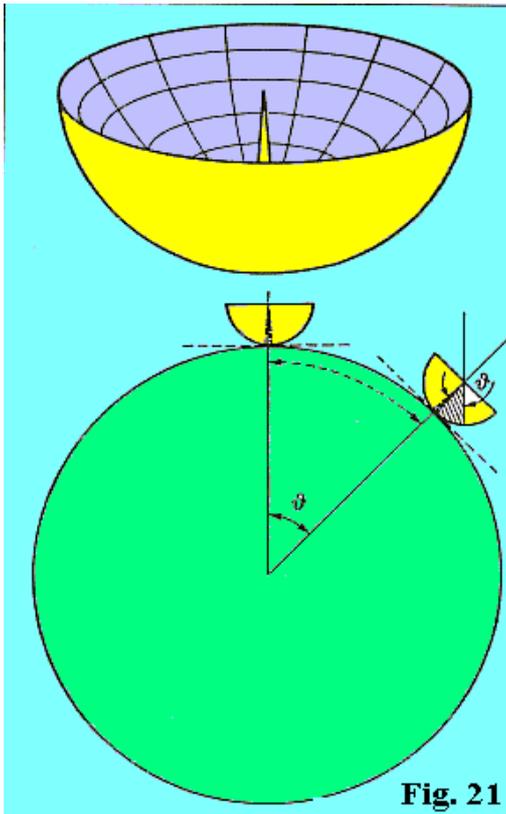


Fig. 21

Secondo Vitruvio, Aristarco fu l'inventore di un tipo di orologio solare, la **scafa** (la figura illustra l'uso che ne fece Eratostene per misurare l'altezza meridiana del Sole ad Alessandria - si veda il paragrafo dedicato ad Eratostene). A lui è riconosciuto il merito di essere stato il primo aperto sostenitore del moto della Terra sul suo asse e del moto della stessa attorno al Sole. A lui cioè è dovuta la prima formulazione dell'ipotesi eliocentrica. Altro motivo di enorme popolarità di cui gode Aristarco (presso i moderni) è che una sua opera *Delle dimensioni e distanze di Sole e Luna* sia giunta fino a noi.

La migliore testimonianza dell'attribuzione ad Aristarco della ipotesi eliocentrica ci viene dall' *Arenario* di **Archimede**, che visse in epoca abbastanza prossima ad Aristarco. Archimede dice chiaramente nell'*Arenario* che Aristarco riteneva che la Terra si muoveva intorno al Sole in un cerchio e che la ragione per la quale tale moto non si manifestava con una parallasse annua delle stelle fisse era dovuto al fatto che queste si trovavano a distanze enormemente maggiori del diametro dell'orbita terrestre. Purtroppo queste idee causarono ad Aristarco non poca avversione tra i contemporanei. Si dice (Plutarco) che il

filosofo stoico Cleante di Asso abbia auspicato che Aristarco venisse condannato per empietà.

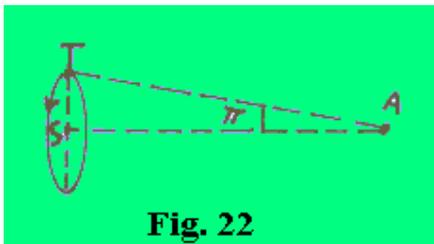


Fig. 22

Per illustrare alcuni aspetti dei contributi di Aristarco, riprendiamo dalla meccanica celeste il concetto di parallasse. Si chiama parallasse annua di una stella A l'angolo sotto il quale dalla stella si vedrebbe il semiasse dell'orbita terrestre, supposto normale alla congiungente Terra-Sole.

A causa della parallasse, spostandosi l'osservatore sull'orbita terrestre tra i punti H e K, la stella A, proiettata sulla sfera celeste viene a spostarsi tra i punti H' e K', descrivendo in un anno un piccolissimo ellisse, talmente piccolo che soltanto nel 1837 fu possibile determinare la parallasse annua della stella fissa più vicina. Quindi Aristarco aveva visto giusto più di duemila anni prima. Alcuni sostengono che le sue idee chiare sulle enormi distanze delle stelle fisse dalla Terra, siano state esiziali nel fargli acquisire la nozione dell'assurdità di una sfera stellata (solida) così distante dalla Terra e tuttavia ruotante attorno ad essa.

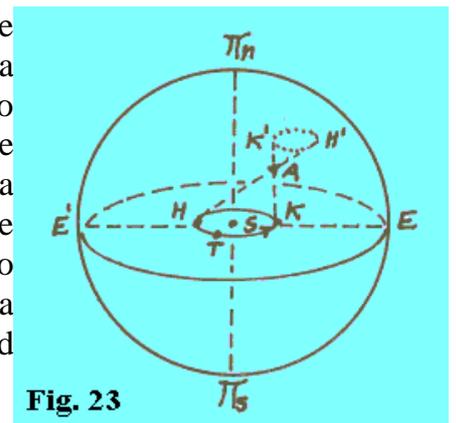


Fig. 23

Aristarco fu il primo ad affrontare il problema di misurare geometricamente le distanze di Luna e Sole dalla Terra, nonché le dimensioni stesse dei due astri. Egli intuì correttamente che il problema richiedeva per prima cosa di misurare l'angolo tra Luna e Sole nell'istante esatto in cui la Luna si trovava in quadratura con il Sole. In figura 24, L è la Luna alla quadratura, T il centro della Terra e S il centro del Sole. Secondo la misura di Aristarco l'angolo STL era "meno di un quadrante, di un trentesimo di quadrante", cioè tre gradi meno di novanta gradi, cioè 87° (così ci si esprimeva a quei tempi, perché i gradi non erano ancora in uso in Grecia).

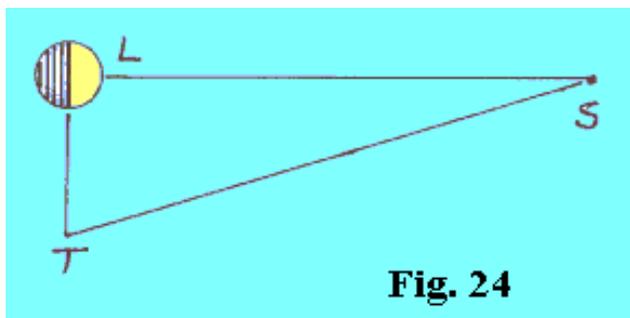


Fig. 24

Aristarco fu il primo ad

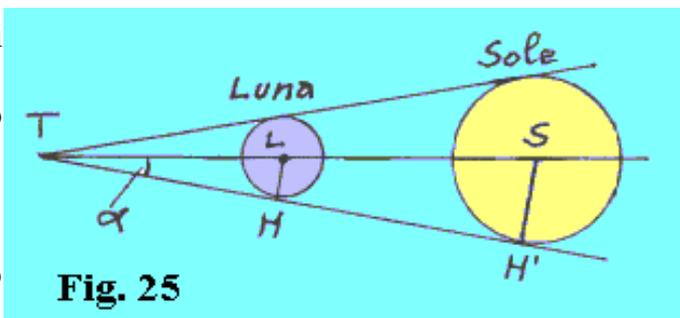


Fig. 25

affrontare il problema di misurare geometricamente le distanze di Luna e Sole dalla Terra, nonché le dimensioni stesse dei due astri.

Allora, Aristarco (non conoscendo ancora la trigonometria) lavorando con metodo euclideo determinò che TS era "da 18 a 20 volte TL". (Trigonometricamente diremmo $TL = TS \cdot \sin(\angle STL)$, cioè $TL = TS \cdot \sin 3^\circ$, da cui $TS = TL \cdot 19.1$). Evidentemente, a quell'epoca la strumentazione di cui poteva disporre Aristarco era grossolanamente imprecisa, e sarebbe stato assolutamente impossibile per lui misurare l'effettivo angolo STL che è di circa $89^\circ 51'$ (TS, in effetti, è circa 390 volte TL).

Il progresso nel ragionamento successivo di Aristarco consistette nell'osservazione che, poiché alle eclissi totali di Sole (Fig. 25) questo veniva coperto per intero dalla Luna, si poteva dedurre che i loro diametri apparenti erano eguali. Si poteva allora costruire una figura come questa, in cui entrambi i mezzi dischi apparenti sottendono lo stesso arco α . Allora, essendo TS da 18 a 20 volte TL, anche SH' doveva essere da 18 a 20 volte LH. Evidentemente, l'errore iniziale di misura si ripercuoteva nel calcolo delle misure dei raggi relativi.

Nel procedere ulteriormente, anziché seguire il complicato modo di ragionare euclideo di Aristarco, utilizzeremo la trigonometria. Diamo il concetto di parallasse orizzontale di un oggetto celeste, nel nostro caso della Luna. Mentre un osservatore O (posto sulla superficie terrestre) osserva il sorgere della Luna L (altezza Luna zero), simultaneamente un osservatore fittizio posto al centro della Terra T, la osserva alta sull'orizzonte di un angolo p, detto **parallasse orizzontale**. Si ha: $\sin(p) = r / d$. (d è la distanza Terra-Luna).

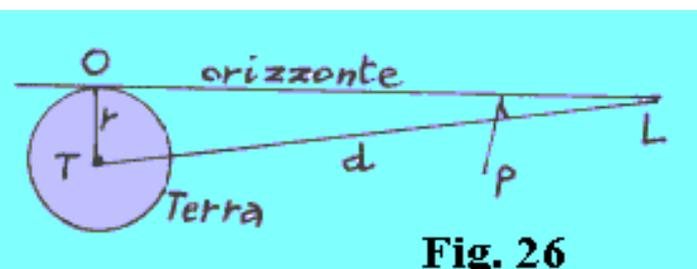
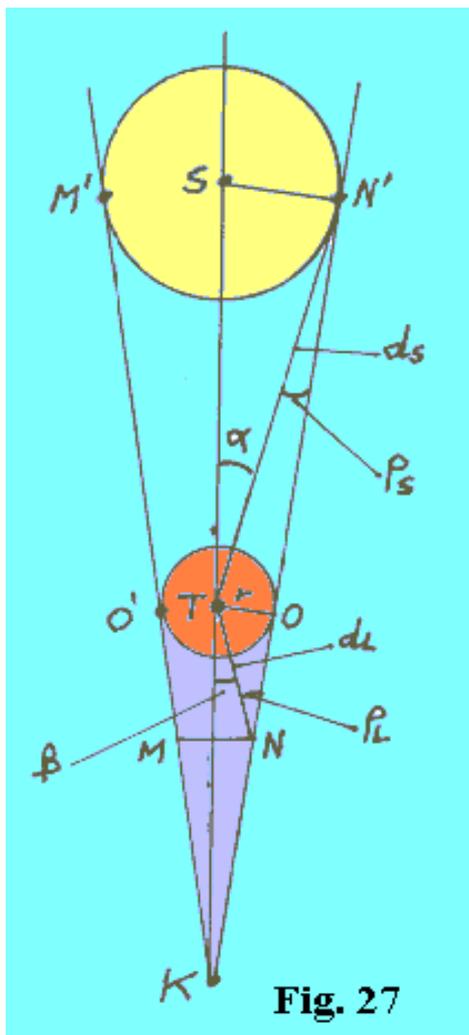


Fig. 26



A questo punto Aristarco considera la situazione di eclisse di Luna. Come è noto, questa si ha quando la Luna, circolando attorno alla Terra, va ad immergersi nel cono d'ombra terrestre, **O-O' - M-K-N** (qui immaginiamo che **MN** sia la traccia del percorso lunare all'interno del detto cono d'ombra). α e β siano i raggi angolari del Sole e del cono d'ombra, misurati dal centro della Terra **T**. P_S e P_L siano le parallassi orizzontali rispettivamente di Sole e Luna, sopra definite. Vediamo che

$$\alpha + \beta = 180^\circ - N'TN.$$

Ma dal triangolo $N'TN$ si ha anche:

$$P_S + P_L = 180^\circ - N'TN \text{ per cui abbiamo: } \alpha + \beta = P_S + P_L.$$

Così come in precedenza Aristarco aveva determinato che il raggio del Sole era circa 19 volte quello della Luna, adesso afferma correttamente (a meno dell'errore iniziale di misurazione) che anche $P_L = 19 \cdot P_S$ e ciò lo porta a concludere che $\alpha + \beta = 20 \cdot P_S$ (1)

Infine (in effetti, in ipotesi che aveva dato preliminarmente alla dimostrazione) Aristarco dice che "l'estensione dell'ombra terrestre [lungo MN] è di due lune" per cui "l'angolo β è di una luna". Altra ipotesi preliminare di Aristarco era che "la Luna sottende un quindicesimo di segno di zodiaco" (e questo è uno stranissimo errore da parte di Aristarco, che avrebbe evidentemente dovuto dire "un sessantesimo di segno di zodiaco"). Siccome secondo un'altra ipotesi Sole e Luna hanno lo stesso diametro, per Aristarco si ha: $\alpha = 1^\circ$ e $\beta = 2^\circ$, per cui, sostituendo nella (1) si ha $P_S = (3/20)^\circ$ e $P_L = (3/20) \cdot 19 =$

$(57/20)^\circ$

Ottenuti i valori di parallasse solare e lunare, Aristarco passa a calcolare le distanze assolute di Sole e Luna dalla Terra, d_S e d_L (noi lo faremo sempre trigonometricamente, indicando con r il raggio terrestre).

Dal triangolo rettangolo $N'TO$ si ha : $d_S = r / \sin P_S$, per cui per Aristarco d_S è circa **382 raggi terrestri**.

Dal triangolo rettangolo NTO si ha: $d_L = r / \sin P_L$, per cui d_L risulta circa **20 raggi terrestri**.

Per i diametri effettivi di Sole e Luna, il calcolo trigonometrico dà:

diametro effettivo Sole = $2 \cdot SH' = 2 \cdot TS \cdot \sin(\alpha) = 2 \cdot d_S \cdot \sin 1^\circ =$ **6.6 diametri terrestri**

diametro effettivo Luna = $2 \cdot LH = 2 \cdot TL \cdot \sin(\beta) = 2 \cdot d_L \cdot \sin 2^\circ =$ **0.31 diametri terrestri**

(Invece Aristarco, sempre ragionando con metodo euclideo, giunge ai seguenti risultati: diametro effettivo Sole: **compreso tra 6.33 e 7.17 diametri terrestri** diametro effettivo Luna: **compreso tra 0.398 e 0.317 diametri terrestri**).

Per quanto riguarda l'"errore" di Aristarco nel dare il valore di 2° per i diametri apparenti di Sole e Luna in una delle sue ipotesi preliminari, è stata avanzata la spiegazione secondo cui, all'epoca della stesura della dimostrazione di cui sopra, Aristarco non fece alcuna misurazione effettiva dei diametri, ma si limitò a dare quel valore di 2° tanto per mettere a disposizione della dimostrazione geometrica un valore. Ciò perché nella visione procedurale scientifica del III secolo a.C. il **metodo** era preminente rispetto alle operazioni materiali inerenti le misurazioni. Inoltre, nell'Arenario Archimede dice che "Aristarco scoprì che il diametro del Sole appariva essere $1/720$ del circolo dello zodiaco", cioè mezzo grado. Quindi potrebbe darsi che Aristarco abbia

eseguito la misura del diametro solare **dopo** la scrittura della dimostrazione, ma si sia del tutto dimenticato (o addirittura abbia trascurato) di modificare l'ipotesi dei 2°.

Aristarco ci appare come un autentico cultore dell'astronomia intesa come scienza, un vero scienziato che si dedicò soltanto a stabilire la verità fondandola su dati di fatto o su ipotesi che meglio si accordano con le leggi della natura e non su semplici apparenze. Il suo nome fu celebre in tutta l'antichità più di quanto possa apparire dalle scarse notizie di lui pervenuteci. Vitruvio nel *De Architectura*, lo cita fra gli uomini più insigni .

ERATOSTENE

Eratostene nacque a Cirene, la Bengasi dell'odierna Libia, nel 276 e visse fino al 194 a.C.

Dopo essere stato tutore del figlio del re d'Egitto, nel 240 a.C. venne nominato a dirigere la Biblioteca di Alessandria, che veniva chiamata **Mouseion**, essendo appunto il tempio delle muse. I commentatori moderni hanno espresso il loro stupore per il fatto che il suo ingegno sembra non aver goduto presso i contemporanei della fama che oggi invece gli viene riconosciuta (uno dei suoi soprannomi era **Beta**, e un altro sembra sia stato **Pentathlos**, con riferimento a quegli atleti che si distinguono in diverse specialità, senza primeggiare in una particolare).

Il nome di Eratostene oggi è popolarmente celebrato per il celebre algoritmo di ricerca dei numeri primi, il famoso **crivello di Eratostene**, (un classico sulla teoria dei numeri e negli esempi elementari di problemi di linguaggi di programmazione), e per la stupefacente precisione con la quale pervenne alla misura della circonferenza terrestre. Egli descrisse il suo procedimento nel trattato **Sulla misura della Terra**, che oggi è perduto ma alcuni dettagli del quale ci sono stati tramandati da autori famosi come Cleomede, Teone di Smirne e Strabone.

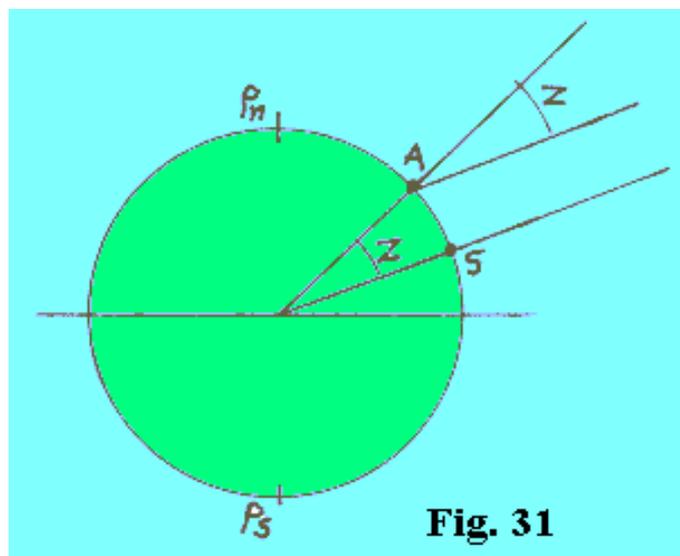


Fig. 31

Avuta notizia (o, forse, avendolo constatato lui stesso) che a **Siene** (l'odierna Asswan), nell'Alto Egitto, il Sole era allo zenit al solstizio estivo (entro un raggio di circa mezzo miglio, a mezzodì del giorno del solstizio estivo, per un attimo, il fondo di ogni pozzo appariva completamente illuminato dalla luce del Sole), egli misurò invece ad Alessandria, sempre a mezzodì di un solstizio estivo, che il Sole distava dallo zenit $1/50$ di circonferenza. Assumendo correttamente l'ipotesi di parallelismo tra i raggi solari di Siene e di Alessandria (a causa della grande distanza del Sole dalla Terra), conoscendo la misura della distanza tra Alessandria e Siene (5000 stadi), nonché la

localizzazione delle due città all'incirca sullo stesso meridiano, con una semplice proporzione egli pervenne alla misura di 250.000 stadi per la circonferenza terrestre. La figura 31 illustra il procedimento di Eratostene. **S** è Siene, **A** è Alessandria. Eratostene misurò l'angolo **Z** al mezzodì del solstizio estivo ad Alessandria e lo trovò di $1/50$ di circonferenza. Allora, anche l'arco **AS** doveva essere $1/50$ di circonferenza.

Purtroppo, le notizie originali non ci hanno informato su quale fosse la lunghezza dell'unità di misura da lui adottata (erano in uso diversi *Stadion* a quei tempi) per cui si è avuta (e continua ad esserci) una strenua disputa sul valore effettivo della misura da lui eseguita. Ma sembra che, in ogni caso, questa si discosti poco dai circa 40.000 Km della lunghezza effettiva.

Strabone dice che Eratostene modificò il valore trovato da 250.000 a 252.000, senza spiegare il perché di questa modifica. Alcuni commentatori odierni pensano che sia stato fatto per una ragione di convenienza aritmetica: al tempo di Eratostene era d'uso tra i matematici dividere la circonferenza in 60 parti (il grado, 360esima parte, non verrà introdotto in Grecia che quasi un secolo dopo Eratostene). Ponendo la circonferenza a 252.000 stadi, si aveva un numero di stadi per sessantesimo di circonferenza ($252.000 / 60 = 4200$ stadi) che era comodo perché dotato di molti divisori.

Anche prima di Eratostene erano state eseguite misure di circonferenza terrestre, ma non si sa con sicurezza a chi attribuirle, né quale metodo venne impiegato. Aristotele dice nel *De Coelo* che

“*alcuni matematici*” avevano ottenuto la misura di 400.000 stadi. Gli storici moderni candidano Eudosso quale più probabile autore di quella misura. (Dopo Eratostene, si ha notizia da Cleomede che il filosofo stoico **Posidonio**, nel I secolo a.C., propose una misura di circonferenza terrestre di 240.000 stadi, basandosi sul fatto che la stella Canopo, non visibile a Rodi, ad Alessandria (ritenuta sullo stesso meridiano di Rodi) appariva raggiungere l’altezza meridiana di $1/48$ di circonferenza. Stimando la distanza tra le due località a 5000 stadi, si aveva $48 \cdot 5000 = 240.000$).

Eratostene eseguì anche misure delle distanze di Sole e Luna dalla Terra, ottenendo valori pregevolissimi, indicativi dei progressi nella strumentazione: per il Sole calcolò la distanza di 804.000.000 stadi (all’incirca 130.000.000 Km) e per la Luna 780.000 stadi (all’incirca 125.000 Km). Ottenne questi risultati elaborando dati misurati durante eclissi di Luna.

Tolomeo dice anche che Eratostene calcolò il valore di $(11/83)^\circ$ per l’obliquità dell’eclittica ($23^\circ 51'$) altro valore estremamente preciso per i suoi tempi. Altri contributi notevoli alla scienza astronomica attribuiti ad Eratostene furono un calendario che includeva anni bisestili, una cronologia degli eventi dal tempo della guerra di Troia, un disegno accurato del corso del Nilo con associata la prima spiegazione scientifica delle cause effettive delle inondazioni annuali (le piogge annuali sulle regioni dei laghi originari del fiume).

IPPARCO

Ad **Ipparco** ci si riferisce generalmente con l'appellativo **di Nicea**, perché si ritiene che abbia avuto i natali in quella località della odierna Turchia, prossima al Mar di Marmara, nella regione allora chiamata Bitinia, intorno al 190 a.C. La solidità della fama di cui godette nell'antichità è testimoniata da monete coniate sotto i regni di diversi imperatori romani. Queste monete portano sul diritto l'immagine di imperatori romani, quali Alessandro Severo (222 - 235 d.C.) e sul rovescio quella di un uomo che regge un globo e la scritta "Ipparco di Nicea". Anche della sua vita si hanno pochissime notizie. Sembrano sicure quelle riferentesi a sue osservazioni astronomiche eseguite in Bitinia, nell'isola di Rodi e ad Alessandria. Soltanto una delle sue opere ci è giunta: il *Commentario su Arato ed Eudosso*, che non è certamente tra le sue più importanti. La maggior parte delle informazioni che abbiamo su Ipparco, ci sono giunte dall'*Almagesto* di Tolomeo. Ora, è stato fatto osservare che, malgrado Tolomeo abbia studiato accuratamente l'opera di Ipparco, la sua preoccupazione principale non dovette certamente essere quella di tramandarla ai posteri, ma di utilizzarla per costruire le sue proprie teorie astronomiche. I commentatori sono pressoché concordi nel ritenere che Tolomeo descriva i risultati ottenuti da Ipparco in una maniera piuttosto sbrigativa, o per lo meno, dando per scontato che il lettore abbia tranquillamente accesso agli scritti di Ipparco. Invece, il fatto che due successivi commentatori di Tolomeo quali Teone di Alessandria e Pappo non diano notizie esplicite sui risultati di Ipparco, lascia pensare che nemmeno per loro tali dati erano disponibili.

C'è un certo accordo da parte degli storici contemporanei dell'astronomia sul fatto che Ipparco sia stato probabilmente l'unico astronomo greco ad essersi dedicato a un'indagine accurata sulle conoscenze astronomiche che avevano conseguito i Babilonesi, sia per quanto riguarda dati relativi a osservazioni risalenti a diversi secoli avanti la sua epoca (dall'inizio dell'**Era di Nabonassar**, 747 a.C, epoca in cui i Babilonesi incominciarono a redigere osservazioni sistematiche) sia per le vere e proprie conoscenze astronomiche, ivi comprese le tecniche predittive. Si arriva a pensare che ci sia stata una certa probabilità che egli abbia potuto disporre di testi astronomici babilonesi tradotti in greco.

Sempre Tolomeo ci dice che Ipparco compilò una lista di tutte le eclissi lunari che erano state osservate in Mesopotamia fin dal secolo VIII a.C., non limitandosi a copiare semplicemente i dati ma eseguendo l'importantissimo lavoro di conversione dalla datazione babilonese in quella nella quale si impiegava l'anno egiziano, sistema di datazione nel quale egli ravvisò (come vedremo in un paragrafo dedicato alla cronologia) che si prestava in maniera eccellente ad essere usato per scopi astronomici (Copernico lo usava correntemente nei suoi calcoli), introducendolo quindi nella pratica dell'astronomia greca.

Ma egli trasse dall'archivio di conoscenze sviluppate dai Mesopotamici altre importanti ricchezze che lo aiutarono nei suoi studi, in particolare il sistema di numerazione sessagesimale con la notazione posizionale. Anche l'adozione (e l'introduzione nell'astronomia greca) del grado quale trecentosessantesima parte dell'angolo giro non c'è motivo di pensare che Ipparco non l'abbia tratto dai Babilonesi, che già usavano questo sistema per misurare gli angoli da centinaia di anni.

Diamo per ora un sommario dei contributi di Ipparco all'astronomia. Egli produsse una **tabella di valori di corde**, un primo contributo alla trigonometria. Alcuni hanno sostenuto perfino che l'invenzione della trigonometria si debba a lui. Ancora, calcolò la **lunghezza dell'anno tropico** con una precisione di circa 6 minuti e scoprì la **precessione degli equinozi** attribuendole il valore annuo straordinariamente preciso di 45". Compilò un **catalogo di stelle** che conteneva circa 850 voci. Tolomeo nell'*Almagesto* ci dà notizia di **modelli di teorie solare e lunare** elaborati da Ipparco. Affrontò anche un **modello di teoria planetaria** (utilizzando il materiale babilonese di cui disponeva), ma per un decisivo contributo su questo soggetto si dovette attendere l'opera di Tolomeo, circa 300 anni dopo.

Nella teoria solare di Ipparco, il Sole si muoveva su un eccentrico fisso, mentre per quella lunare, basandosi su osservazioni di eclissi lunari compiute da astronomi babilonesi e alessandrini, adottò un eccentrico mobile. Elaborò anche un'altra teoria lunare basata su un epiciclo il cui centro si muoveva su un deferente concentrico alla Terra. Siccome Ipparco non disponeva di osservazioni di suoi predecessori, non gli fu possibile elaborare una vera e propria teoria planetaria. Il suo notevole contributo su questo argomento consistette nell'aver richiamato l'attenzione, con una certa severità, (degnata della sua stoffa di scienziato di razza - Tolomeo dice di lui che era "*amante della verità*"), sul fatto che la teoria epicicloidale di Apollonio "*doveva essere provata nei dettagli*", riferendosi indubbiamente alle discordanze che si avevano tra archi di retrogradazione teorici e pratici.

Ipparco riprese il metodo già usato da Aristarco, ripetendo le misure delle distanze della Luna e del Sole. Per la Luna ottenne una distanza di 59 raggi terrestri, valore molto prossimo al vero, che è di circa 60. Per il Sole a causa di errori di osservazione nella determinazione della parallasse (evidentemente impossibile determinarla a quell'epoca) non ottenne un risultato accettabile. Teone di Smirne dice che Ipparco riportò in un libro intitolato *Grandezze e distanze del Sole e della Luna* i procedimenti e i risultati di queste osservazioni.

Nel passato vi furono grandi incertezze da parte dei commentatori dell'*Almagesto* nel distinguere quali risultati dovevano essere attribuiti ad Ipparco e quali a Tolomeo. Dapprima si ebbe perfino una certa tendenza ad accusare Tolomeo di essersi appropriato di risultati di Ipparco. Oggi si giudicano le cose con più ponderazione.

Nel *Commentario su Arato ed Eudosso*, Ipparco discute di tre libri: (1) Un trattato di Eudosso sulle costellazioni, (2) un poema in versi scritto da Arato, intitolato *I fenomeni*, in pratica una versione poetica del precedente trattato di Eudosso (Questo poema ci è pervenuto), (3) un *Commentario su Arato*, scritto da **Attalo di Rodi**, poco prima del tempo di Ipparco.

Di tutte le opere di Ipparco questa unica che ci è giunta è la meno desiderata da parte dei commentatori, perché i pochi argomenti di astronomia matematica che vi sono affrontati sono di scarso interesse rispetto alle grandi conquiste di Ipparco. Diversi autori hanno osservato i tipi di sistemi di coordinate ancora piuttosto antiquati di cui Ipparco faceva uso. C'è anche contrasto tra i commentatori nel decidere quando Ipparco scrisse questo libro, se al principio o alla fine della sua carriera scientifica.

Quando Ipparco si dedicò a stabilire la lunghezza dell'anno tropico, per prima cosa volle determinare se l'antica credenza sulla variabilità della sua durata avesse qualche fondamento (secondo Teone di Smirne la credenza risaliva a Talete). Tolomeo dice che la conclusione di Ipparco fu che la piccolezza nelle differenze faceva propendere nell'attribuirle a imprecisione nelle osservazioni.

Stabilito ciò, Ipparco calcolò il numero di giorni intercorsi tra un solstizio estivo osservato da Aristarco nel 280 a.C. e un solstizio estivo che lo stesso Ipparco aveva osservato nel 135 a.C. Prendendo come durata-base dell'anno il numero di giorni 365 e 1/4, ottenne che tra le due date erano trascorsi $145 \cdot 365.25 = 52961.25$ giorni. Secondo le sue stime circa gli istanti esatti in cui si erano verificati i due solstizi, egli concluse che al numero di giorni precedente doveva essere tolta mezza giornata per cui si arrivava a 52960.75 giorni. Ipparco allora ragionò più o meno così: l'anno tropico mostrava di essere più corto, rispetto al valore-base di 365.25 giorni, di mezza giornata in 150 anni, cioè di una intera giornata in 300 anni. Allora, poiché $300 \cdot 365.25 - 1 = 109574$, si ha che la lunghezza effettiva dell'anno tropico dev'essere $109574 / 300 = 365.2466667$, che Ipparco espresse alla maniera di allora con $365 + \frac{1}{4} - \frac{1}{300}$. Questo valore ottenuto da Ipparco rappresenta un notevolissimo risultato (si pensi che 1600 anni dopo, per la riforma gregoriana del calendario, si adottò il valore di $365 + \frac{1}{4} - \frac{3}{400}$, cioè 365.2425).

Nel corso della sua indagine sulla durata effettiva dell'anno tropico, l'accertamento della durata delle singole stagioni astronomiche (prima misura di questo tipo dotata di una ottima precisione)

portò Ipparco a una importantissima (e precisissima) determinazione: quella della **longitudine dell'apogeo dell'orbita solare**. Oggi noi sappiamo che la longitudine dell'apogeo progredisce continuamente (furono gli Arabi, circa un millennio dopo Ipparco, a scoprirlo per primi). Ipparco non poté scoprirlo perché prima di lui nessuno aveva fatto questa determinazione di longitudine. (Tolomeo dice di aver eseguito un suo calcolo di longitudine, in base a sue misure di durata delle stagioni, e di aver ottenuto gli stessi risultati di Ipparco. Lo stesso dice Teone di Alessandria che visse nel tardo IV secolo d.C. Evidentemente, entrambi devono essere stati quanto meno poco fortunati osservatori per questa determinazione, perché avrebbero ben dovuto trovare valori diversi da quelli trovati da Ipparco).

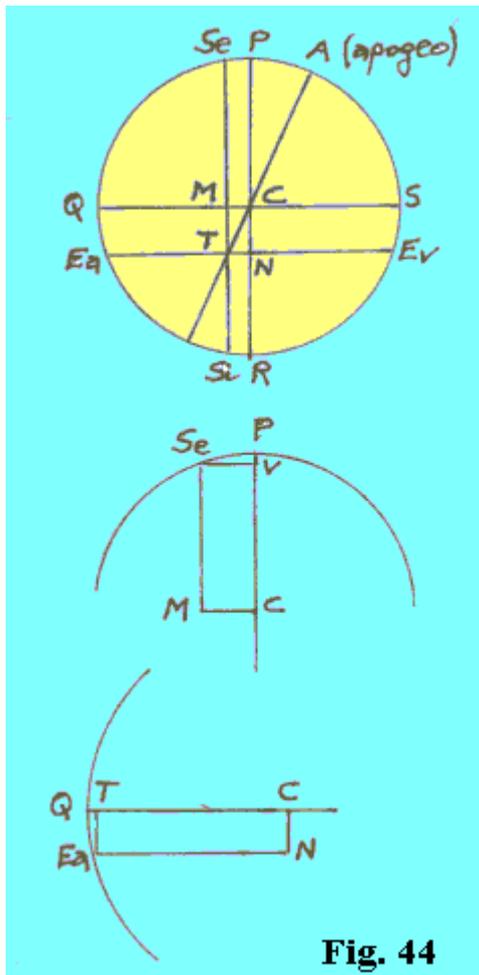


Fig. 44

Diamo ora una trattazione succinta del calcolo di longitudine dell'apogeo solare eseguito da Ipparco (ricorrendo per semplificare alle funzioni trigonometriche). Si osservi la figura 44 (il cerchio rappresenta l'eclittica-orizzonte visto dal polo nord). **Ev** è l'equinozio vernale (di primavera), **Ea** l'equinozio autunnale, **Se** il solstizio estivo. Secondo le osservazioni di Ipparco, l'arco **Ev-Se** era percorso dal Sole in 94.5 giorni e l'arco **Se-Ea** era percorso in 92.5 giorni.

Allora possiamo scrivere:

$$365.25 \text{ gg} : 360^\circ = 94.5 \text{ gg} : X^\circ \text{ e}$$

$$365.25 \text{ gg} : 360^\circ = 92.5 \text{ gg} : Y^\circ$$

dalle quali si ricava:

$$\text{Arco primaverile Ev-Se} = 93^\circ.1417,$$

$$\text{arco estivo S-Ea} = 91^\circ.1704,$$

$$\text{arco somma dei due Ev-Se-Ea} = 184^\circ.3121$$

Possiamo dunque stabilire che gli archi Q-Ea ed Se-P avranno le seguenti ampiezze:

$$- \text{Q-Ea} = \text{S-Ev} = 4^\circ.3121/2 = 2^\circ.15605$$

$$- \text{Se-P} = \text{Si-R} = 93^\circ.1417 - 90^\circ - 2^\circ.15605 = 0^\circ.98565$$

Ora dobbiamo calcolare le lunghezze CM e CN. Essendo gli archi Se-P e Q-Ea abbastanza piccoli, li possiamo ritenere uguali rispettivamente ai segmenti Se-V e Ea-T. Inoltre, ricordiamo che in trigonometria si usa spesso ammettere che la lunghezza di archi piccoli (come Se-P e Q-Ea) sia eguale al valore del seno dell'arco stesso. In base a ciò, avremo:

$$\text{CM} = \text{Se-V} \cong \text{Se-P} \cong \text{sen}(0^\circ.98565) = 0.0172$$

$$\text{CN} = \text{Ea-T} \cong \text{Q-Ea} \cong \text{sen}(2^\circ.15605) = 0.03762.$$

E finalmente possiamo ricavare la longitudine dell'apogeo Ev-A e l'eccentricità TC.

$$\text{Longitudine apogeo} = \arctan(\text{CN}/\text{CM}) = \arctan(2.18721) = 65^\circ.4$$

$$\text{Eccentricità} = (\text{CM}^2 + \text{CN}^2)^{1/2} = 0.041365$$

Il risultato di longitudine è eccellente: è prossimo di circa 1° alla longitudine effettiva dell'apogeo solare nel 140 a.C. Il risultato dell'eccentricità è invece piuttosto impreciso.

E' noto che la più celebrata delle scoperte di Ipparco è quella della precessione degli equinozi. Alcuni ritengono che la molla che lo spinse inizialmente verso questa felice conclusione, possa essere stata il suo sospetto che le stelle "fisse" potessero avere dei moti relativi e che ciò lo abbia indotto a intraprendere l'opera (immane per le forze di un solo uomo che operava 300 anni prima di Tolomeo in una località, Rodi, che non era certamente provvista dell'attrezzatura scientifica di Alessandria) di compilare un catalogo di stelle per confrontarne le posizioni con quelle di un precedente catalogo compilato circa 160 prima da Aristillo e Timocari (altri grandi pionieri

dell'astronomia). Plinio, nella *Storia naturale*, dice che ciò che spinse Ipparco a intraprendere la compilazione di un catalogo fu l'apparizione in cielo di una stella mai vista fino a quel momento, una **nova stella**. Da ciò l'indagine di Ipparco per appurare se le stelle nascono e muoiono, se variano di luminosità, e se si muovono le une rispetto alle altre (se ciò che dice Plinio è vero, Ipparco fornisce un ottimo esempio di scienziato che, alla ricerca della verità, si stacca dai dogmatismi aristotelici e platonici, uno dei quali riguardava appunto la inviolabilità della perfezione dei cieli).

Ipparco scoprì la precessione confrontando dunque sue misure di longitudine di stelle, con quelle fatte circa 150 anni prima da Aristillo e Timocari. Come al solito, è Tolomeo che ci informa che mentre al tempo di Timocari, Spica si trovava 8° a ovest dell'equinozio autunnale, Ipparco la trovò essere a 6°, cioè due gradi di meno. Naturalmente, Ipparco confrontò anche le longitudini di alcune altre stelle che era in grado di osservare, e trovò che esse differivano egualmente di circa due gradi dalle corrispondenti longitudini riportate dai suoi due predecessori. Confrontando le latitudini celesti, invece, notò che erano rimaste praticamente invariate.

Si poneva ora il problema di stabilire se era l'intera sfera recante le stelle fisse ad aver ruotato verso est o se erano stati i punti equinoziali ad aver ruotato verso ovest. Altro problema era quello di stabilire se a muoversi verso est erano solamente le stelle fisse della zona zodiacale, o tutte le stelle. Dopo una iniziale tergiversazione Ipparco accettò la conclusione del moto dei punti equinoziali (considerato anche che, non avendo riscontrato variazioni nelle latitudini celesti dai tempi di Timocari, ciò rendeva improbabile attribuire la variazione costante a moti propri delle stelle). Pubblicò la sua scoperta (assieme evidentemente al resoconto scientifico su cui era basata) su un libro intitolato *Sulle variazioni [di posizione] dei punti equinoziali*, del quale Tolomeo ci ha lasciato alcune citazioni nell'*Almagesto*.

Della precisione del valore annuo calcolato da Ipparco (circa 2° in 150 anni, quindi circa 45'') abbiamo già detto in precedenza.

Circa il metodo da lui usato nel determinare la longitudine di Spica e di qualche altra stella, Tolomeo ci informa che Ipparco misurò la differenza di longitudine tra la Luna e Spica (probabilmente utilizzando una sfera armillare forse da lui stesso costruita) nell'istante preciso di massima eclisse lunare (istante di plenilunio, Luna esattamente opposta al Sole). Si tratta del metodo probabilmente già utilizzato da Aristillo e Timocari e forse da altri: con due degli anelli della sfera armillare puntati uno su Spica e l'altro sulla Luna, un terzo operatore leggeva il valore di differenza di longitudine tra i due astri nell'istante preciso in cui un quarto operatore (forse Ipparco stesso) giudicava che l'eclisse di Luna aveva raggiunto il massimo. In quell'istante, la longitudine della stella era data dalla longitudine del Sole (sempre disponibile da tabelle), aumentata (o diminuita) di 180° e aumentata ancora (o diminuita) della differenza di longitudine misurata.