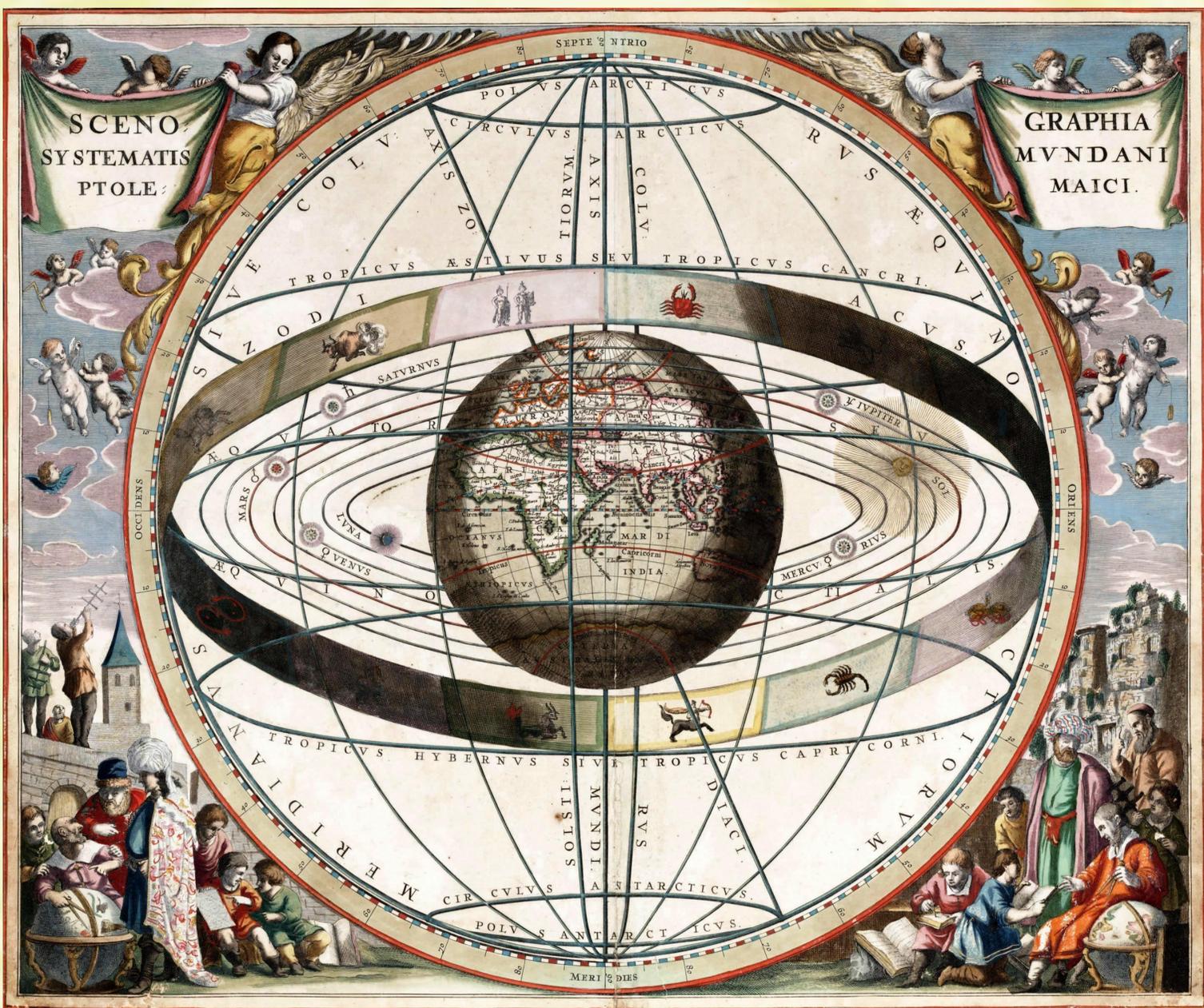


L'ORDINE DEL COSMO

Prima parte

L'Astronomia Greca

***Dai tempi più antichi ai nostri giorni
la ragione umana ha risposto
al suo irrinunciabile bisogno di conoscenza scientifica
secondo un metodo ordinato, preciso e rinnovato.***



Una mostra prodotta dal Centro Culturale Marcello Candia - Melzo



*Elaborazione dell'impianto realizzato da insegnanti e studenti del
Liceo Alexis Carrel - Fondazione Grossman, Milano*

**FONDAZIONE
GROSSMAN**

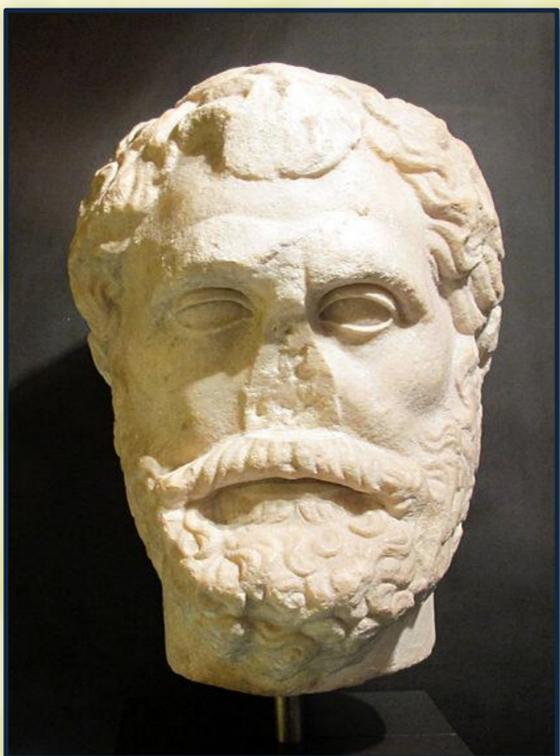
Novembre 2017

Astronomia greca: i protagonisti

Talete e Anassimandro di Mileto	VI sec a. C.	Superamento mitologie; natura governata da leggi oggettive e impersonali
I Pitagorici	IV sec. a. C.	Sfericità della Terra
Eudosso di Cnido	IV sec. a. C.	Sistema meccanico di 27 sfere concentriche
Aristotele (di Stagira, poi vive ad Atene)	IV sec. a. C.	I 4 elementi del mondo (terra, acqua, aria e fuoco). Il regno terrestre e quello celeste; le sfere concentriche
Apollonio di Perga (Antalia)	III sec. a. C.	Ep cicli e deferenti
Eratostene di Cirene (Libia)	III sec. a. C.	Prima misura delle dimensioni della Terra
Aristarco di Samo	III sec. a. C.	Prime stime delle dimensioni di Luna e Sole e delle loro distanze dalla Terra; ipotesi eliocentrica
Ipparco (di Nicea)	II sec. a. C.	Eccentricità dell'orbita del Sole
Tolomeo (di Alessandria)	II sec. d. C.	<i>Almagesto</i> : sintesi delle conoscenze dell'epoca; indicazione dei problemi aperti.



I filosofi di Mileto



TALETE

I primi filosofi sono fisici o fisiologi.

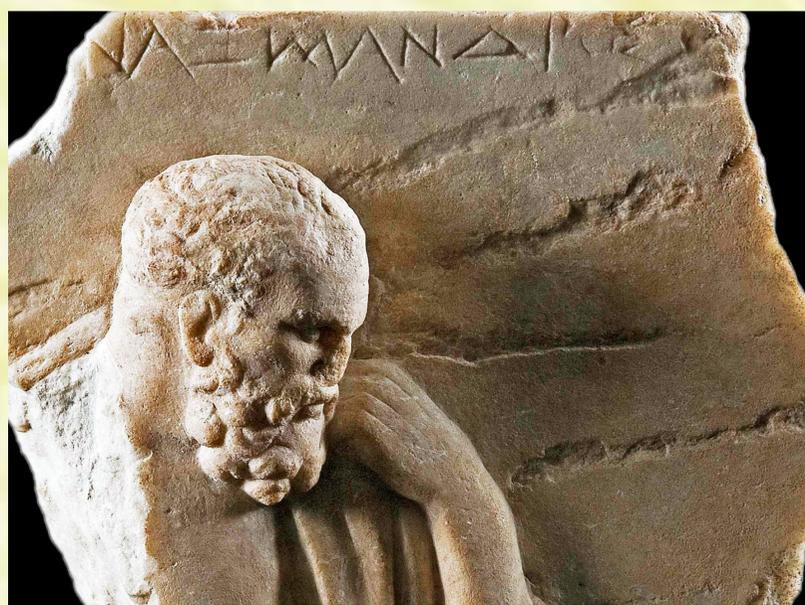
Essi cominciano ad occuparsi della realtà materiale e, a differenza delle precedenti cosmogonie, **cercano di spiegare** tale realtà **senza gli impacci del mito**.

La fisica, in greco *physis*, natura, è la realtà che diviene, la realtà in movimento - che è solo una parte del Tutto, il quale comprende tanto questa realtà quanto la realtà divina.

Secondo Anassimandro

(~610-546 a.C.) il Sole è il più alto (lontano) dei corpi celesti e la Luna è subito sotto di esso.

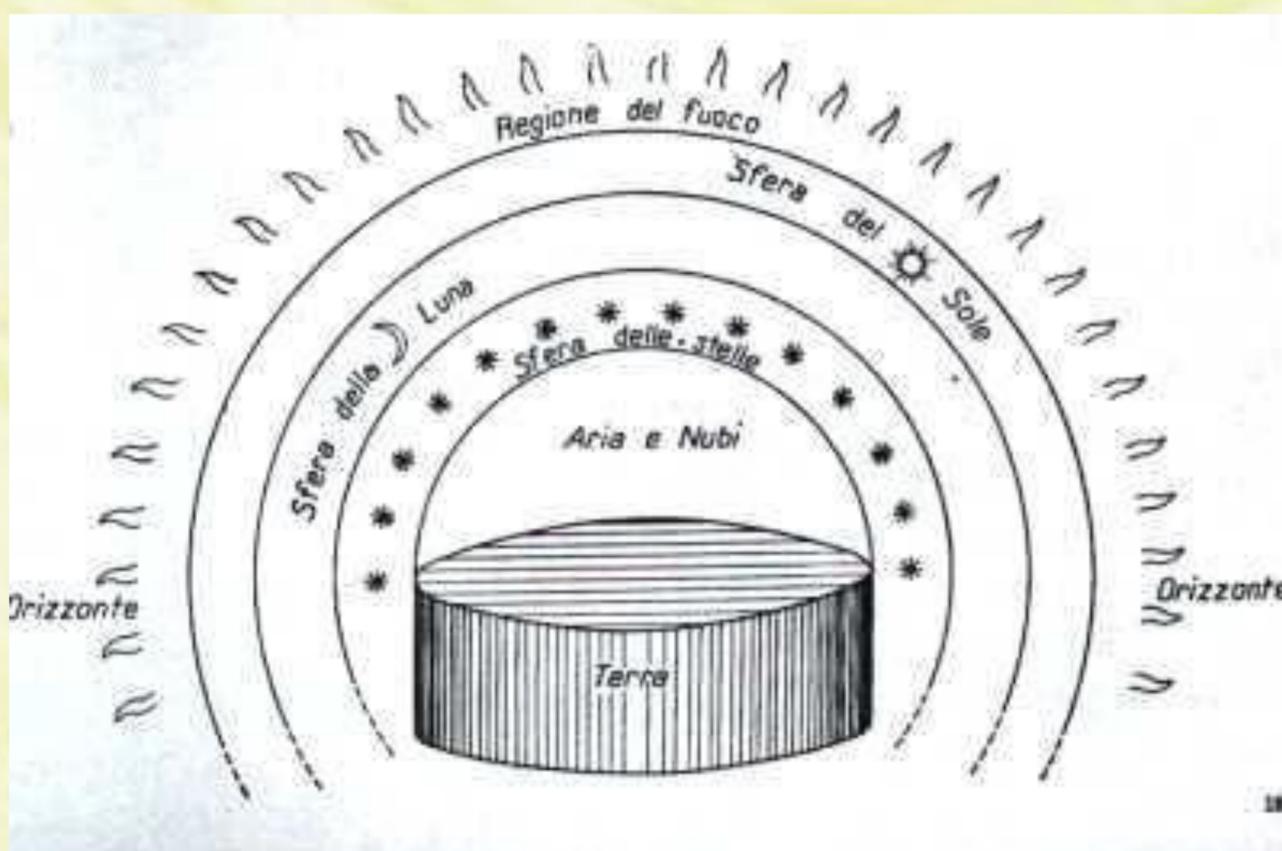
La Terra è un cilindro e sta ferma al centro dell'universo in quanto è equidistante da qualsiasi altra cosa. L'umanità vive sulla sua superficie.



ANASSIMANDRO

Una prova della validità del modello cilindrico è il fatto che a diverse latitudini le stelle visibili non sono le stesse: dall'Egitto sono visibili stelle che non possono assolutamente essere viste dalla Grecia.

Questo porta a distruggere la concezione di una Terra piatta a favore perlomeno di una qualche curvatura della superficie terrestre.



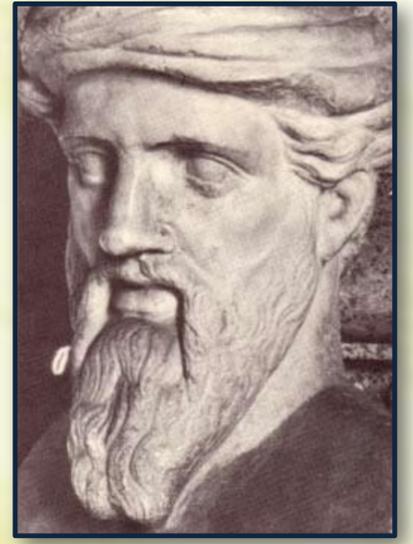
Anassimandro riteneva che la curvatura andasse solo nella direzione Nord-Sud:

Nelle colonie greche dell'**Italia meridionale**, attorno al celebre

Pitagora (~580-495 a.C.)

si radunano i membri di un gruppo religioso: sono chiamati "**Pitagorici**".

Fondamento della loro scuola e filosofia è che alla base di qualsiasi cosa ci siano i numeri; "*Tutto è numero*" è infatti il motto che li ha resi famosi.



PITAGORA

Ad essi si deve l'intuizione della

sfericità della Terra

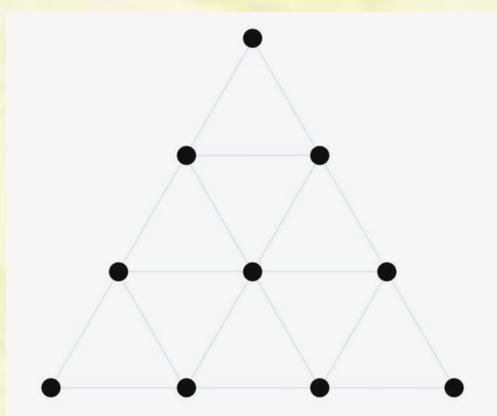
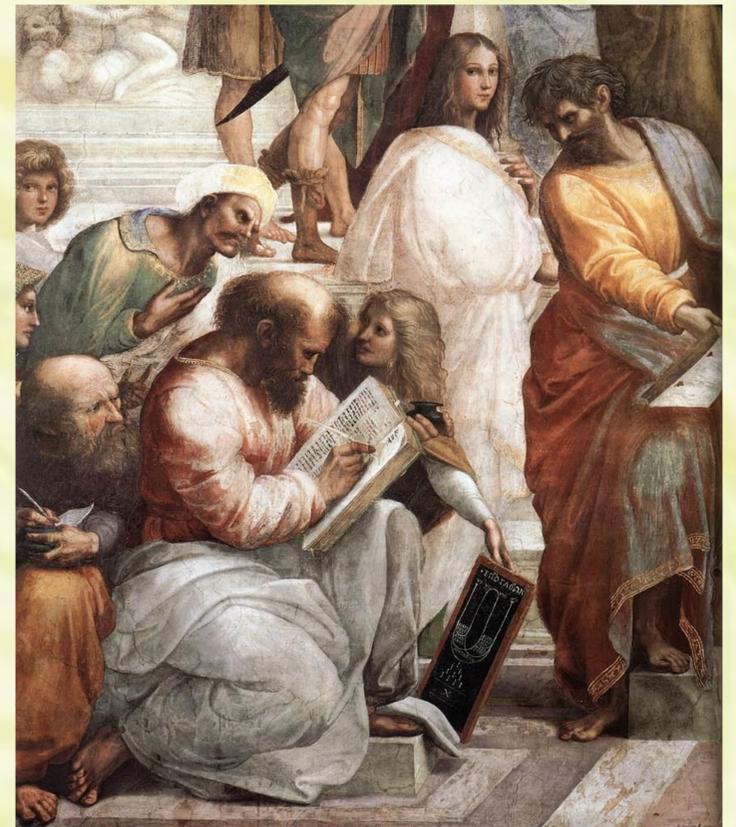
giustificata da diverse motivazioni:

- **osservazione astronomica:**

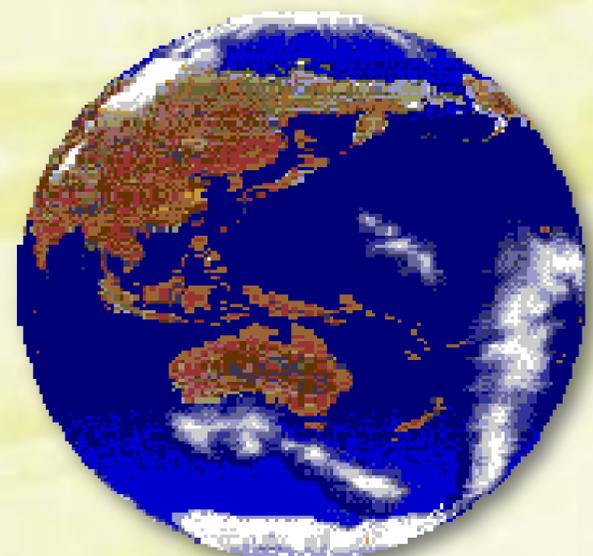
l'ombra della Terra proiettata sulla Luna nelle eclissi lunari è sempre circolare

- **intuizione fisica:** l'analogia con la forma degli altri corpi celesti

- **argomentazione filosofica:** quella sferica è l'unica forma adatta a tenere un corpo naturalmente in equilibrio; è la forma più perfetta.



Il numero $10 = 1+2+3+4$ è un *numero triangolare*



Il modello geocentrico

Le concezioni astronomiche dei Greci sono basate sulle osservazioni ad occhio nudo e sulla filosofia.

Aristotele propone un **modello geocentrico**, nel quale:

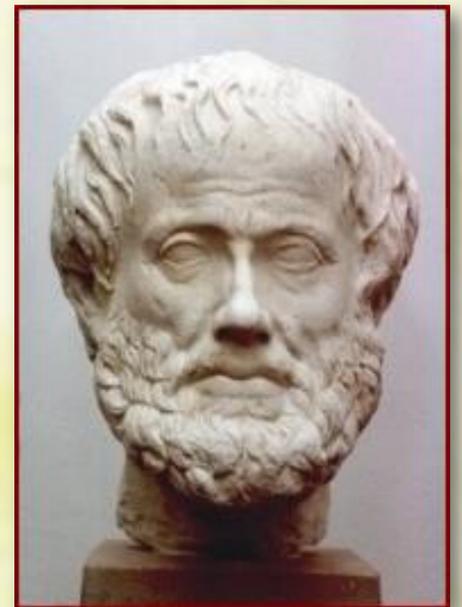
- **il cosmo è finito**

(diversamente non potrebbe esserci un centro);

- **il mondo è formato da quattro elementi: terra, acqua, aria e fuoco;**

- ciò che si trova **oltre la Terra** è composto di

un quinto elemento, l'etere, privo di massa, invisibile, eterno e inalterabile.



Aristotele
(384-322 a.C.)



C'è un confine tra i luoghi sub-lunari, il regno terrestre, e i luoghi oltre il concavo lunare, il regno celeste:

- **il regno terrestre**, delimitato dall'orbita della Luna, è il regno della **mutevolezza**, della **meteorologia**;

- **il regno celeste** è il regno della perfezione e della **immutabilità**; in esso i corpi compiono i loro **moti circolari, regolari ed eterni**.

I pianeti conosciuti sono cinque: Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno.

Ognuno si muove, insieme al Sole, su orbite circolari, concentriche alla Terra, che è sospesa al centro dell'universo.

Tutto l'universo è racchiuso da **un'ultima sfera, quella delle stelle fisse**, che a sua volta riceveva il moto dal **Primo Mobile**.



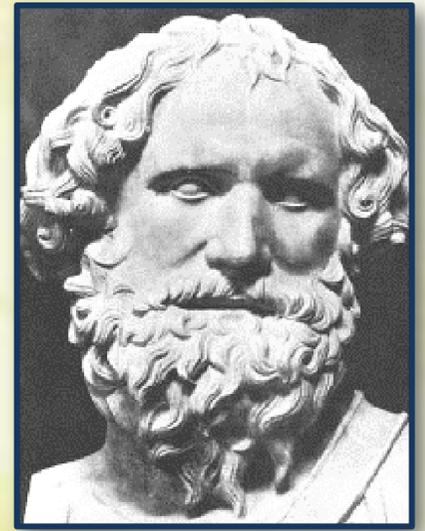
La misura del raggio della Terra

Intorno al 230 a.C. **Eratostene** misura per la prima volta le dimensioni della Terra.

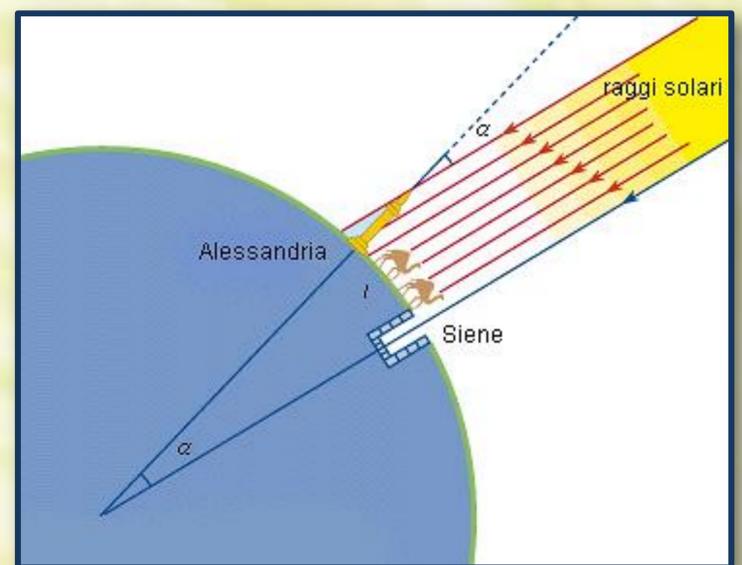
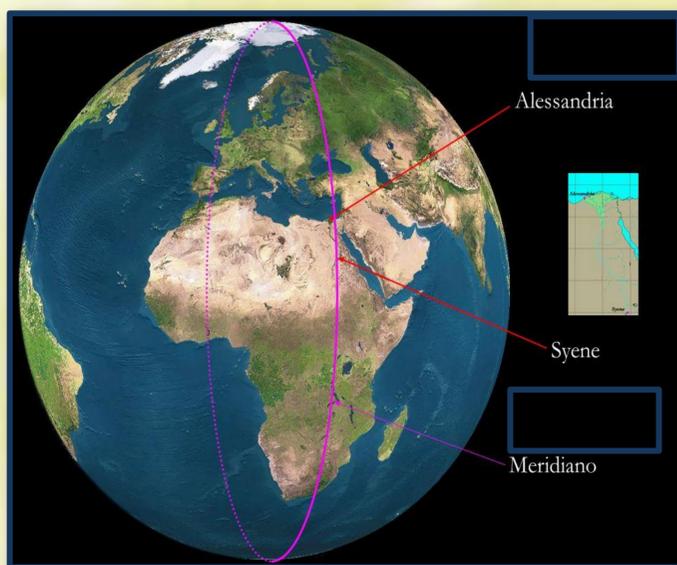
Il suo calcolo si basa sull'osservazione che un bastone verticale posto a Siene (Assuan) in Egitto il giorno del solstizio d'estate, non proietta nessuna ombra; ciò significa che, in quel giorno e a quell'ora, il Sole si trova esattamente allo Zenit.

Nello stesso giorno dell'anno e alla stessa ora, un uguale bastone piantato ad Alessandria, proietta un'ombra che indica una

inclinazione dei raggi solari di 7° 12'



Eratostene di Cirene
(273-192 a.C.)



Se Alessandria si trova sullo stesso meridiano, a nord di Siene (come Eratostene credeva), la differenza di latitudine tra i due luoghi è di 7° 12'.

Conoscendo la distanza tra Siene e Alessandria è possibile calcolare, per mezzo di una semplice proporzione, la misura della circonferenza e quindi del raggio terrestre. Infatti, se 7° 12' rappresentano un cinquantesimo dell'angolo giro, anche la distanza Siene-Alessandria deve essere la cinquantesima parte della circonferenza terrestre.

I calcoli di Eratostene

stima della distanza Siene - Alessandria (SA)	5.000 stadi
valore di uno stadio	157 m
distanza tra Siene e Alessandria	$5.000 \times 157 = 758 \text{ km}$
proporzione	$7^{\circ}12' : 360^{\circ} = SA : \text{circ. Terra}$
rapporto tra 7°12' e 360°	50
rapporto tra circ. Terra e SA	50
circonferenza della Terra	$758 \times 50 = 39.250 \text{ km}$
raggio della Terra	$39.250 : 2\pi = 6.250 \text{ km}$

Le misure attuali sono

(considerando che la Terra non è una sfera perfetta) :

Raggio Equatoriale: 6.378 km

Raggio Polare: 6.356 km

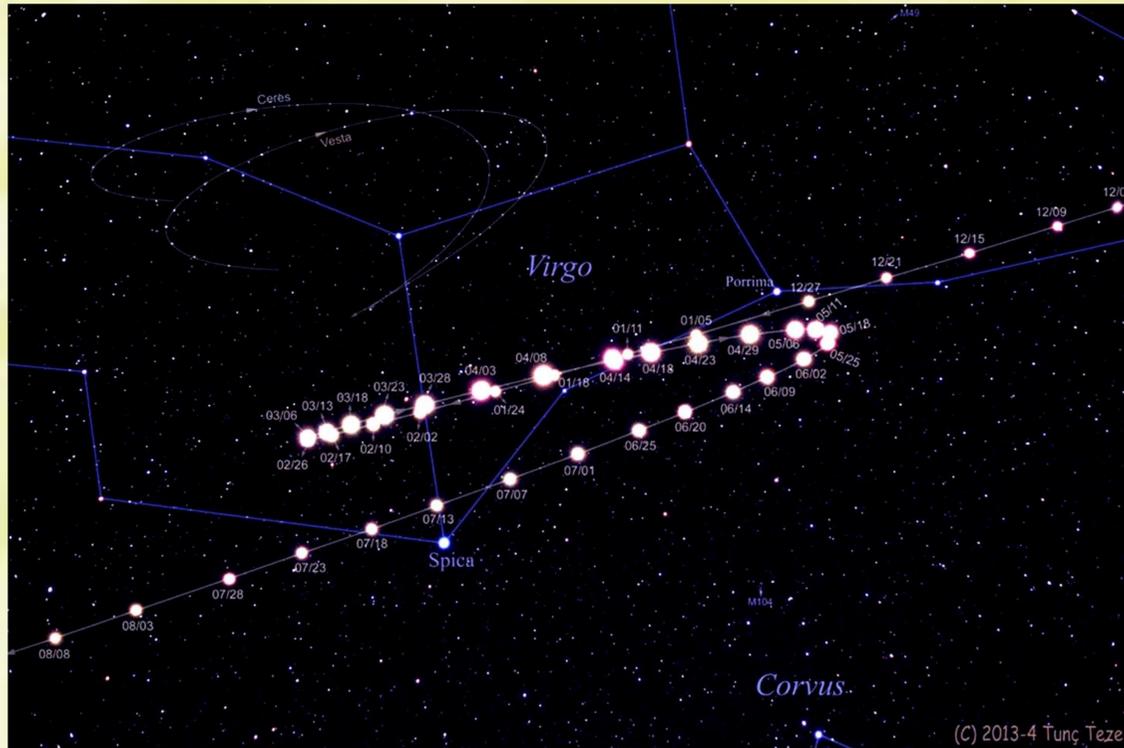
La misura di Eratostene ha un margine di errore molto contenuto

Osservazioni e perplessità

Nessuno osò mettere in discussione le concezioni di Aristotele. Gli astronomi, però, avevano notato che non tutto nei cieli è fisso e immutabile: i cinque pianeti, ad esempio, si muovono fra le stelle fisse per conto proprio, con velocità variabili.

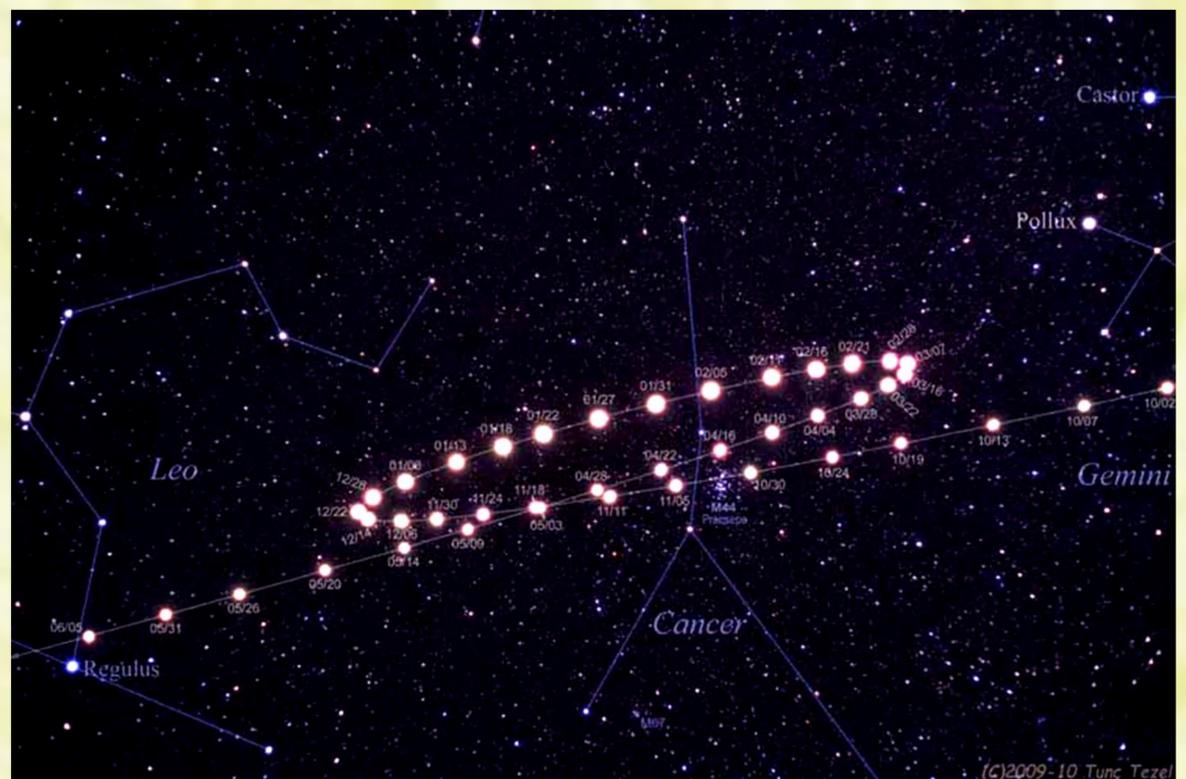
Pianeti = stelle vagabonde

αστέρες πλανήται: astéres planétai



Moto retrogrado di Marte

Moto retrogrado di Saturno



Ognuno dei cinque pianeti, visto dalla Terra, ogni tanto addirittura si ferma, **inverte per un po' di tempo il suo cammino** (*moto retrogrado*)

e poi riprende il normale volo diretto da ovest verso est.

Inoltre i pianeti

non appaiono sempre con la stessa luminosità

a volte sembrano più luminosi e altre meno; ciò suggerisce

grandi mutamenti della loro distanza dalla Terra.

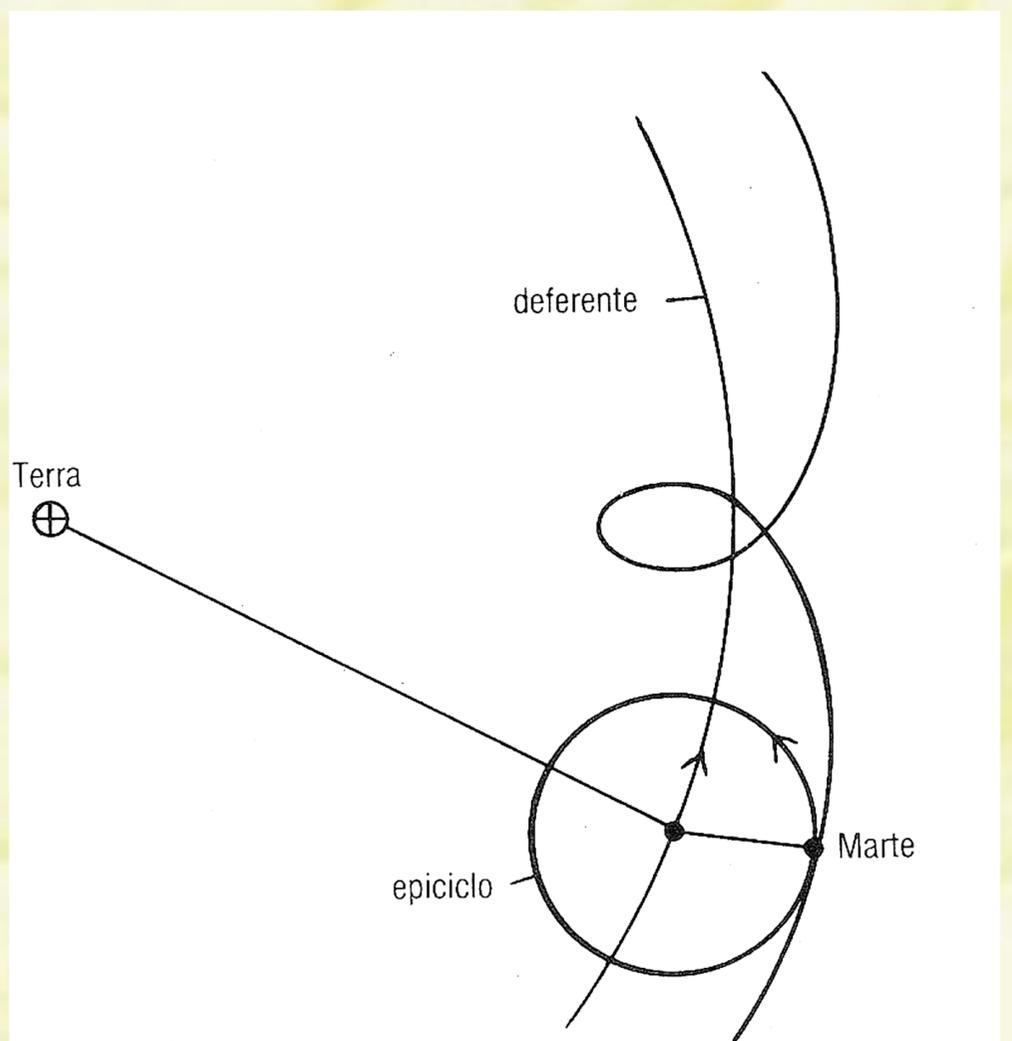
Moto Retrogrado

Platone (427-347 a.C.) assegna ai suoi contemporanei il **compito** di mostrare che i moti planetari sono altrettanto regolari di quelli degli altri moti celesti, anche se non altrettanto semplici.

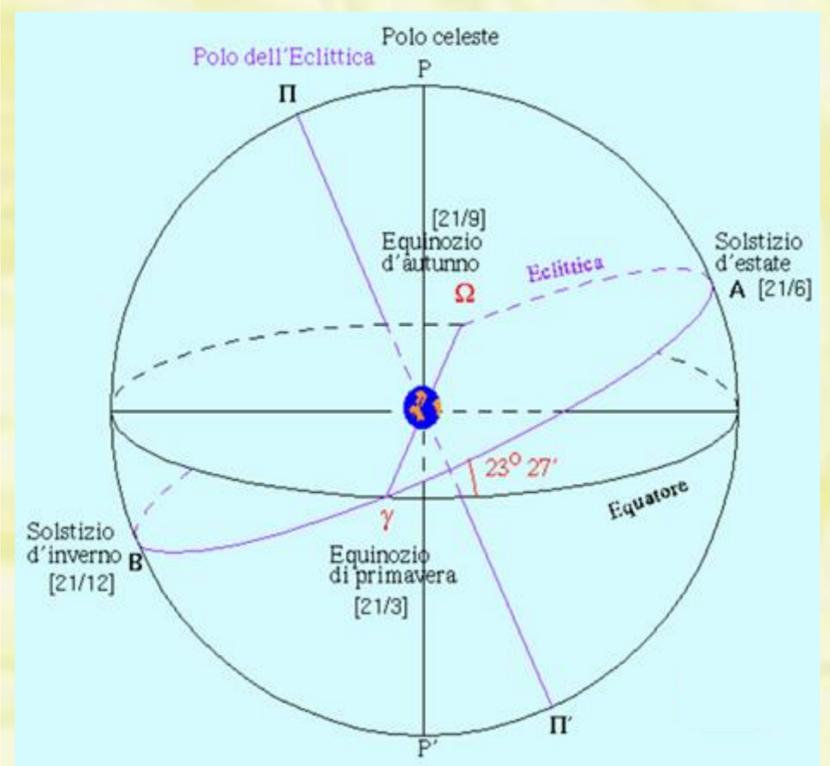
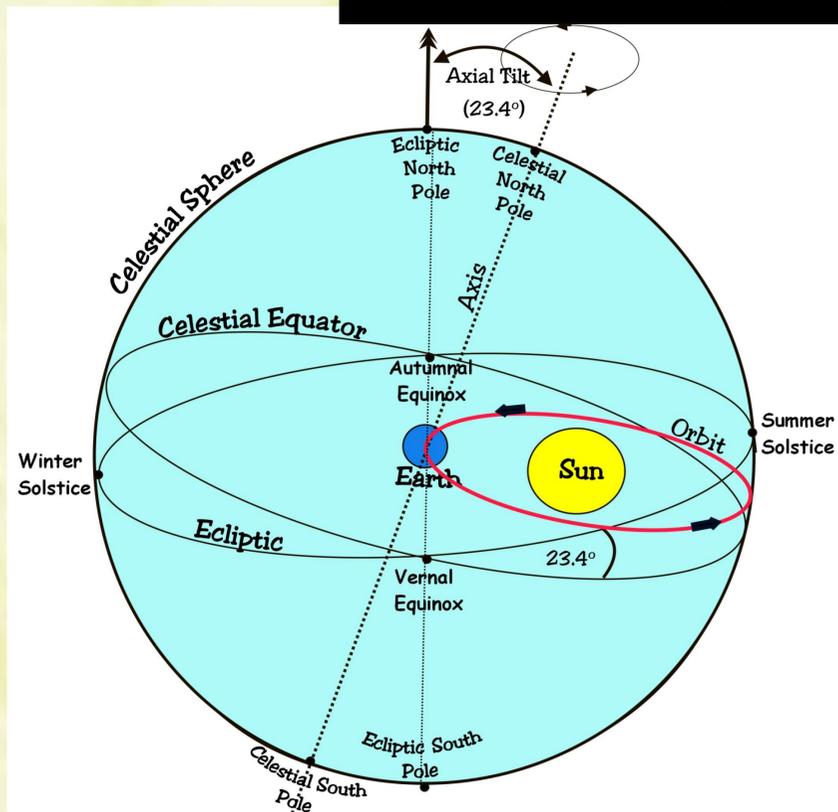
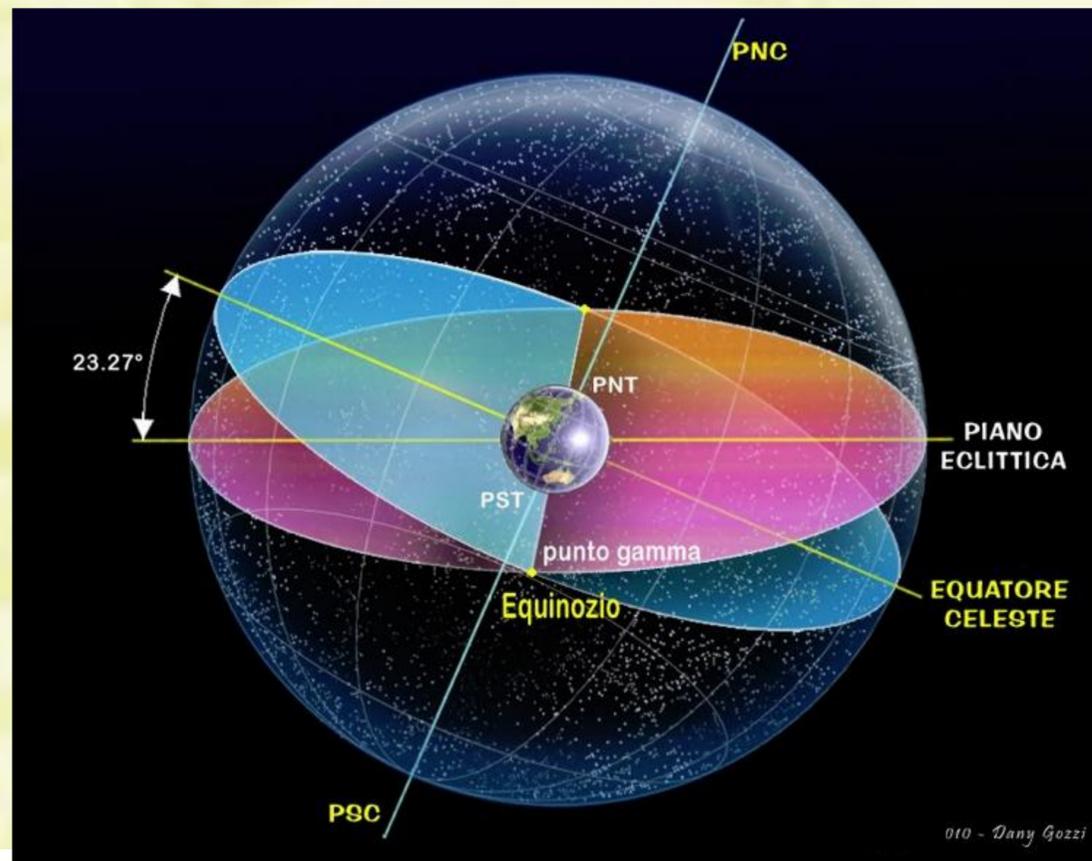
Poiché i moti delle stelle sono circolari e uniformi, si tratta di **spiegare anche i moti dei pianeti come combinazioni di moti circolari e uniformi.**



Il sistema dei *deferenti* e degli *epicicli* giustifica il moto retrogrado: un pianeta orbita su una circonferenza detta *epiciclo* il cui centro ruota lungo una circonferenza detta *deferente*.



L'eclittica è il percorso apparente che il Sole compie in un anno rispetto allo sfondo della sfera celeste (stelle fisse)



L'ORDINE DEL COSMO

Il Sistema solare

le orbite dei pianeti giacciono tutte nel piano dell'eclittica; fa eccezione Plutone, che non è un pianeta come gli altri

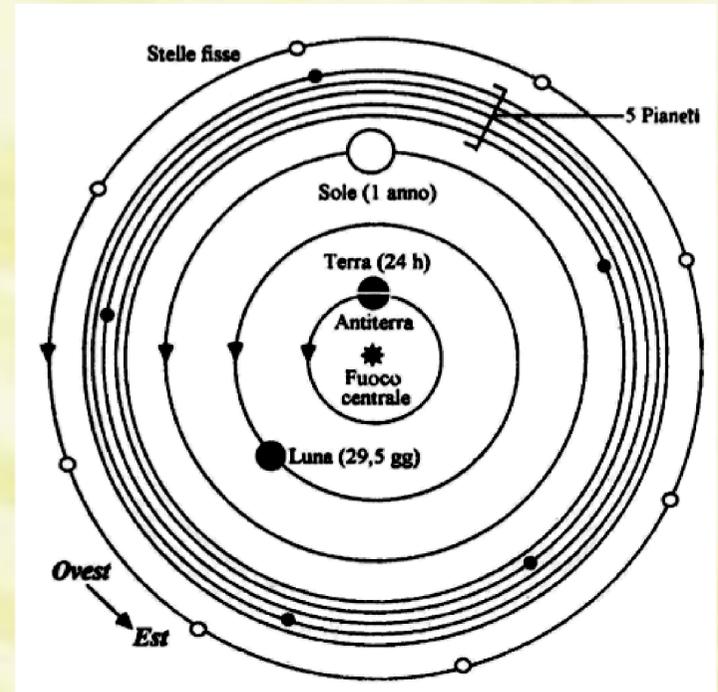


La Terra è ferma?

Non mancano nell'antica Grecia le ipotesi di qualche moto della Terra



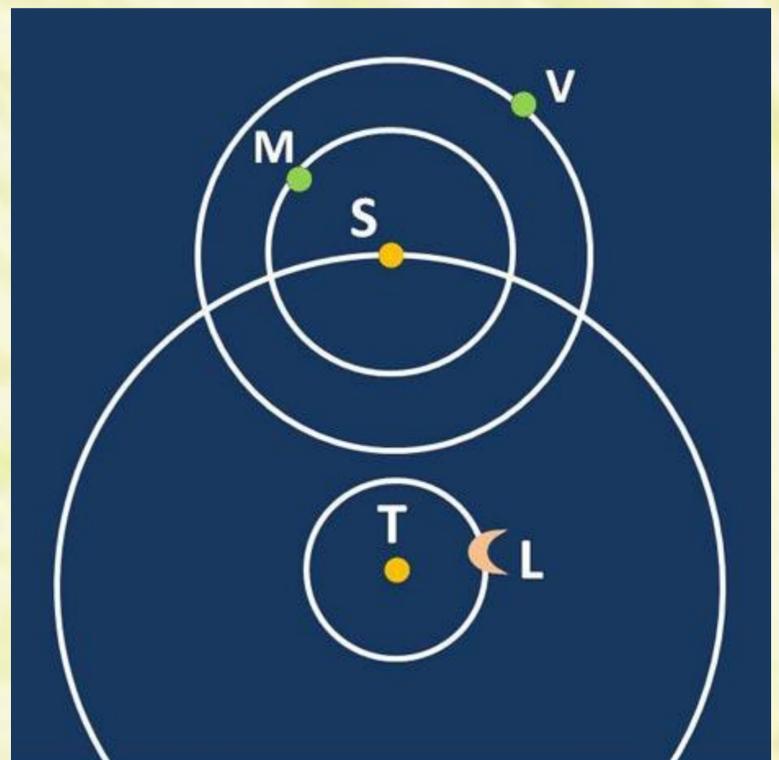
Filolao, pitagorico vissuto nell'Italia meridionale tra il 470 e il 390 a.C., è il primo a proporre il **moto della Terra, della Luna, del Sole e dei cinque pianeti attorno a un fuoco centrale: il "cuore dell'universo"**.



Eraclide Pontico

(~395-320 a.C.)

Propone il moto della Terra attorno a un suo asse ed è **il primo a sostenere la teoria dei moti di Mercurio e Venere intorno al Sole, pur lasciando a quest'ultimo il suo moto intorno alla Terra**, secondo lo schema della figura.



Aristarco di Samo (~310-230 a.C.)

anticipa Copernico, sostenendo che:

- il Sole è fermo al centro dell'universo;
- la Terra e pianeti ruotano attorno al Sole con moti circolari uniformi;
- la Terra inoltre ruota su se stessa.

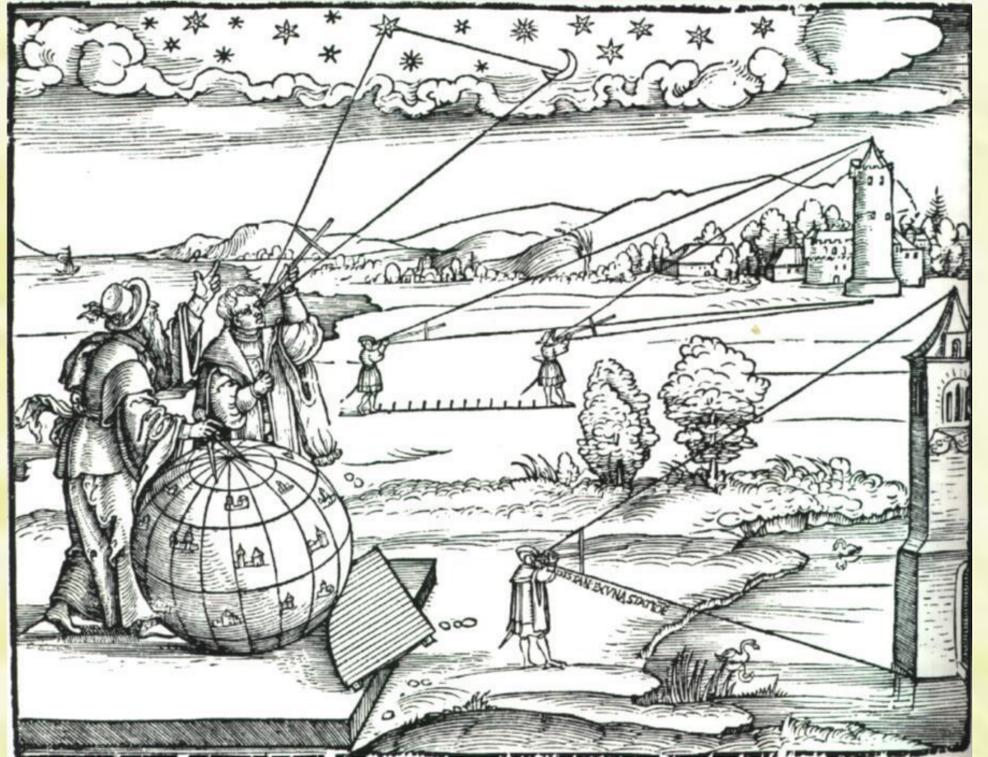
Da questo modello consegue che:

- il moto di rotazione delle stelle fisse e dei corpi celesti è apparente (dovuto alla rotazione della Terra);
- la variazione stagionale dell'altezza del Sole è dovuta all'inclinazione dell'asse terrestre;
- il moto retrogrado è la conseguenza della differente velocità di rotazione dei pianeti rispetto a quella della Terra.

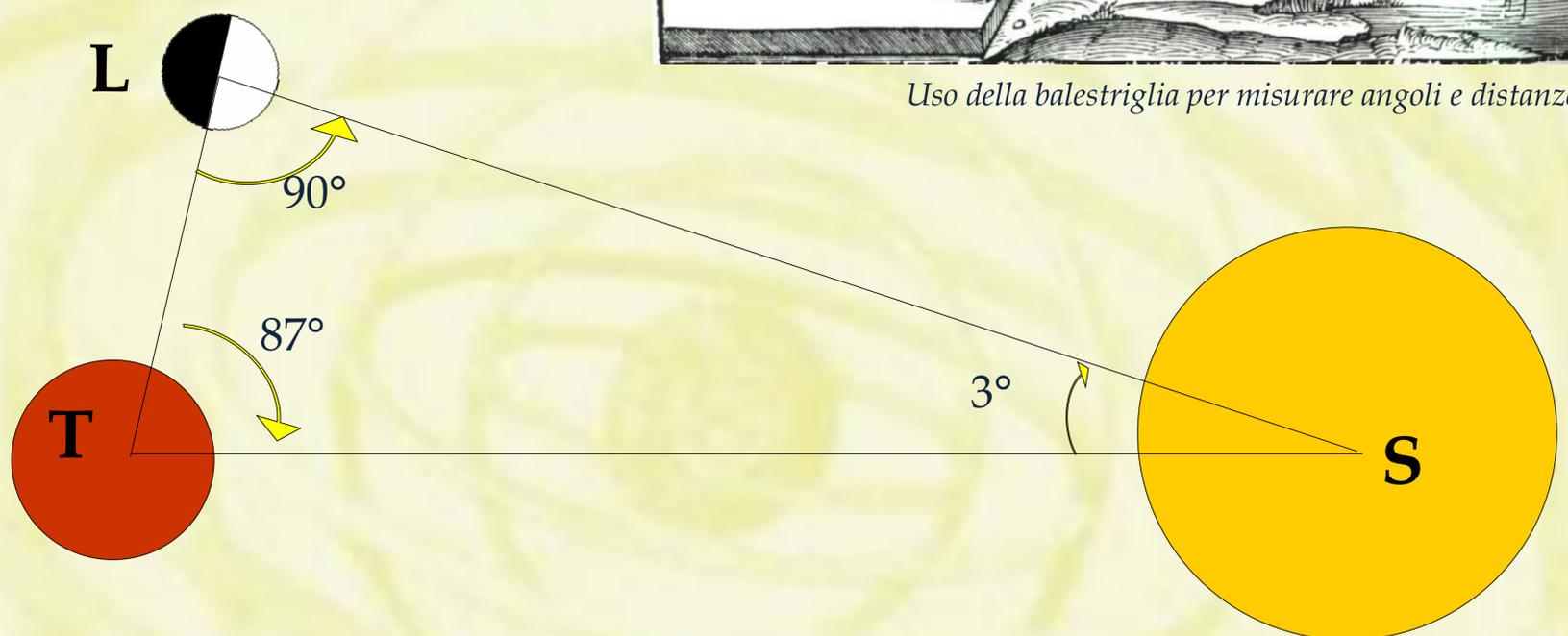


Prima misura delle distanze Terra-Sole e Terra-Luna

Quando la Luna è semipiena, l'angolo TLS (Terra-Luna-Sole) è retto. Aristarco, con la balestriglia, misura 87° per l'angolo STL.



Uso della balestriglia per misurare angoli e distanze



Il rapporto tra ipotenusa e cateto minore di un qualsiasi triangolo con i gli angoli di 90° , 87° e 3° è circa 19.

quindi

distanza Terra - Sole = 19 volte distanza Terra - Luna
 si tratta ora di trovare la distanza Terra - Luna

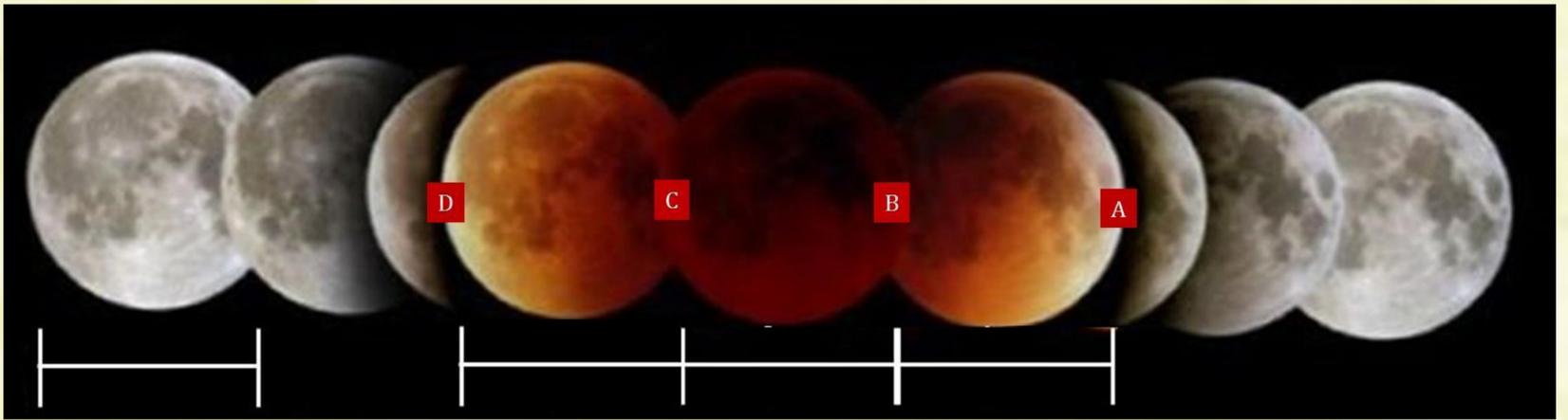
Osservazione:

i valori sono in effetti molto diversi da quelli reali ma il metodo usato da Aristarco è ineccepibile.

Errori:

- Gli angoli del triangolo TSL sono: 90° - 89.94° e $1/18$ di grado (invece di 3°) quindi l'ipotenusa non è 19 volte il cateto ma 57 volte (*errore dovuto a strumenti rudimentali*)
- Nel calcolo delle distanze si sono trascurati i raggi di Terra, Sole e Luna.

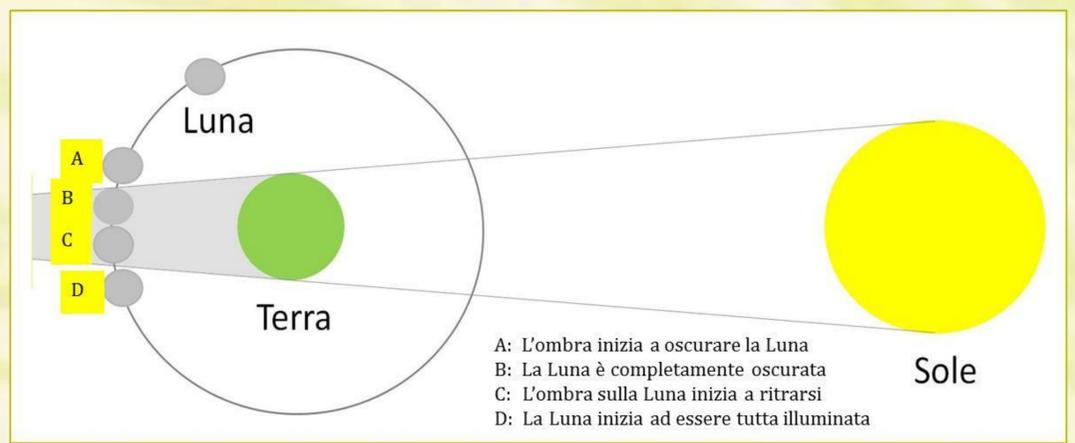
Prima misura delle distanze Terra-Sole e Terra-Luna



- 1) Osservando un'eclissi di Luna Aristarco vede che l'intervallo di tempo tra l'inizio dell'ombra sulla Luna (A) e l'oscuramento completo della Luna (B) e l'intervallo di tempo in cui la Luna resta completamente oscurata (BC) sono uguali ed è uguale anche al tempo per tornare ad esser illuminata (CD).

Conclude quindi che

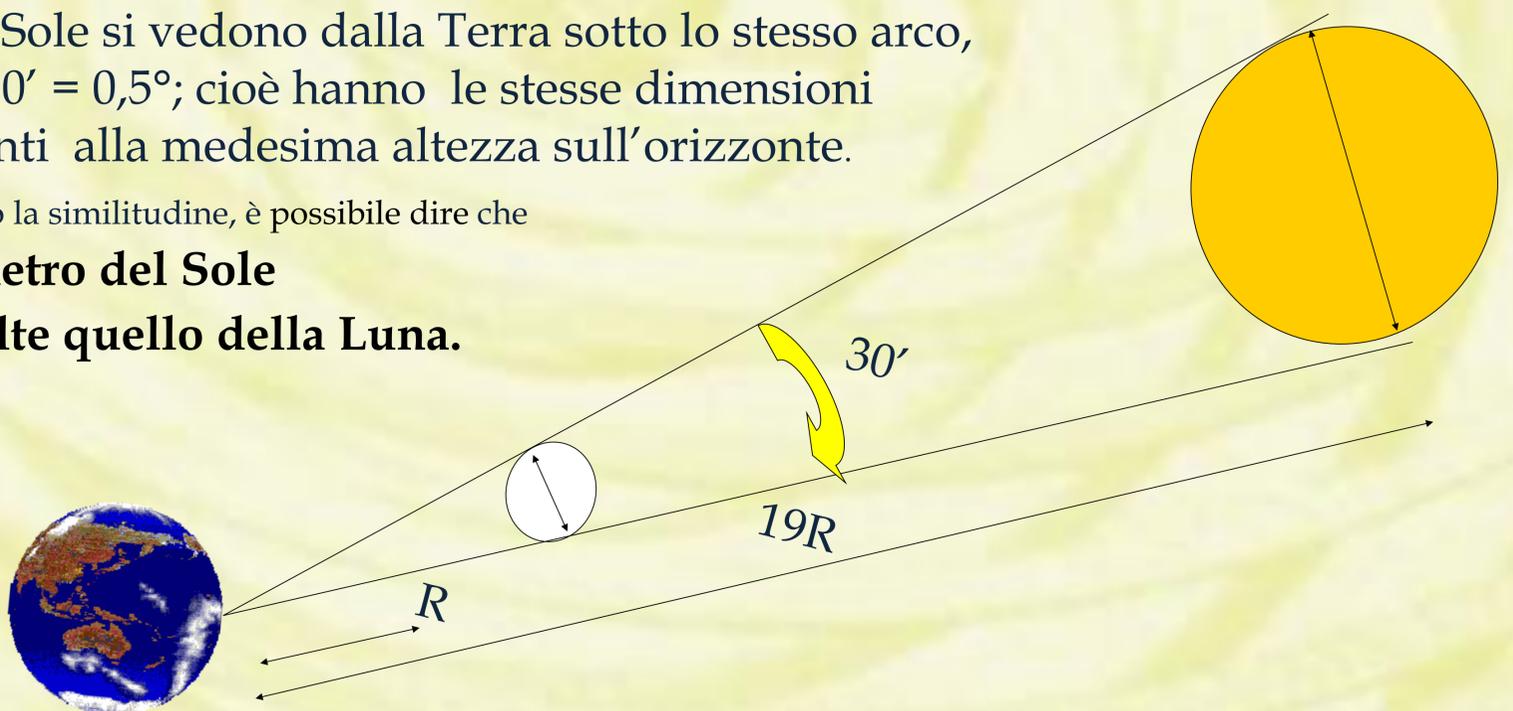
la larghezza del cono d'ombra che la Terra proietta sulla Luna è circa due volte il diametro della Luna. E' possibile così calcolare il diametro della Luna.



- 2) Luna e Sole si vedono dalla Terra sotto lo stesso arco, pari a $30' = 0,5^\circ$; cioè hanno le stesse dimensioni apparenti alla medesima altezza sull'orizzonte.

Sfruttando la similitudine, è possibile dire che

il diametro del Sole è 19 volte quello della Luna.



Aristarco, con un procedimento matematico abbastanza semplice, arriva a stabilire che:

- **diámetro Luna** = $20/57$ diámetro Terra = $20/57 \times 12.600 = 4.421$ km
- **diámetro Sole** = $4.421 \times 19 = 84.000$ km
- **distanza Terra-Luna** = **506.609 Km.**
- **distanza Terra- Sole** = $506.609 \times 19 = 9.625.571$ km

Osservazione:

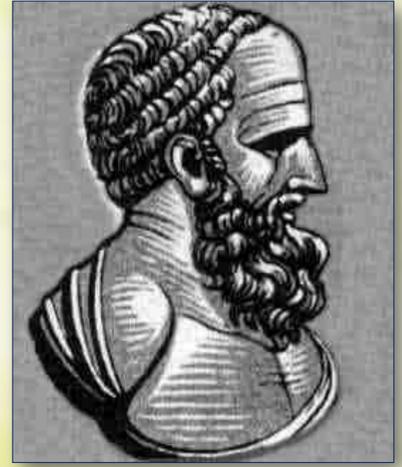
anche in questo caso i valori sono molto diversi da quelli reali ma il metodo usato da Aristarco è ineccepibile.

Primo catalogo stellare Rottura della simmetria

Ipparco fonde gli studi dei babilonesi e dei greci e ne trae il primo modello geometrico in grado di **predire la posizione di un pianeta per tutti i tempi.**

In particolare, compila un **catalogo stellare** con 1.080 stelle e le rispettive posizioni celesti.

Compone poi un **elenco delle eclissi lunari** registrate dai Babilonesi a partire dall'VIII secolo a.C.; queste registrazioni si rivelano cruciali per lo studio dei moti del Sole e della Luna, poiché nelle eclissi Sole e Luna sono perfettamente allineati con la Terra.



Ipparco di Nicea
(190-120 a.C.)

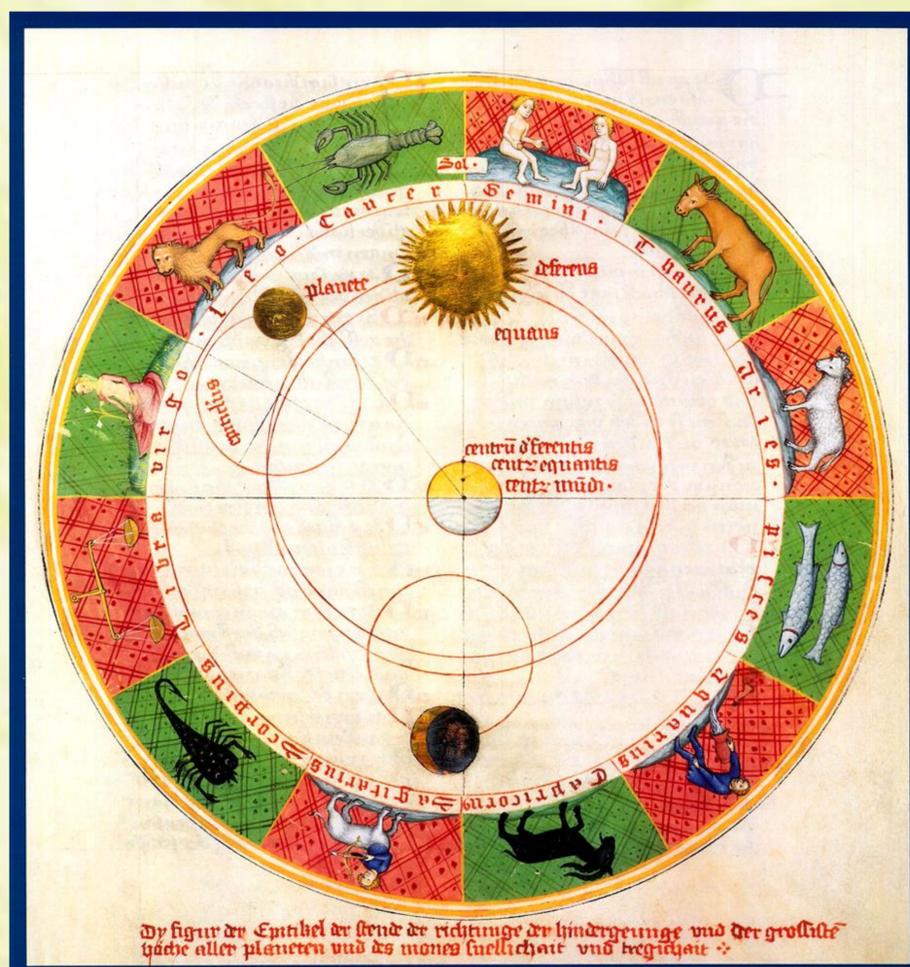
Si accorge che **le stagioni non hanno tutte la stessa durata**

Primavera:	94,500 giorni
Estate:	92,500 giorni
Autunno:	88,125 giorni
Inverno:	<u>90,125</u> giorni
	<u>365,250</u>

e conclude che

**la Terra non può trovarsi al centro dell'orbita solare
ma in una posizione eccentrica.**

Ipparco arriva a stabilire che l'eccentricità deve essere pari a $1/24$ del raggio dell'orbita solare e che l'asse Terra - Centro Orbita Sole deve formare un angolo di $65^\circ 30'$ con l'equinozio di primavera.



Nel più diffuso testo di cosmologia medievale, il *Tractatus de Sphaera*, viene presentato il modello greco: è evidente la rottura della simmetria.

Un nuovo modello

Un problema:

i pianeti non si muovono con la stessa velocità in ogni punto della loro orbita; in certe zone vanno più lentamente, in altre più velocemente.

Come si giustifica questa osservazione nel modello geocentrico simmetrico?

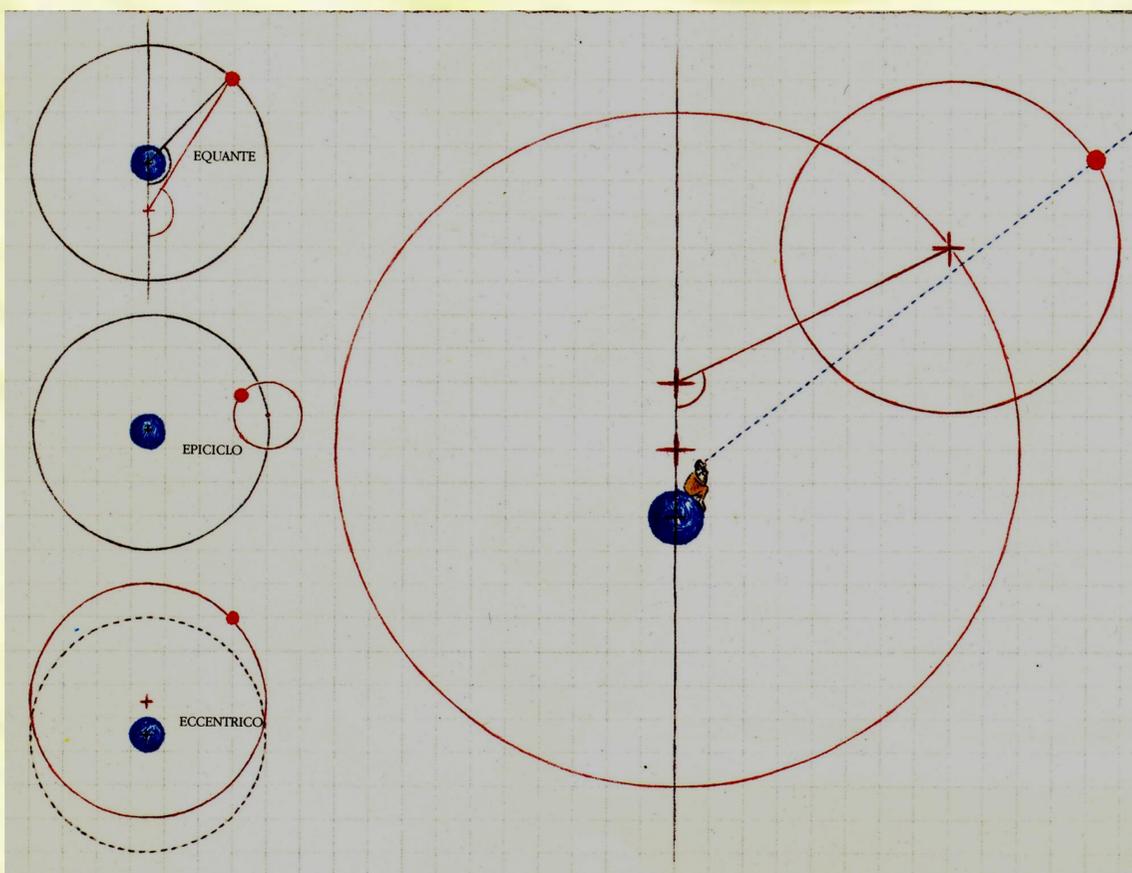
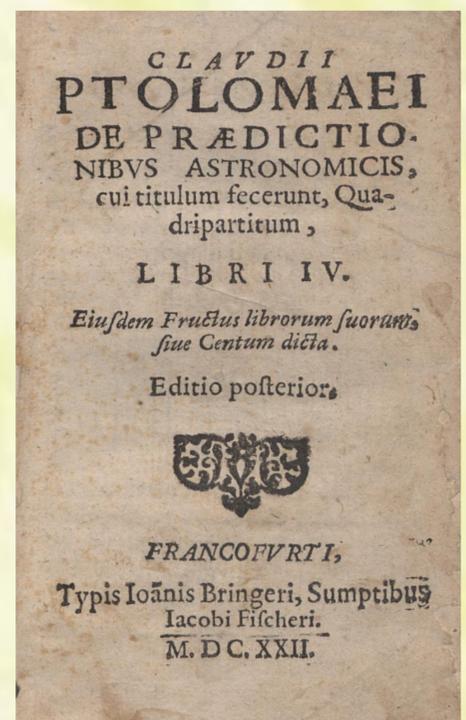


Claudio Tolomeo
(190-120 d.C.)

Tolomeo riprende la proposta di Ipparco e fa ruotare il Sole su un'orbita "eccentrica" cioè con il centro non coincidente con la Terra.

Introduce anche il **punto "equante"**, definito come l'immagine speculare della Terra, simmetrico rispetto al centro

dell'orbita del pianeta. Dunque **un pianeta si muove con velocità non uniforme, visto dalla Terra, ma tale da apparire uniforme a un osservatore situato nel punto equante.**



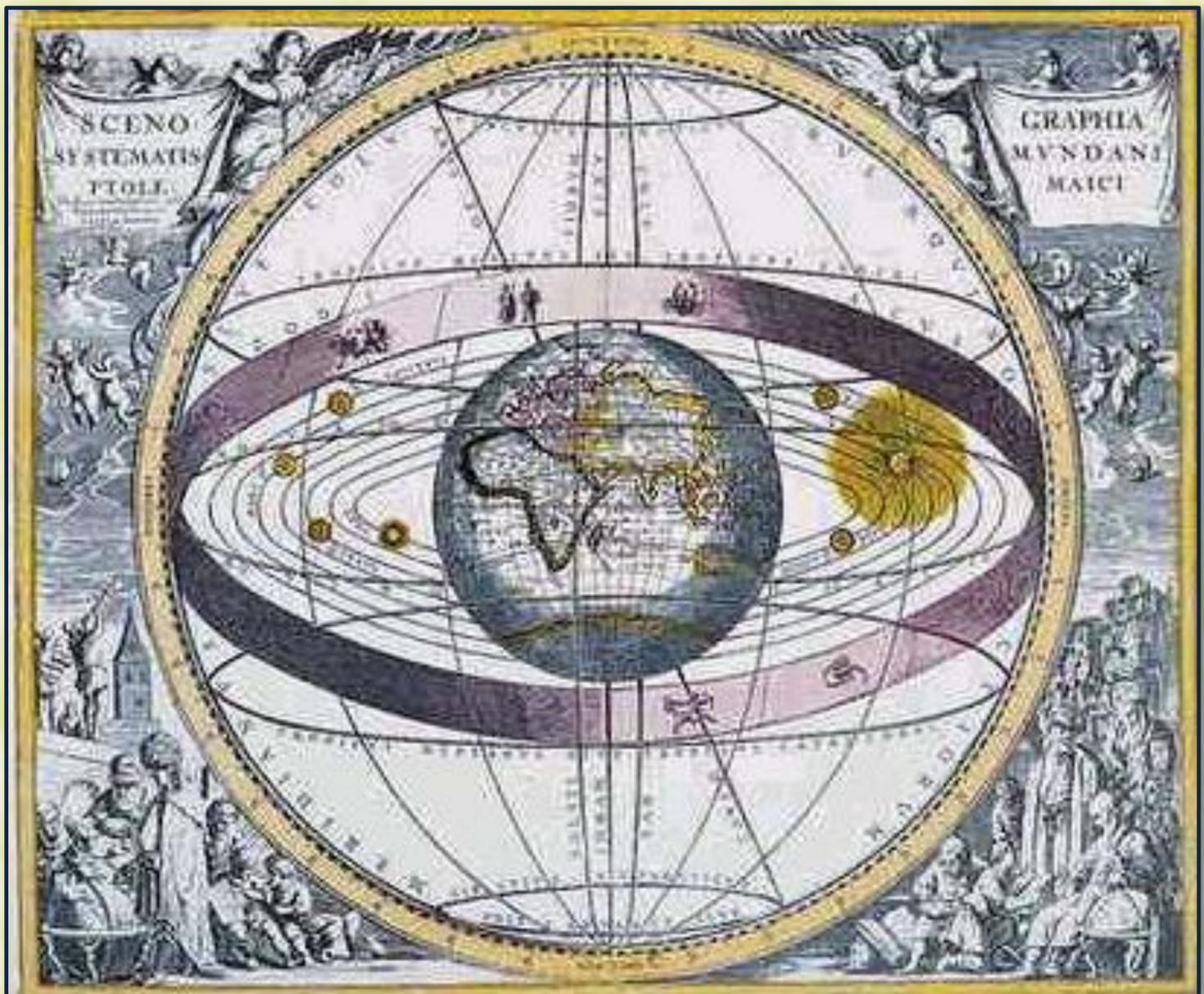
Gli elementi principali del modello Tolemaico (a sinistra) e il sistema complessivo (a destra).

L'Almagesto

Tutte le concezioni greche sull'universo vengono perfezionate e raccolte da Tolomeo in una grande opera, l'*Almagesto* (che significa *il grande Libro*).

In esso sono presenti:

- le tavole correlate di Ipparco che permettono di calcolare le posizioni del Sole, della Luna e dei cinque pianeti attorno alla Terra per un futuro indefinito;
- il catalogo, con più di un migliaio di stelle con relativa posizione e luminosità;
- la spiegazione della variazione di velocità osservata per i pianeti.



Nonostante le perplessità e le inesattezze contenute nell'Almagesto, non si riuscì a trovare un migliore modello dell'universo per i 14 secoli successivi .

Diversi sono i problemi irrisolti nell'Almagesto

Ecco i più clamorosi

- A. Gli espedienti dell'eccentricità (introdotti da Ipparco) e degli epicicli (introdotti da Apollonio) mal si conciliano con la filosofia naturale aristotelica, che parla di moti uniformi su sfere concentriche.
- B. L'artificiosità dell'equante infastidisce tutti.
- C. Il problema delle Comete.

- Secondo i principi aristotelici le comete dovrebbero far parte della meteorologia, in quanto sono mutevoli: compaiono e scompaiono in cielo.
- Le osservazioni sulla loro altezza nel cielo le collocano nettamente fuori dal concavo lunare, cioè nel mondo celeste, che è immutabile.



Verrà un tempo...

Perché dunque ci meravigliamo se uno spettacolo cosmico tanto raro come quello delle comete non è ancora inquadrato in leggi regolari e se non sono ben note le circostanze in cui hanno inizio e fine questi fenomeni, che ricompaiono a intervalli smisurati?

Non sono ancora trascorsi millecinquecento anni da quando la Grecia contò e diede un nome alle stelle, ed esistono ancora oggi molti popoli che conoscono il cielo solo nel suo aspetto esteriore, che non sanno ancora perché la Luna si eclissi, perché si oscuri:

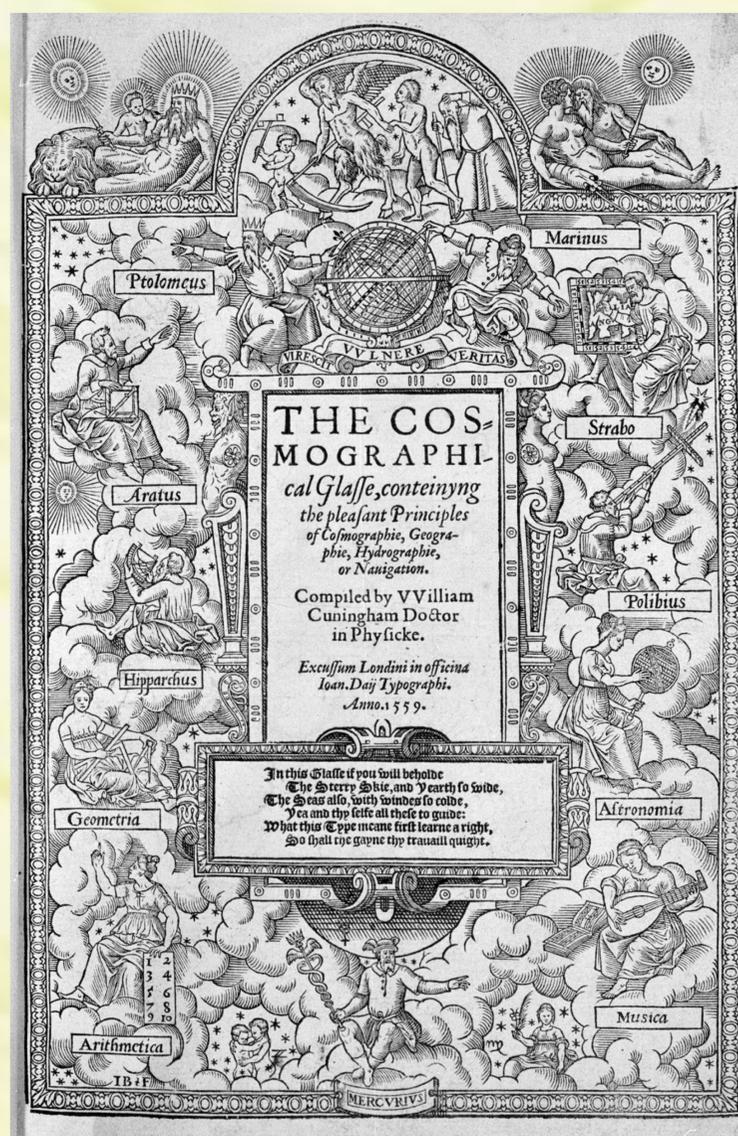
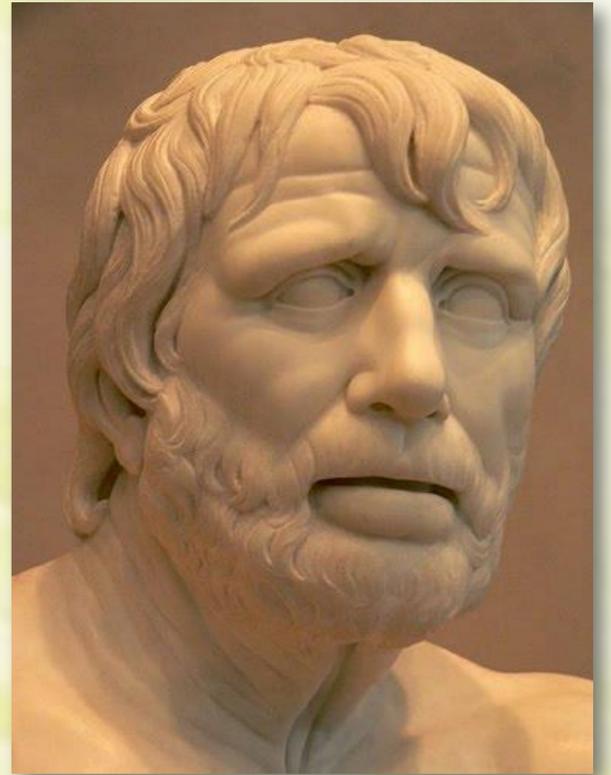
anche presso di noi solo di recente la ricerca

scientifica è giunta a dare una risposta sicura a questi problemi.

Verrà un tempo in cui un solo momento, insieme al lavoro di un'età più lunga, porterà alla luce queste cose che ora sono celate; per la ricerca di cose tanto grandi non è sufficiente una vita, anche se fosse tutta dedicata allo studio del cielo: che dire, dal momento che noi dividiamo in modo diseguale i nostri pochi anni tra gli studi e i vizi?

E così queste cose saranno spiegate attraverso lunghe successioni di generazioni. Verrà il tempo in cui i nostri posteri si meraviglieranno del fatto che noi abbiamo ignorato realtà così evidenti.

SENECA, *Naturales Quaestiones* -VII, 25, 3-5; 30, 3-6



I protagonisti della cosmologia antica, nel frontespizio di un testo del '500