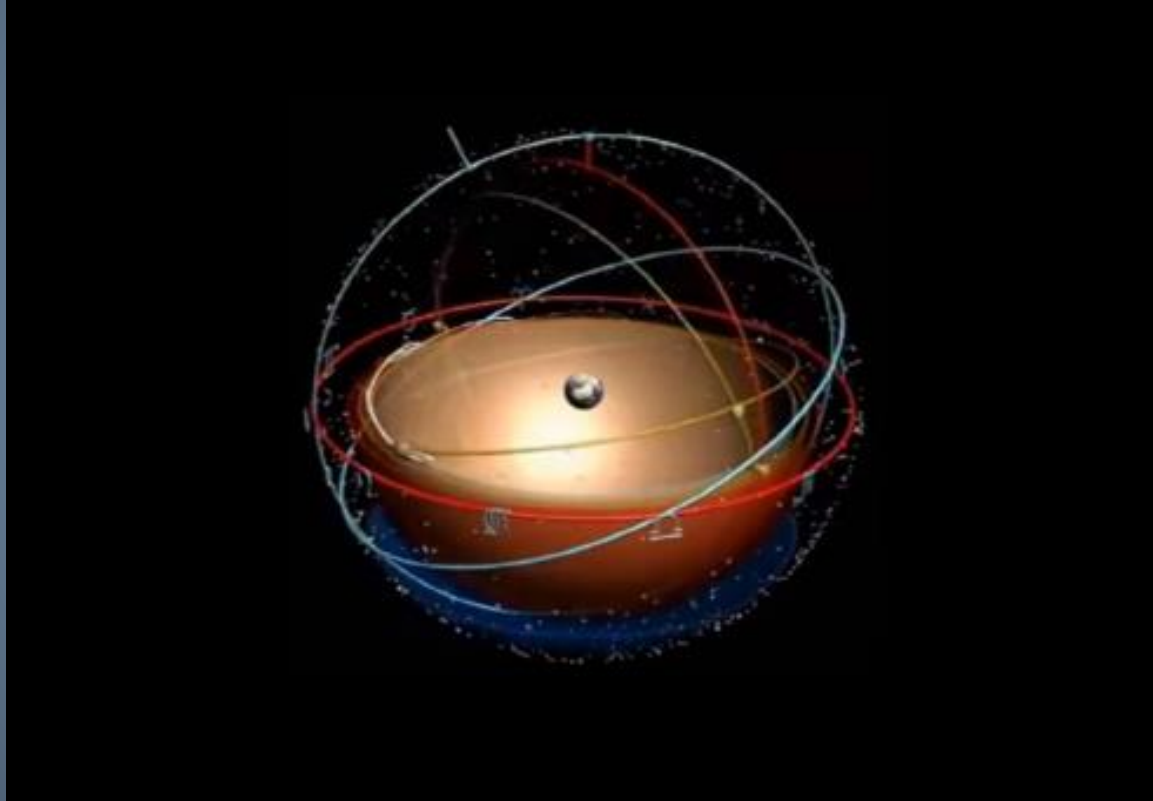


L'ordine nel cosmo

Liceo Alexis Carrel 2015 - 2016



I momenti storici dell'astronomia

3.000 a. C. Babilonesi, Egiziani,
Cinesi, Stonehenge – Bretagna



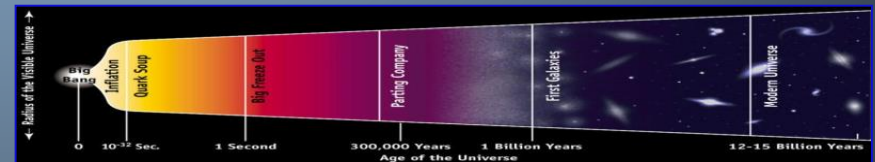
300 a.C. La civiltà greca
e il modello geocentrico
(matematica)



1600 Il rinascimento
e la rivoluzione copernicana
(osservazione e tecnica)



1900
L'universo in espansione
(fisica)



La civiltà greca e il modello geocentrico

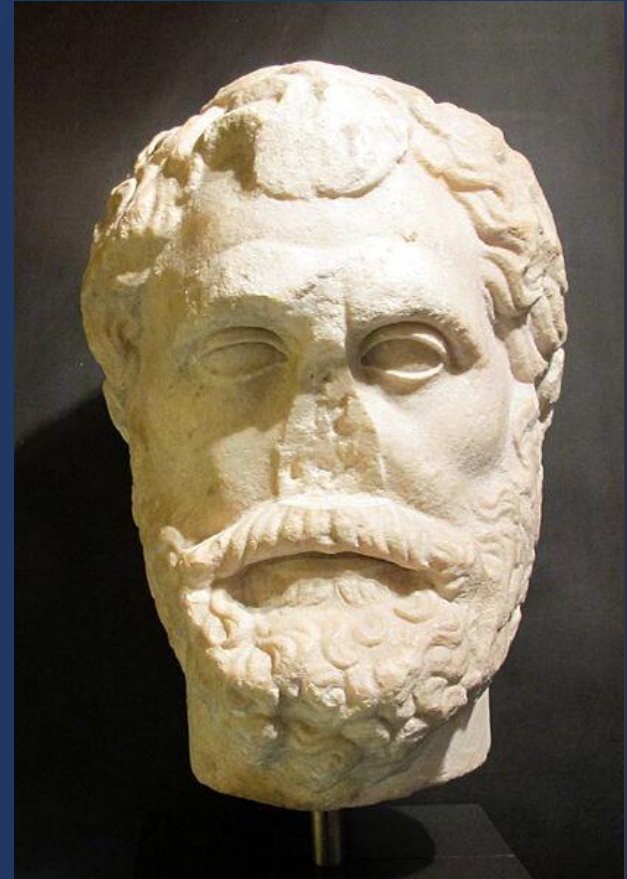
Talete e Anassimandro di Mileto	VI sec. a. C.	Superamento mitologie; natura governata da leggi oggettive e impersonali
I Pitagorici	IV sec. a. C.	Sfericità della Terra
Aristotele	IV sec. a. C.	I 4 elementi del mondo (terra, acqua, aria e fuoco) Il regno terrestre e quello celeste le sfere concentriche
Apollonio da Perga	III sec. a. C.	Ep cicli e deferenti
Eudosso da Cnido	III sec. a. C.	Sistema meccanico di 27 sfere concentriche
Eratostene da Cirene	III sec. a. C.	Prima misura delle dimensioni della Terra
Aristarco da Samo	III sec. a. C.	Prime stime delle dimensioni di Luna e Sole e delle loro distanze dalla Terra; ipotesi eliocentrica
Ipparco	II sec. a. C.	Eccentricità dell'orbita del Sole
Tolomeo	II sec. d. C.	Almagesto con sintesi delle conoscenze; introduce l'equante; segnala problemi aperti.

Talete

« Talete di Mileto fu il primo scopritore della geometria, l'osservatore sicurissimo della natura, lo studioso dottissimo delle stelle »

(Apuleio, *Florida*, 18)

Talete di Mileto (625-547 a.C.) sostenne che alla base di tutti gli innumerevoli e vari fenomeni rilevati dai nostri sensi c'era un'entità materiale comune (l'acqua) e che la natura era molto intelligibile al di là dell'aspetto superficiale.

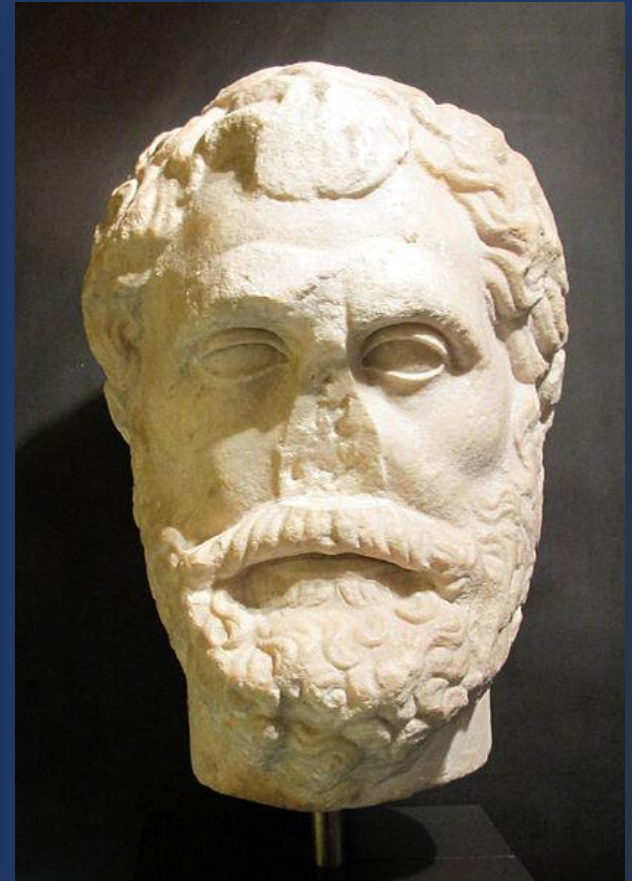


Talete

I primi filosofi sono dei fisici o fisiologi.
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.
I filosofi di Mileto si sono occupati solo della realtà materiale.

A differenza delle precedenti cosmogonie che pretendevano anch'esse di spiegare tutta la realtà, ora si pretende di spiegare tale realtà senza gli impacci, i fraintendimenti e i veli del mito, che nella realtà, nella *physis*, coinvolgevano le presenze determinanti degli dei e degli esseri sovranaturali. Eliminata ogni sovrastruttura mitica, resta la *physis*, la natura.

Il termine di natura coincide infatti con quello stesso di cosmo: la *physis* è il *kosmos*.



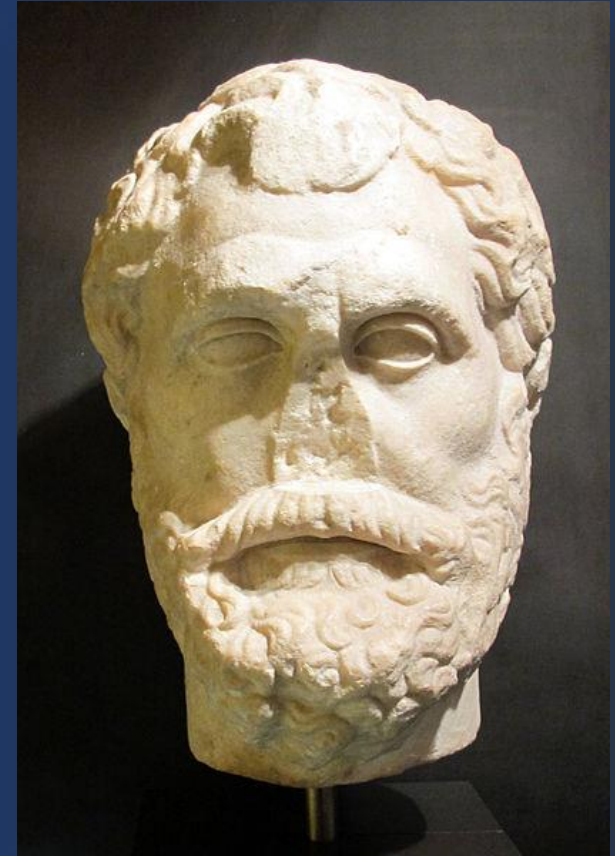
Talete

Ad esempio

notarono che il rapporto della grandezza del sole rispetto alla sua orbita e il rapporto della grandezza della luna rispetto alla sua orbita è di 1:720.

Stabilirono che alcune stelle non erano, come sembravano, fisse rispetto ad altre, e le chiamarono pianeti, ossia corpi erranti.

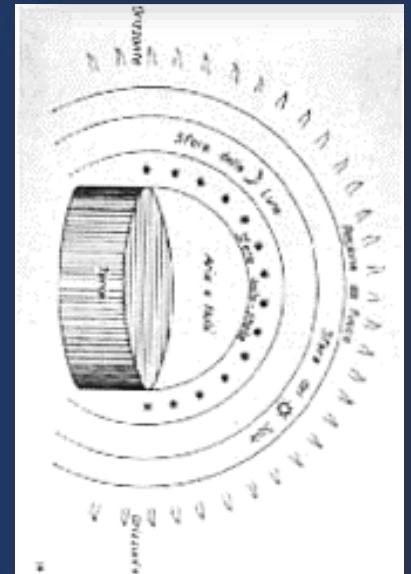
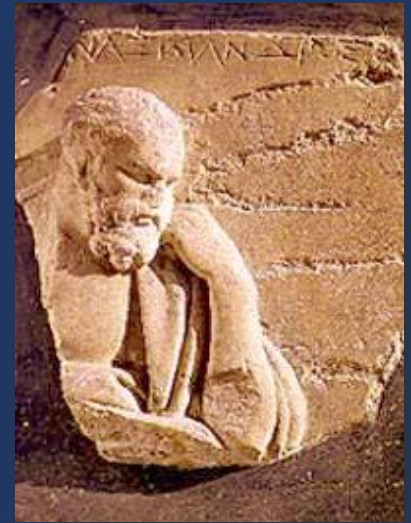
Fissarono in trenta il numero dei giorni del mese e constatato che l'anno era composto da 365 giorni e un quarto.



Anassimandro

Anassimandro (di Mileto anche lui 610-545 a.C.) concepì le stelle come condensazioni di aria piene di fuoco, con aperture dalle quali trasparivano le fiamme.

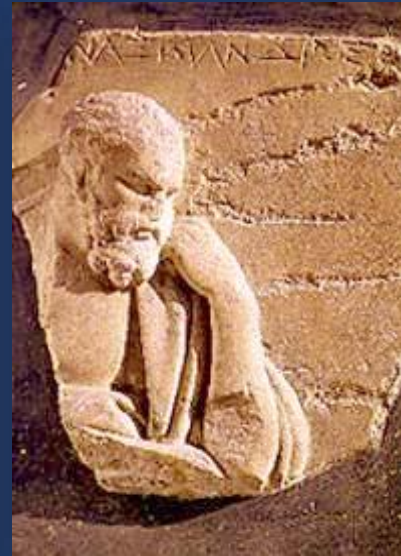
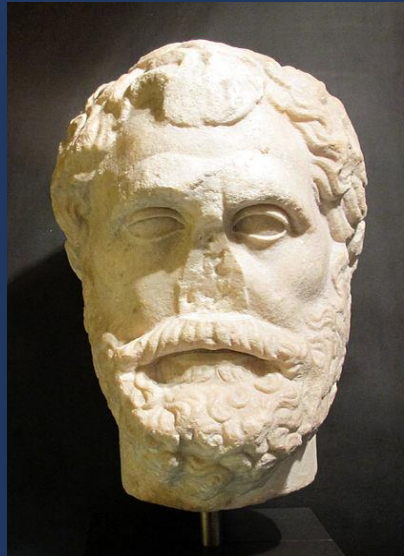
Il sole era il più alto (lontano) dei corpi celesti e la luna era subito sotto di esso. La Terra era un cilindro e stava ferma al centro dell'universo in quanto era equidistante da qualsiasi altra cosa. L'umanità viveva sulla sua superficie..



A sostegno del modello cilindrico era il fatto che a diverse latitudini le stelle visibili non erano le stesse: dall'Egitto erano visibili stelle che non potevano assolutamente essere viste dalla Grecia. Questo portava 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.

Talete di Mileto (625-547 a.C.) e Anassimandro (610-545 a.C.)
sono primi «cosmologi» a noi noti



Per entrambi c'è il superamento delle mitologie
a favore di una natura governata
da leggi oggettive, impersonali.

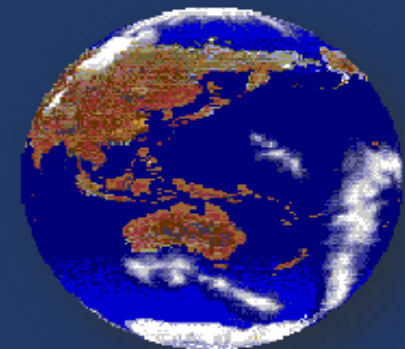
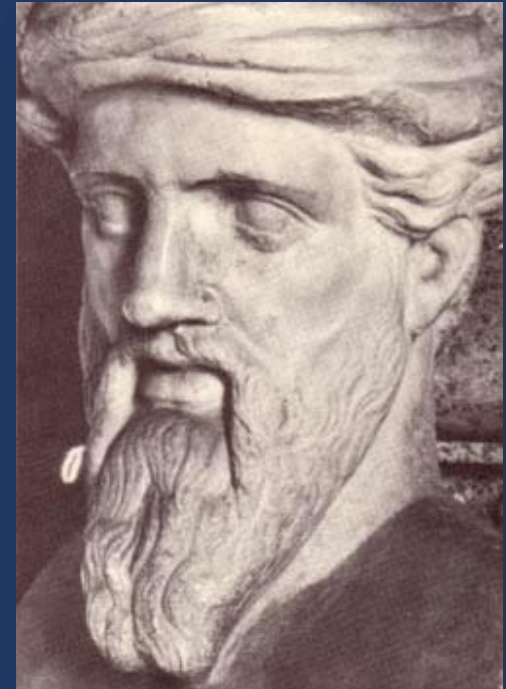
I Pitagorici

Nelle colonie greche dell'Italia meridionale, attorno al celebre Pitagora, si radunarono i membri di un gruppo religioso: furono chiamati "Pitagorici".

Fondamento della loro scuola e filosofia fu che alla base di qualsiasi cosa ci fossero i numeri; "Tutto è numero" fu infatti il motto che li rese famosi.

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
- **Filosofica:** basata sull'idea che l'unica forma adatta a rimanere naturalmente in equilibrio fosse quella sferica: la forma più perfetta per un corpo.

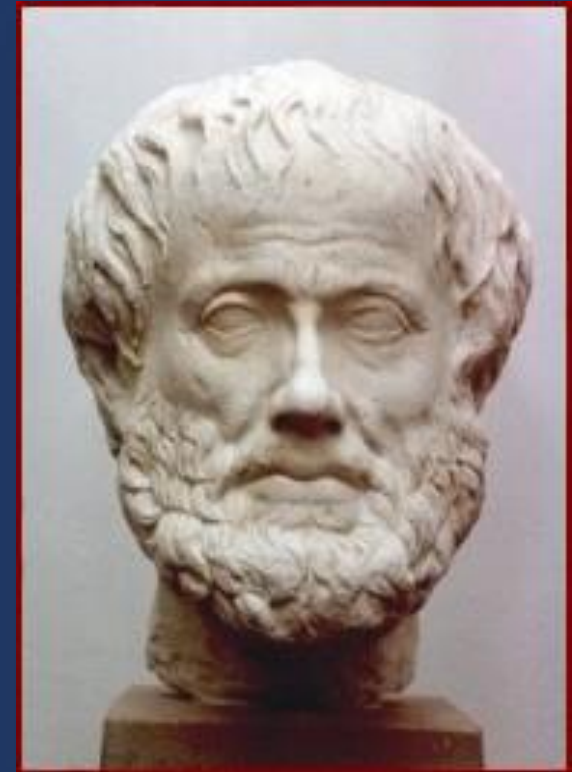


Aristotele

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

Aristotele tratta nella *Fisica* e nel *De coelo* della conformazione dell'universo.

Egli propone un **modello geocentrico**, finito (diversamente non potrebbe esserci un centro). Secondo Aristotele, la Terra è formata da quattro elementi: terra, acqua, aria e fuoco.

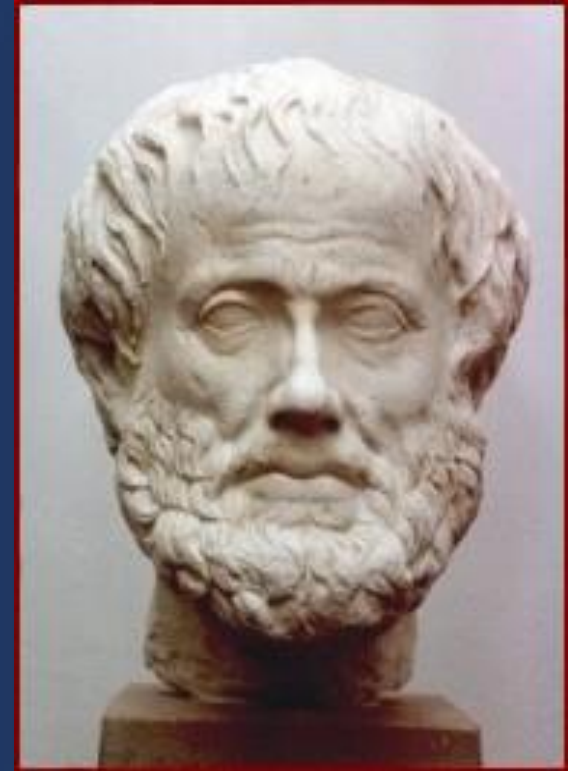


Aristotele

Riguardo a ciò che si trova oltre la Terra, Aristotele lo riteneva composto di un quinto elemento (o essenza): l'etere, che non esiste sulla Terra, è privo di massa, invisibile e, soprattutto, eterno ed inalterabile.

Queste due ultime caratteristiche fissano 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, era il mondo mutevole, della meteorologia.
- il regno celeste, oltre il "concavo lunare", era il mondo immutabile, perfetto, dove i corpi compivano i loro moti circolari, regolari ed eterni, con immutabilità.



Il regno terrestre

Nel regno terrestre, secondo Aristotele, ogni cosa tendeva verso il proprio luogo naturale: C'era perciò una sfera di terra verso la quale tendeva il moto delle pietre, attorniata da una sfera di acqua (mari), una sfera di aria (atmosfera) e una sfera superiore di fuoco che arrivava fino al confine del concavo lunare; per questo il fuoco era attratto al cielo... Infatti le comete e le stelle cadenti, che comparivano e scomparivano in certi periodi, appartenevano a questa sfera concentrica.



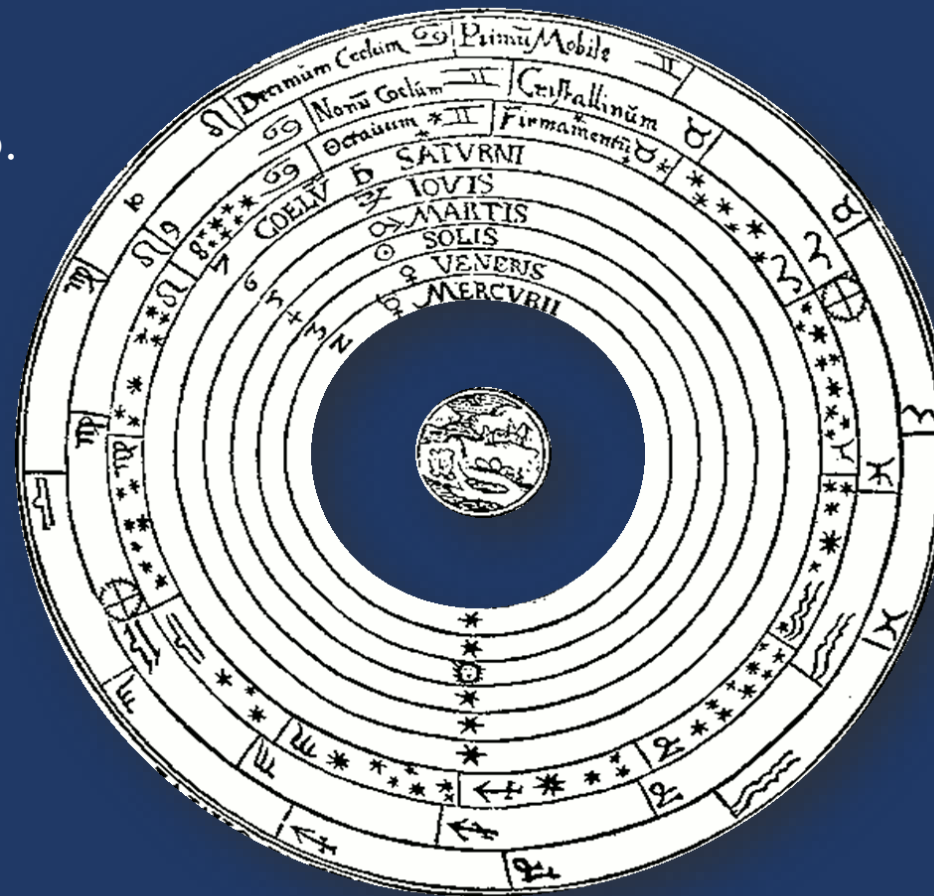
Il regno celeste

I pianeti conosciuti erano 5:
Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno.

Ognuno si muoveva, insieme al sole,
su orbite circolari, concentriche alla
Terra, che era sospesa al centro
dell'universo.

Tutto l'universo era racchiuso
da un'ultima sfera, maggiore:
quella delle stelle fisse,

che a sua volta riceveva il moto dal PRIMO MOBILE



La prova della fissità della Terra

La prova che la Terra stesse ferma veniva dal seguente esperimento.

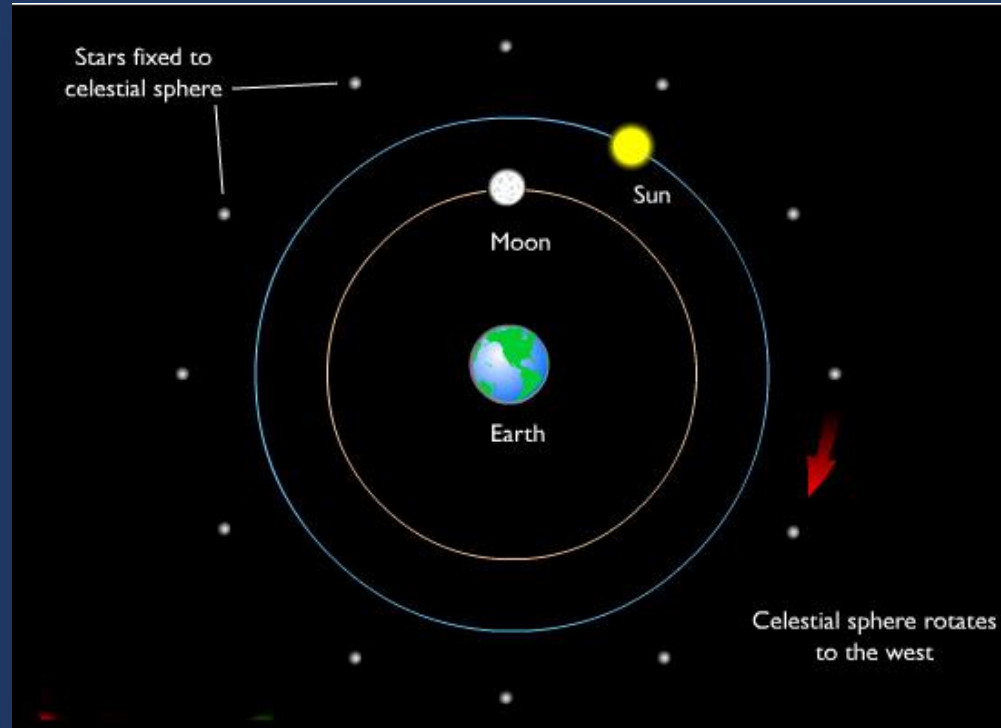
Supponiamo che un arciere scocchi una freccia verticalmente verso l'alto e che, mentre la freccia è in volo, la terra si muova e con essa l'arciere.

Nel tempo impiegato dalla freccia a salire in alto, fermarsi per un istante e ricadere, la Terra si sarà spostata e l'arciere non si troverà più sotto la freccia....

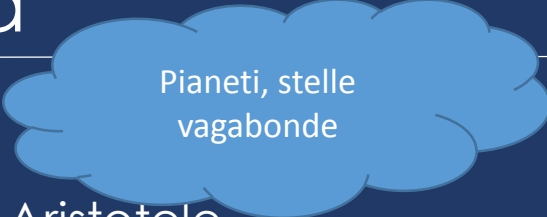


Le stelle fisse

Le stelle “fisse” ruotavano intorno alla Terra, centrale, con perfetta regolarità matematica, una notte dopo l'altra, un anno dopo l'altro, conservando le loro posizioni relative.



Incongruenze e perplessità



Pianeti, stelle
vagabonde

Nessuno osò mettere in discussione le concezioni di Aristotele, però gli astronomi notarono che i 5 pianeti (Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno) si muovevano ognuno per conto proprio fra le stelle fisse, con velocità variabile, apparentemente a proprio piacimento.

Ognuno dei 5 pianeti, ogni tanto addirittura si fermava, invertiva per un po' di tempo il suo cammino e poi riprendeva il normale volo diretto da ovest verso est.

Inoltre i pianeti non apparivano sempre con la stessa luminosità, ma a volte sembravano più luminosi e altre meno; questo suggeriva grandi mutamenti della loro distanza dalla Terra.

Solo cerchi, sfere e moti uniformi

Platone avrebbe assegnato ai suoi contemporanei il compito di mostrare che i moti planetari erano altrettanto regolari di quelli degli altri moti celesti, anche se non altrettanto semplici.

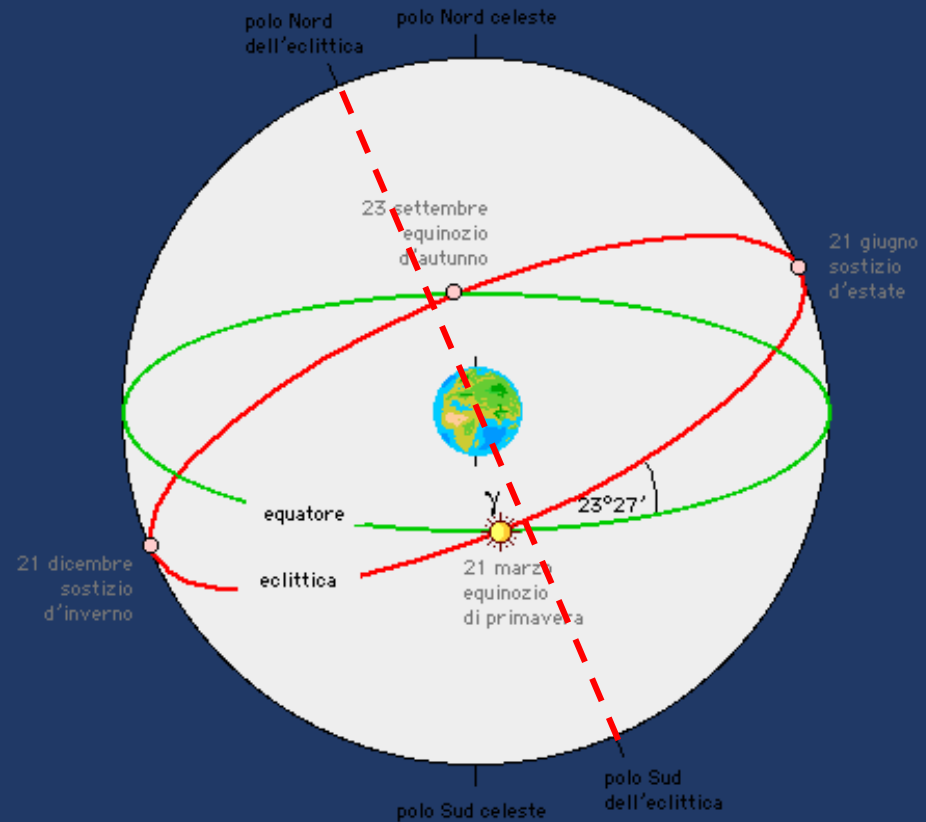
Poiché i moti delle stelle erano circolari e uniformi, si trattava di spiegare anche i moti dei pianeti come combinazioni di moti circolari e uniformi.

Si chiamò moto retrogrado il particolare comportamento dei pianeti che li faceva retrocedere, lungo le rispettive orbite, in certi periodi dell'anno e si cercò di spiegarlo con cerchi e sfere.



Eclittica

Percorso apparente
che il sole compie
in un anno
rispetto allo sfondo
della sfera celeste



Modello meccanico di 27 sfere concentriche

Eudosso da Cnido (400 -347 a. C.)

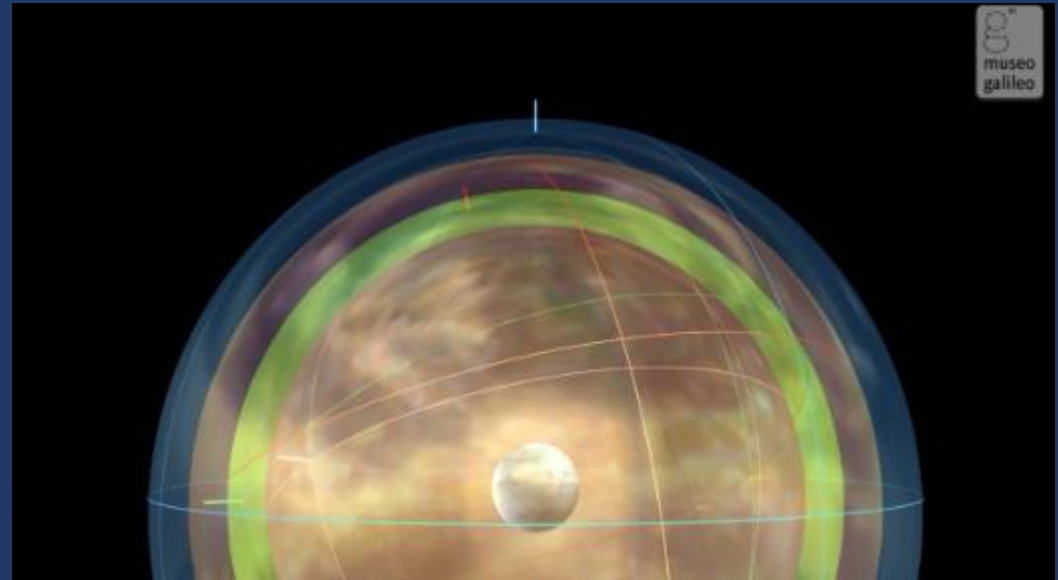
Fu uno dei migliori matematici dell'antichità e propose un modello geometrico per i moti dei pianeti ipotizzati da Aristotele.

Era un sistema composto da 27 sfere:

4 per ciascuno dei 5 pianeti minori, 3 per il sole, 3 per la Luna, 1 per le stelle fisse

Le combinazioni dei moti delle sfere riuscivano a riprodurre abbastanza fedelmente i moti osservati nel cielo.

Il modello fu adottato e insegnato nelle università fino al tardo Medioevo.

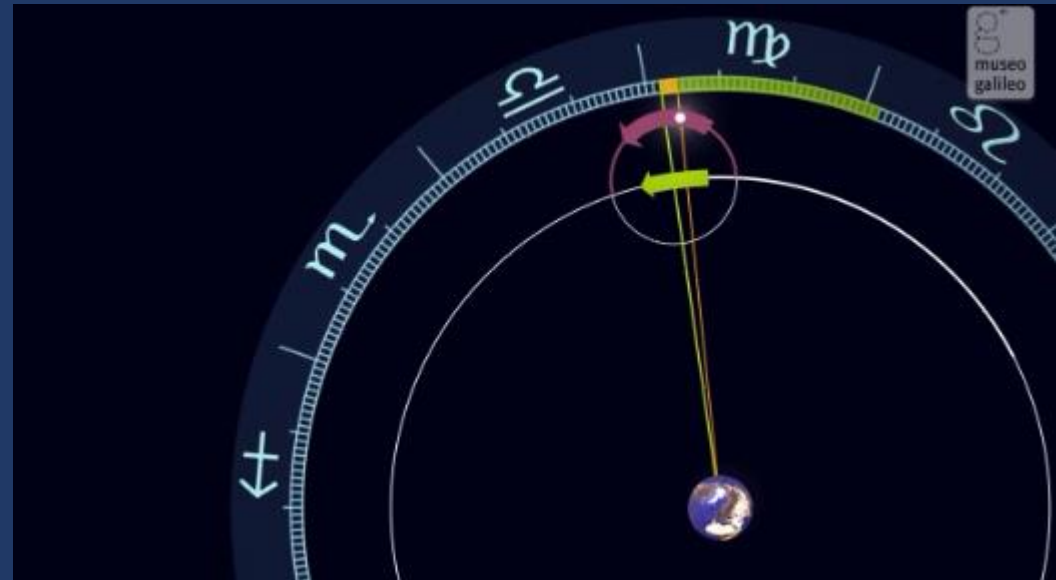


Epicicli e deferenti

Apollonio da Perga – Asia Minore – 262 – 190 a. C.

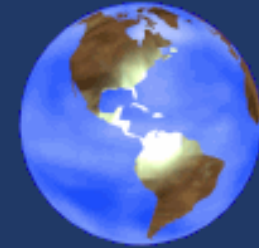
Fu grande matematico, studioso della geometria delle coniche, mise a punto alcuni dispositivi per simulare il moto dei pianeti.

Ideò gli epicicli: piccoli cerchi i cui centri si muovono su un cerchio maggiore, detto deferente, con la Terra nel suo centro. Fu proprio questo meccanismo che interpretò il moto retrogrado osservato dalla Terra.



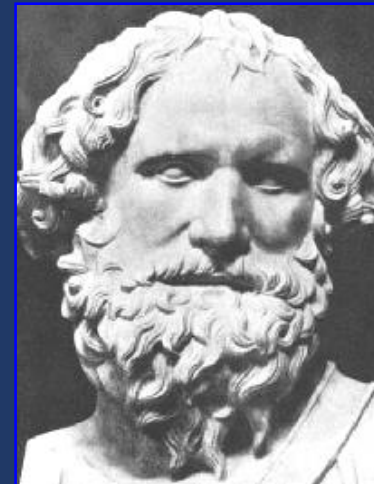
Ricerche di carattere quantitativo

- La misura del raggio terrestre
- Le distanze Terra – Sole, Terra – Luna
- La misura del raggio di Luna e Sole



Le misure della Terra

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



Le misure della Terra

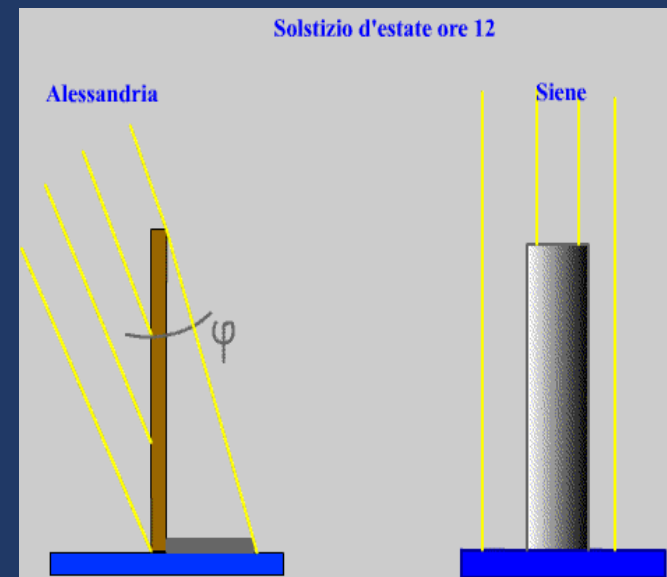
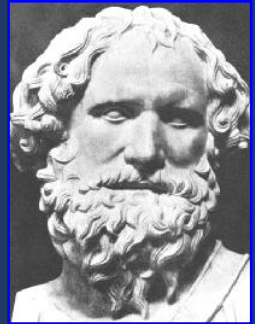
Eratostene di Cirene (273-192 a.C.)

Intorno al 230 a.C. misurò per la prima volta le dimensioni della Terra.

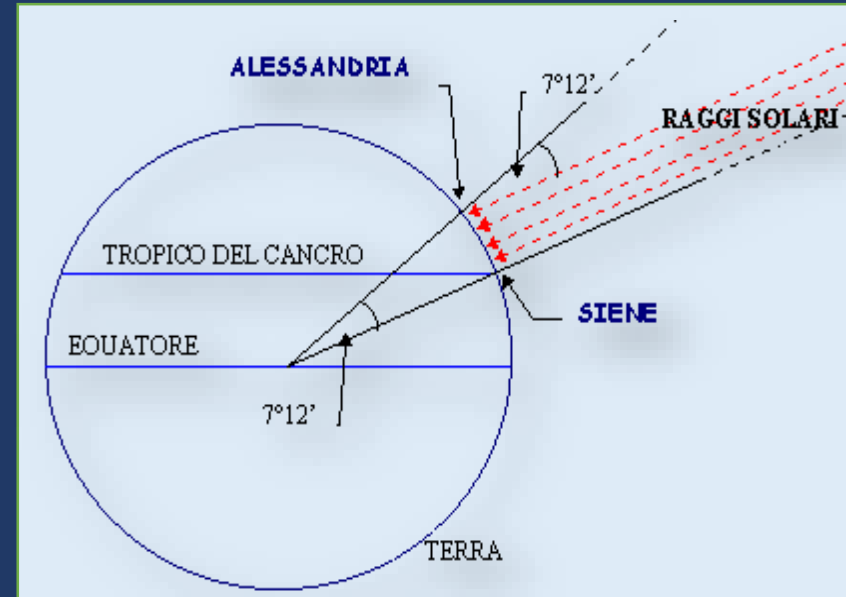
Il suo calcolo si basava sull'osservazione che un bastone verticale posto a Siene (Assuan) in Egitto il giorno del solstizio d'estate, non proietta nessuna ombra.

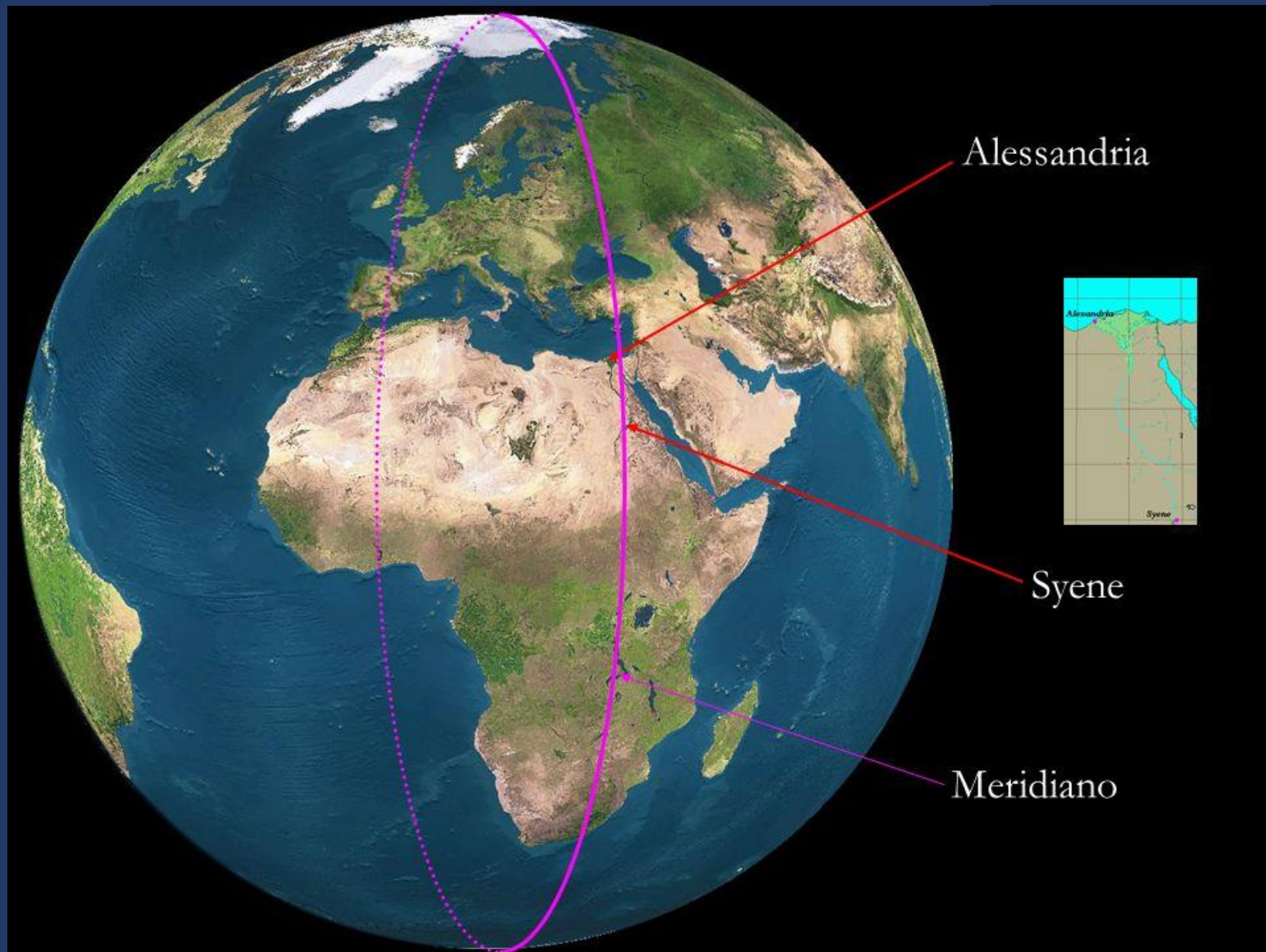
Ciò significa che, in quel giorno e a quell'ora, il sole si trova esattamente allo zenit.

Nello stesso giorno dell'anno e alla stessa ora, un uguale bastone piantato ad Alessandria, proietta un'ombra che indica una inclinazione di $7^{\circ} 12'$ dei raggi solari rispetto alla verticale.



Se Alessandria si trova sullo stesso meridiano, a nord di Siene (come Eratostene credeva), la differenza di latitudine tra i due luoghi è di $7^{\circ} 12'$. Conoscendo la distanza tra Siene e Alessandria era possibile calcolare, per mezzo di una proporzione, la misura della circonferenza e quindi del diametro terrestre. Infatti, $7^{\circ} 12'$ rappresentano un cinquantesimo dell'angolo giro; quindi anche la distanza Siene-Alessandria deve essere la cinquantesima parte della circonferenza terrestre.





$$7^{\circ}12' : 360^{\circ} = SA : \text{circ.Terr.}$$

Le stime della distanza tra le due città (SA) era allora di 5.000 stadi (1 stadio equivale a circa 157 metri), quindi :

$$SA = 157\text{m} * 5.000 = 785.000 \text{ m}$$

cioè 785 km.

$7^{\circ} 12'$ sono $1/50$ di 360° .

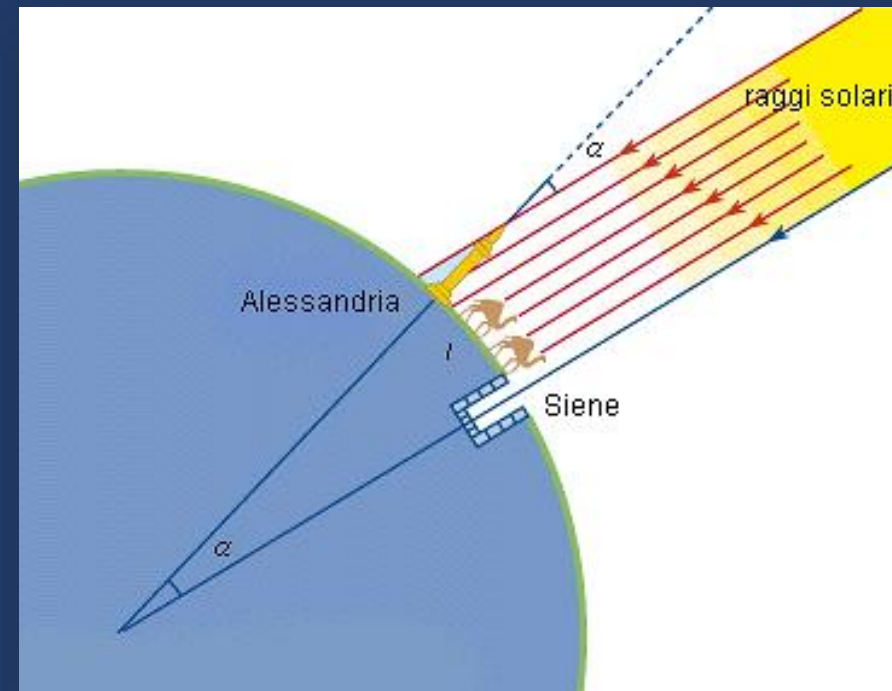
Dunque la circonferenza della

Terra è di $785 * 50 = 39.250 \text{ km}$

che diviso per 6.28 dà 6.250 km;

una misura straordinariamente vicina a quella oggi accettata

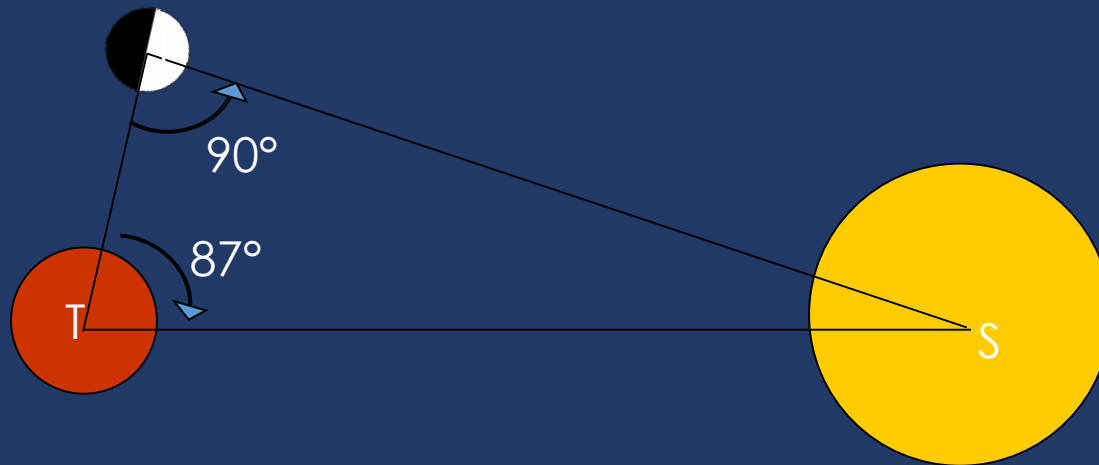
(attuali: 6.378 km Equatoriale – 6.356 km Polare)



Le distanze della Terra da Sole e Luna

Aristarco da Samo (III sec. A.C.)

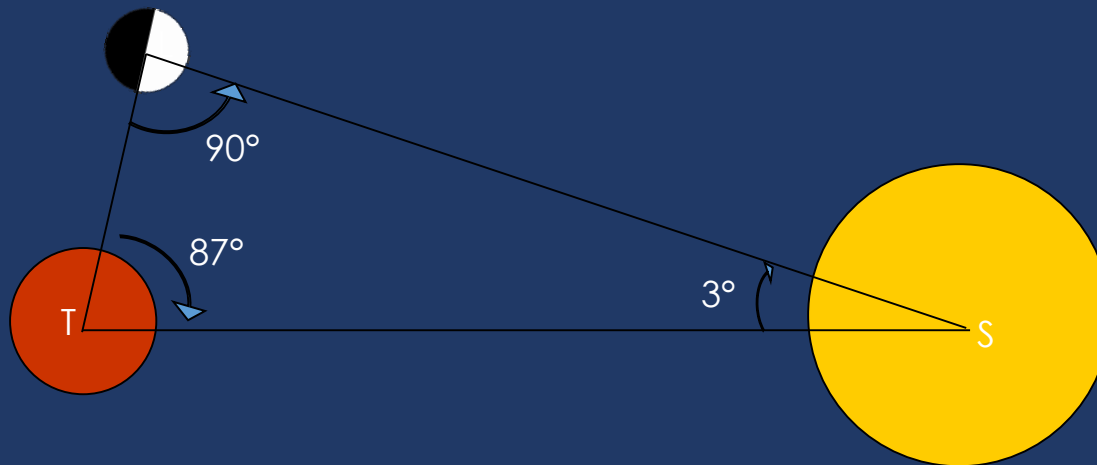
Quando la luna è semipiena, l'angolo Terra-Luna-Sole è retto



Aristarco misurò 87° per l'angolo STL

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

Quindi, per similitudine $TS : TL = 19 : 1$



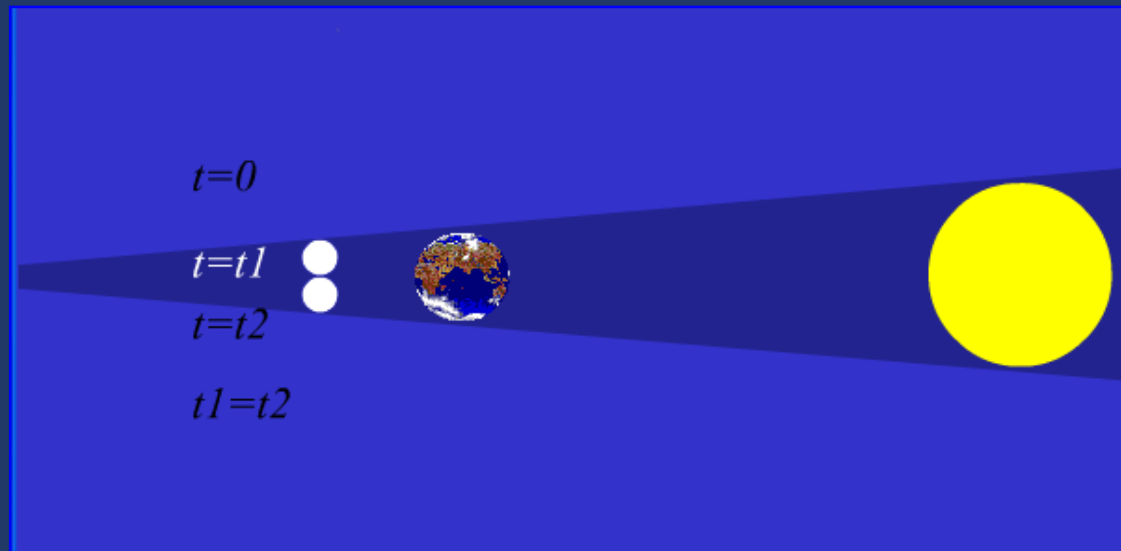
Dunque la distanza Terra – Sole = 19 volte la distanza Terra-Luna

Osservando l'eclissi Aristarco notò che

- detto t_1 l'intervallo di tempo tra l'inizio dell'ombra sulla Luna e l'oscuramento completo della Luna,
- detto t_2 l'intervallo di tempo in cui la luna resta completamente oscurata,

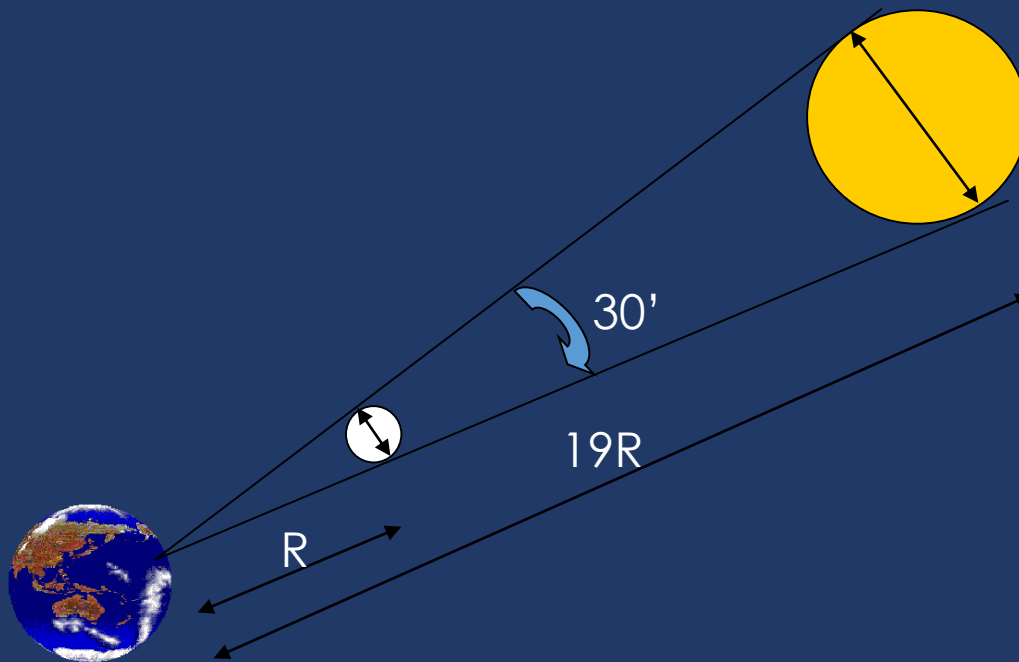
$$t_1 = t_2 - \text{Simulazione}$$

Conclusione: la larghezza del cono d'ombra che la Terra proietta sulla Luna in una eclissi lunare è circa 2 volte il diametro della luna



Luna e Sole si vedono dalla Terra sotto lo stesso arco

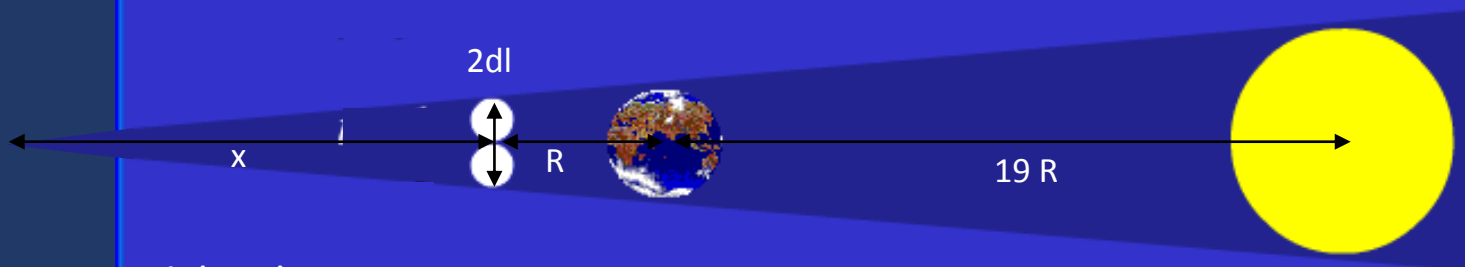
(di $30' = 0,5^\circ$); cioè hanno le stesse dimensioni alla medesima altezza sull'orizzonte



Quindi il diametro del Sole è 19 volte quello della Luna

I dati noti sono:

- il diametro terrestre $D_t = 12.600$ km, circa (Eratostene)
- il rapporto tra le dimensioni del Sole e della Luna: 19, circa
- il rapporto fra le distanze Terra-Sole e Terra-Luna: 19, circa



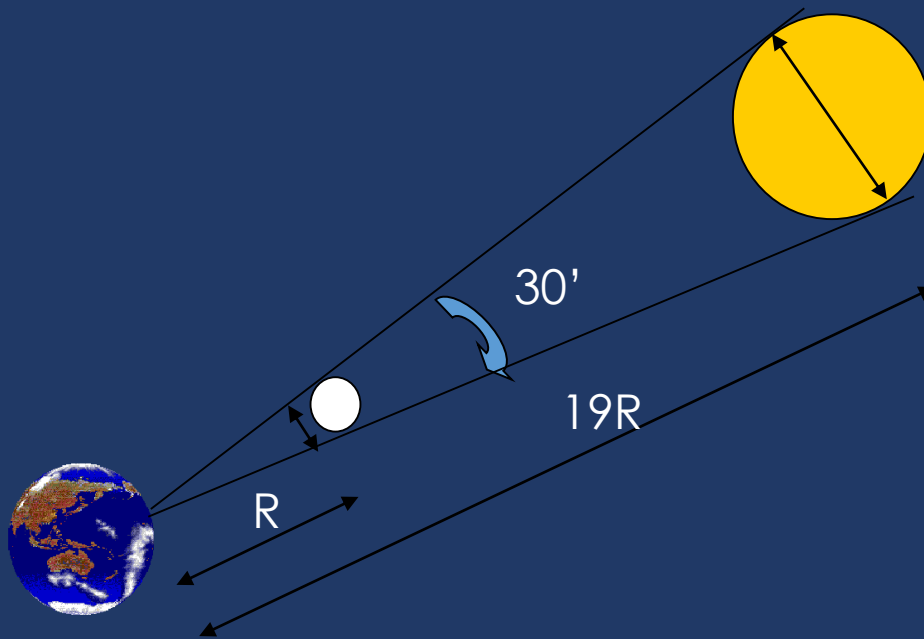
Le incognite sono :

- il diametro Lunare d_l (e quello del Sole D_s)
- la distanza Terra-Luna R (e quella Terra-Sole $19R$)

Aristarco seguì un procedimento matematico abbastanza semplice, basato sulle similitudini ed arrivò a stabilire che

- Il valore x (indicato nella figura) è $40/17R$
- $d_l = 20/57 D_t = 20/57 * 12600 = 4.421$ km
- quindi $D_s = 4.421 * 19 = 84.000$ km

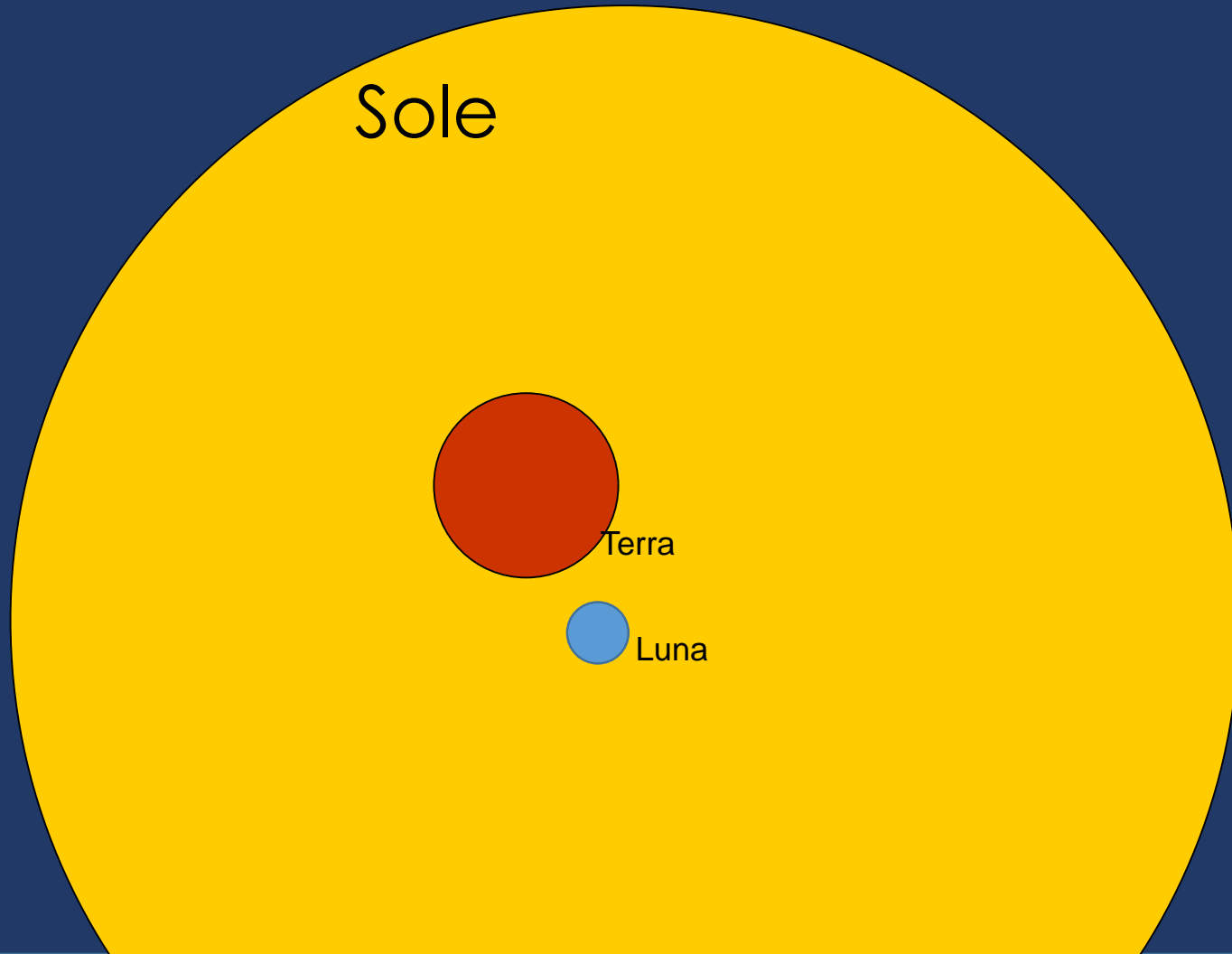
La Luna si vede dalla Terra sotto un arco di $30' = 0,5^\circ$;



Ora che conosciamo il diametro della Luna, 4421 km circa, possiamo ricavare la lunghezza dell'orbita lunare: (4421×720) e quindi il raggio di tale orbita: $(4421 \times 720) / 2\pi \cong 506.609$ Km e questo è il valore di R.

Quindi la distanza Terra- Sole è pari a $506.609 \times 19 = 9.625.571$ km)

Le proporzioni, secondo Aristarco



Confronto con i valori attuali

Distanze T-L e T-S

	Aristarco	Attuali
Diametro Luna - d	1/3 Terra 4.421 km	1/4 Terra 3.189 km
Diametro Sole - Ds	6,6 Terra 84.000 km	110 Terra 1.403.160 km
Distanza T-L	40 diam Terrestri 506.609 km	60 diam. Terr. 384.000 km
Distanza T-S	782 diam. Terrestri 9,625 Mil. di km	23.455 diam. Terrestri 149,6 Mil. di km

Catalogo stellare e irregolarità durata stagioni

Ipparco di Nicea (190 a.C.– 120 a.C.)

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

In particolare, Ipparco compilò un **catalogo stellare** con 1080 stelle e le rispettive posizioni celesti. Compose poi un **elenco delle eclissi lunari** registrate dai Babilonesi a partire dall'VIII secolo.

Queste registrazioni furono cruciali per lo studio dei moti del Sole e della Luna, poiché nelle eclissi Sole e Luna sono perfettamente allineati con la Terra.

Si accorse che **le stagioni non avevano tutte la stessa durata** e concluse che la Terra non poteva trovarsi al centro dell'orbita del Sole, ma in una posizione eccentrica.



Ipparco rompe la simmetria

Ipparco arrivò a stabilire che l'eccentricità dovesse essere pari a $1/24$ del raggio del cerchio e che l'asse Terra-centro orbita Sole doveva fare un angolo di $65^{\circ} 30'$ con l'equinozio di primavera.

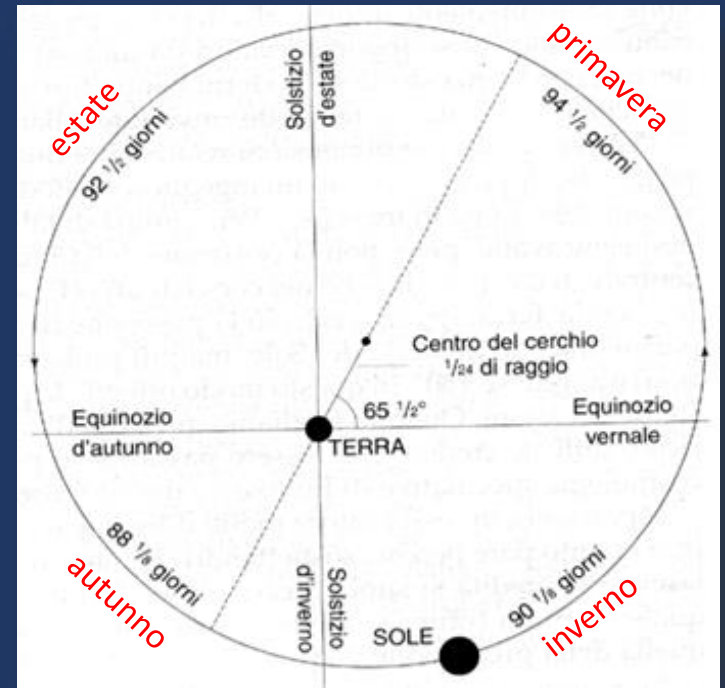
Primavera: 94,5 giorni

Estate: 92,5 giorni

Autunno: 88,125 giorni

Inverno: 90,125 giorni

365,25



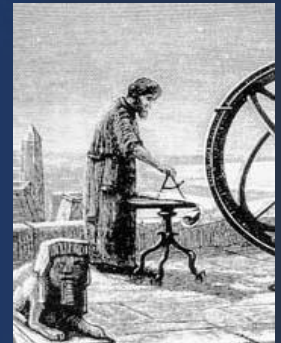
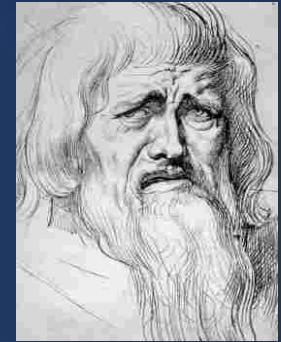
La Terra è veramente ferma ?

Le ipotesi di qualche moto della Terra non mancarono nell'antichità.

Filolao, pitagorico vissuto nell'Italia meridionale, fu il primo a proporre il moto della Terra, della Luna, del Sole e dei 5 pianeti attorno ad un fuoco centrale: il "cuore dell'universo".

Eraclito Pontico (350 a.C.) avrebbe proposto il moto della Terra attorno ad un suo asse.

Aristarco dell'isola di Samo (250 a.C.) anticipò Copernico, sostenendo che la Terra ruotava attorno al sole.

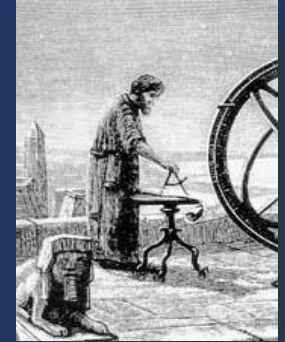


Il primo modello eliocentrico di Aristarco (3° sec. A.C.)

Il Sole è fermo al centro dell'universo.

Terra e pianeti ruotano attorno al Sole con moti circolari uniformi

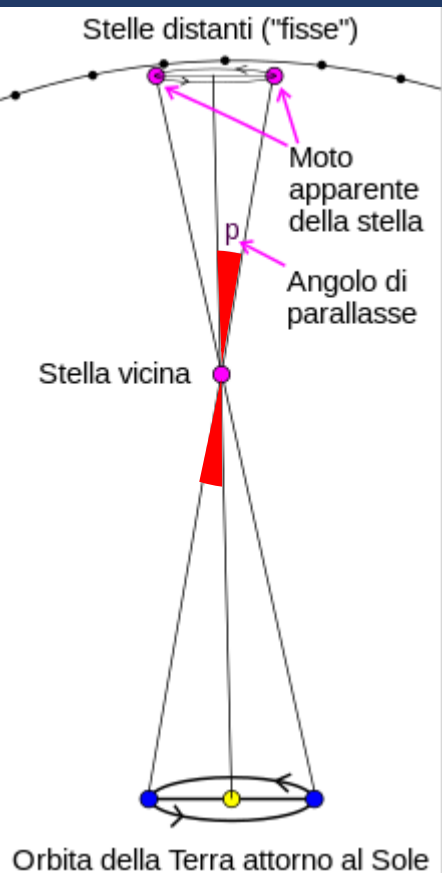
La Terra, oltre a ruotare attorno al Sole, ruota su se stessa



Da questo modello consegue che:

- Il moto diurno 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 (eclittica)
- Il moto retrogrado è conseguenza della differente velocità di rotazione dei pianeti rispetto a quella della Terra

Una riflessione di Aristarco



La parallasse di una stella

Se la Terra si muove attorno al Sole, e io osservo una stella
In un determinato giorno, 6 mesi dopo devo vedere la
stessa stella in un'altra posizione. In tal caso la stella deve
avere ai miei occhi un moto apparente.

Si chiama parallasse annua di una stella l'angolo sotto
il quale, dalla stella si vedrebbe il semiasse dell'orbita
terrestre

Aristarco però dalla terra non riuscì ad osservare alcun
moto apparente delle stelle fisse.

Ipotizzò che tale fatto doveva attribuirsi all'enorme
distanza delle stelle fisse dalla Terra.

(solo nel 1837 fu possibile determinare la parallasse annua
della stella fissa più vicina)

Tuttavia la fede nella
fissità della Terra
e nei moti circolari
attorno ad essa di tutti gli
altri corpi celesti prevalse.

Si avanzarono allora
nuove ipotesi per
giustificare le
incongruenze delle
osservazioni.

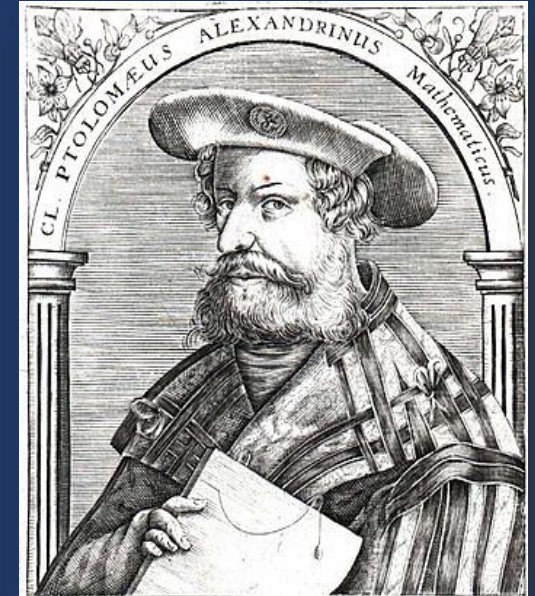


Claudio Tolomeo (150 d.C.)

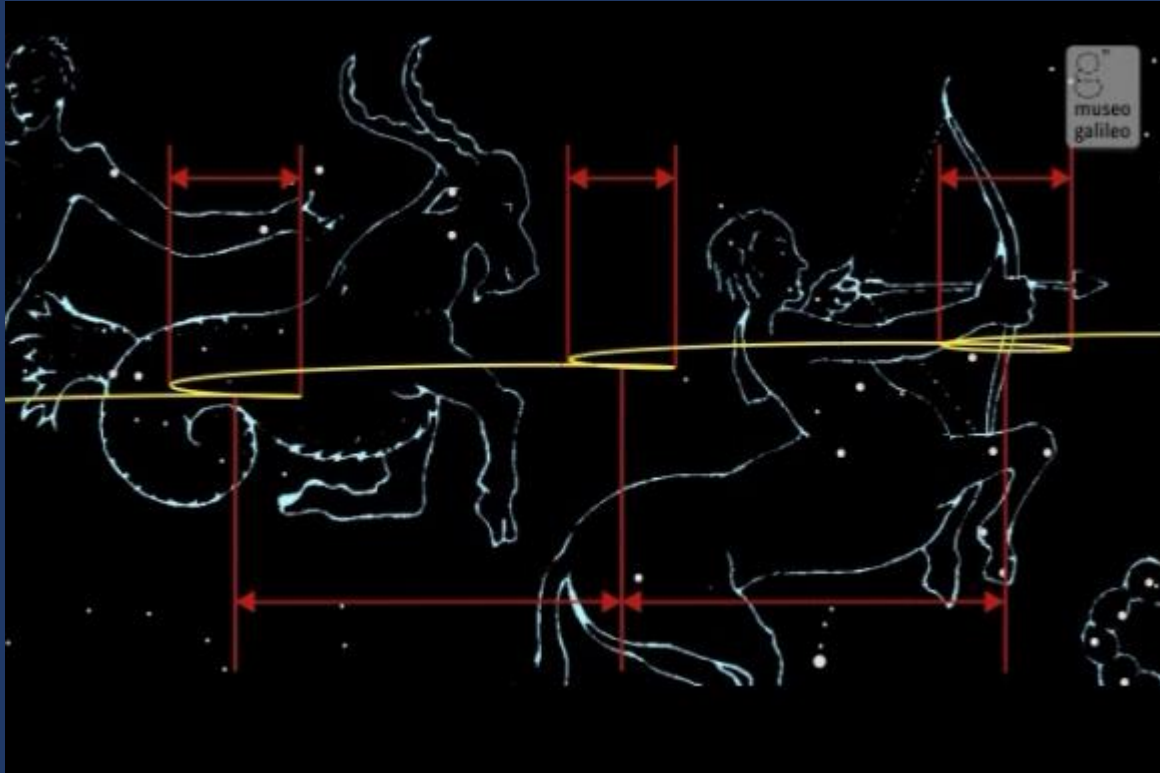
Tutte le concezioni greche sull'universo furono perfezionate e raccolte da Tolomeo in una grande opera, l'**Almagesto**.

In essa erano presenti anche le tavole correlate di Ipparco che permettevano di calcolare le posizioni del Sole, della Luna e dei 5 pianeti attorno alla terra per un futuro indefinito, un catalogo con più di un migliaio di stelle, le loro posizioni e la loro luminosità.

Nell'**Almagesto** Tolomeo cercò anche di dare una nuova spiegazione della variazione di velocità osservata per i pianeti.



Claudio Tolomeo (150 d.C.)



Il punto equante

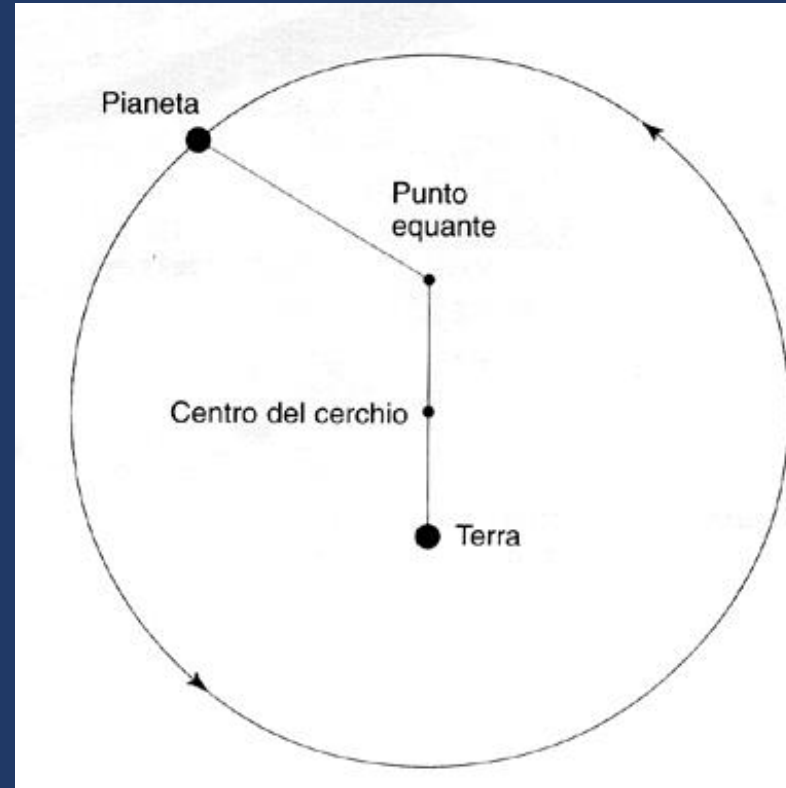
Il problema

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

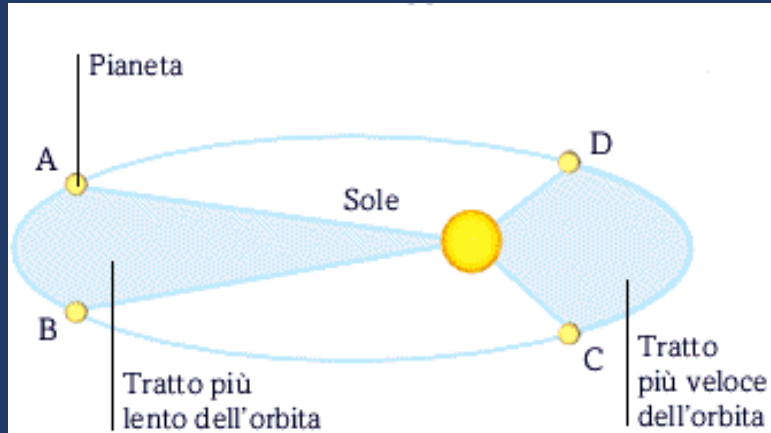
Come giustificare questa osservazione con il modello geocentrico simmetrico ?

Tolomeo definì il punto “equante” come l’immagine speculare della Terra, simmetrico rispetto al centro dell’orbita del pianeta.

Un pianeta, sulla circonferenza, doveva muoversi non con velocità uniforme, ma con una velocità che variava in modo tale da apparire uniforme a un osservatore situato nel punto “equante”.

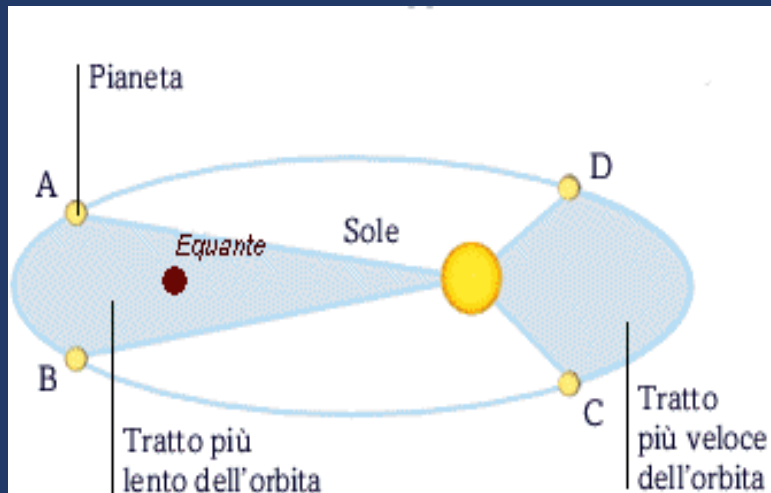


Come mai l'equante era così necessario ?



Per capirlo dobbiamo riferirci ad una legge scoperta da Keplero 1700 anni dopo

Quando il pianeta è più lontano dal sole si muove più lentamente, quando è più vicino, più velocemente.



Se collochiamo l'osservatore in un punto simmetrico al sole rispetto al centro dell'ellisse descritta dal pianeta (l'equante), le variazioni di velocità sono compensate dalle diverse distanze e il moto apparirà perciò grosso modo uniforme....

Tolomeo lascia alcune grosse perplessità

Diversi furono i problemi irrisolti nell'Almagesto; ecco i più clamorosi

A. Gli espedienti dell'**eccentricità** (introdotta da Ipparco) e degli epicicli (di Apollonio) mal si conciliavano con la filosofia naturale aristotelica che parlava di moti uniformi su sfere concentriche.

B. L'artificiosità dell'**equante** infastidiva tutti.

C. Il problema delle Comete

Anche le comete restavano un problema aperto:

- dovevano far parte della meteorologia, in quanto mutavano, comparivano e scomparivano in cielo.



- ma le osservazioni sulla loro altezza nel cielo le collocavano nettamente fuori dal concavo lunare, cioè nel mondo celeste, che doveva essere immutabile in eterno ...

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

25, 3-5. 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.

Un modello dell'Universo

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

