

ELEMENTI DI STORIA DELL'ASTRONOMIA

Prof. Angelo Angeletti

Liceo Scientifico Statale "Galileo Galilei"
Macerata

INDICE

- I primordi
- L'Astronomia fra il Tigri ed l'Eufrate
- Gli antichi Egizi
- I Greci
- Il Sistema Tolemaico
- Gli Arabi e l'Astronomia Medievale
- Il Sistema Copernicano
- Tycho Brahe
- Le Leggi di Keplero
- Galileo e le prime osservazioni del cielo con il Telescopio
- Newton e la Legge della Gravitazione Universale

FINE

I PRIMORDI

Tutte le grandi civiltà antiche hanno tenuto in grandissimo conto lo studio dell'astronomia.

L'interpretazione del moto dei corpi celesti rispondeva sia ad esigenze di carattere metafisico, sia a ragioni pratiche ben precise.

Tutte le attività umane sono più o meno direttamente collegate ai moti periodici dei corpi celesti (Sole, Luna, ecc.).

Nella concezione di tutti i popoli dell'antichità l'astronomia è stata strettamente legata alla tradizione religiosa spesso confondendole tra di loro.

I PRIMORDI

L'impulso dato all'astronomia da sacerdoti ed astrologi è stato molto utile per il suo progresso generale.

L'origine dell'astronomia è avvolto nel mistero.

Caldei, Egiziani, Fenici, Cinesi ed altri popoli hanno sviluppato autonomamente le loro esperienze astronomiche.

La maggior parte degli sforzi di questi popoli è stata dedicata al computo del tempo utilizzando le lunazioni, il sorgere e il tramontare del Sole e, a volte anche i movimenti dei pianeti.

Per molti popoli il punto cardinale Est era ritenuto sacro per il fatto che vi sorge il Sole.

I PRIMORDI

Stonehenge è un sito neolitico che si trova in Inghilterra. È composto da un insieme circolare di grosse pietre, conosciute come megaliti.

C'è dibattito circa l'età della costruzione, ma la maggior parte degli archeologi ritiene sia stato costruito tra il 2500 a.C. e il 2000 a.C..

Il terrapieno circolare e il fossato sono state datate al 3100 a.C.



I PRIMORDI

Ci sono molte testimonianze che indicano come in molte popolazioni antiche si usasse riunire le stelle in gruppi, le costellazioni (ai quali furono dati nomi legati a miti, leggende e dèi), per poterle riconoscere più facilmente.

Secondo alcuni studiosi la costellazione dell'Orsa Maggiore era nota già 40-50.000 anni fa.

I PRIMORDI

Si hanno poche notizie sulle osservazioni dei pianeti.

Si trova spesso menzionato Venere, il più appariscente dei pianeti, che per la sua alternanza nell'apparire all'alba o al tramonto veniva spesso scambiato per due oggetti diversi.



L'Astronomia fra il Tigri e l'Eufrate

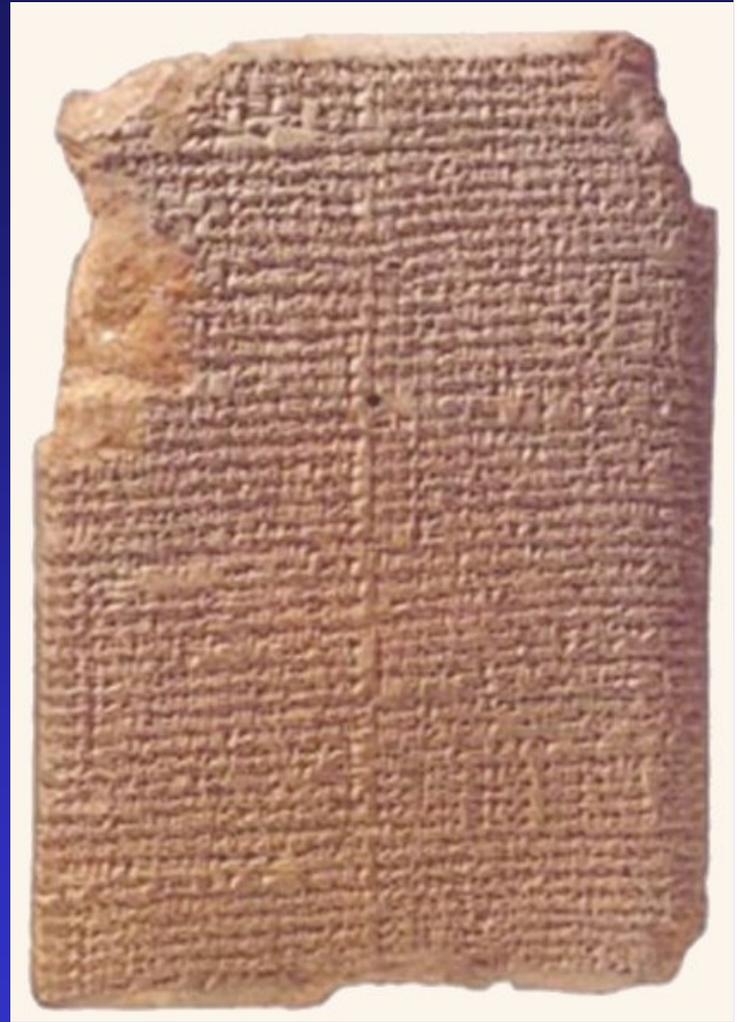


Nella pianura fra Tigri ed Eufrate vissero numerosi popoli che diedero grande impulso all'astronomia:
Sumeri, Accadi, Caldei, Babilonesi e Assiri.

L'Astronomia fra il Tigri e l'Eufrate

Tavolette di argilla risalenti al 4.000 a.C. fanno supporre che i Caldei fossero la casta sacerdotale dei Babilonesi alla quale erano affidate mansioni di osservazione del cielo per fini astrologici e religiosi.

Fra queste tavolette ne sono state rinvenute alcune raffiguranti il cielo stellato su cui erano tracciate le figure di alcune costellazioni. Sembra che gli Accadi conoscessero già le due Orse, Orione e Cassiopea.



*Tavoletta babilonese
"Mulapin" con
catalogazione delle
costellazioni circumpolari*

L'Astronomia fra il Tigri e l'Eufrate

Intorno al 1.800 a.C., con la dinastia di re Hammurabi, gli astronomi iniziarono a calcolare la rotazione apparente diurna del cielo.

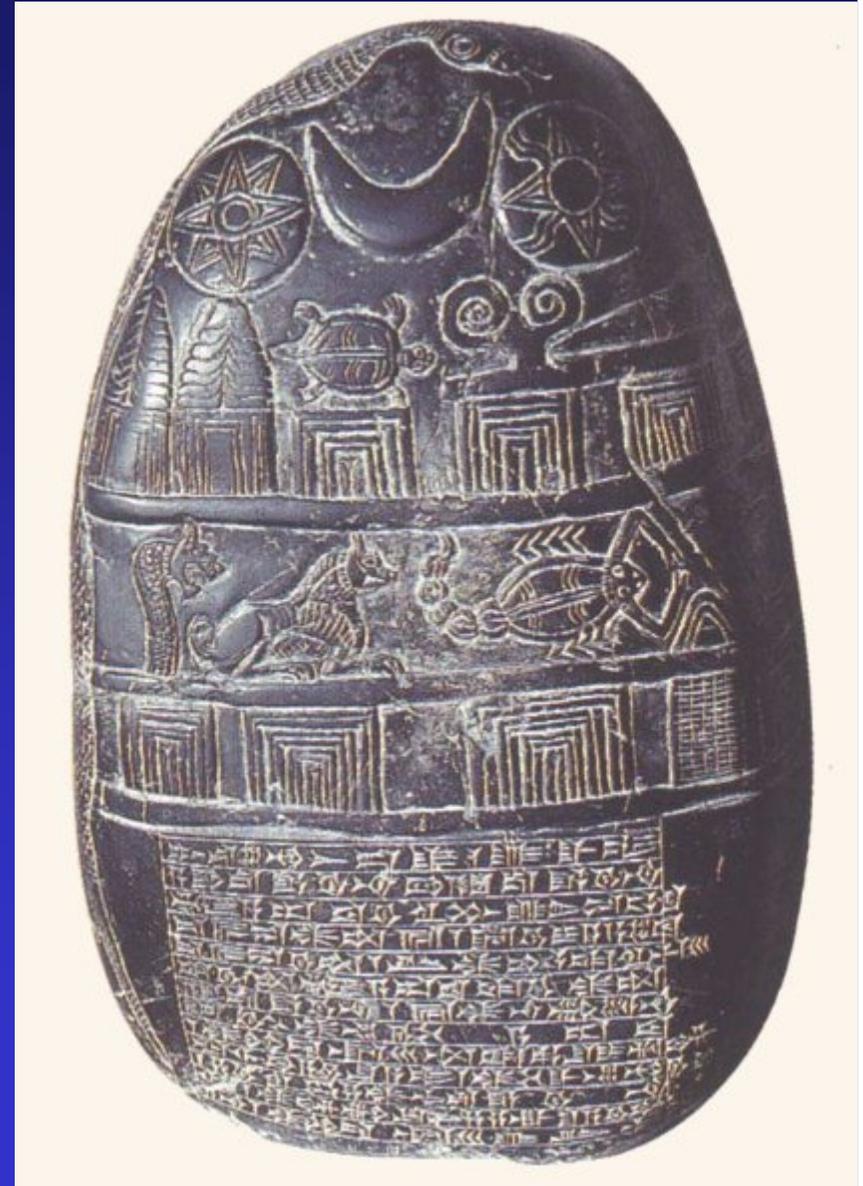
Il calendario babilonese era regolato dal novilunio, con 12 mesi lunari (indicati dal sorgere eliaco di 12 stelle) in un anno solare ed un tredicesimo mese in aggiunta di tanto in tanto, quando lo si riteneva opportuno.

Questo calendario lunisolare era ulteriormente suddiviso in periodi più brevi corrispondenti alle nostre settimane.

L'istante del tramonto del Sole segnava l'inizio del giorno, costituito da dodici intervalli detti *Kaspu*.

L'Astronomia fra il Tigri e l'Eufrate

Attorno al 1350 a.C. a Babilonia per far rispettare i confini delle varie proprietà cominciarono ad essere usate delle pietre chiamate Kudurrus su cui erano incise maledizioni che avrebbero colpito chi non rispettava questi confini ma erano decorate con simboli divini che corrispondevano a pianeti (Marduk-Giove, Nabu-Mercurio, Nergal-Marte e Ninurta-Saturno) e costellazioni (Toro, Leone, Scorpione, Sagittario, Capricorno, Acquario, probabilmente Ariete e Vergine e precursori dei Pesci e dei Gemelli). Gli originali di questi kudurrus venivano conservati nei templi come una sorta di ex-voto per avere la benedizione dei vari dei e quindi un buon raccolto.



L'Astronomia fra il Tigri e l'Eufrate

Intorno al I millennio a.C. iniziarono le osservazioni sistematiche della volta celeste.

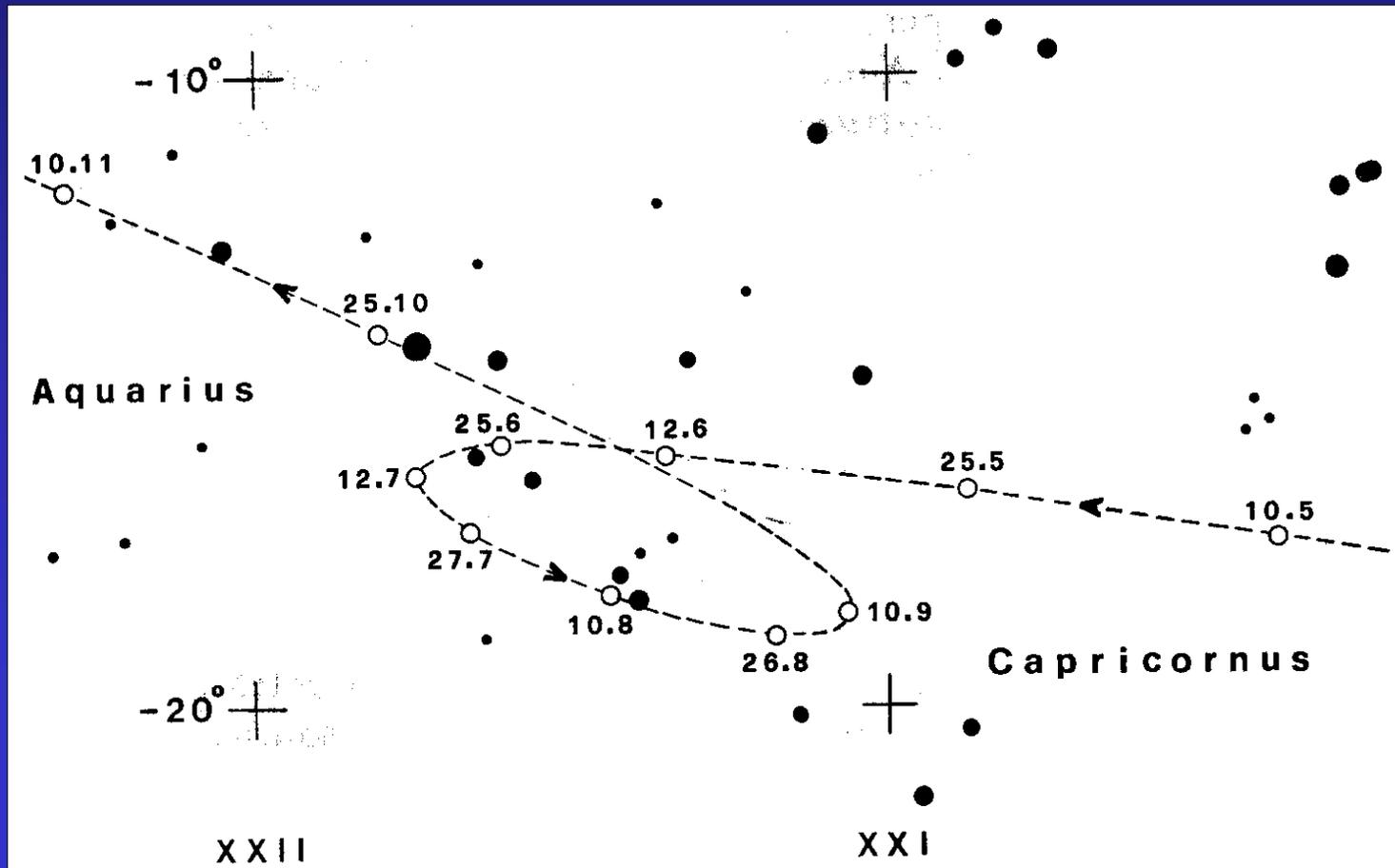
Particolare attenzione era riservata al pianeta Venere.

Gli astronomi babilonesi sapevano che le eclissi di Sole potevano verificarsi solo al novilunio e che le eclissi di Luna potevano verificarsi solo al plenilunio.

Durante il regno di Nabucodonosor II (il distruttore di Gerusalemme nel 587 a.C.), tra il VII e il VI secolo a.C., fu redatto un almanacco che riportava i movimenti della Luna e dei pianeti e dove venivano annotate le loro congiunzioni con le stelle fisse.

L'Astronomia fra il Tigri e l'Eufrate

Le osservazioni dei moti dei pianeti portarono allo studio in dettaglio delle stazioni e delle retrogradazioni lungo quella che essi chiamavano *via del Sole*, il nostro Zodiaco.



L'Astronomia fra il Tigri e l'Eufrate

È di questo periodo la prima suddivisione del cerchio in 360 gradi, come conseguenza del cammino percorso dal Sole nel cielo.

L'uso di strumenti più precisi portò ad osservazioni sistematiche e fondate sul calcolo di fenomeni celesti come le eclissi, la prima delle quali è stata registrata il 19 marzo 721 a.C..

Questa ed altre osservazioni di eclissi lunari vengono usate ancor oggi per i calcoli sul moto della Luna.

L'Astronomia fra il Tigri e l'Eufrate

Veniva poi data una enorme importanza astrologica alle comete, alle meteore ed ai bolidi.

Pur essendo il loro studio rivolto a previsioni astrologiche, a questi popoli va il grande merito di essersi basati su osservazioni celesti sistematiche ed accurate, estese per un gran numero di anni alla ricerca di una certa periodicità per ogni fenomeno.

Essi non giunsero mai ad una conoscenza approfondita della geometria e della trigonometria, che li avrebbe portati a soluzioni più rigorose dei vari problemi astronomici.

L'Astronomia fra il Tigri e l'Eufrate

Lo zodiaco circolare del tempio di Hathor a Dendera (Egitto)

È l'unica mappa completa del cielo antico che abbiamo e risale ai primi secoli a.C. in Egitto.

Esso mostra lo zodiaco classico circondato dalle altre costellazioni egizie, ma le figure non sono quelle tipiche della tradizione greco-latina, bensì sono identiche alle pittografie delle pietre di confine mesopotamiche risalenti a circa 2000 anni a.C.



Gli antichi Egizi

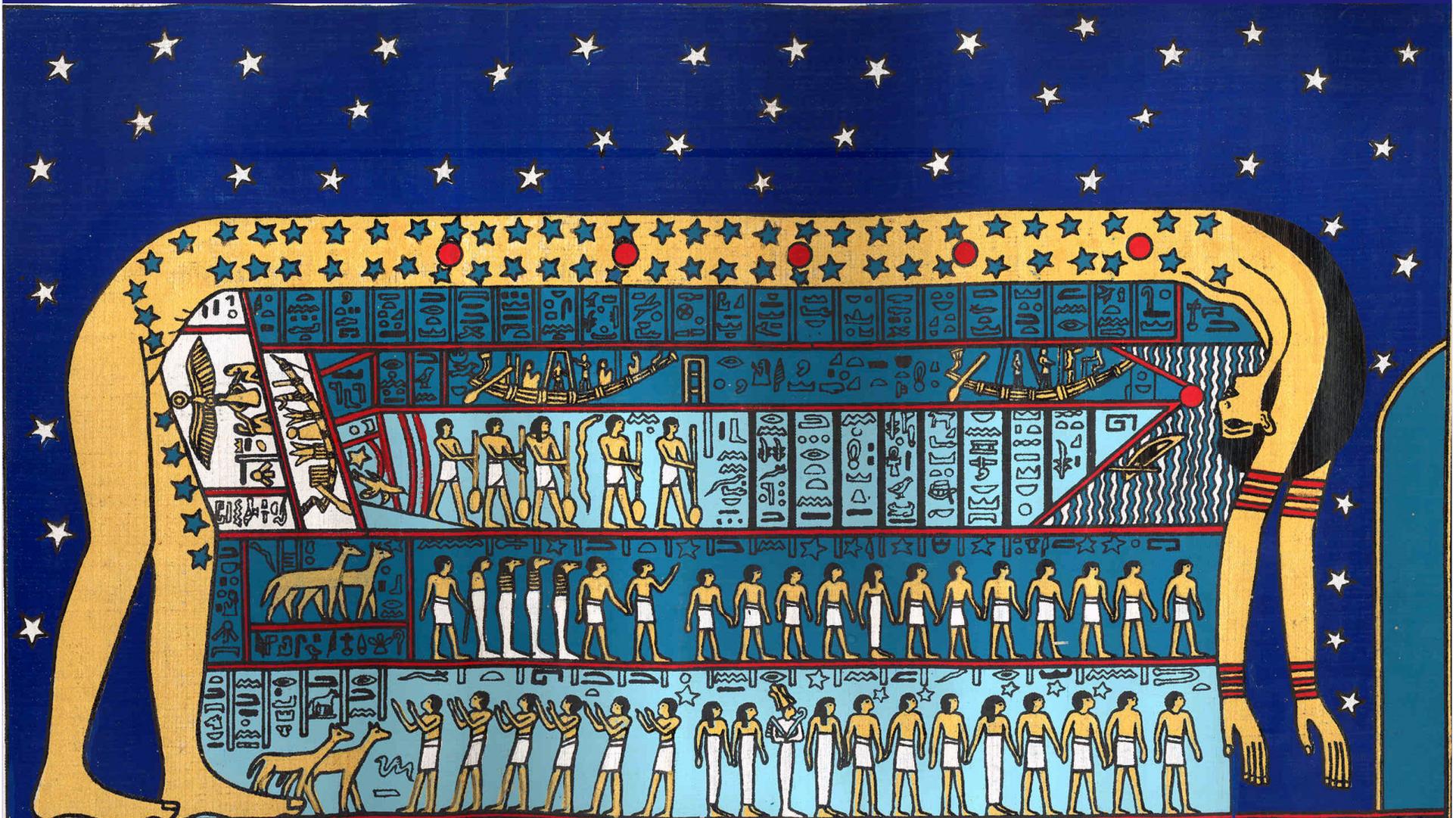
Nei ventitré secoli di storia di questo popolo tutte le branche della scienza ebbero il tempo di svilupparsi e prosperare: fra queste anche l'astronomia.

Per gli Egizi l'universo era sagomato come un grande parallelepipedo; sulla faccia in basso si trovava la Terra, mentre su in alto si trovava il cielo che in alcune rappresentazioni era una mucca appoggiata con le zampe sui quattro angoli della Terra, in altre una donna appoggiata sui gomiti e sulle ginocchia oppure sui piedi e sulle mani.

Attorno alle pareti interne di questa sorta di scatola cosmica vi era una galleria sospesa e invisibile lungo la quale scorreva un fiume, su cui gli dèi Sole e Luna facevano scivolare le proprie barche.

Gli antichi Egizi

Una rappresentazione della dea del cielo NUT



Gli antichi Egizi

Gli astri del cielo erano immaginati come lampade sospese alla volta celeste, oppure spostate dagli dèi.

I pianeti navigavano su proprie imbarcazioni lungo canali che fluivano dalla Via Lattea, considerata la controparte celeste del fiume Nilo.

Per le fasi lunari ritenevano che nel giorno del plenilunio il dio Luna subiva l'attacco di una scrofa famelica, che in due settimane lo divorava completamente.

Egli poi rinasceva, per andare ancora incontro al proprio terribile destino.

Quando la scrofa riusciva a inghiottire interamente il dio si verificava un'eclisse di Luna.

Gli antichi Egizi

Le eclissi di Sole erano invece causate da un grande serpente che lo ingoiava.

Utilizzavano un calendario solare basato sul cammino della Sole sulla volta celeste, lungo il cerchio dell'eclittica.

L'anno egizio iniziava con la levata eliaca di Sirio ed era formato da dodici mesi di trenta giorni, più cinque supplementari.

Gli antichi Egizi

Gli Egizi si erano accorti dei ritardi nella levata di Sirio (dovuti alla precessione degli equinozi) e avevano calcolato un ciclo completo di 1460 anni affinché l'astro più luminoso del firmamento sorgesse di nuovo insieme con il Sole in un preciso giorno.

Questo ciclo era detto *anno sotiano* da Sothis, nome della stella Sirio. Il periodo della levata eliaca di Sirio veniva indicato con l'appellativo di *canicola*, successivamente passato ad indicare il caldo torrido della stagione della stella del Cane.

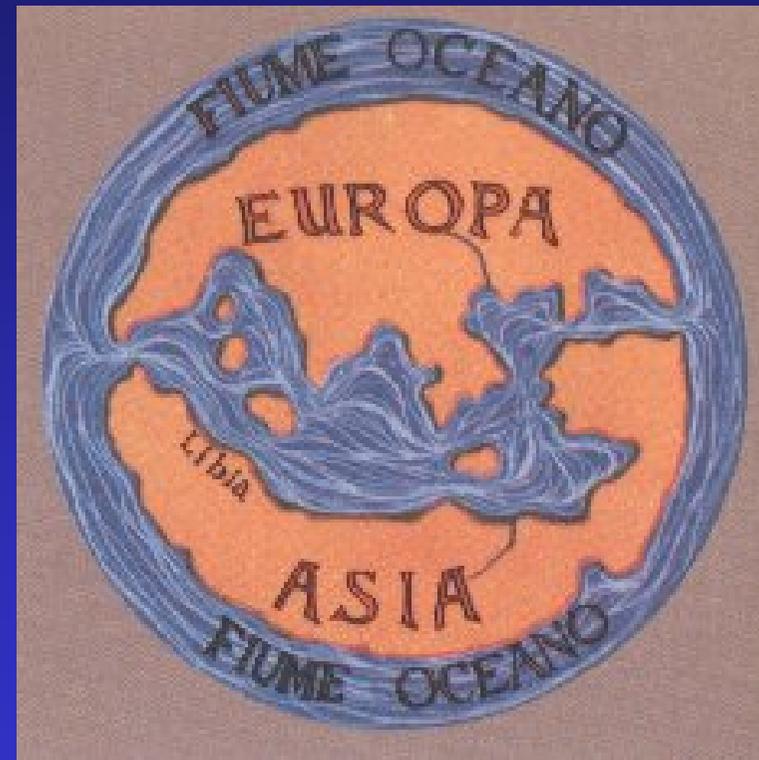
Per la misura del tempo in frazioni più brevi di un intero anno gli Egizi usavano meridiane durante il giorno e clessidre (a sabbia o acqua) durante la notte.



I Greci

I primi greci ritenevano che la Terra fosse costituita da un disco circolare circondato dal Fiume Oceano e che sopra vi fosse la conca emisferica del cielo.

Questo modello appare nelle opere di Omero ed è probabile che fosse universalmente accettato fino al VI secolo a.C.



I Greci

Il modello di Terra piatta poneva alcuni problemi:

- il moto degli astri dopo il tramonto
- la diversa altezza delle stelle

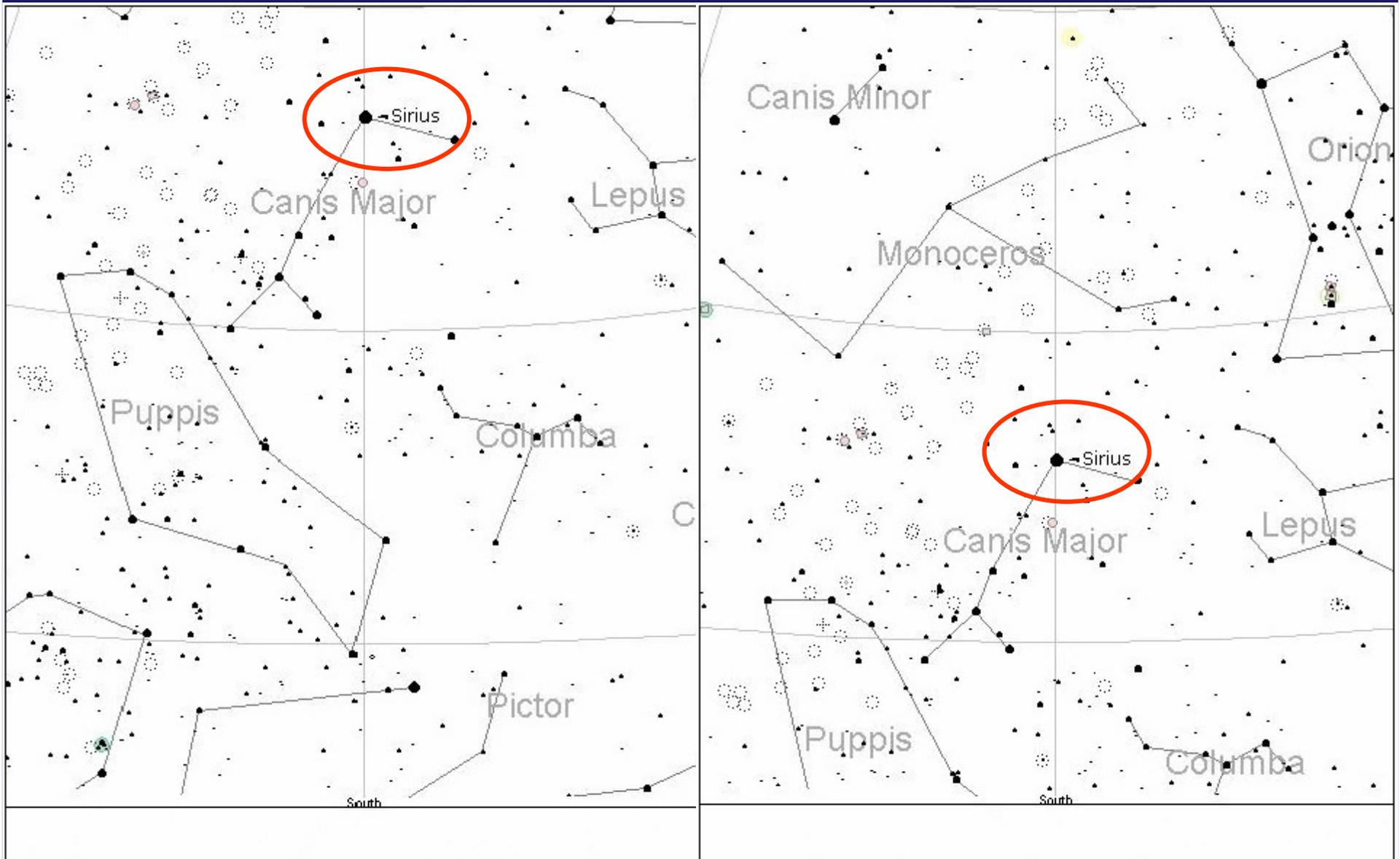
I Greci

Il primo problema veniva anticamente risolto ritenendo che tutti i corpi celesti, dopo aver compiuto il loro percorso sulla semisfera celeste, si immergessero nei flutti di Oceano e girassero in qualche modo intorno all'orizzonte verso nord, riapparendo più tardi ad est al momento del loro sorgere.

Il secondo fu risolto ...

... ammettendo che la Terra NON era piatta!

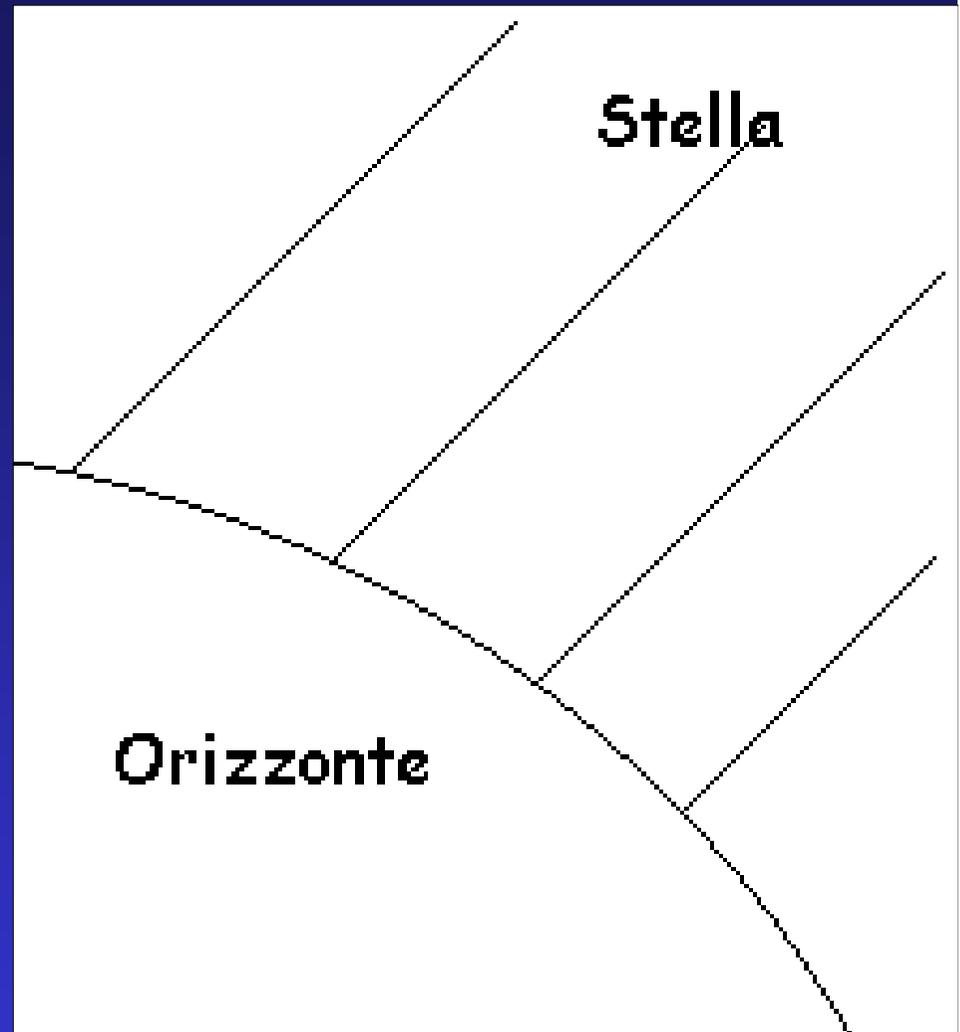
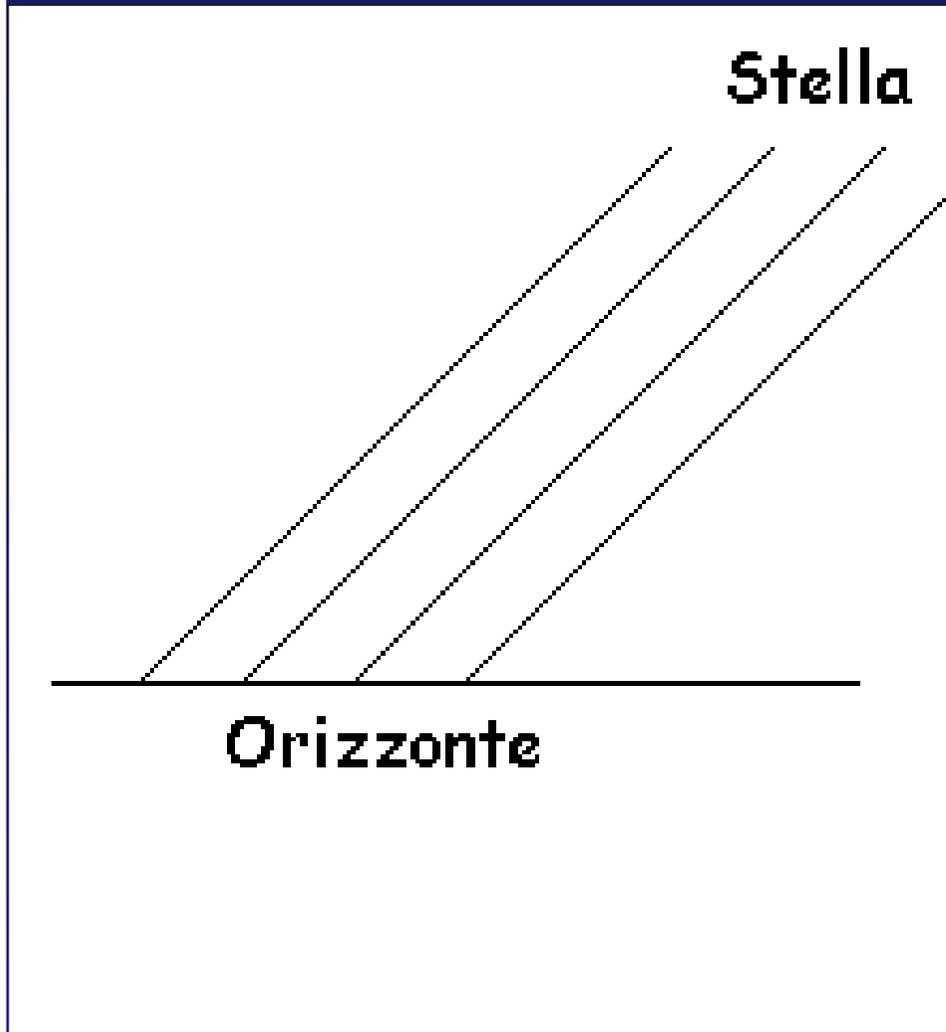
ALTEZZA DELLE STELLE



Altezza di Sirio vista dal Cairo

Altezza di Sirio vista da Londra

ALTEZZA DELLE STELLE

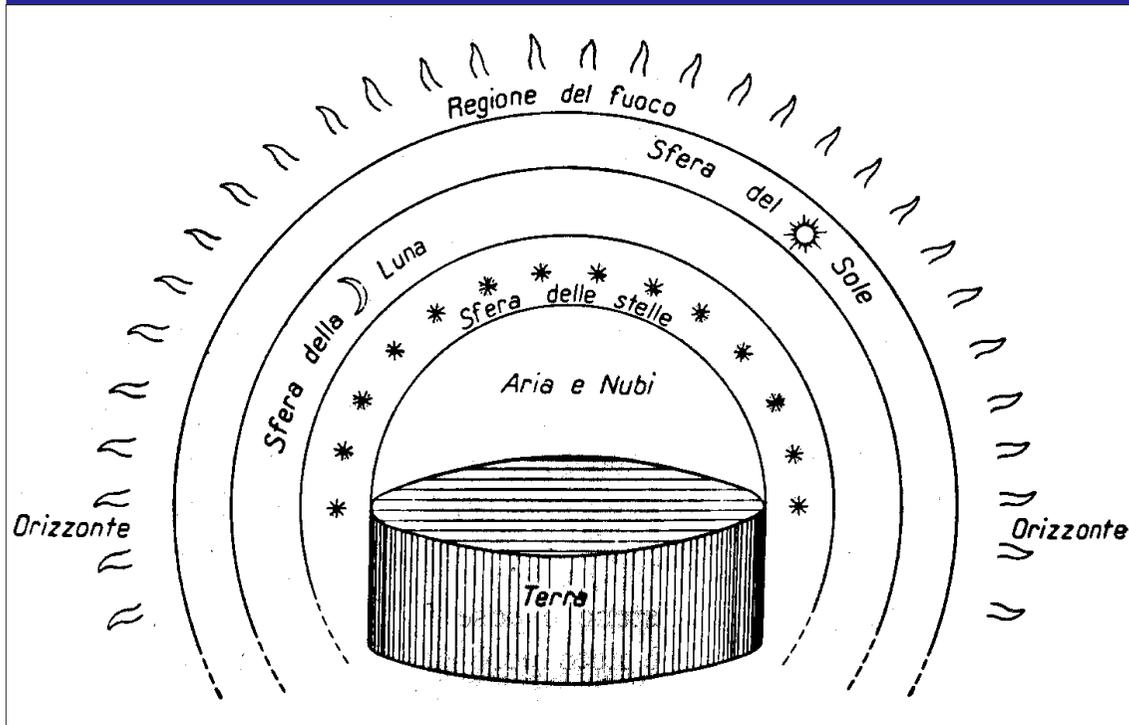
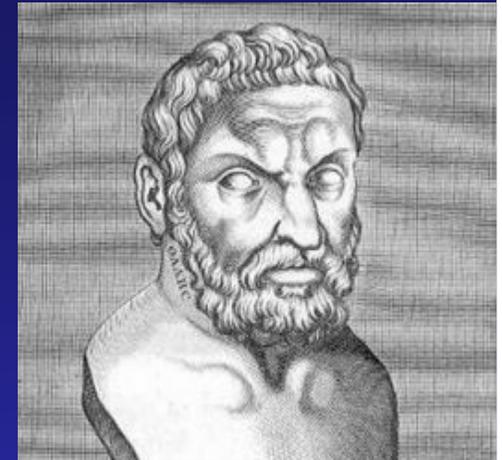


I raggi provenienti da una stella molto lontana possono essere considerati paralleli e formano lo stesso angolo con un orizzonte piatto

I raggi provenienti da una stella molto lontana formano angoli diversi con un orizzonte curvo

I Greci

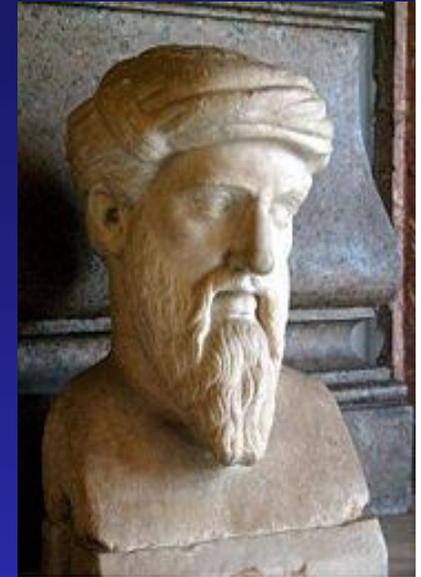
Nel 600 a.C. Talete di Mileto insegnava che la Terra era sferica, che la Luna è visibile solo perché riflette i raggi solari ed affermava anche che le stelle del cielo erano fatte di fuoco.



Si ritiene che Anassimandro fu il primo ad utilizzare lo gnomone per le osservazioni celesti. Egli riteneva che la Terra avesse una superficie cilindrica e che la sua curvatura andasse nella direzione nord-sud.

I Greci

Intorno al V secolo a.C. nasce e si sviluppa la scuola pitagorica alla quale si attribuiscono le prime idee sui moti di rotazione e di rivoluzione della Terra: un passo importante che pone il nostro pianeta fra i corpi celesti (pianeti), anche se ancora al centro dell'Universo.



Secondo Teofrasto, Parmenide (510-? a.C.), anch'egli seguace di Pitagora, fu tra i primi a ritenere che la Terra fosse sferica.

Le sue motivazioni si basavano sull'idea che l'unica forma adatta a rimanere naturalmente in equilibrio fosse quella sferica.

I Greci

Filolao di Crotone, anch'egli pitagorico, verso la fine V secolo a.C. ideò per la prima volta una struttura dell'Universo; c'era un *fuoco centrale* ed i pianeti, Sole compreso, ruotanti intorno ad esso.

Egli riteneva che l'influenza predominante nell'Universo dovesse provenire dal suo punto centrale, e la Terra non poteva trovarsi al centro perché non esercita tale influenza.

Essa quindi ruota attorno ad un centro, occupato non dal Sole, ma da un *fuoco centrale*, sede di Zeus e del principio dell'attività cosmica.

Tale fuoco è nascosto ai nostri occhi dalla massa della Terra stessa, sempre rivolta dalla parte opposta.

I Greci

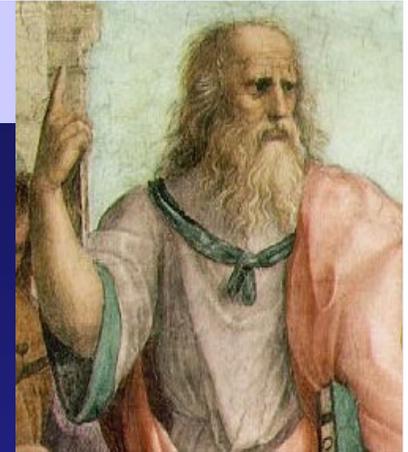
Per Filolao il Sole non era un corpo che emetteva luce da sé; solo il fuoco centrale era l'unico focolare di attività presente nell'universo.

Il Sole era semplicemente un corpo vitreo e poroso che assorbiva la luce dal fuoco centrale e la rendeva visibile a noi.

Questa teoria possedeva il pregio di mettere in evidenza il moto della Terra che con la sua rotazione attorno ad un centro determina il moto apparente della sfera celeste in senso opposto.

Si potrebbe affermare che Filolao fu il primo anticipatore delle idee di Copernico.

I Greci



Fra il 429 ed il 347 a.C. appare una figura che lascerà una notevole traccia del suo passaggio: Platone.

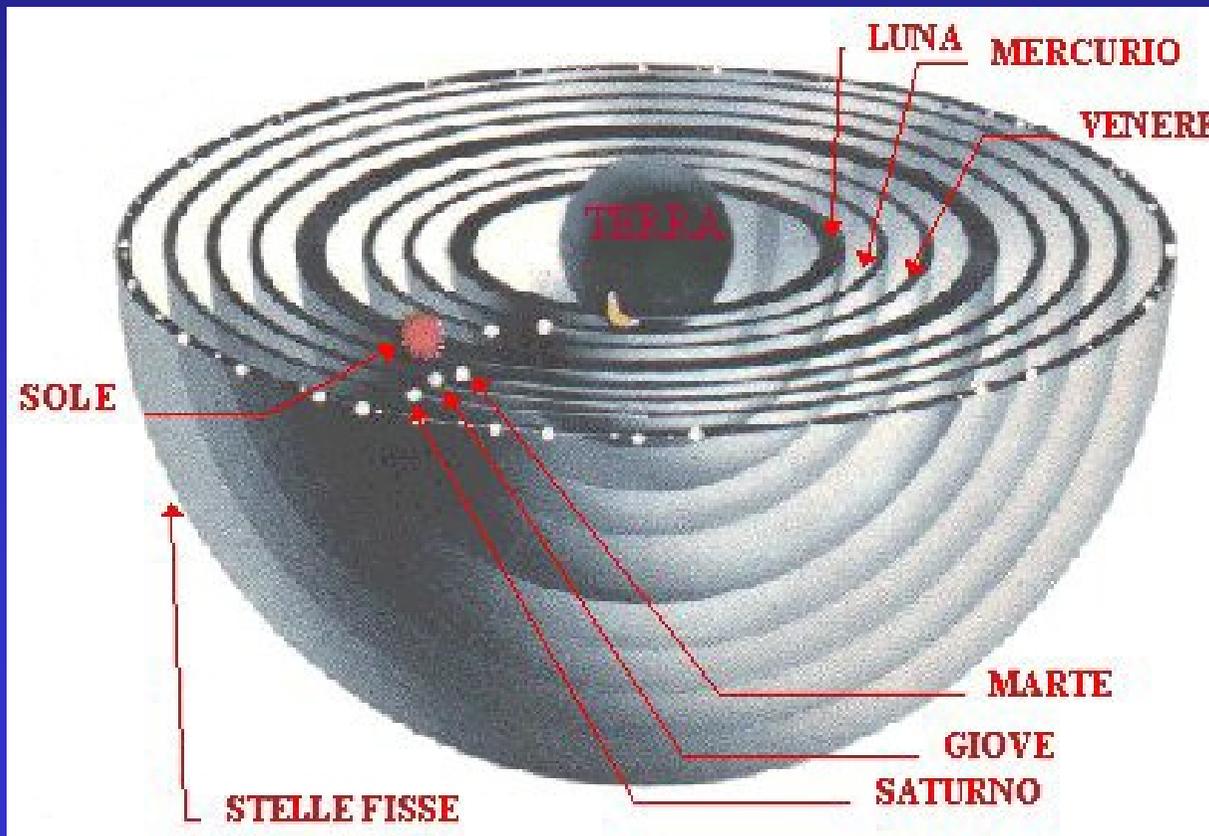
Tra i suoi scritti si possono rintracciare per la prima volta accenni ai moti della Luna e dei pianeti ed alla materia che componeva le stelle.

Dimostrò filosoficamente che la Terra è sferica; nel Timeo descrive l'Universo in questi termini: *"...ed Egli (Dio) lo fece tondo e sferico, in modo che vi fosse sempre la medesima distanza fra il centro ed estremità [...] e gli assegnò un movimento, proprio della sua forma, [...]. Dunque fece che esso girasse uniformemente, circolarmente, senza mutare mai di luogo [...]; e così stabilì questo spazio celeste rotondo e moventesi in rotondo"*.

I Greci

L'idea della sfericità della Terra fu universalmente accettata per la grande fama di Platone.

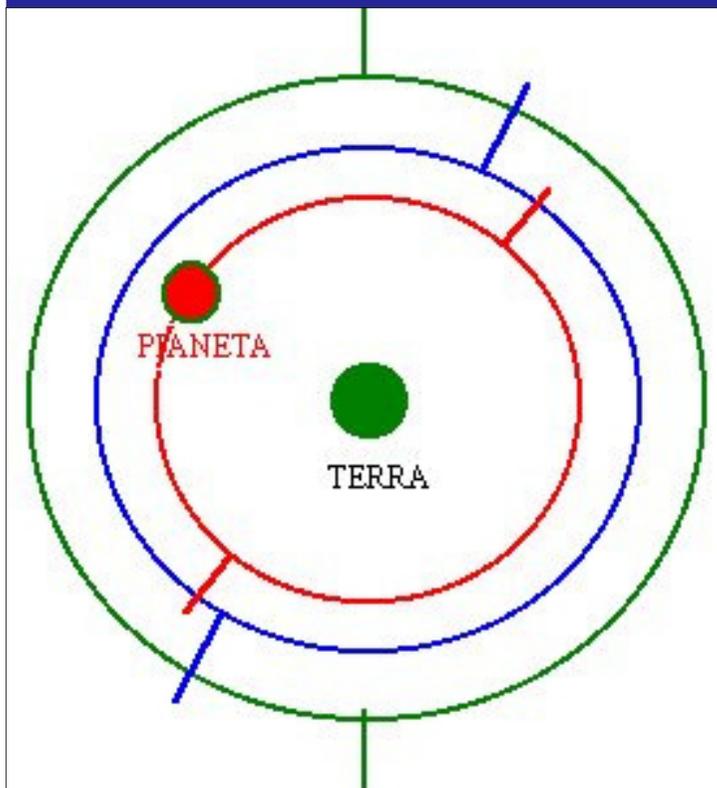
Egli ideò un sistema geocentrico, a sfere concentriche ognuna delle quali conteneva un pianeta, il Sole e la Luna.



I Greci

Il sistema delle sfere fu perfezionato da Eudosso, Callippo e infine da Aristotele.

Eudosso da Cnido (409-356 a.C.) per primo tentò di risolvere il problema dei movimenti irregolari dei pianeti.



Per spiegare il moto retrogrado dei pianeti Eudosso ipotizzò che solo le stelle fisse possedevano un'unica sfera.

La Luna e il Sole ne possedevano tre ciascuno.

Callippo, qualche anno più tardi, aggiunse altre sfere per Mercurio, Venere, Marte, la Luna ed il Sole.

I Greci

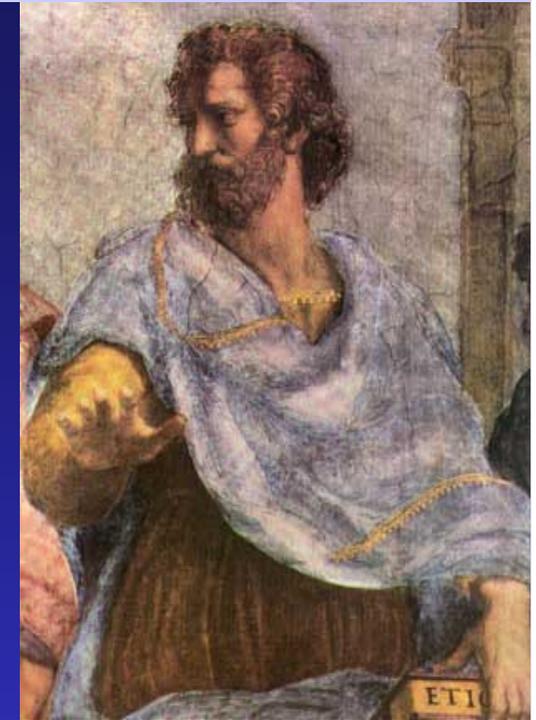
Con Aristotele si arrivò a 55 sfere !!!

Aristotele aveva diviso il cosmo in due parti:

-> quella oltre la Luna che era costituita da sfere concentriche ove erano incastonati i pianeti e le stelle, composti dalla "quintaessenza" incorruttibile ed immutabile ed animati da moto circolare uniforme.

-> quella sublunare che era costituita dal mondo caotico e corruttibile formato da quattro sfere (Terra, Acqua, Aria, Fuoco) in cui l'ordine era solo una tendenza per ogni cosa e dove l'unico moto naturale era il moto rettilineo verso il basso.

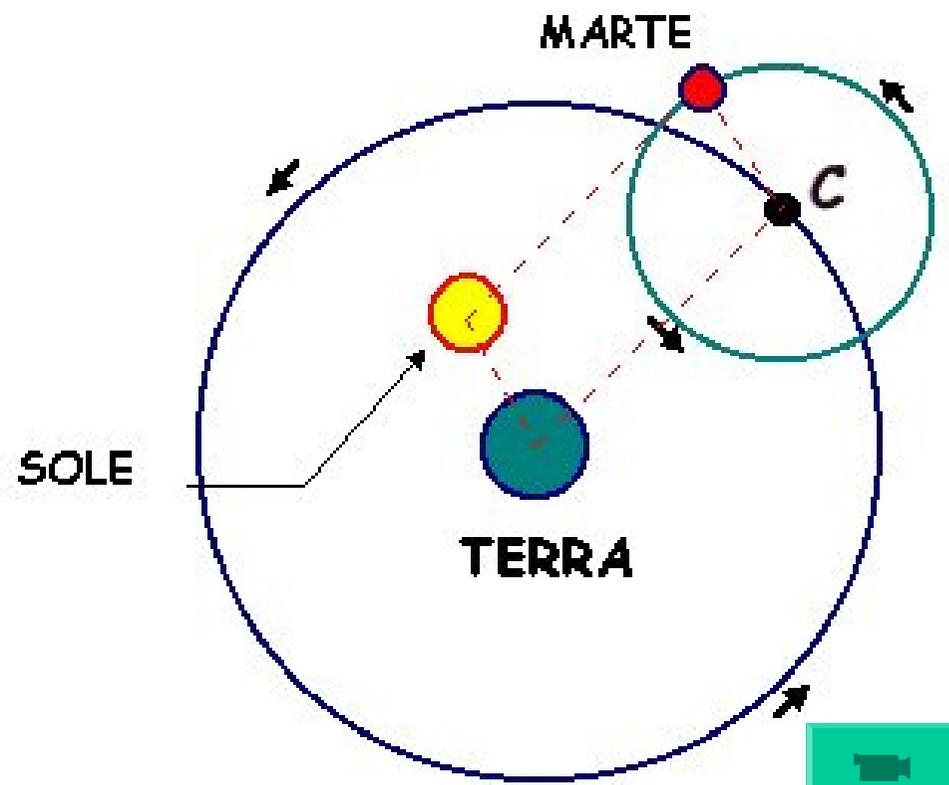
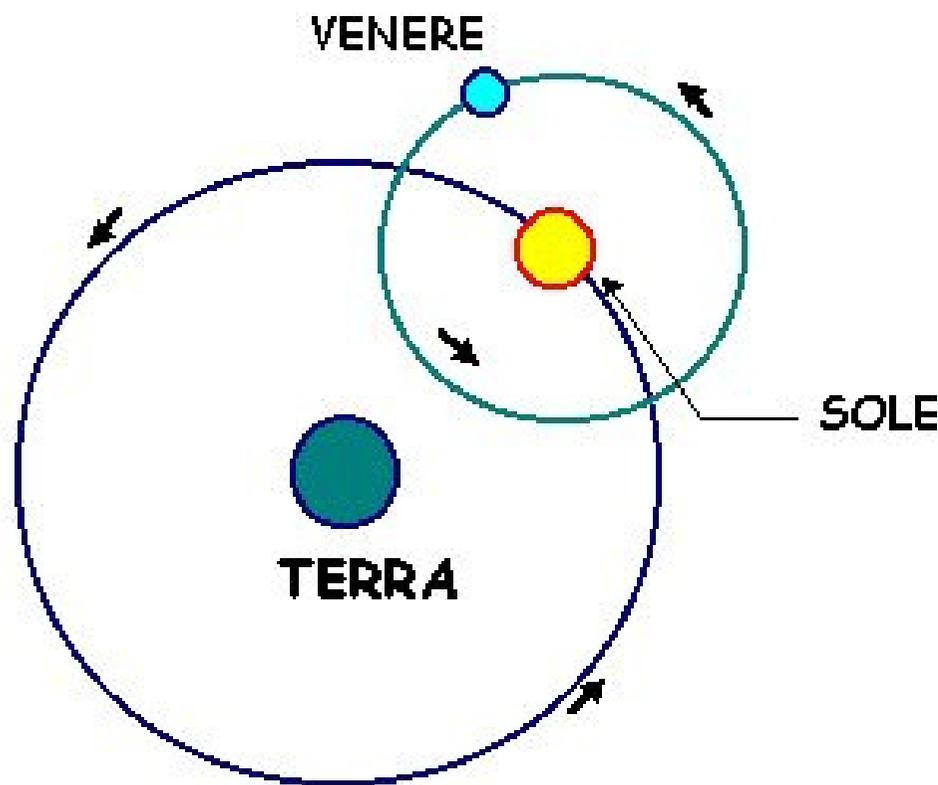
Al di là della sfera delle stelle fisse collocava il *motore* di tutto l'Universo che trasmetteva il moto a tutte le sfere.



I Greci

Dopo Aristotele la teoria di Eudosso fu abbandonata perché non spiegava la variazione di luminosità dei pianeti.

Eraclide Pontico (390-310 a.C.) ipotizzò la teoria degli epicicli.



I Greci

Eraclide riprese e sviluppò le teorie di Filolao, abbandonando l'idea del fuoco centrale e facendo ruotare la Terra attorno al suo asse. Il Sole era il centro delle orbite di Mercurio e Venere.

Aristarco da Samo, nato verso il 310 a.C., giunge a ipotizzare una teoria eliocentrica nella quale tutti i pianeti girano attorno al Sole, e il Sole gira attorno alla Terra.

Aveva compreso anche che in questo modo non aveva molta importanza se fosse il Sole a girare attorno alla Terra oppure la Terra attorno al Sole, perché le due ipotesi erano equivalenti dal punto di vista cinematico.



I Greci

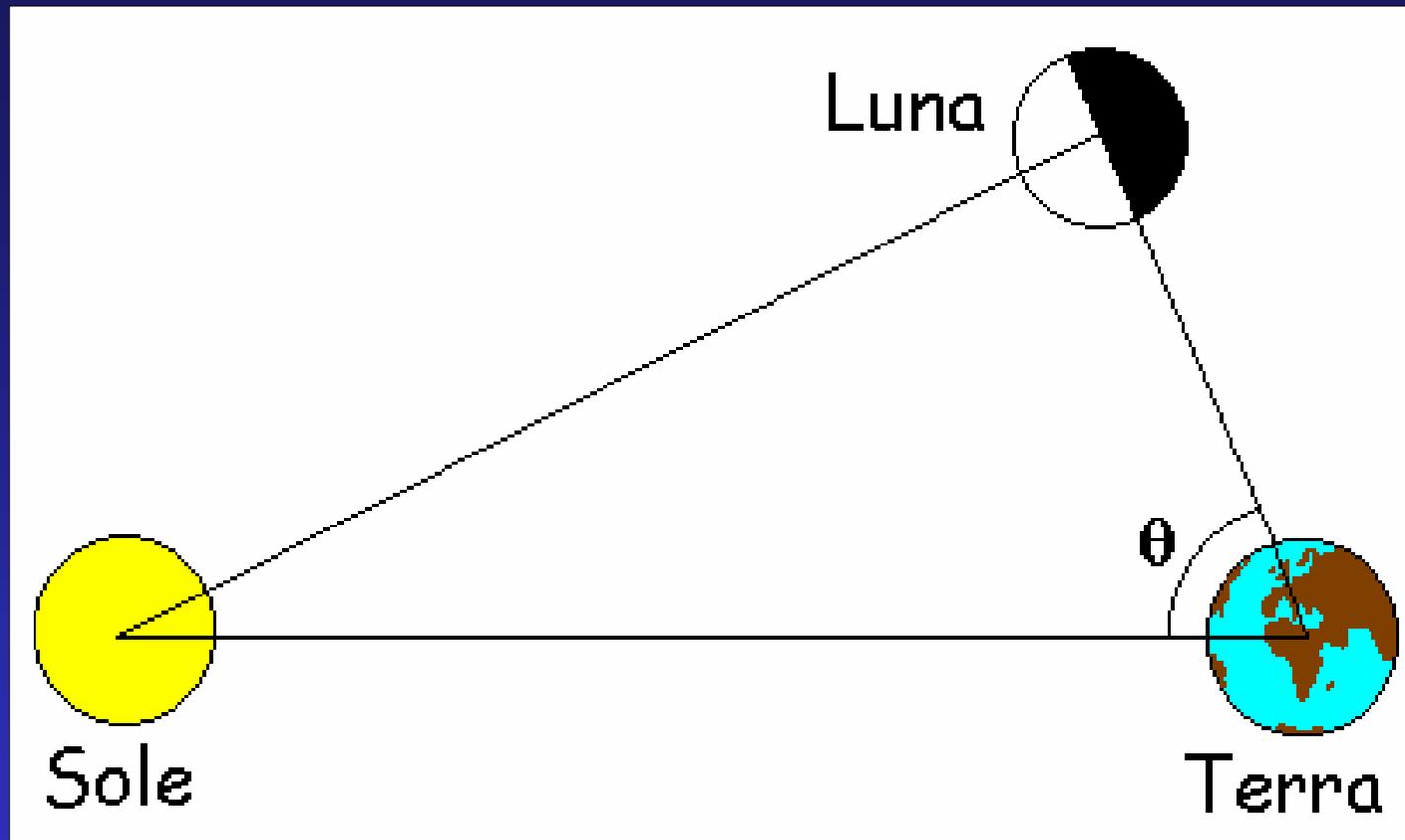
Aristarco capì che se infatti fosse stata la Terra a girare attorno al Sole le stelle avrebbero dovuto mostrare una parallasse che invece non si osserva.

Allora o la Terra stava ferma o le stelle dovevano essere lontanissime.

La teoria eliocentrica di Aristarco non venne capita e non ebbe quindi sviluppi.

Aristarco definì il *metodo della dicotomia lunare* per misurare le distanze della Luna e del Sole.

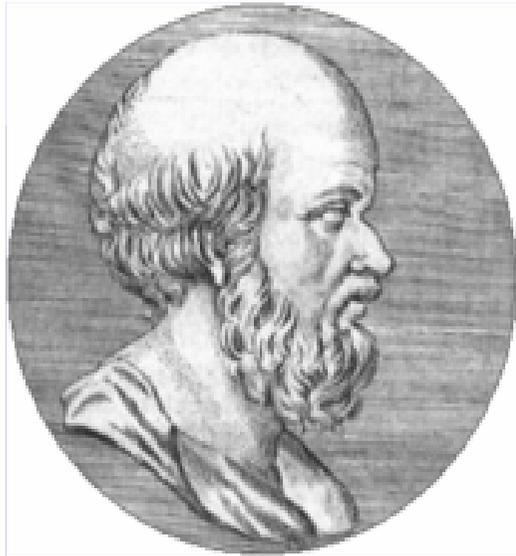
Il metodo della dicotomia lunare di Aristarco



Per Aristarco $\theta = 87^\circ$ ed ottenne $TL/TS \approx 1/19$ ($\cos 87^\circ \approx 1/19$), cioè il Sole è 19 volte più lontano della Luna.

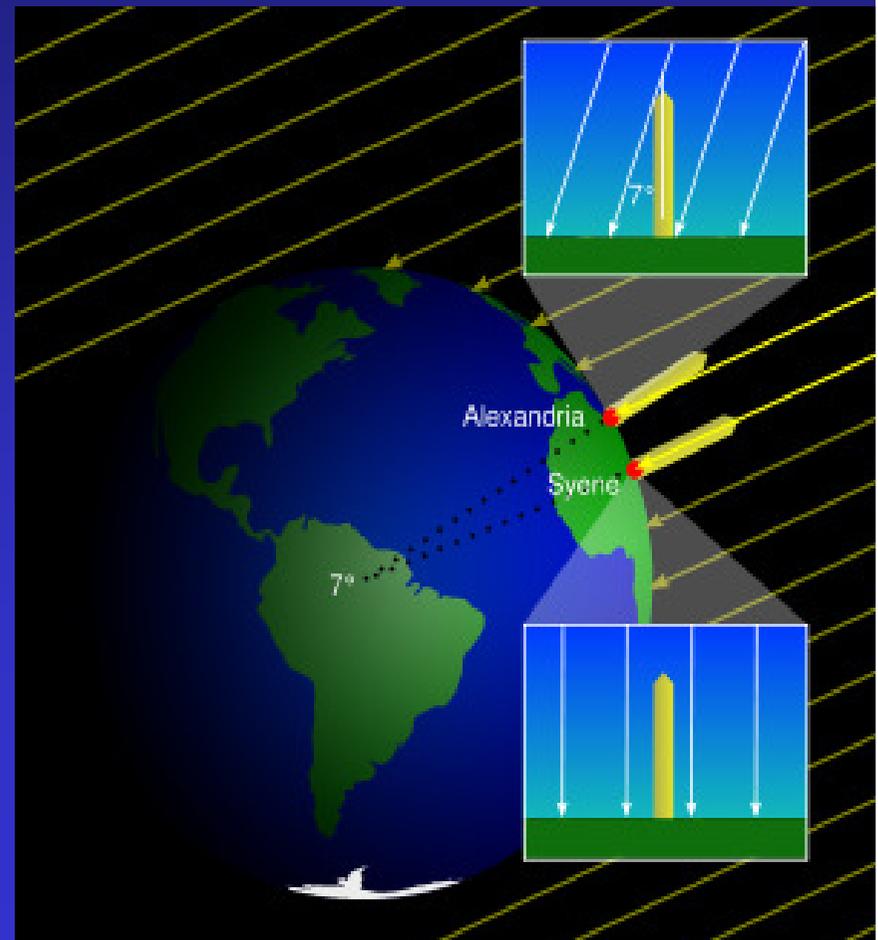
In realtà $\theta \approx 89^\circ 51,2'$ e quindi $TL/TS \approx 1/391$ da cui si ricava che il Sole dista dalla Terra 391 volte più della Luna.

I Greci



Eratostene (273 - 192 a.C.) fu il primo a tentare di calcolare le dimensioni della Terra con metodo scientifico.

Osservò che il giorno del solstizio a Siene (Assuan) uno gnomone non fa ombra, mentre ad Alessandria (distante 5.000 stadi: 1 stadio = 157 m) si ha un angolo per ad $1/50$ dell'angolo giro ($7^{\circ}12'$). Con semplici calcoli si ottiene che il diametro della Terra è di 12.629 km. Oggi si ha 12.756 km per il diametro equatoriale e 12.712 km per quello polare.



I Greci



Il primo astronomo vero e proprio di quel periodo fu Ipparco di Nicea (194 - 120 a.C.), scopritore della precessione degli equinozi.

Confrontando le sue osservazioni con quelle dei suoi predecessori egli scoprì degli spostamenti di lieve entità, che potevano essere rilevati solo con osservazioni fatte a distanza di molto tempo le une dalle altre, e che espose nella sua celebre opera *Spostamenti dei punti dei solstizi e degli equinozi*.

I Greci

Ipparco cercò di determinare con la maggiore precisione possibile i tempi di rivoluzione dei pianeti, ma non costruì un vero e proprio sistema.

Di notevole importanza è anche il suo *Nuovo catalogo stellare* che riportava oltre 1000 stelle, con le coordinate corrette per la precessione e suddivise in sei classi (grandezze) a seconda della loro luminosità.

Fu spinto alla compilazione di questo catalogo dall'apparizione di una stella nuova nel 134 a.C. per meglio valutare eventuali nuove apparizioni.

I Greci

Nel 150 a.C. ideò un metodo per misurare le distanze del Sole e della Luna, e non solo del loro rapporto come fece Aristarco, basandosi sull'osservazione delle eclissi totali di Luna.

Le osservazioni astronomiche fatte da Ipparco per determinare l'entità della precessione lo portarono a determinare anche le lievi differenze fra anno siderale ed anno tropico.

Per un paio di secoli, dopo la morte di Ipparco, nelle scienze astronomiche non vi furono progressi di qualche rilevanza.



Il Sistema Tolemaico



Per ritrovare un risveglio nello sviluppo dell'Astronomia bisogna arrivare a Tolomeo (circa 100 - 178 d.C.).

Claudio Tolomeo, nato ad Alessandria d'Egitto, fu l'ultimo rappresentante dell'antica astronomia greca.

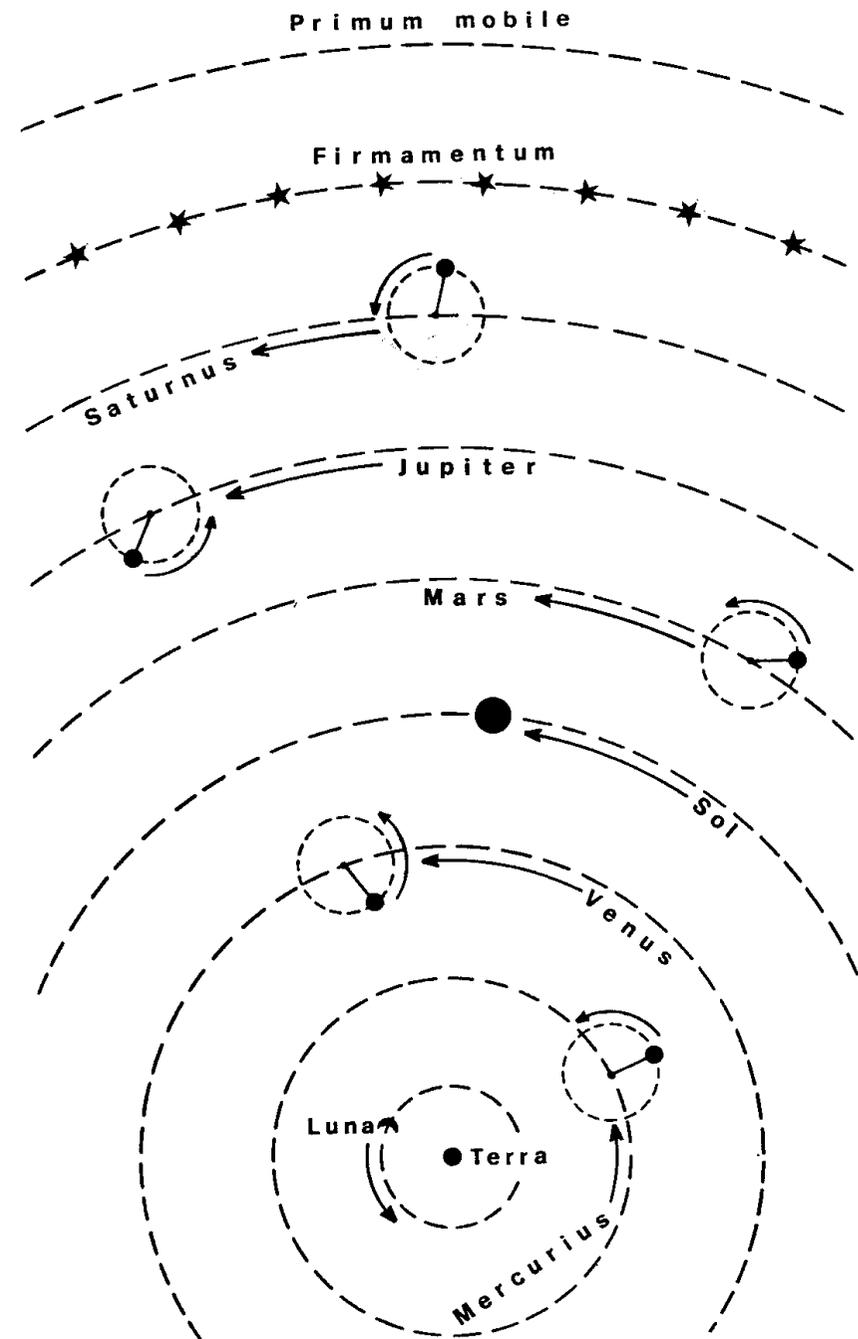
Il merito principale di Tolomeo fu di aver raccolto tutto lo scibile astronomico dei suoi tempi e, arricchitolo con le sue esperienze, di averlo esposto nella sua opera principale, la *Mathematike Syntaxis* (Composizione Matematica), che tradotto in arabo divenne *Al Magisti*, da cui il titolo a noi conosciuto: *Almagesto*.

Il Sistema Tolemaico

In essa Tolomeo aveva esposto un sistema del mondo: il Sistema Tolemaico.

La Terra è immobile al centro dell'Universo, i pianeti (compresi il Sole e la Luna) ruotano intorno ad essa col sistema degli epicicli e dei deferenti.

Anche la sfera celeste ruota intorno alla Terra.



Il Sistema Tolomaico

I primi capitoli dell'Almagesto trattano di coordinate celesti, di trigonometria piana e sferica, di dimensioni della Terra, di eclissi di Sole e di Luna, di strumenti di osservazione e contengono un catalogo delle posizioni di 1022 stelle.

Il Sistema Tolomaico è esposto negli ultimi cinque capitoli.

Quello di Tolomeo fu per parecchi secoli *il Libro dell'astronomia* perché i metodi matematici e geometrici di cui si servì lo fecero preferire alle opere simili di quel tempo.

L'Almagesto fu tradotto in latino (ma la traduzione non giunse mai a noi) e in arabo (per ordine del califfo Al Mamun nell'827 d.C.). Questa traduzione si diffuse in Europa e fu ritradotta in latino a Napoli nel 1230, assai prima che si scoprisse l'originale in greco (1438).

Il Sistema Tolemaico

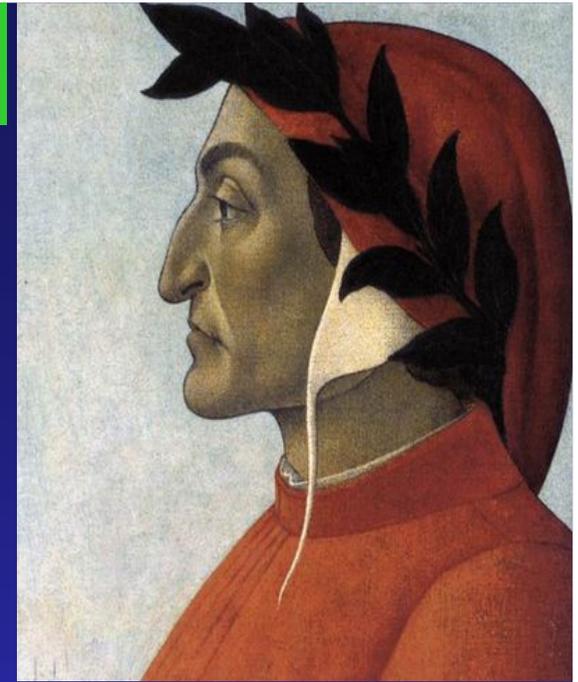
Il sistema tolemaico è matematicamente complesso, però le sue previsioni concordano abbastanza bene con le osservazioni.

Le irregolarità dei moti dei pianeti, del Sole e della Luna erano facilmente spiegabili mettendo la Terra non esattamente al centro delle orbite planetarie, ma leggermente decentrata. A questo fatto era possibile anche attribuire la diversa velocità del Sole nel cielo e, soprattutto, l'alternarsi delle stagioni.

Con Tolomeo finisce la storia dell'astronomia greca, fatta di poche osservazioni ma arricchita dalla matematica e dalla geometria, discipline che assumeranno una sempre maggiore importanza nell'aiutare questa scienza a progredire e a perfezionarsi.

Il Sistema Tolemaico

Il Sistema Tolemaico fu utilizzato da Dante Alighieri nella Divina Commedia.



Il sistema tolemaico continuò ad essere insegnato nelle scuole anche dopo le innovazioni di Copernico, Keplero e Galileo fin quasi ai primi del Settecento.



Gli Arabi e l'Astronomia Medievale

Dopo la morte di Tolomeo dovettero passare circa seicento anni prima che venisse compiuto qualche significativo progresso delle scienze astronomiche.

Ciò avvenne nell'VIII secolo, durante il periodo di maggior sviluppo dell'espansionismo arabo.

Ricordiamo che le varie tribù arabe che vivevano in uno stato di semibarbarie, vennero unificate politicamente e religiosamente in seguito all'azione di Maometto (570 - 632).

Gli arabi, al contatto delle civiltà molto più progredite in cui si erano imbattuti specialmente in Siria, in Persia e in Egitto, seppero rapidamente assimilarle, unificarle con la loro lingua, dar loro un nuovo impulso, senza mortificarle con un troppo invadente integralismo religioso.

Gli Arabi e l'Astronomia Medievale

In campo scientifico e astronomico l'apporto degli arabi è stato notevole. Sebbene durante il periodo del fiorire della civiltà araba non si registrino grandi scoperte, la traduzione e l'analisi delle opere dei grandi scienziati dell'antichità, unite a continui perfezionamenti, basati su nuove osservazioni e calcoli, hanno costituito il presupposto dei successivi, più rapidi progressi.

Fra i meriti più rilevanti ricordiamo l'introduzione e la diffusione in Occidente del metodo indiano posizionale a base dieci per la scrittura dei numeri che ancora oggi usiamo: il valore di ogni cifra da 0 a 9 è determinato dalla posizione che essa occupa in un numero.

Gli Arabi e l'Astronomia Medievale

Data l'importanza che la civiltà araba ha avuto per la conservazione e lo sviluppo della scienza antica non ci si deve meravigliare se molti dei termini scientifici e soprattutto astronomici ancor oggi utilizzati siano di origine araba. Pensiamo ai nomi di molte stelle come Aldebaran, Altair, Betelgeuse, Rigel, Vega; a termini astronomici come zenit, nadir, almucantarato, almanacco; a termini matematici come algebra e algoritmo.

Già all'epoca della dinastia degli Omèiadi (661 - 750) era operante a Damasco un osservatorio.

Il califfo Al Mamun promosse la fondazione di un grande osservatorio a Baghdad (828) e sostenne anche l'attività del grande matematico e astronomo persiano Mohamed Ben Musa Al Khowarizmi, cui si deve una raccolta di tavole astronomiche.

Gli Arabi e l'Astronomia Medievale

Forse il più grande astronomo del mondo arabo è stato Muhammed Al Battani (858 - 929), che divenne noto nel mondo occidentale, nel XII secolo, come Albategnus (Albatenio).

Pur essendo un convinto tolemaico, Albatenio effettuò nuove e più accurate osservazioni che gli permisero di migliorare i valori dell'obliquità dell'eclittica e della precessione.

L'ultimo fra i numerosi astronomi che operarono a Baghdad fu Abùl Wafa, o Wefa (939 - 998), autore di un voluminoso trattato, anch'esso noto come *Almagesto*, che è stato a volte considerato una semplice traduzione dell'opera di Tolomeo, sebbene contenga diverse nuove idee e una diversa impostazione.

Gli Arabi e l'Astronomia Medievale

Intorno al 970 vennero istituite a Cordova, in Spagna, una grande biblioteca e un'accademia. Altri centri culturali sorsero a Toledo, a Siviglia e in Marocco.

Il lavoro astronomico più importante realizzato in questi centri furono le *Tavole di Toledo*, che contenevano effemeridi calcolate per un osservatore di Toledo, compilate a cura di Ibn Al Zarfála, noto come Arzachel (1029-1087). Le tavole di Toledo contengono anche una descrizione degli strumenti e dei metodi di calcolo impiegati.

Dopo il 1258, data della conquista di Bagdad da parte del mongolo Hulagu Khan, nipote di Gengis Khan, il contributo del mondo arabo alla scienza in generale e all'astronomia in particolare si esaurì.

Gli Arabi e l'Astronomia Medievale

In Europa, durante tutto il medioevo, l'Astronomia non fece progressi apprezzabili. Pochi personaggi sono degni di nota.

Gerardo da Cremona (1114 - 1187) tradusse l'Almagesto di Tolomeo e molti lavori di astronomia arabi.

Leonardo da Pisa (1170 - 1240) detto Fibonacci introdusse in Italia il metodo posizionale in base dieci adottato dagli arabi per la scrittura dei numeri e l'esecuzione delle quattro operazioni.

Gli Arabi e l'Astronomia Medievale

L'inglese John Holywood, più noto come Giovanni Sacrobosco (morì intorno al 1250) scrisse un trattato elementare di astronomia sferica (*Sphaera mundi*) tradotto e commentato in diverse lingue e che costituì per diversi secoli un riferimento fondamentale.

Il re Alfonso X di Castiglia (1221 - 1284) nel 1252 fece elaborare da una cinquantina di astronomi appositamente raccolti a Toledo delle effemeridi che furono chiamate le *Tavole Alfonsine*.

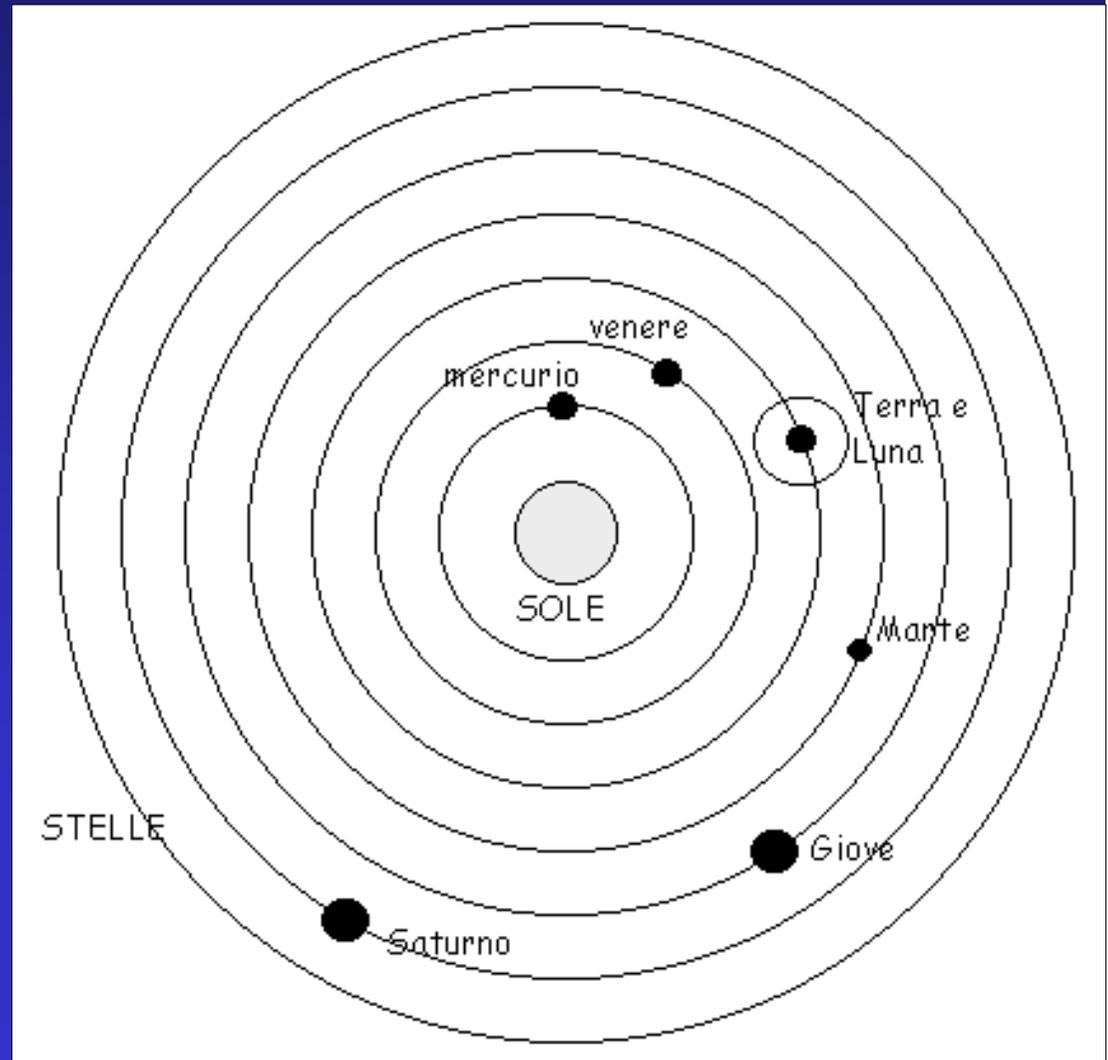


Il Sistema Copernicano



Passarono circa due millenni prima che le idee di Tolomeo fossero messe in discussione.

Ciò avvenne nel 1542 con la pubblicazione e la diffusione dell'opera *De Revolutionibus Orbium Coelestium* di Nicolò Copernico (1473 - 1543) che conteneva il **sistema copernicano**.



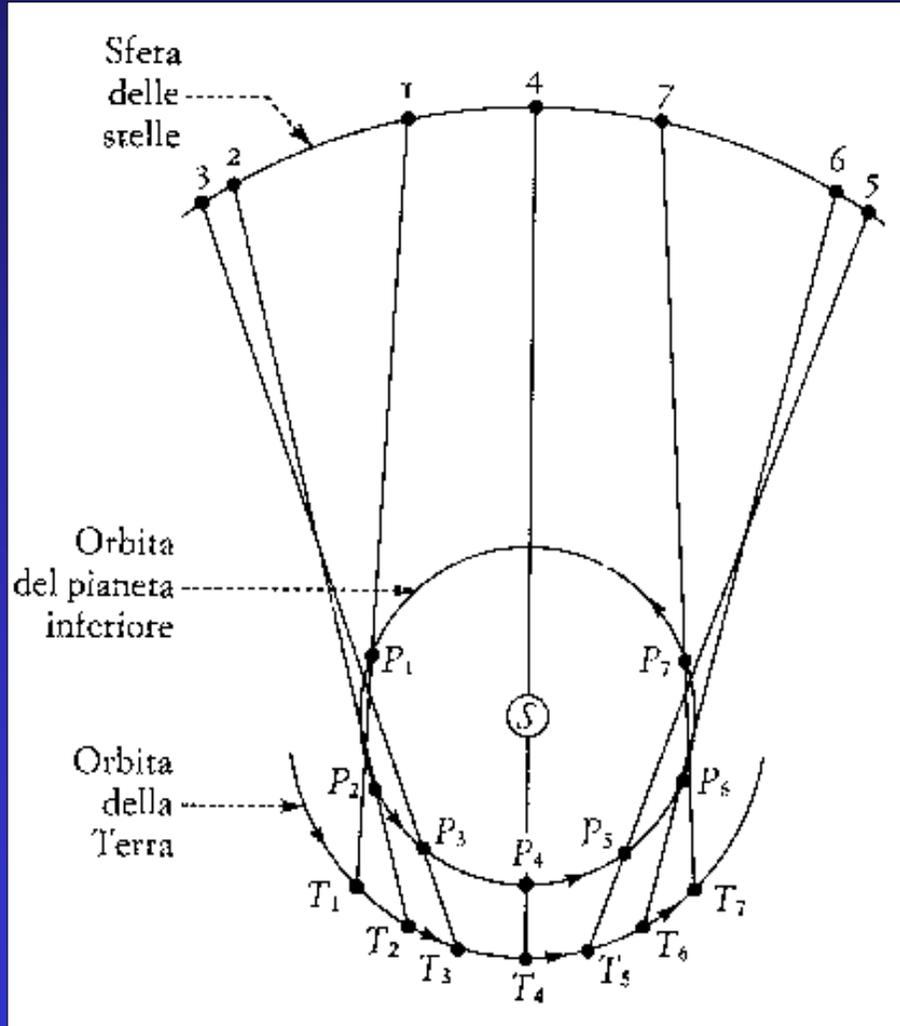
Il Sistema Copernicano

Copernico riprese una vecchia idea di Aristarco, che può essere sintetizzata nel seguente modo:

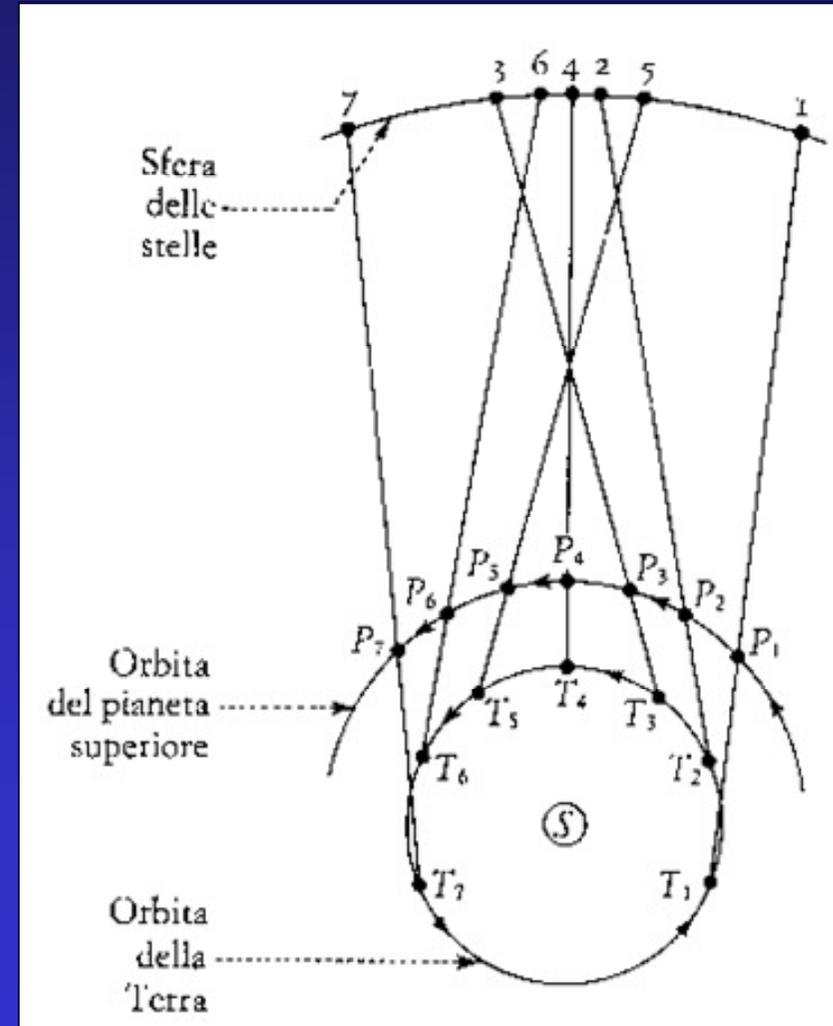
- > la Terra compie una rotazione attorno al proprio asse da ovest a est in circa ventiquattro ore;
- > la Terra non si trova al centro dell'Universo, ma solo dell'orbita lunare, e compie un giro attorno al Sole nel corso di un anno;
- > i pianeti, come la Terra, ruotano attorno al Sole, che occupa il centro dell'Universo.

Il Sistema Copernicano

Con questo modello si possono spiegare facilmente gli strani moti dei pianeti.



Pianeti interni



Pianeti esterni

Il Sistema Copernicano

La concezione eliocentrica era stata accantonata per quasi venti secoli perché era attaccabile sia dal punto di vista fisico, sia da quello metafisico.

Fisicamente l'ipotesi che la Terra orbitasse attorno al Sole veniva scartata principalmente per due motivi:

1) sembrava contraddire il senso comune che prevedeva effetti catastrofici quali crollo di edifici, caduta degli oggetti non più lungo la verticale, eccetera;

2) poiché l'angolo sotto cui le stelle vengono viste da un osservatore posto sulla Terra dipende dalla posizione della stessa, si dovrebbero osservare variazioni nel corso dell'anno nella posizione apparente delle stelle nella volta celeste.

Ovviamente non si poteva sapere che a causa delle enormi distanze delle stelle queste variazioni sono talmente piccole da risultare inosservabili ad occhio nudo!

Il Sistema Copernicano

Se alle obiezioni di tipo scientifico si poteva in qualche modo contrapporre argomentazioni scientifiche, ben poco si poteva fare per gli attacchi di tipo metafisico o teologico.

La concezione aristotelica che aveva distinto in modo inequivocabile l'Universo in due mondi separati, quello sublunare e quello celeste, era difficilmente attaccabile senza scontrarsi anche con la Chiesa, che nel frattempo aveva fatto sua questa concezione.

Il Sistema Copernicano

L'idea copernicana, ponendo la Terra sullo stesso piano degli altri corpi celesti, le faceva perdere quella posizione privilegiata che secoli di dispute filosofiche le avevano attribuito.

Non devono quindi sorprendere i dubbi e le titubanze di Copernico stesso. Dovrà passare più di un secolo prima le sue idee siano accettate dalla comunità scientifica e, ancora nel XVIII secolo, nei salotti culturali si accendevano dispute accanite tra i sostenitori della teoria tolemaica e quella copernicana.

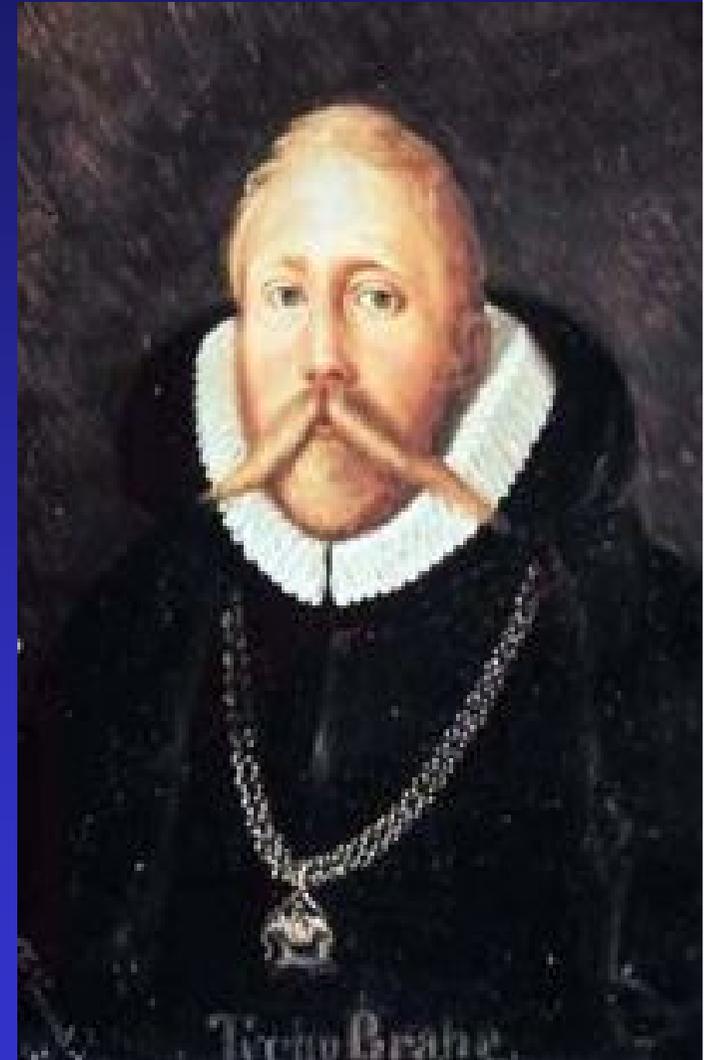
Con Copernico furono gettate le basi della moderna astronomia.



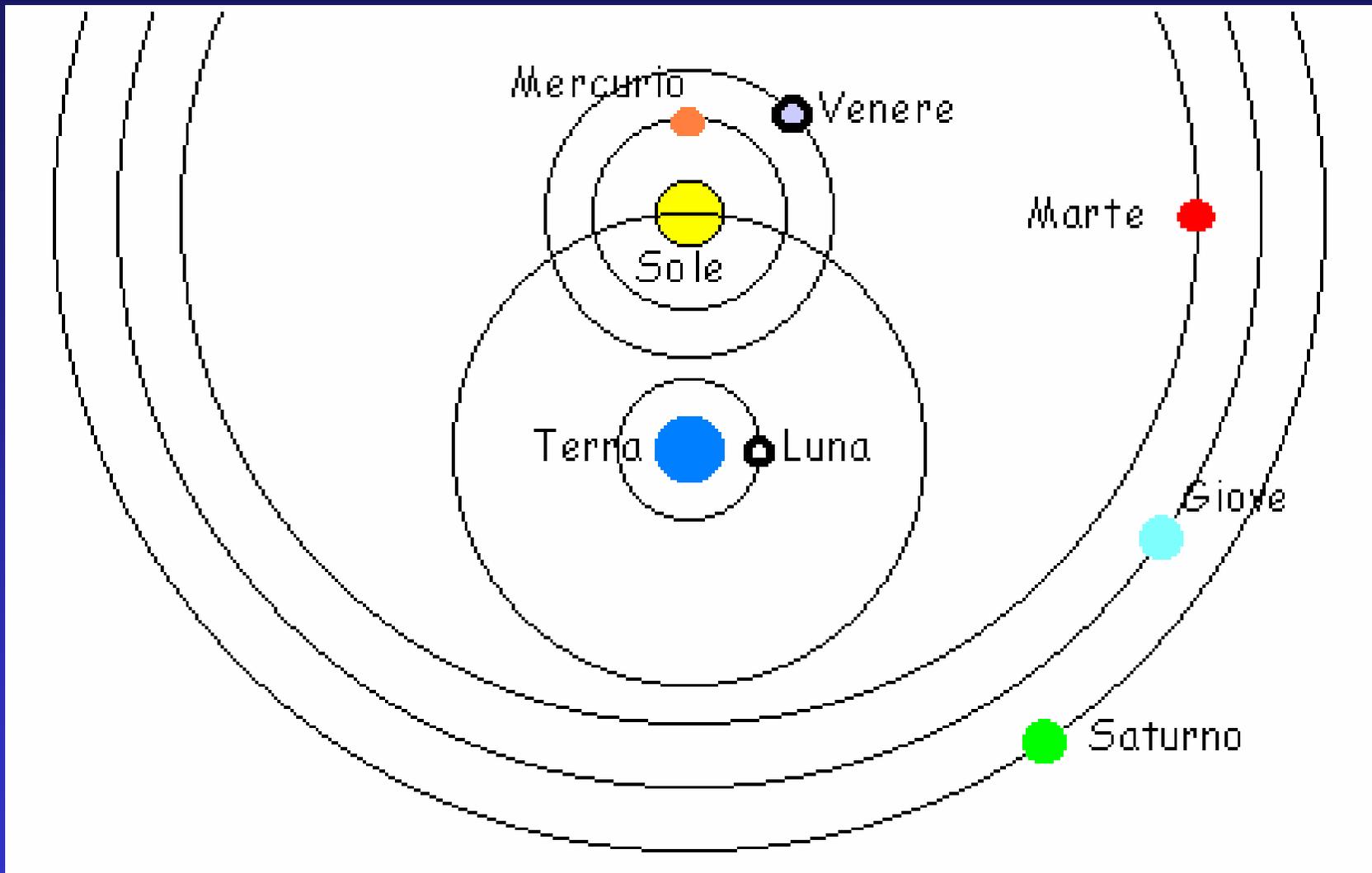
Tycho Brahe

Il matematico ed astronomo danese Tycho Brahe (1546 - 1601) ebbe un ruolo fondamentale nello sviluppo dell'Astronomia grazie alla grande mole di dati che ottenne con le sue continue osservazioni della volta celeste. Dati raccolti e catalogati per più di trenta anni.

Contrario alla teoria copernicana, formulò un suo sistema ancora geocentrico, anche se diverso dal sistema Tolemaico.



Tycho Brahe



Nel suo sistema la Terra era immobile al centro dell'universo, il Sole e la Luna ruotavano attorno alla Terra e tutti i pianeti ruotavano attorno al Sole.

Tycho Brahe

Non si accorse che matematicamente il suo sistema era uguale a quello di Copernico.

Nel 1563, osservando una congiunzione di Giove e Saturno si rese conto che le più recenti e aggiornate tavole astronomiche erano in errore di parecchi giorni.

Cominciò quindi a progettare e collezionare strumenti di osservazione sempre più imponenti e precisi con i quali confermò l'imprecisione delle misurazioni astronomiche fino ad allora eseguite.

Tycho Brahe

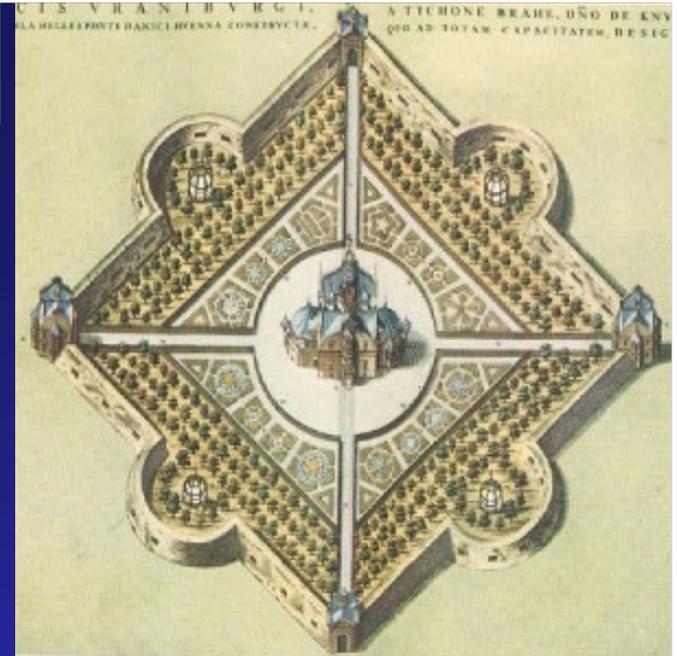
Nel novembre del 1572 Tycho osservò la stella nova apparsa in Cassiopea (si trattava di una supernova) e notò che non presentava parallasse; deducendone che doveva essere molto più lontana della Luna e quindi doveva appartenere al cielo delle stelle fisse.



Questo evento suscitò scalpore negli ambienti accademici visto che si riteneva che tutti i corpi celesti appartenenti al cielo delle stelle fisse non avrebbero dovuto essere soggetti a mutazioni.

Tycho Brahe

Per permettergli di migliorare le sue osservazioni il re Federico II, che era un protettore delle arti e delle scienze, gli regalò l'isola danese di Hveen con tutte le rendite che produceva e si impegnò a costruirgli un osservatorio a spese dello stato.



Nacque un grande edificio chiamato Uranjborg (castello del cielo) dove Tycho installò molti strumenti astronomici. Un secondo edificio fu chiamato Stjerneborg (castello delle stelle).

Tycho visse a Uranjborg per vent'anni, durante i quali raccolse un'ampia collezione di dati che gli sarebbe servita in seguito per costruire il suo sistema cosmologico.

Tycho Brahe

Non seppe però amministrare bene gli abitanti dell'isola di Hveen e per porre un freno alla difficile situazione che si era creata il successore di Federico II limitò gli appannaggi di Tycho.



Questi, offeso, abbandonò l'isola e girò per l'Europa portandosi dietro la famiglia e i suoi numerosi strumenti.

Nel 1600 incontrò Keplero (copernicano convinto) e sperò di convincerlo a dimostrare la sua teoria, ma morì senza riuscirci, anzi ...



Giovanni Keplero



Una svolta decisiva in favore della teoria copernicana fu la pubblicazione dei lavori di Giovanni Keplero (1571 - 1630).

Allievo di Tycho Brahe, egli continuò dopo la morte del maestro il lavoro di raccolta di dati relativi al moto dei corpi del sistema solare.

Analizzando le precise osservazioni di Tycho e le proprie, giunse a formulare quelle leggi ormai universalmente note come le leggi di Keplero.

Giovanni Keplero

Prima legge

Le traiettorie descritte dai pianeti attorno al Sole sono ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi

Seconda legge

Il raggio vettore che congiunge il Sole con un pianeta descrive aree uguali in tempi uguali.

Terza legge

I quadrati dei periodi di rivoluzione sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori delle rispettive orbite.

Giovanni Keplero

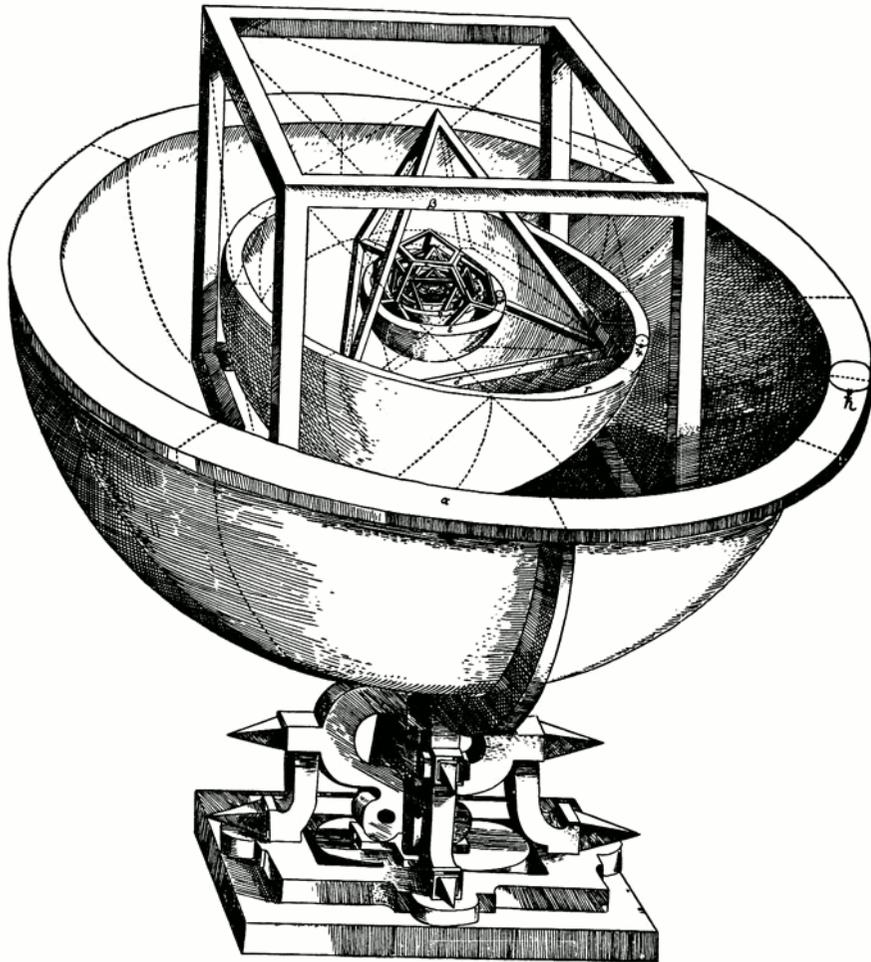
Con la scoperta di queste leggi, l'astronomia compiva un gigantesco passo in avanti.

Era infatti risolto il problema che aveva assillato generazioni di scienziati: il calcolo della posizione di un pianeta nella sua orbita in un qualsiasi istante.

Keplero non riuscì però a liberarsi completamente di un certo atteggiamento mistico che lo spingeva ad attribuire alle leggi sopra enunciate un significato metafisico riconducibile all'Armonia dell'Universo.

Giovanni Keplero

Nel *Mysterium Cosmographicum* (1596) Keplero espone in maniera molto chiara la teoria copernicana, ma ci rivela un aspetto del suo pensiero legato all'influsso dell'astrologia.



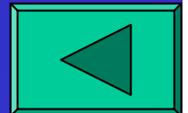
Egli ritenne di dover dare una spiegazione del perché i raggi e le eccentricità delle orbite dei pianeti abbiano quei particolari valori.

Giovanni Keplero

Keplero suppose che l'orbita di ogni pianeta fosse perfettamente circolare e ad essa si potesse circoscrivere un solido platonico ed inscrivere un altro.

La sfera più esterna, quella di **Saturno**, circoscrive un **cubo**. Tale solido circoscriverà la sfera di **Giove**, che a sua volta conterrà un **tetraedro** circoscrivente la sfera di **Marte**. A quest'ultima sarà inscritto un **dodecaedro** circoscrivente la sfera della **Terra**, considerata da Keplero la misura di tutte le orbite. Essa circoscriverà un **icosaedro** contenente la sfera di **Venere**, che a sua volta circoscriverà un **ottaedro** con inscritta la sfera di **Mercurio**.

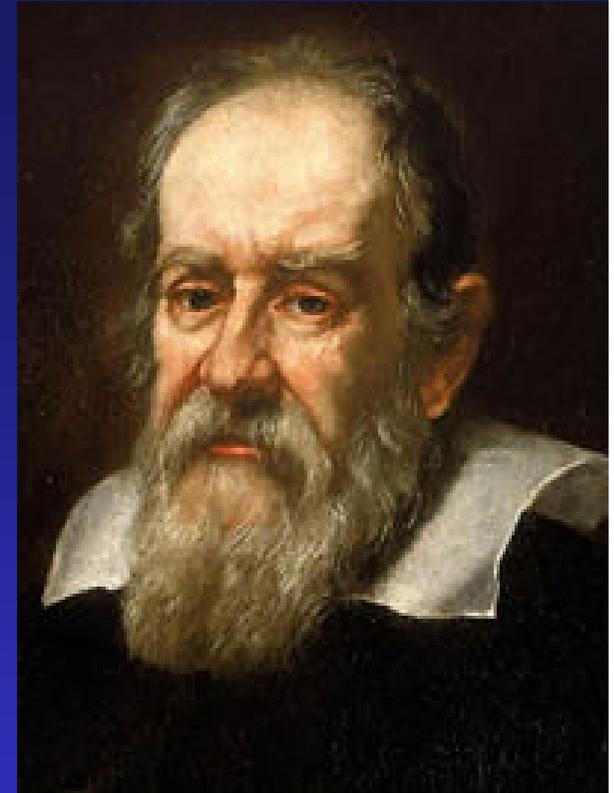
Secondo la visione di Keplero, ogni solido ruota insieme alla propria sfera.



Galileo Galilei

Galileo Galilei nacque a Pisa il 15 febbraio 1564.

Per seguire la volontà del padre a 17 anni si iscrisse nello Studio Pisano per ottenere la laurea in medicina, ma la sua passione per la matematica prevalse sui progetti paterni: Galileo divenne così professore di Matematica nella stessa Università pisana.



Al periodo pisano appartengono gli studi sul moto che condurranno Galileo ad accettare la teoria copernicana dell'Universo.

Riteneva che la Matematica è il linguaggio con cui è scritto il Libro della Natura e l'astronomia non è che un capitolo.

Galileo Galilei

Fu un astronomo diverso dai predecessori, meno attento all'astronomia di posizione, ma molto più curioso di tutti quei fenomeni che potevano far comprendere il *funzionamento* del mondo o avere qualche applicazione pratica.

Un principio fondamentale dell'opera di Galileo è il *rispetto del primato dell'esperienza fisica* nello stabilire la verità o la falsità delle tesi che venivano avanzate per creare dei modelli plausibili del mondo fisico.

La sua curiosità per la natura e la ricerca della sensata esperienza trova un aiuto fondamentale nell'applicazione del cannocchiale allo studio degli astri.

Galileo Galilei

Nel 1609 viene a sapere che a Parigi era stato costruito un strumento che consentiva di vedere più vicini gli oggetti lontani.

Sono i primi cannocchiali la cui "invenzione" venne successivamente rivendicata dagli occhialai olandesi, ma già 20 anni prima Gian Battista Della Porta ne aveva "descritto" uno nella sua *Magia Naturalis*.

A quanto sembra lo strumento nacque in Italia ma non fu inventato dal Della Porta. Per una parola forse definitiva sulla questione vedere "La Nouvelle Astronomie - Science de l'Universe", 1971 (traduzione italiana: "Guardiamo l'Universo - La Nuova Astronomia", ed. Feltrinelli 1972, pag. 24.)

Galileo Galilei

Successivamente Galileo si trasferisce a Padova, dove ha una piccola officina in cui costruisce i suoi strumenti tra questi un cannocchiale che ingrandisce di trenta volte.

Il cannocchiale non viene subito utilizzato per osservazioni astronomiche, ma diventa prima uno strumento di guerra per le navi della Repubblica Veneta alla quale ne consegna 12.



Il tubo di legno ricoperto di carta, contiene una lente obbiettiva biconvessa e un oculare piano concavo. Ha capacità di ingrandimento di 14 volte. La lente obbiettiva di questo cannocchiale ha distanza focale di 1330mm e apertura utile di 26mm.

Galileo Galilei

Quando Galileo inizia ad usare il cannocchiale per scrutare il cielo pubblica i risultati delle osservazioni su un opuscolo dal titolo *Sidereus Nuncius*.

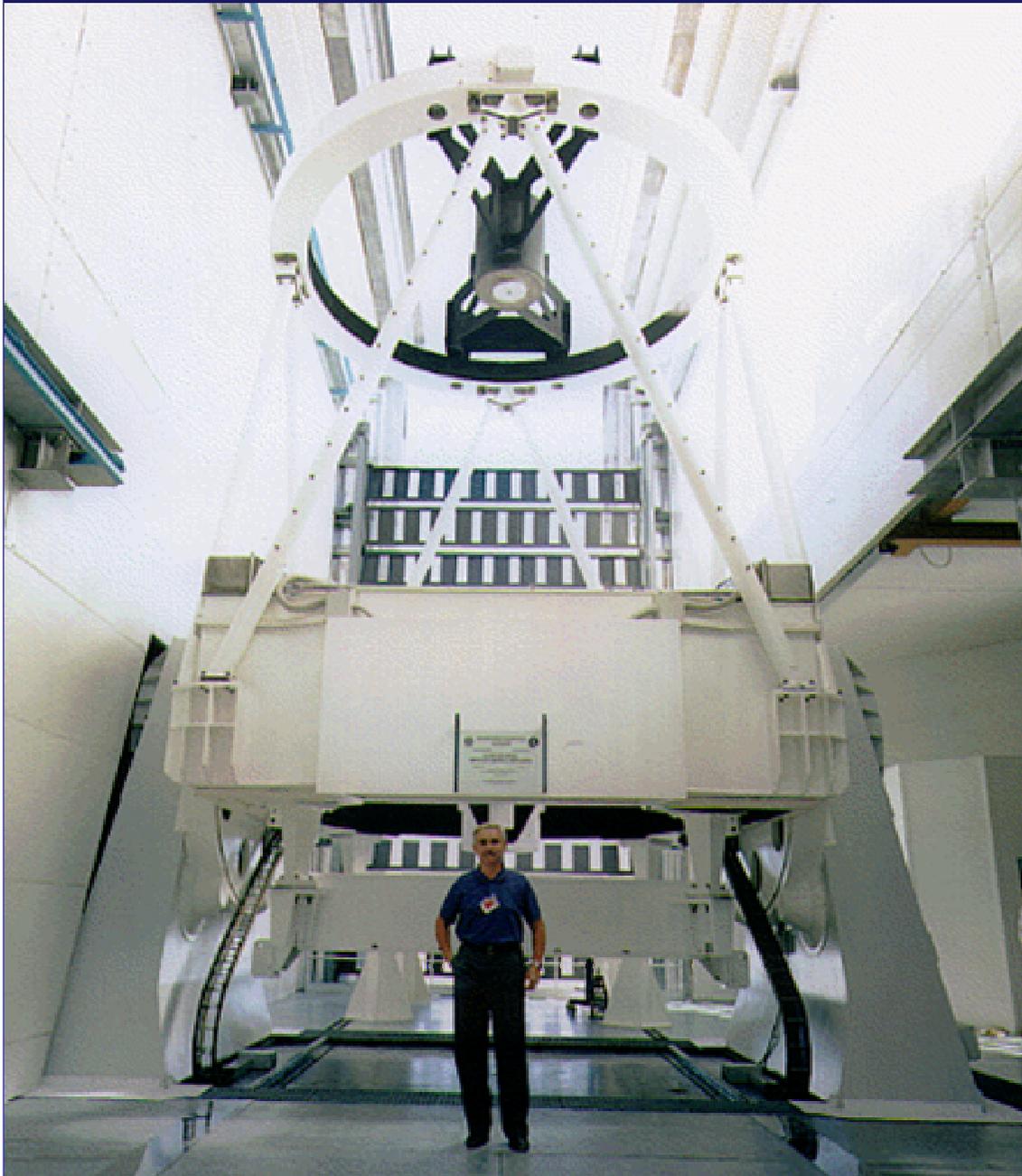
Molte e di diversa natura sono le scoperte annunciate da Galileo in questo libro.

Il cannocchiale svela a Galileo un mondo completamente diverso da quello che tutti conoscevano.

Il tubo di legno è ricoperto di pelle rossa con fregi in oro. L'obiettivo è biconvesso e l'oculare biconcavo. Ha capacità di ingrandimento di 21 volte. La lente obiettiva ha apertura utile di 16mm e distanza focale di 980mm.



Galileo Galilei



Il Telescopio Nazionale Galileo (TNG)

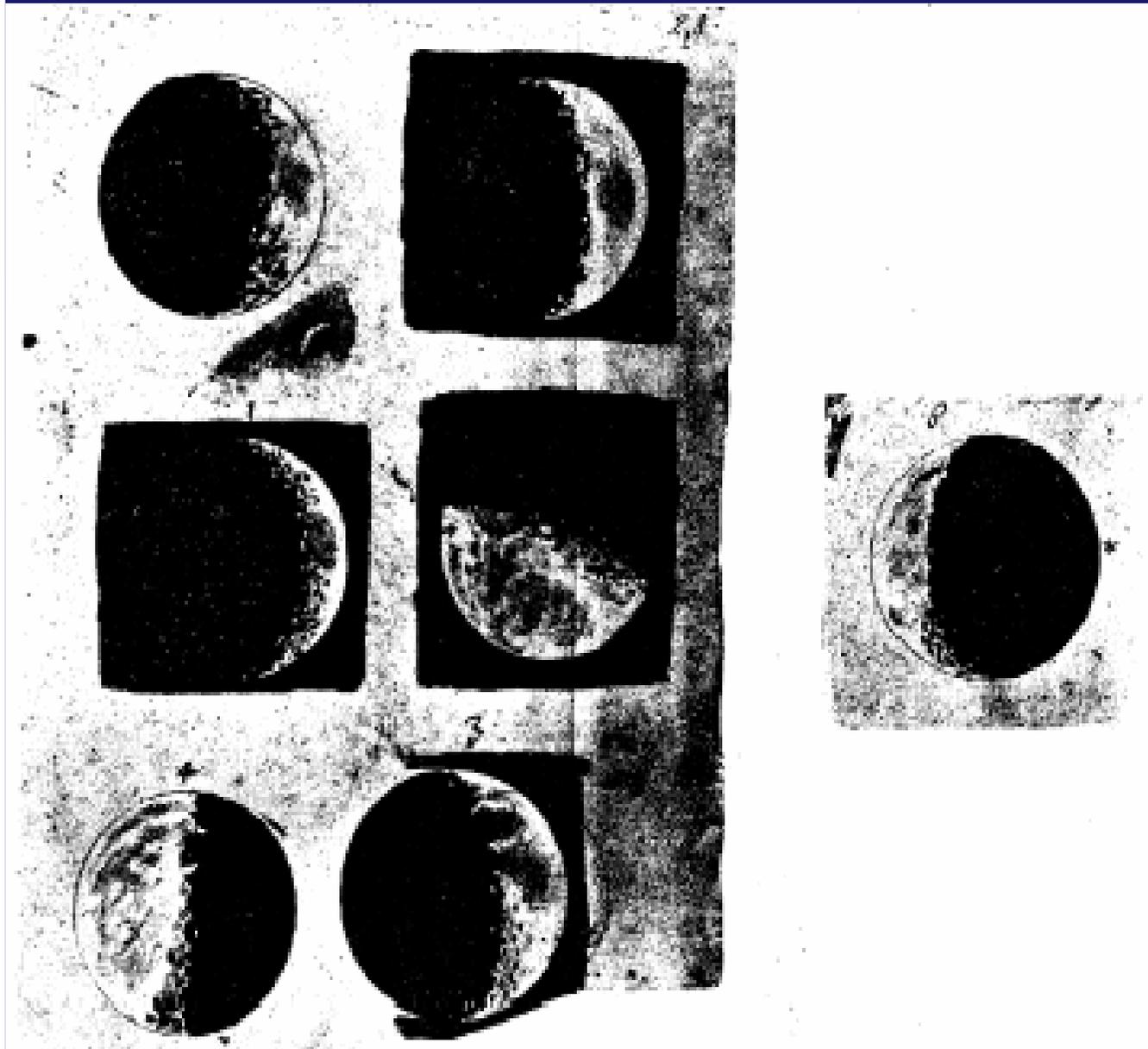
Il telescopio all'interno della cupola a Roque de los Muchachos (Isole Canarie).

Galileo Galilei

La Luna gli appare scabra, cosparsa di monti, valli e grandi pianure:

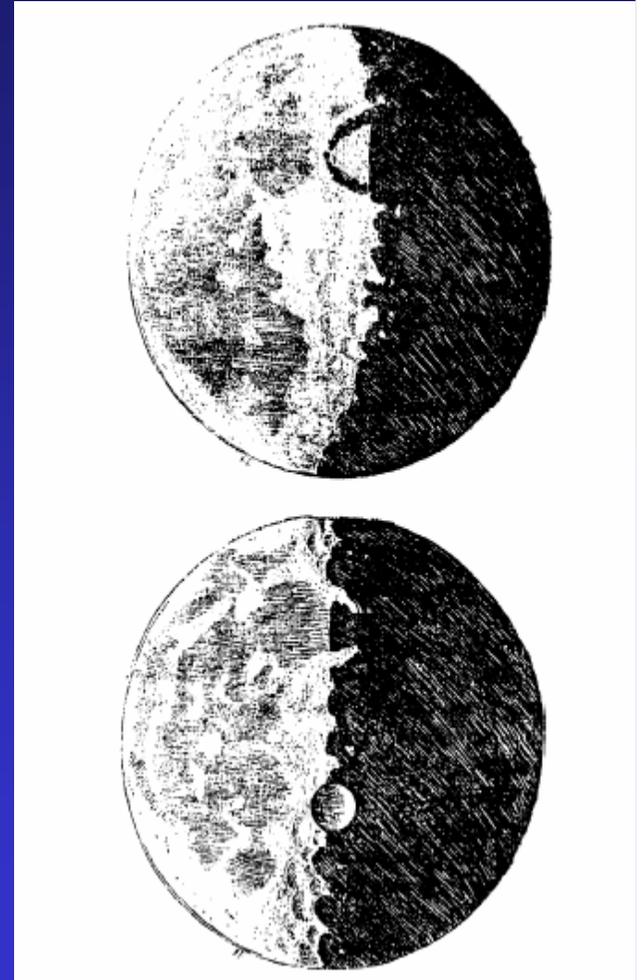
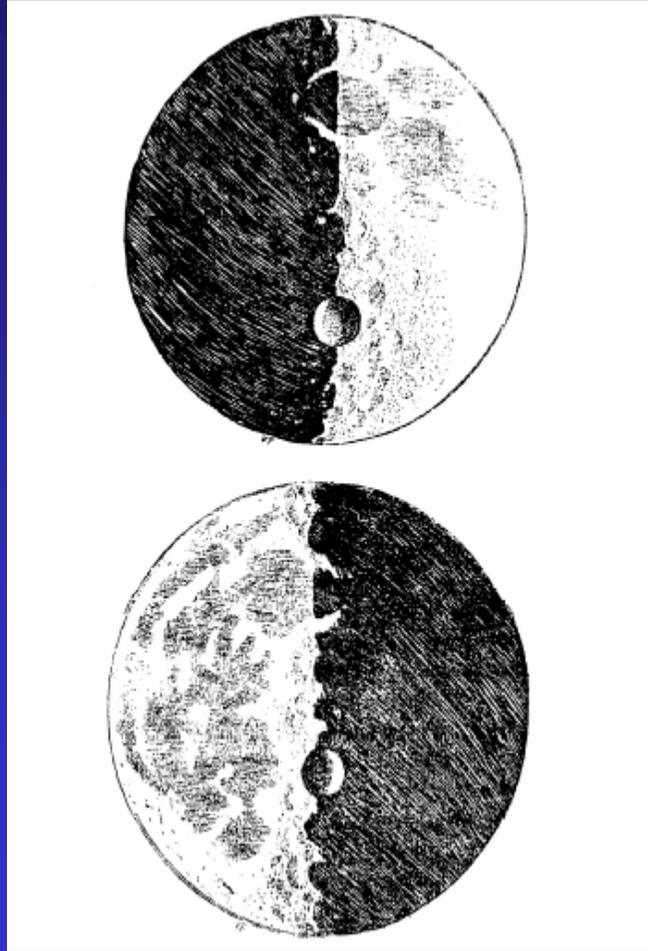
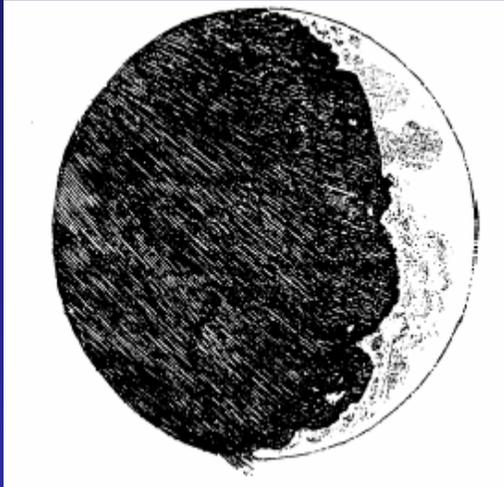
Già nel quarto o quinto giorno dopo la congiunzione, quando la Luna ci si mostra con i corni splendenti, il termine che divide la parte oscura dalla luminosa non si stende uniformemente secondo una linea ovale, come in un solido perfettamente sferico dovrebbe accadere, ma segnato da una linea diseguale, aspra e notevolmente sinuosa [...] Ma poi, non solo i confini tra le tenebre e la luce si vedono nella Luna ineguali e sinuosi, ma, ciò che induce maggior meraviglia, nella parte tenebrosa della Luna, appaiono moltissime punte lucenti, totalmente diverse e staccate dalla regione illuminata, e da esse non di breve intervallo distanti; le quali a poco a poco, trascorso un certo tempo, aumentano di grandezza e di luce, poi, dopo due o tre ore, si congiungono con la restante parte lucida, già fattasi più ampia [...] Or appunto sulla Terra, prima del sorgere del Sole, le più alte cime dei monti non sono illuminate dai raggi solari mentre l'ombra occupa tuttora le pianure?

Galileo Galilei



Disegni originali
della Luna

Galileo Galilei



Le immagini a
stampa della Luna,
apparse nel
Sidereus Nuncius

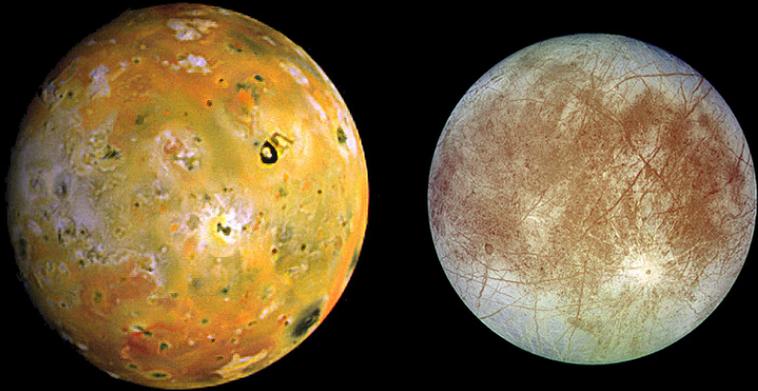
Galileo Galilei

Osserva anche Giove, il più brillante dei pianeti e scopre che attorno ad esso ci sono quattro lune. Nel gennaio 1610 Giove si trovava in una posizione molto favorevole per l'osservazione. Nel Sidereus Nuncius Galileo scrive:

[...] il giorno 7 gennaio del corrente anno 1610, alla prima ora della notte seguente, mentre guardavo gli astri celesti con il cannocchiale, mi si presentò Giove; e poiché mi ero preparato uno strumento proprio eccellente, m'accorsi, [...] che gli stavano accanto tre Stelline piccole invero, ma pur lucentissime; le quali per quanto fossero da me credute del numero delle fisse, tuttavia mi destarono qualche meraviglia, per il fatto che apparivano disposte secondo un'esatta linea retta e parallela all'Eclittica, e più splendide delle altre loro pari per grandezza [...] dalla parte orientale c'erano due Stelle, una sola invece verso occidente. [...] essendo io ritornato, non so da quale fato condotto, alla medesima indagine il giorno 8, trovai una disposizione di molto diversa: erano infatti le tre Stelline tutte occidentali rispetto a Giove, e fra di loro più vicine che nella notte antecedente, e da uguali intervalli fra loro separate.

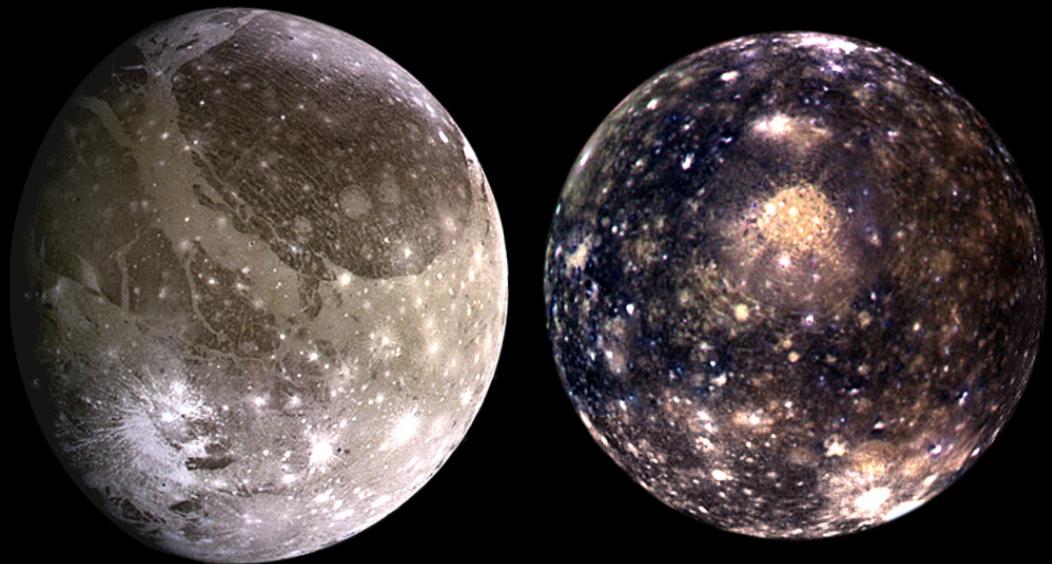
Galileo Galilei

I satelliti galileiani



Io ed Europa

Ganimede e Callisto



Galileo Galilei

Il 30 luglio 1610, da Padova, scrive a Belisario Vinta a Firenze una lettera in cui tra l'altro annuncia al Granduca di Toscana Cosimo II che ha osservato Saturno non circolare, ma con due grandi appendici diametralmente opposte. Sono gli anelli che Galileo non riesce a distinguere e che solo il fisico olandese Huygens osserverà compiutamente.



Saturno ripreso dall'Hubble Space Telescope

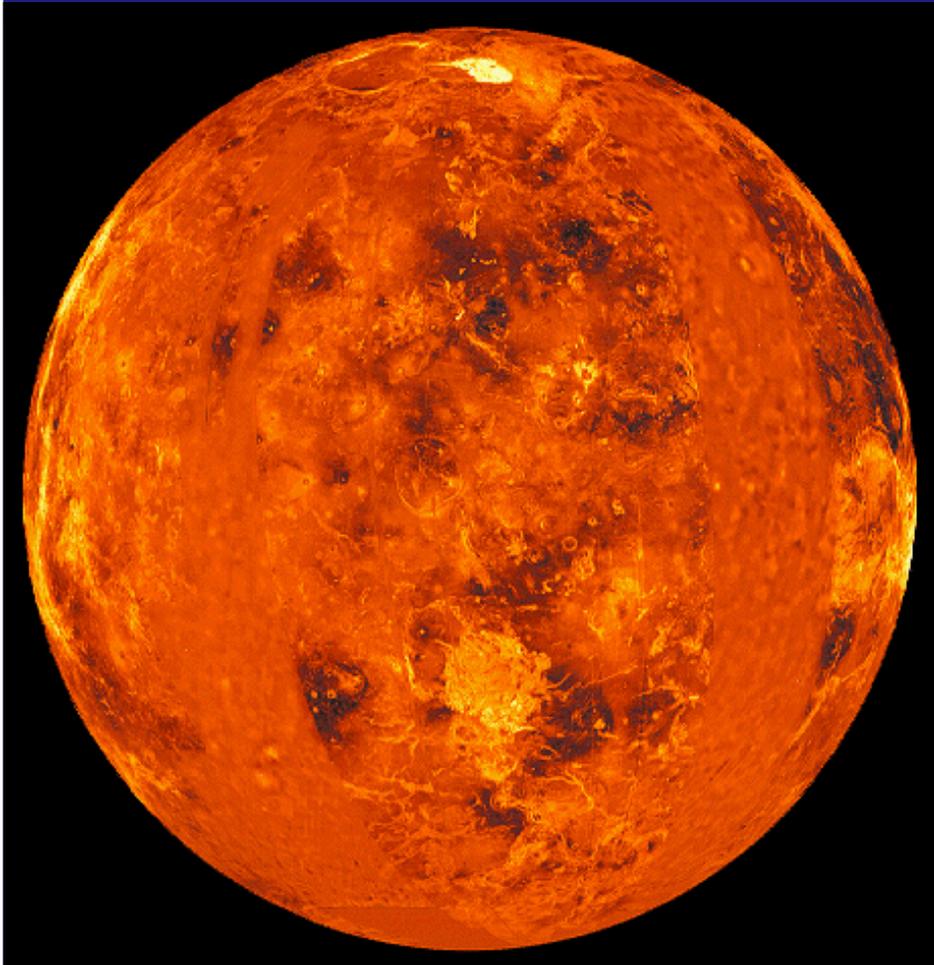
Saturno ripreso con una webcam da Cristian Fattinnanzi



Galileo Galilei

Nel 1610 Venere fu visibile la sera subito dopo il tramonto del Sole e Galileo scoprì che presentava le fasi come la Luna.

Venere ripresa dalla Terra . Foto di Alfredo Trombetta



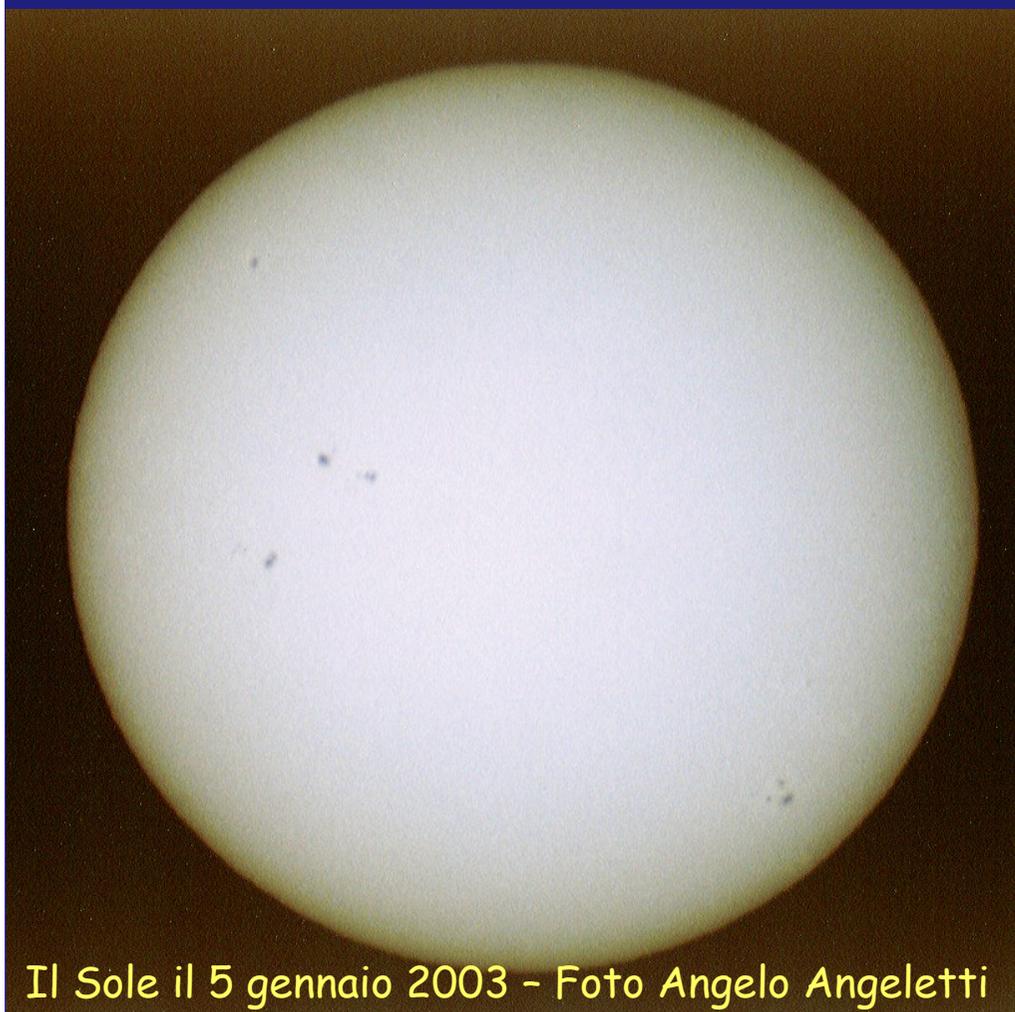
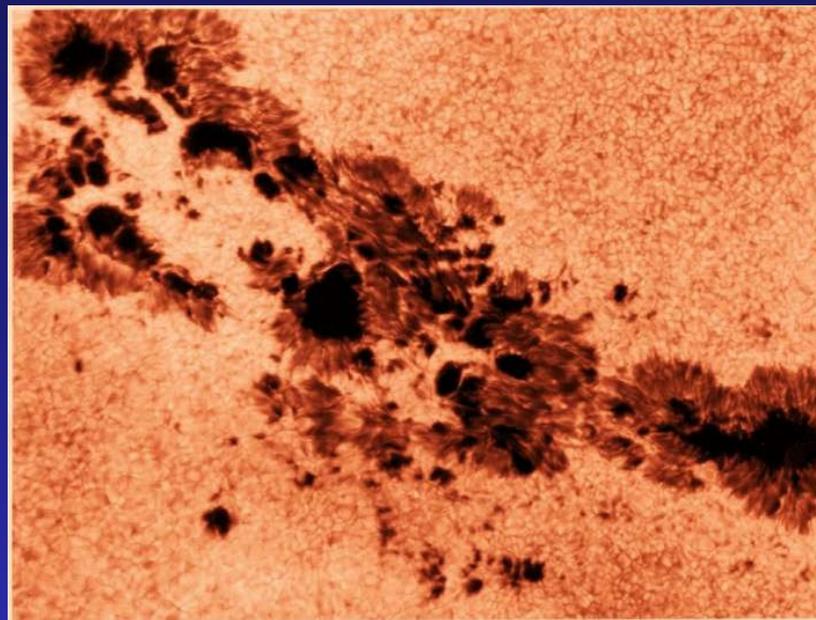
C'è chi sospetta che questa osservazione sia stata compiuta dall'allievo Benedetto Castelli che per ossequio al maestro non l'abbia rivendicata.

Comunque sia la scoperta di questo fenomeno dava la prova che Venere si muoveva attorno al Sole.

Venere ripresa dalla sonda Magellano.

Galileo Galilei

Galileo, osservando con il suo cannocchiale il Sole al tramonto, scopre che la sua superficie presenta delle macchie che ne dimostrano la rotazione.



Il Sole il 5 gennaio 2003 - Foto Angelo Angeletti

Le osservazioni di Galileo erano in palese contrasto con la cultura aristotelica del tempo che assumeva la perfetta sfericità e omogeneità degli oggetti celesti, per cui la Luna avrebbe dovuto apparire perfettamente liscia all'osservazione telescopica.

Galileo Galilei

- La scabrosità della Luna che orbita attorno alla Terra,
- la presenza dei satelliti di Giove che sembrano volere imitare in piccolo la struttura del sistema planetario,
- le fasi di Venere, possibili solo se Venere avesse orbitato attorno al Sole,
- Saturno tricorporeo che confutava la perfetta sfericità della quinta essenza, ovvero della sostanza dei cieli;
- le macchie solari.

avevano profondamente convinto Galileo della plausibilità del sistema copernicano, ma a differenza di Copernico e Keplero egli era convinto che il modello di Copernico non fosse semplicemente un comodo artificio per calcolare le effemeridi dei pianeti, ma che corrispondesse ad una reale struttura fisica dell'Universo.

Galileo Galilei

Nel 1632 pubblicò il Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo, tolemaico e copernicano schierandosi apertamente a favore del sistema copernicano.

Il libro fu condannato dalla Chiesa e Galileo accusato di eresia; minacciato di tortura, ormai vecchio e malato, abiurò ufficialmente l'idea che la Terra si muovesse attorno al Sole.

Condannato al carcere a vita - commutato poi negli arresti domiciliari - Galileo, diventato anche cieco, continuò a lavorare con i suoi allievi Vincenzo Viviani ed Evangelista Torricelli nella sua villa di Arcetri, presso Firenze, dove morì l'8 gennaio 1642.

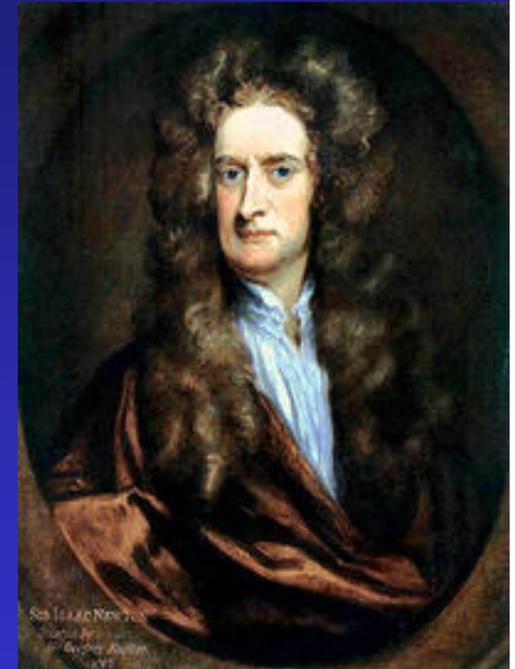
Il 31 ottobre 1992, dopo tre secoli e mezzo di caute e attente delibere della Chiesa, papa Giovanni Paolo II ha formalmente riabilitato Galileo.



Newton e la legge della Gravitazione Universale

Isaac Newton (1642-1727) è sicuramente uno dei più grandi geni di tutti i tempi.

Avvalendosi del principio d'inerzia enunciato da Galileo e di una brillante intuizione di Hooke (gli aveva consigliato di studiare il moto dei pianeti dividendolo in due parti: una rappresentata da un moto inerziale lungo la tangente alla traiettoria, l'altra rappresentata da un moto accelerato in direzione del Sole) scoprì quale fosse il significato fisico delle leggi di Keplero.



Concluse che essendo il moto dei pianeti non rettilineo e uniforme deve esserci una forza diretta verso il Sole che *regola*, ma non *causa* il moto.

Newton e la legge della Gravitazione Universale

Newton accertò che tale forza segue la legge dell'inverso del quadrato della distanza.

I punti salienti del suo ragionamento sono:

1. tutti i corpi cadono in prossimità della superficie terrestre con un'accelerazione pari a $9,8 \text{ m/s}^2$;
2. la causa che fa cadere un corpo (si narra che Newton giungesse a queste conclusioni vedendo cadere una mela da un albero) non viene meno qualunque sia l'altezza a cui il corpo è posto; se così non fosse dovrebbe esistere una determinata quota al di sopra della quale i corpi cessano di cadere e di pesare;
3. anche la Luna deve avere un peso e deve in qualche modo cadere sulla Terra; questo significa che la presenza della Terra regola il moto orbitale della Luna (potremmo dire che la Luna non cade affatto, ma se sulla Luna non agisse alcuna forza, essa proseguirebbe in linea retta, mentre invece viaggia lungo una traiettoria circolare, cosicché in realtà cade rispetto alla posizione in cui si troverebbe se non vi fosse nessuna forza).

Newton e la legge della Gravitazione Universale

Per verificare quantitativamente l'esattezza delle sue supposizioni Newton scelse il sistema Terra-Luna ed ipotizzò che la forza che faceva cadere i corpi in prossimità della superficie terrestre fosse la stessa che mantiene la Luna nella sua orbita.

I dati in possesso di Newton erano i seguenti:

raggio della Terra: $R_T \sim 6.400$ km

distanza Terra-Luna: $D_{T,L} \sim 384.000$ km

periodo di rivoluzione della Luna: $T_L = 29$ giorni.

Newton e la legge della Gravitazione Universale

Mediante questi dati è possibile calcolare le grandezze cinematiche relative al moto della Luna e precisamente:

velocità orbitale della Luna: $v_L \approx 1 \text{ km/s}$

accelerazione centripeta della Luna: $a_{C,L} = 0,0027 \text{ m/s}^2$.

Calcoliamo ora il rapporto tra la distanza Terra-Luna ed il raggio della Terra:

$$\frac{D_{T,L}}{R_T} = \frac{3,84 \cdot 10^8}{6,4 \cdot 10^6} = 60$$

Newton e la legge della Gravitazione Universale

La Luna si trova quindi ad una distanza dal centro della Terra che è 60 volte più grande della distanza a cui si trova la "mela" (che praticamente è sulla superficie della Terra) dallo stesso centro. Se calcoliamo il rapporto tra l'accelerazione centripeta della Luna e l'accelerazione gravitazionale della "mela" in prossimità della Terra otteniamo

$$\frac{a_{c,L}}{g} = \frac{0,0027}{9,8} \approx \frac{1}{3600}$$

in altri termini, la Luna cade con un'accelerazione che è 3.600 volte più piccola di quella con cui cade la "mela".

Newton e la legge della Gravitazione Universale

Questo indusse Newton a pensare che la forza di gravità variasse con l'inverso del quadrato della distanza

$$F \propto \frac{1}{r^2}$$

Newton espone i suoi principi della Dinamica, nonché la legge della Gravitazione Universale nell'opera: *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*.

La prima edizione fu pubblicata nel 1687, ma gran parte del lavoro venne svolto dall'agosto 1665 al maggio 1667, quando Newton fu costretto alla solitudine nel suo paese natale (Woolsthorpe), a causa della peste che colpì l'Inghilterra.

Newton e la legge della Gravitazione Universale

Nel libro III, Proposizione IV Teorema IV, Newton afferma:
"La Luna gravita verso la Terra, ed è continuamente ritratta dal moto rettilineo e trattenuta nella sua orbita dalla forza di gravità" e ne dà una dimostrazione che, con un linguaggio più moderno, è quella che riportiamo.

L'accelerazione g con cui cade un corpo in prossimità della Terra è 3.600 volte maggiore dell'accelerazione a con cui cade la Luna; osserviamo anche che in prossimità della superficie terrestre un corpo cade di una quantità $h = 5 \text{ m}$ nel primo secondo dopo l'abbandono dello stato di quiete [$h = \frac{1}{2}g(1\text{s})^2$], mentre lo spazio s di cui cade la Luna nello stesso intervallo di tempo è dato da: $s = \frac{1}{2}a(1\text{s})^2$.

Newton e la legge della Gravitazione Universale

Da queste considerazioni si ricava che:

$$\frac{h}{s} = \frac{\frac{1}{2}g(1s)^2}{\frac{1}{2}a(1s)^2} = \frac{g}{a}$$

e quindi

$$s = \frac{a}{g}h \approx \frac{1}{3600} \cdot (5m) \approx 1,4mm$$

cioè, in 1 s, la Luna cade di 1,4 mm.

Newton e la legge della Gravitazione Universale

Conoscendo il raggio dell'orbita lunare ($D_{T,L}$) e il tempo che la Luna impiega a girare intorno alla Terra (T_L), possiamo calcolare quale tratto (d) percorrerebbe la Luna, in 1 s , se non cadesse.

$$d = v \cdot t = \frac{2\pi D_{T,L}}{T_L} \cdot t = \frac{2\pi \cdot (384.000\text{km})}{29\text{giorni}} \cdot (1s) \approx 1\text{km}$$

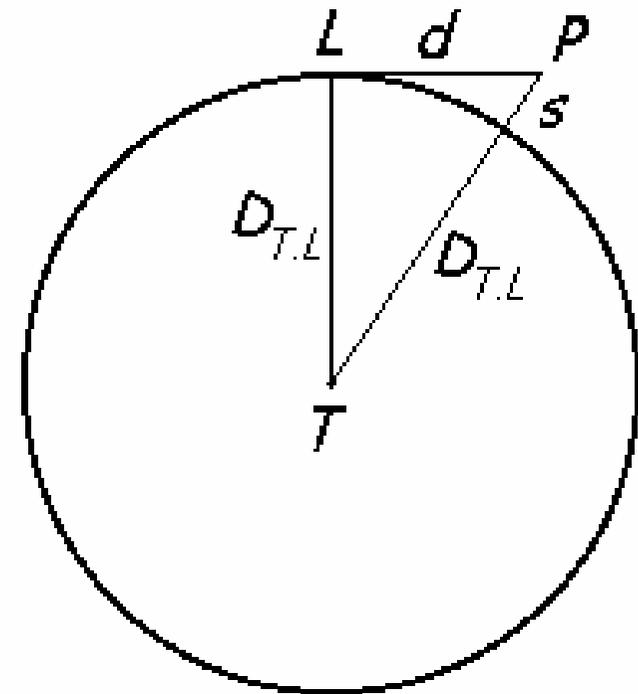
Indicando con s la quantità della quale cade in 1 s la Luna, dal triangolo rettangolo TLP si ricava:

$$\overline{TL}^2 + \overline{LP}^2 = \overline{TP}^2 \quad D_{T,L}^2 + d^2 = (D_{T,L} + s)^2$$

$$D_{T,L}^2 + d^2 = D_{T,L}^2 + 2sD_{T,L} + s^2$$

$$s \approx \frac{d^2}{2D_{T,L}} \approx 1,3\text{mm}$$

si è trascurato s^2 perché piccolo rispetto agli altri termini.
Da ciò si deduce che la Luna, in 1 s , cade di circa 1,3 mm .



Newton e la legge della Gravitazione Universale

Il risultato ottenuto lo soddisfaceva. Solo nel 1679, con migliori misure della distanza Terra-Luna, egli ottenne la conferma numerica della sua teoria.

È importante capire quali estrapolazioni avesse dovuto compiere Newton per giungere al risultato che la forza di gravità segue la legge dell'inverso del quadrato della distanza.

In primo luogo il risultato ottenuto per il sistema Terra-Luna non autorizzava a pensare che potesse essere altrettanto corretto in altri sistemi con caratteristiche totalmente diverse da quello preso in esame.

Solo in tempi relativamente recenti si è potuto verificare (studiando sistemi di stelle doppie) che ovunque nell'Universo la gravità varia come $1/r^2$ (almeno nell'ambito di precisione delle nostre misure).

In secondo luogo c'era il problema che il calcolo delle distanze usate per rapportare tra loro g e $a_{C,L}$ veniva eseguito partendo dal centro della Terra.

Per poter giustificare questo calcolo Newton dovette sviluppare quegli strumenti matematici (il calcolo infinitesimale) che gli permisero di dimostrare che se due corpi sferici esercitano l'uno verso l'altro una forza che varia come $1/r^2$ allora si può supporre che la massa di ciascun corpo sia concentrata nel centro del corpo stesso (il baricentro).

Newton e la legge della Gravitazione Universale

Ma non è tutto.

Fino a quel momento era opinione corrente che il moto dei pianeti si svolgesse attorno ad un punto coincidente con il centro del corpo centrale (il Sole) ritenuto immobile. Newton superò questa concezione applicando al moto planetario la sua terza legge del moto, il principio di azione e reazione. Affermò infatti che le azioni dei corpi che attraggono e che sono attratti sono sempre reciproche ed uguali: perciò, se ci sono due corpi, nessuno dei due può trovarsi in quiete, ed entrambi orbitano attorno a un centro comune (il *centro di massa* del sistema).

Newton formulò la *Legge della Gravitazione Universale*, che possiamo enunciare come segue: *due corpi di masse m_1 ed m_2 esercitano l'uno sull'altro una forza, diretta lungo la loro congiungente, che è direttamente proporzionale al prodotto delle masse ed inversamente proporzionale al quadrato della distanza fra i loro centri.*

In formula:

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

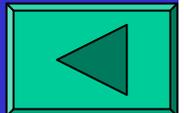
La costante G è nota come *costante di gravitazione universale* ed assume nel Sistema Internazionale il valore $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$.

Newton e la legge della Gravitazione Universale

Newton si chiese anche quale fosse la natura della gravità.

"Fin qui ho spiegato i fenomeni del cielo e del nostro mare mediante la forza di gravità, ma non ho mai fissato la causa della gravità. Questa forza nasce interamente da qualche causa, che penetra fino al centro del Sole e dei pianeti [...] e opera [...] in relazione alla quantità di materia solida. La sua azione si estende per ogni dove ad immense distanze, sempre decrescendo in proporzione inversa al quadrato delle distanze. La gravità verso il Sole è composta dalla gravità verso le singole particelle del Sole [...]. In verità non sono ancora riuscito a dedurre dai fenomeni la ragione di queste proprietà della gravità, e non invento ipotesi. [hypotheses non fingo] Qualunque cosa, infatti, non deducibile dai fenomeni va chiamata ipotesi; e nella filosofia sperimentale non trovano posto le ipotesi sia metafisiche, sia fisiche, sia delle qualità occulte, sia meccaniche. In questa filosofia le proposizioni vengono dedotte dai fenomeni e sono rese generali per induzione. In tal modo divennero note l'impenetrabilità, la mobilità e l'impulso dei corpi, le leggi del moto e la gravità. Ed è sufficiente che la gravità esista di fatto, agisca secondo le leggi da noi esposte, e spieghi tutti i movimenti dei corpi celesti e del nostro mare."

Con queste parole Newton chiudeva la seconda edizione dei *Principia*, portando a termine una delle più grandi rivoluzioni del pensiero umano.



FINE

Il **sorgere eliac** di un astro è la sua levata insieme al sole dopo un periodo di invisibilità



Almanacco dall'arabo al-manakh che vuol dire calendario. È una pubblicazione annuale simile al calendario, ma che comprendente varie notizie complementari.



L'**eclittica** è il piano dell'orbita della Terra intorno al Sole. Dalla Terra, l'eclittica corrisponde al percorso che il Sole fa in un anno in cielo rispetto allo sfondo delle stelle. Le orbite di tutti i pianeti, ad eccezione di Plutone, sono molto vicine al piano dell'eclittica cioè si trovano più o meno nello stesso piano.



Lo **gnomone** è uno stilo la cui ombra proiettata su un piano orizzontale o verticale indica la direzione e l'altezza del Sole. Veniva usato sia come orologio, sia per la determinazione della latitudine.



L'anno siderale è l'intervallo di tempo tra due passaggi consecutivi del Sole in uno stesso punto della sua orbita, rispetto alle stelle è pari a 365,25636 giorni



L'anno tropico è l'intervallo di tempo tra due equinozi di primavera successivi è pari a 365,24219 giorni.



Le **effemeridi** sono tavole astronomiche pubblicate annualmente che forniscono, per intervalli fissi di tempo (per esempio giorno per giorno), la posizione di Sole, Luna, pianeti e l'ora in cui l'astro sorge, culmina al meridiano, tramonta.



Una **supernova** è una stella che esplode alla fine della sua esistenza lasciando come resti una nebulosa (ammasso di gas che si espande a grande velocità) e un oggetto molto denso (stella di neutroni o buco nero).

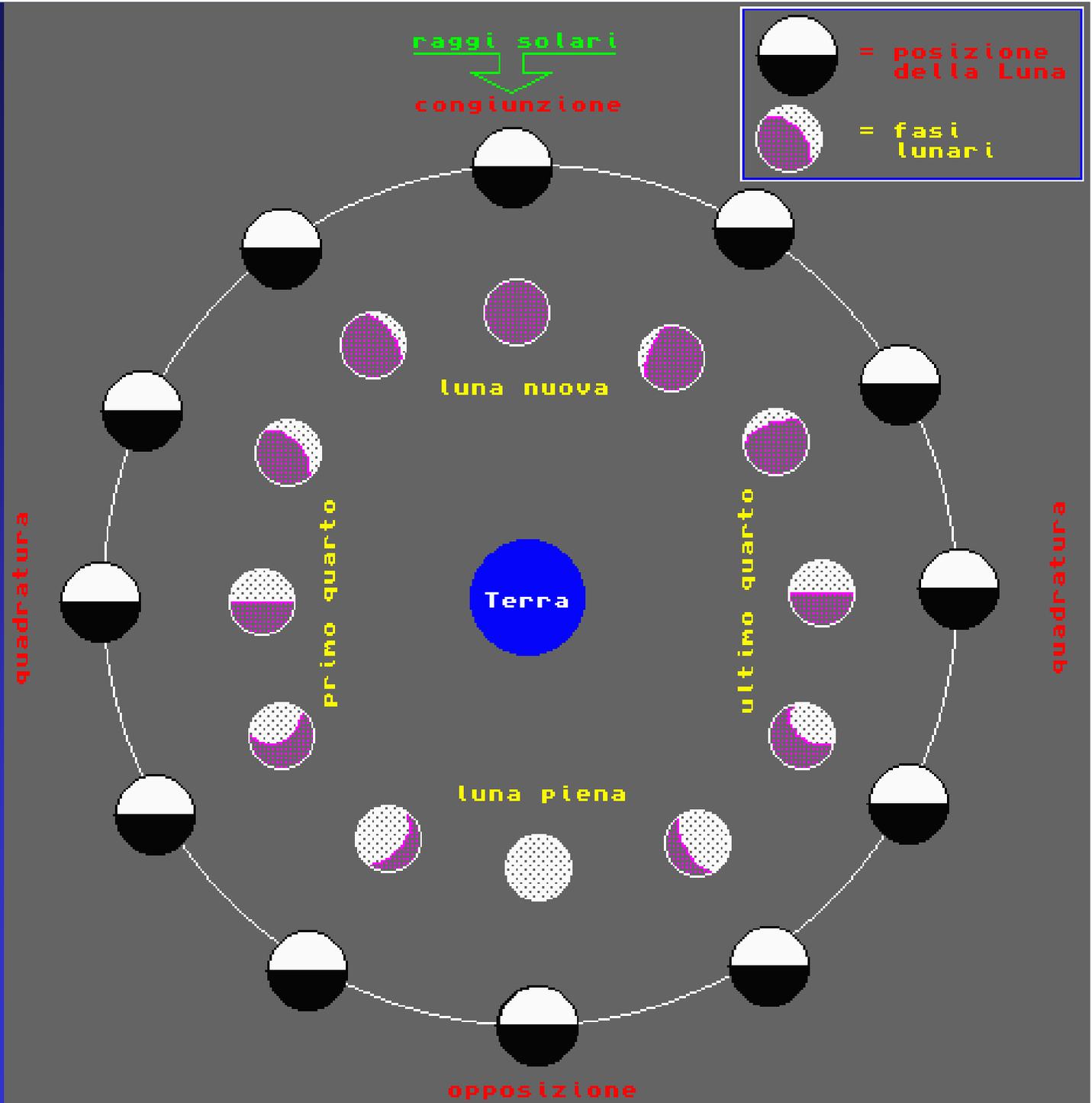


LE FASI LUNARI

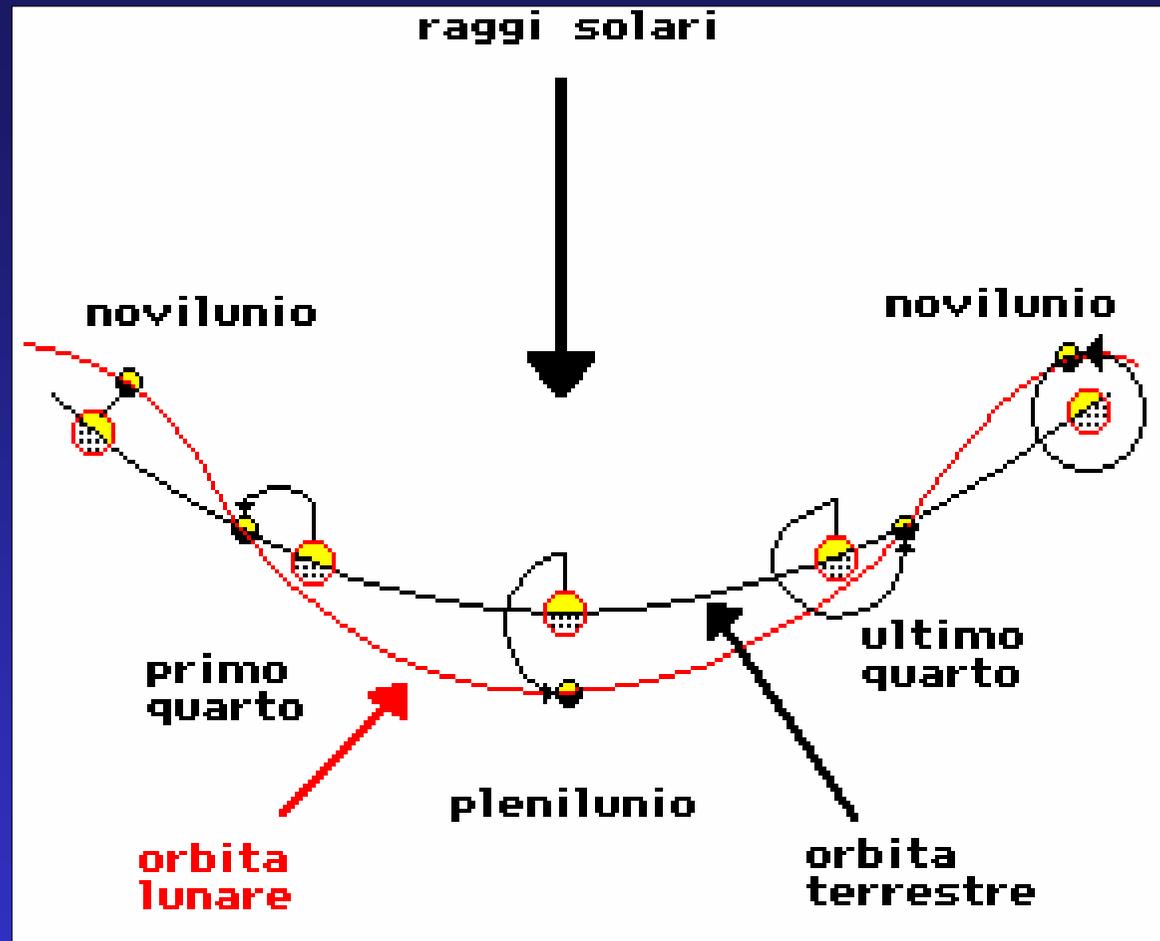
Nel loro moto attorno al Sole, la Terra e Luna si vengono a trovare in posizioni tali che dalla Terra la Luna viene vista illuminata dal Sole in modi diversi.

La Luna presenta le cosiddette "fasi".

Un ciclo, che dura 29 giorni, viene detto lunazione.



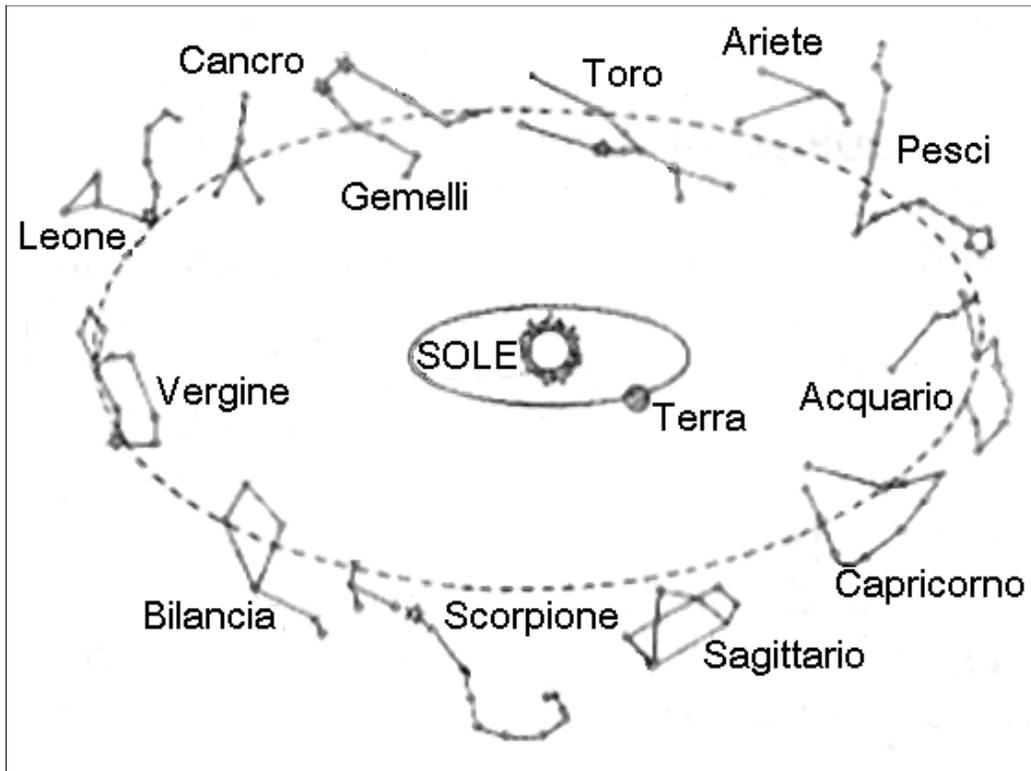
LE FASI LUNARI



Il Novilunio o Luna Nuova è la fase in cui la Luna ci si presenta completamente oscura.

Il Plenilunio o Luna Piena è la fase in cui la Luna ci si presenta completamente illuminata.





Lo Zodiaco è una fascia immaginaria nel cielo che si estende per 9° circa da entrambi i lati dell'eclittica.

Sono comprese in questa fascia le traiettorie visibili del Sole, della Luna e di tutti i pianeti ad eccezione di Plutone.

I Greci divisero lo Zodiaco in 12 parti uguali (ciascuna corrispondente ad un segmento di cielo di 30°) dando loro il nome

della costellazione più vistosa presente in ognuna di esse. Tali suddivisioni sono i cosiddetti segni dello Zodiaco. Le costellazioni attraversate dal Sole sono in realtà 13 e non 12, poiché tra lo Scorpione e il Sagittario il Sole attraversa Ofiuco. Da quando le suddivisioni dello Zodiaco hanno ricevuto i loro nomi classici, la precessione degli equinozi ha spostato la fascia zodiacale, ma i vecchi nomi dei segni non sono mai stati cambiati, anche se non corrispondono più alle costellazioni come le si osserva in cielo. Così, per esempio, un tempo il 21 marzo il Sole si trovava nella costellazione dell'Ariete, mentre oggi si trova nella costellazione dei Pesci.



La Via Lattea

E' quella fascia lattiginosa di stelle che attraversa il cielo notturno, segnando il piano della Galassia (un insieme di circa 200 miliardi di stelle grosso modo simili al nostro Sole, di gas e di polveri mantenuti insieme dalla forza di gravità).

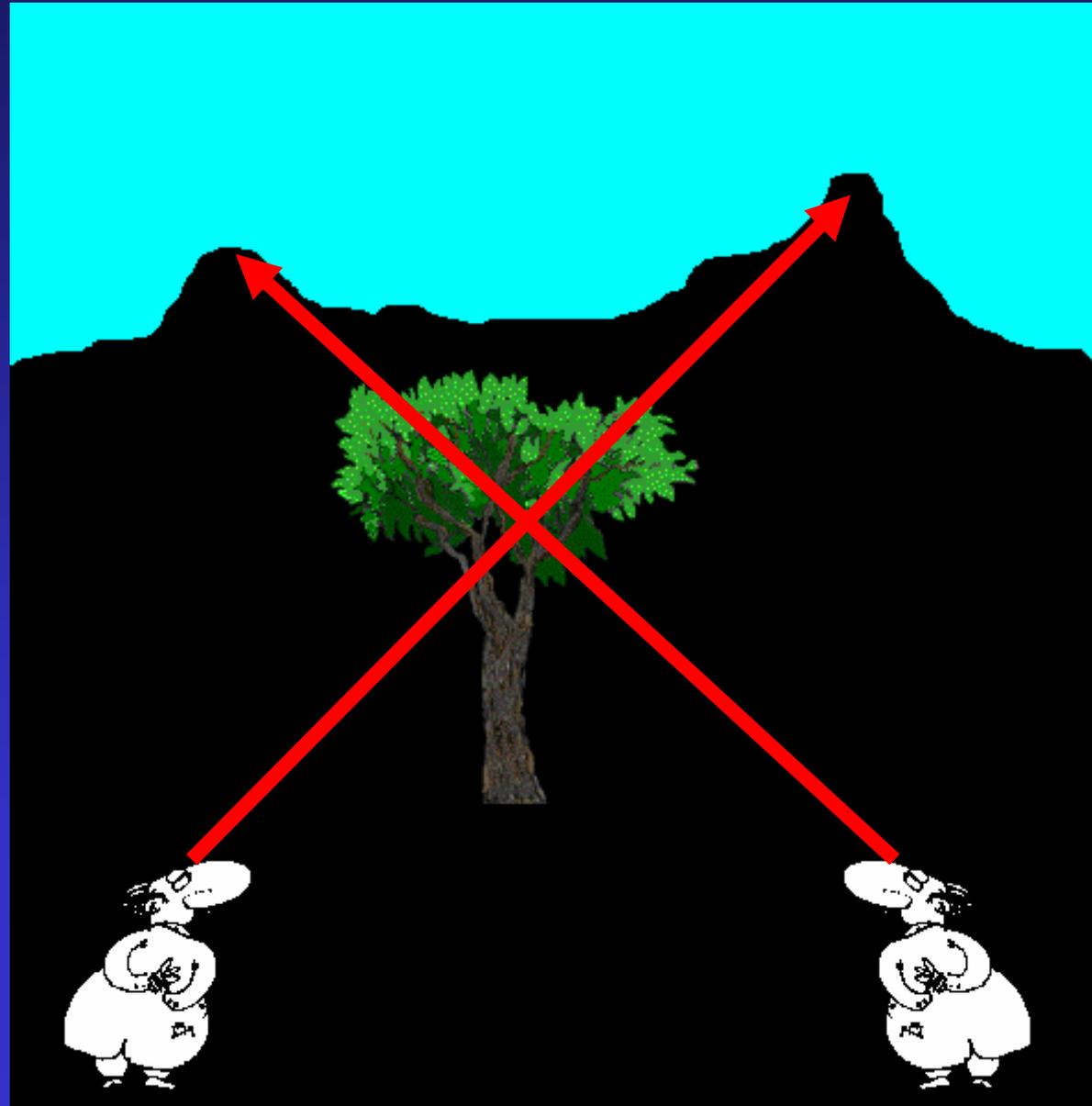


L'espressione Via Lattea è usato come sinonimo di Galassia.

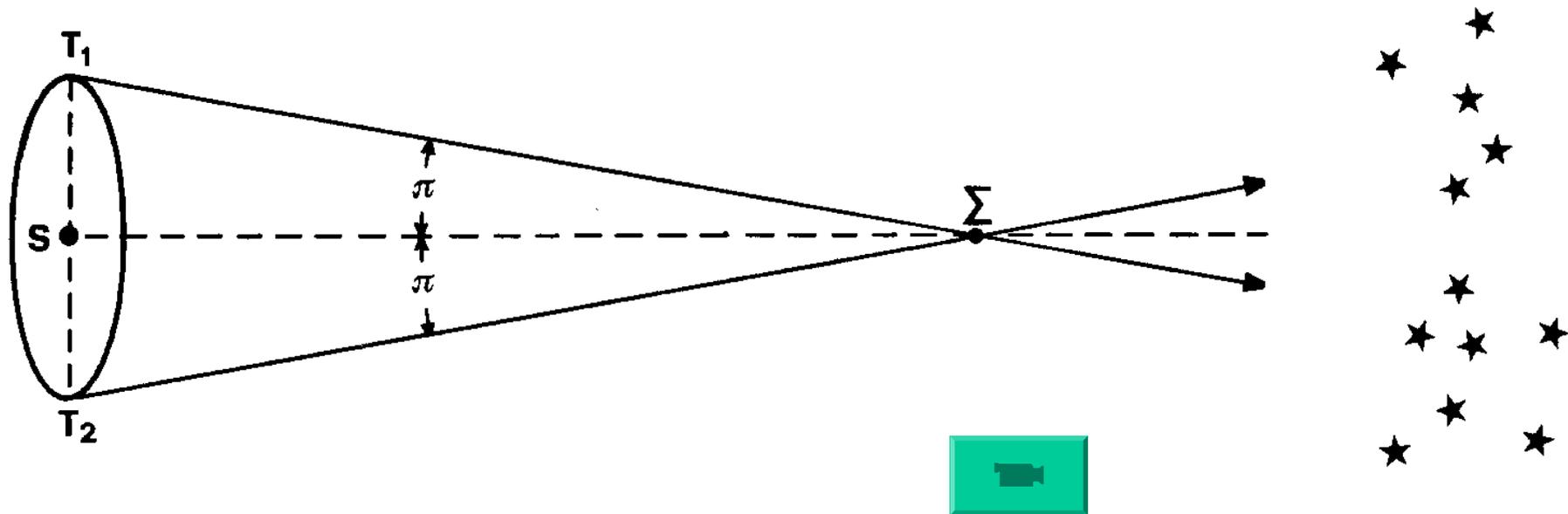
Nella foto di Alfredo Trombetta la parte della Via Lattea verso il centro nella costellazione del Sagittario.



La parallasse



La parallasse



Spostamento apparente di una stella per effetto del moto orbitale della Terra; l'ellisse rappresenta l'orbita terrestre vista in prospettiva.

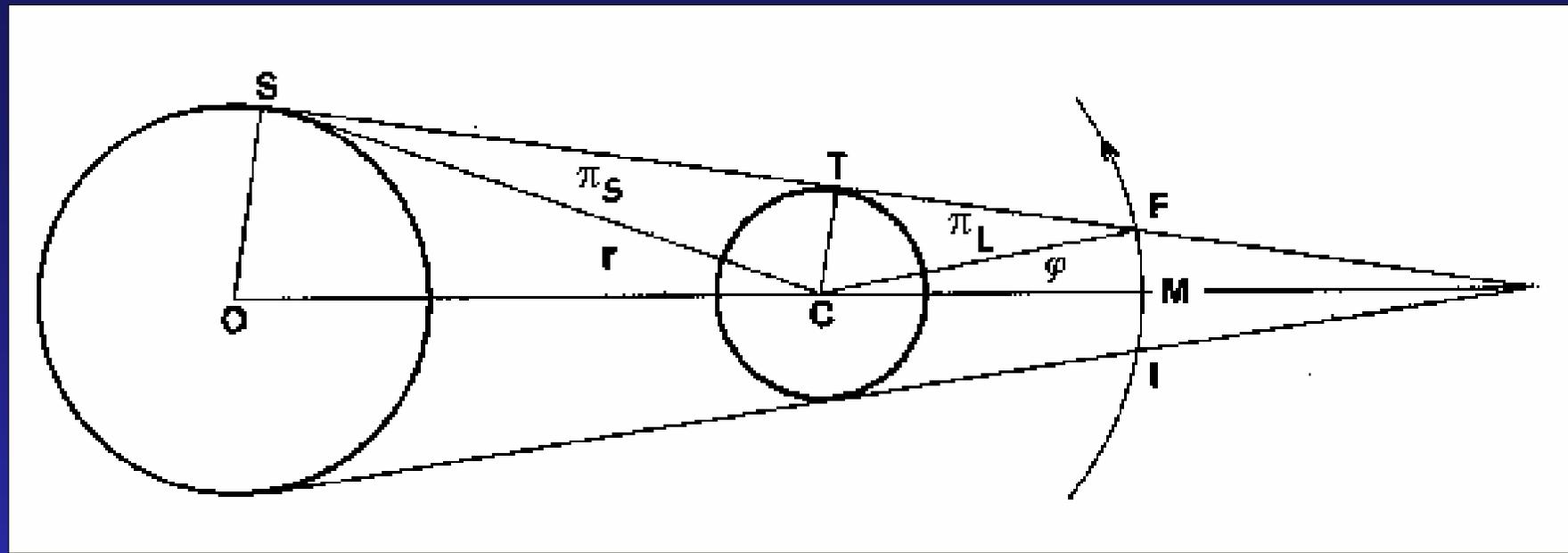
La stella posta in S viene vista in due posizioni diverse da T_1 o da T_2 , punti diametralmente opposti nell'orbita della Terra attorno al Sole.

C'è da notare che le stelle più vicine alla Terra hanno angolo di parallasse π dell'ordine dei decimi di secondo d'arco, quantità troppo piccola per essere rilevata a quell'epoca.

Se $\pi = 1''$ la distanza è di $3,094 \cdot 10^{16}$ m ovvero 3,27 anni luce, per definizione 1 parsec.



Distanza del Sole e della Luna



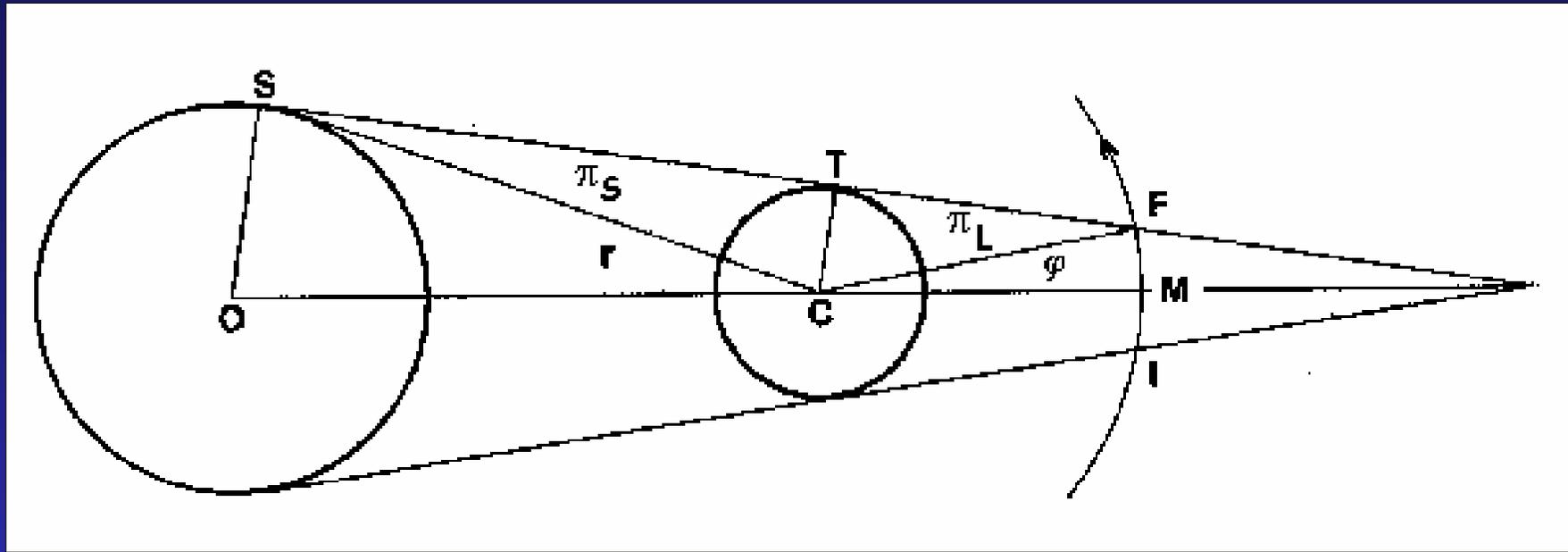
Nella figura sono rappresentati il Sole con centro in O , la Terra con centro in C , ed un arco IMF dell'orbita lunare (la figura non è in scala).

I è il punto in cui la Luna entra in eclisse, M il punto centrale del fenomeno ed F quello di uscita dall'ombra. Si suppone che l'eclisse sia centrale, cioè che nella fase centrale Sole, Terra e Luna siano sulla stessa retta.

π_S è la misura dell'angolo sotto cui dal Sole si vede il raggio terrestre, cioè la parallasse del Sole; π_L è la parallasse della Luna.

L'angolo r è il semidiametro apparente del Sole; è noto che vale $16'$ (dalla Terra il disco del Sole ha mediamente un diametro angolare di $32'$); infine φ è l'arco entro cui la Luna è in eclisse.

Distanza del Sole e della Luna



È noto che un'eclisse centrale dura due ore e mezzo, la metà di tale arco, cioè l'angolo φ , viene percorsa quindi in un'ora e 15 minuti (= 1,25 ore).

Nel suo moto attorno alla Terra la Luna, in cielo, si sposta mediamente di circa 13° in 24 ore, si può scrivere la proporzione

$$\varphi : 1,25 = 13^\circ : 24$$

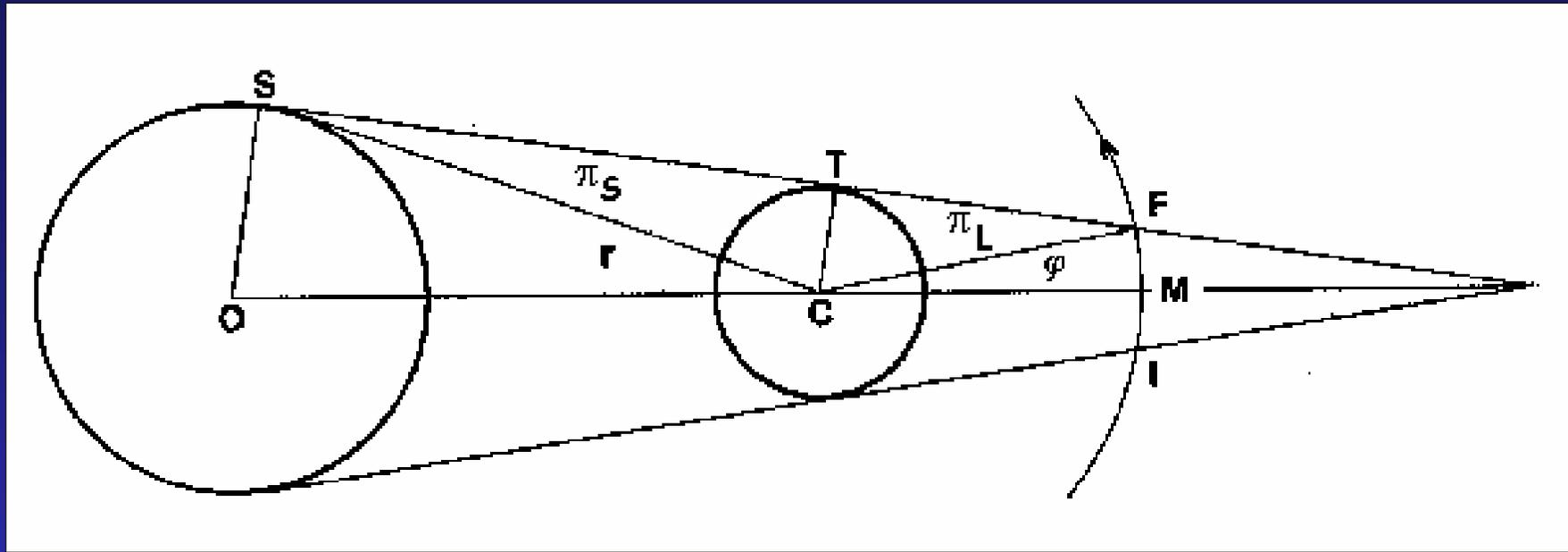
dalla quale si ricava che $\varphi = 40'$.

Poiché gli angoli $(r + \varphi)$ e $(\pi_S + \pi_L)$ sono supplementari dello stesso angolo SCF, si ha

$$(\pi_S + \pi_L) = (r + \varphi) = 16' + 40' = 56'.$$



Distanza del Sole e della Luna



I triangoli CTS e CTF sono rettangoli in T , si ha quindi: $\pi_S + \pi_L$

$$TC = CS \sin \pi_S \quad \text{e} \quad TC = CF \sin \pi_L.$$

CS è la distanza del Sole dalla Terra (la indichiamo con d_S) mentre CF è la distanza della Luna dalla Terra (la indichiamo con d_L).

Poiché gli angoli in gioco sono "piccoli" valgono le approssimazioni:

$$\sin \pi_S = \pi_S \quad \text{e} \quad \sin \pi_L = \pi_L.$$

Si ha quindi: $TC = d_S \cdot \pi_S$ e $TC = d_L \cdot \pi_L$. da cui segue: $d_S/d_L = \pi_L/\pi_S$.

Ipparco era a conoscenza del valore trovato da Aristarco per il rapporto d_S/d_L ($= 19$); si ottiene $\pi_L = 19 \cdot \pi_S$.

Ricordando che $\pi_S + \pi_L = 56'$ si ottiene:

$$\pi_S = \sim 3'; \quad \pi_L = \sim 53'.$$



Distanza del Sole e della Luna

Oggi sappiamo che la parallasse solare è $8,79''$ e perciò il valore trovato da Ipparco era in eccesso per un fattore circa 20; la parallasse della Luna invece era assai prossima al vero, che è $57'$, un errore quindi solo del 7%.

Il grande errore nel risultato è dovuto al valore dato da Aristarco per il rapporto fra le distanze del Sole e della Luna.

Conoscendo il raggio della Terra TC (vedi Eratostene) utilizzando:

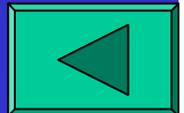
$$d_S = TC / \text{sen } \pi_S \quad \text{e} \quad d_L = TC / \text{sen } \pi_L$$

si ha:

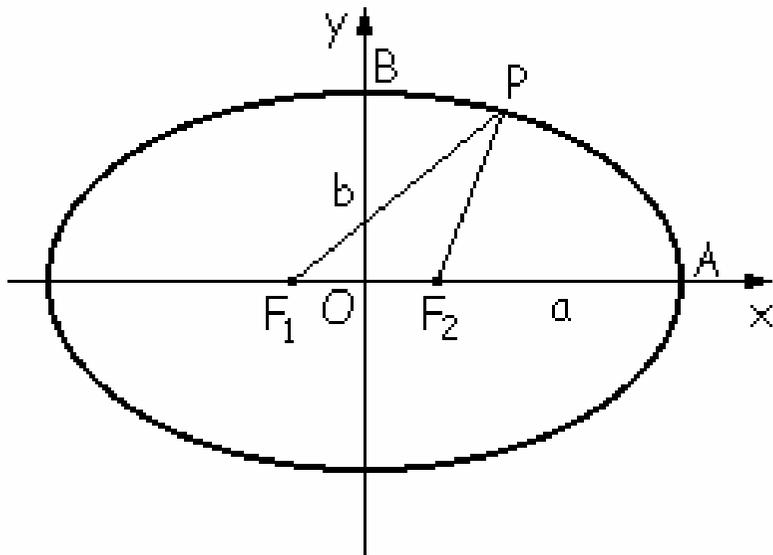
$$d_S \approx 7235000 \text{ km} \quad \text{e} \quad d_L \approx 410000 \text{ km}$$

La distanza del Sole corrisponde a circa 1100 volte il raggio terrestre; oggi sappiamo che è 23500 volte.

Per quanto l'errore sia notevole si ricavava che il Sole, apparendo di circa mezzo grado, doveva essere un globo 5 volte più grande in diametro del globo terrestre; risultato molto importante se si considera che in epoca successiva c'erano discussioni tra chi riteneva il Sole un immenso astro dominante il cosmo e chi un piccolo globo di fuoco entro l'atmosfera sovrastante la Terra piatta.

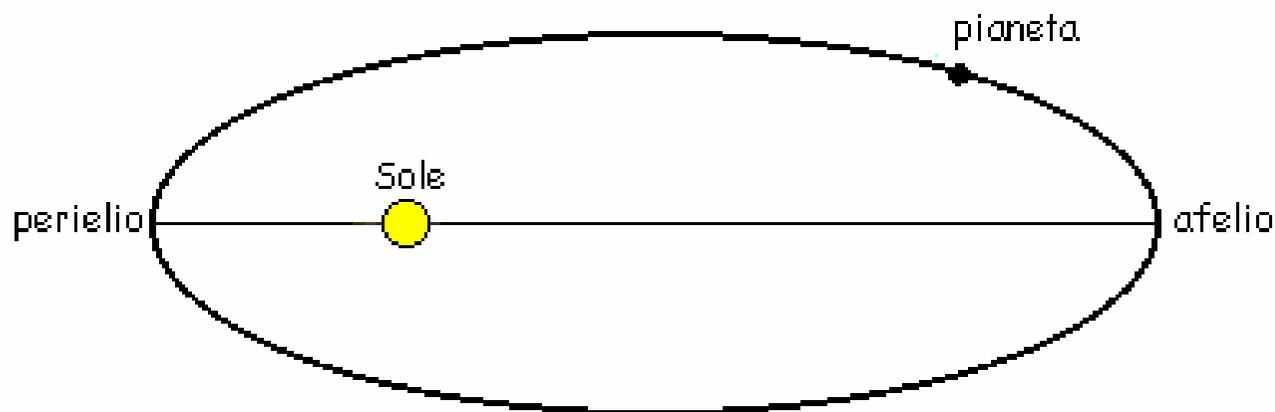


Prima legge di Keplero



L'ellisse è una curva algebrica che può essere definita come l'insieme dei punti P del piano per i quali è costante la somma delle distanze da due punti fissi detti fuochi (F_1 e F_2).
I segmenti OA e OB sono detti rispettivamente semiasse maggiore a e semiasse minore b .

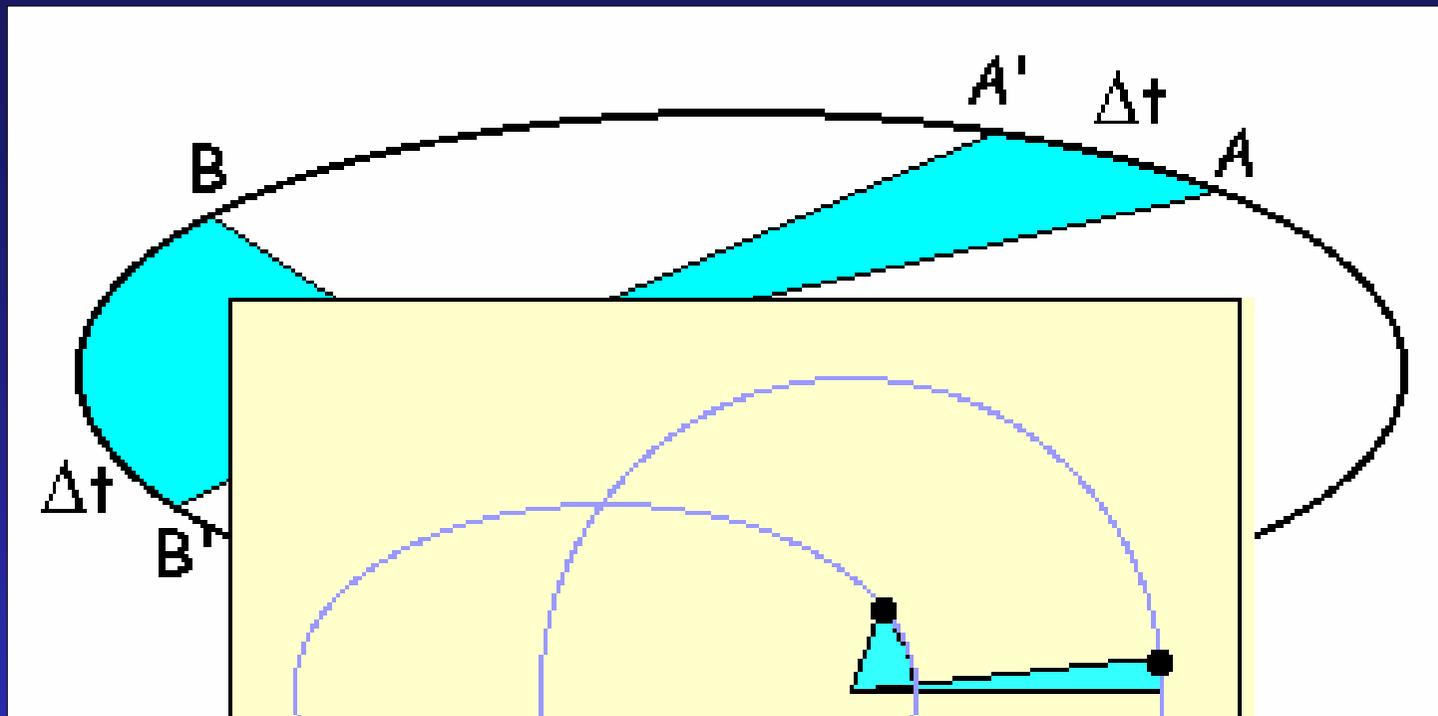
La distanza di un pianeta dal Sole non è costante.



Keplero chiamò **perielio** (dal greco peri = intorno e helios = Sole) il punto di minima distanza e **afelio** (dal greco apo = lontano e helios = Sole) il punto di massima distanza.



Seconda legge di Keplero o legge delle aree



Da questa legge si deduce che i pianeti orbitano attorno al Sole non è uniforme, ma è proporzionale alla radice quadrata della loro distanza dal Sole.

Poiché le aree sono uguali, si deduce che il tratto di orbita AA' è minore del tratto BB' per cui la velocità in AA' è minore di quella in BB' .

orbitano attorno al Sole non è uniforme, ma è proporzionale alla radice quadrata della loro distanza dal Sole.

vettore in tempi uguali ne consegue che il tratto di orbita AA' è minore del tratto BB' per cui la velocità in AA' è minore di quella in BB' .



Terza legge di Keplero

$$\frac{T^2}{a^3} = \text{costante}$$

T è il tempo che un pianeta impiega a ruotare attorno al Sole e a è il semiasse maggiore dell'orbita.

La terza legge è di una categoria diversa rispetto alle altre due perché non è riferita ad un solo pianeta, ma mette in relazione i pianeti tra loro.

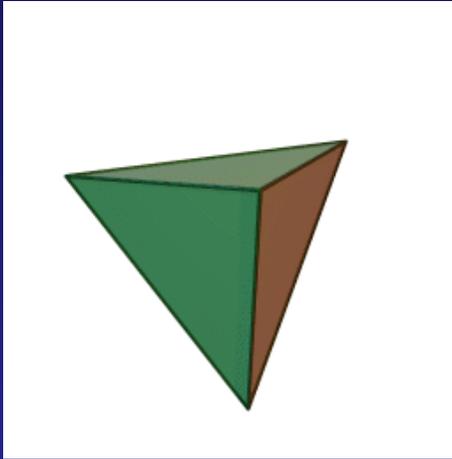
Utilizzando la legge della Gravitazione Universale di Newton si ricava il valore della costante; la legge è data quindi da:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_S}$$

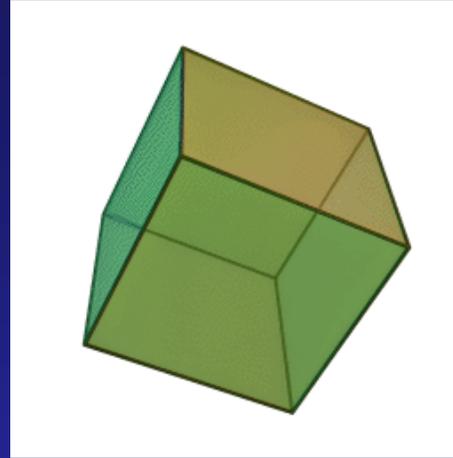
G ($=6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$) è una costante e M_S è la massa del Sole.



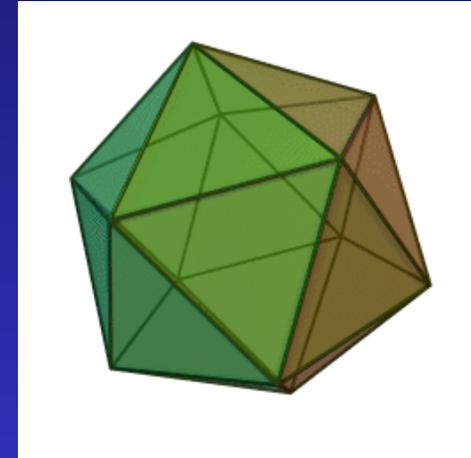
SOLIDI PLATONICI



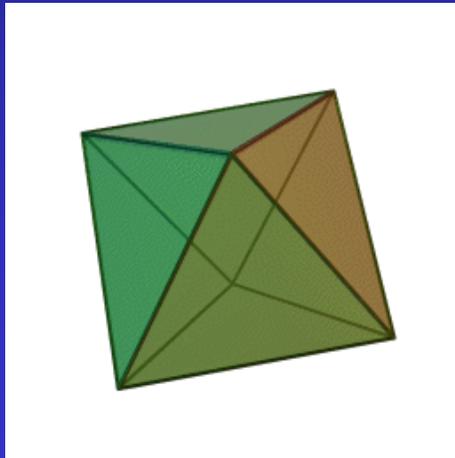
Tetraedro
(4 triangoli equilateri)



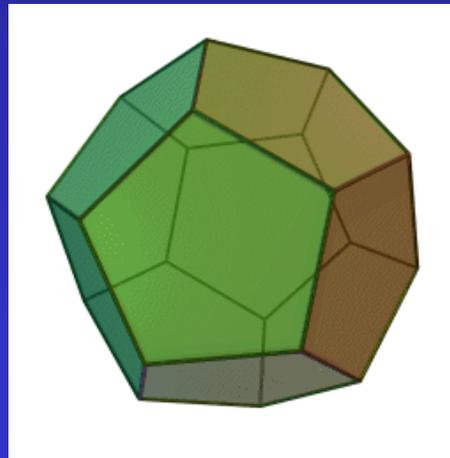
Cubo
(o esaedro 6 quadrati)



Icosaedro
(20 triangoli equilateri)



Ottaedro
(8 triangoli equilateri)



Dodecaedro
(12 pentagoni)

