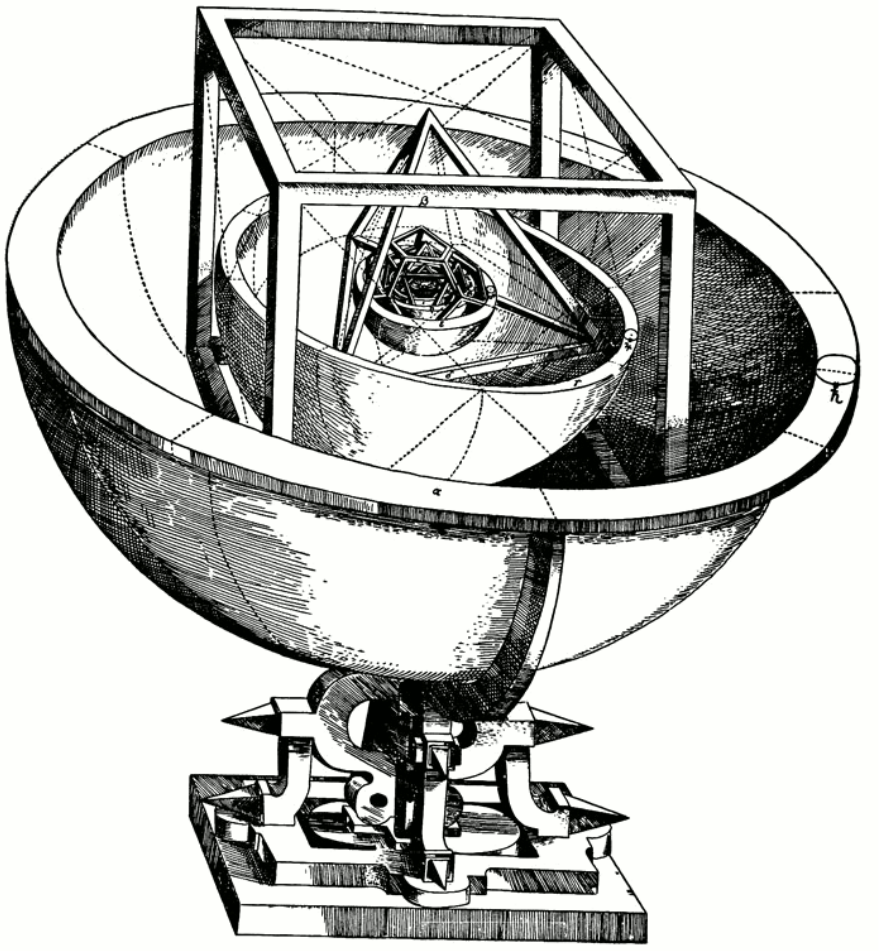
LICEO SCIENTIFICO STATALE “G. GALILEI”
MACERATA



Modello del sistema solare dal *Mysterium Cosmographicum* di Keplero

# CENNI DI STORIA DELL’ASTRONOMIA

## dai primordi a Newton

Prof. Angelo ANGELETTI

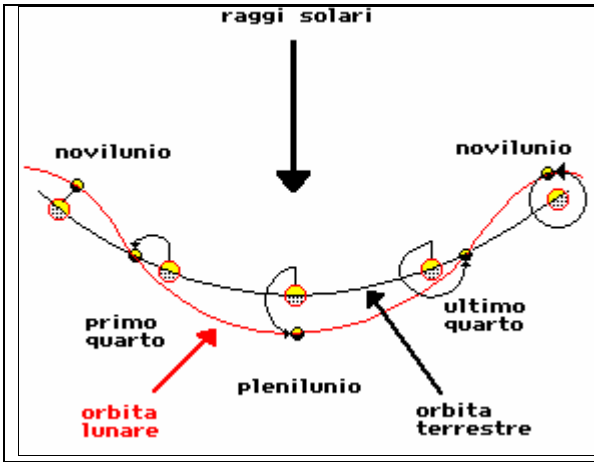
06022011

# 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 stati datati al 3100 a.C.

Fin dai tempi più remoti l'uomo ha rivolto il suo sguardo con meraviglia verso il cielo stellato. Il desiderio di conoscere il segreto del moto dei corpi celesti ha sempre fatto parte dei sogni dell’umanità, e non soltanto degli scienziati.

L'interpretazione del moto dei corpi celesti non risponde però solo ad esigenze di carattere metafisico, ma anche a ragioni pratiche ben precise. Tutte le attività umane sono più o meno direttamente collegate ai moti periodici dei corpi celesti (Sole, Luna, ecc.), che da millenni continuano a scandire il nostro vivere quotidiano.



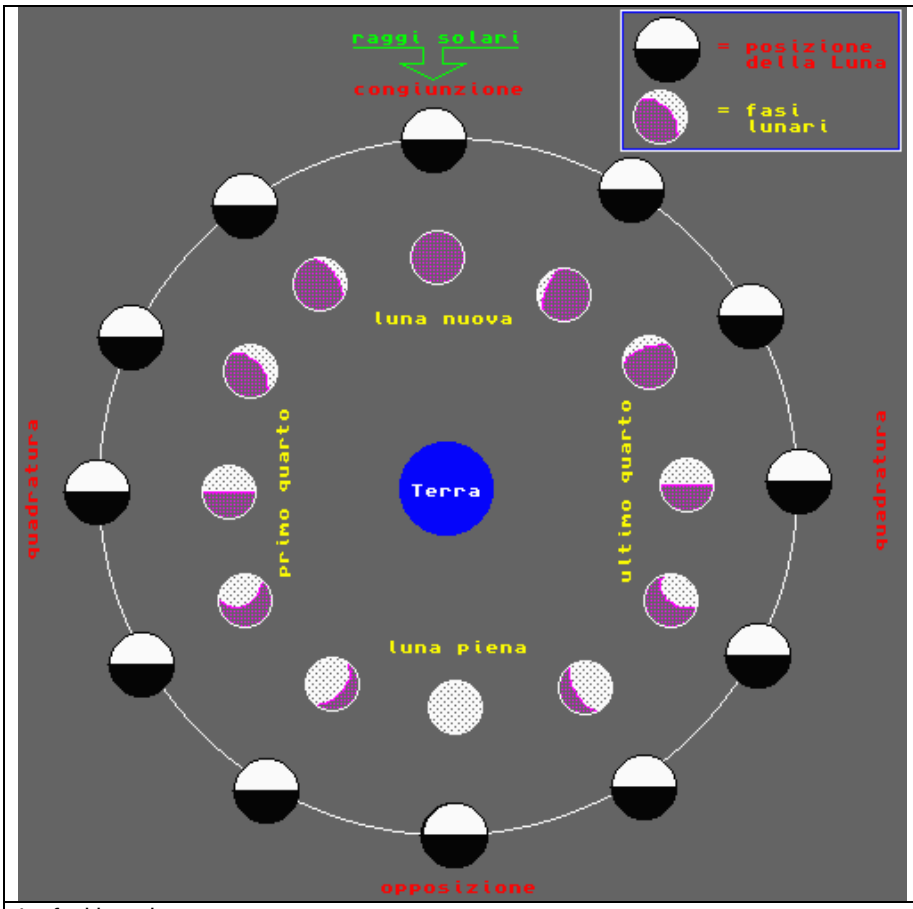

Le fasi lunari

Non stupisce quindi il fatto che tutte le grandi civiltà antiche abbiano tenuto in grandissimo conto lo studio dell'astronomia, anche se in verità questo termine non assumeva presso questi popoli lo stesso significato che noi oggi gli attribuiamo. Nella concezione di tutti i popoli dell'antichità questa scienza è stata strettamente legata alla tradizione religiosa, tanto che avvenimenti dell'una o dell'altra si confondevano tra di loro. Tuttavia l’impulso dato all'astronomia da sacerdoti ed astrologi è stato molto utile per il suo progresso generale. Un tempo, infatti, non esisteva la figura dell'astronomo come *scienziato*, ma erano soprattutto i sacerdoti che si occupavano dello studio degli astri onde trarne auspici e predire il futuro.

L'origine dell'astronomia è avvolto nel mistero: a poco valgono i tentativi di localizzarla in questo o quel luogo. Si conoscono vari centri di cultura astronomica sparsi in tutto il mondo, ognuno dei quali riflette gli usi, i costumi e le tradizioni di ogni singolo popolo. Molti popoli hanno sviluppato autonomamente le loro esperienze astronomiche. La maggior parte dei loro sforzi è stata dedicata al computo del tempo utilizzando le lunazioni[1], il sorgere e il tramontare del Sole e, a volte (anche se raramente) i movimenti dei pianeti. Moltissimi popoli antichi, distribuiti in diverse regioni della Terra ed in diverse epoche, utilizzavano calendari con i mesi lunari, definiti dall'intervallo di tempo tra due noviluni[2] o due pleniluni[3].

[1] Una lunazione è un periodo di tempo durante il quale la luna attraversa tutte le sue fasi, dura circa 29 giorni.
[2] Il novilunio viene detto anche Luna Nuova, la fase in cui la Luna ci si presenta completamente oscura.

Oltre al computo del tempo, anche il problema dell'orientamento ha interessato le antiche civiltà; un problema facilmente risolubile conoscendo i moti del Sole e la posizione delle Stelle. Il punto cardinale Est era ritenuto da molti sacro proprio per il fatto che in quella direzione sorge il Sole; molti templi e molte chiese sono orientati lungo la direzione Est-Ovest.



Le fasi lunari

È ben nota l'importanza che da sempre ha avuto il Grande Carro, per la sua vicinanza al polo celeste nord e per la sua utilizzazione nella ricerca della Stella Polare da parte degli antichi navigatori del Mediterraneo. Per potersi orientare con le stelle occorreva conoscerle, ed è per questo che si cominciò a riunirle in gruppi, le costellazioni, ai quali vennero dati nomi legati ai loro miti, alle loro leggende e ai loro dèi.

Poche notizie si hanno 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 Tigri ed Eufrate

Nella pianura del Tigri e dell'Eufrate vissero numerosi popoli che diedero grande impulso all'astronomia: Sumeri, Accadi, Caldei, Babilonesi e Assiri. Sappiamo che già nel III millennio a.C. gli Accadi raggrupparono gli astri più brillanti del firmamento in costellazioni, che poi giunsero sino al mondo greco. Tra queste troviamo le due Orse, Orione e Cassiopea.

Le notizie a noi pervenute sui Caldei sono poche ed incomplete. Alcune tavolette di argilla, risalenti al 4.000 a.C., ci fanno supporre che i Caldei rappresentassero la casta sacerdotale dei Babilonesi ed è quindi a loro che erano affidate le mansioni di osservazione del cielo soprattutto per fini astrologici e religiosi.

Un periodo importante per lo sviluppo dell'astronomia nella pianura fra il Tigri e l'Eufrate è intorno al 1.800 a.C., quando incomincia l'ascesa di Babilonia e ha inizio la dinastia di re Hammurabi. Gli astronomi dell’epoca iniziarono a calcolare la rotazione apparente diurna del cielo.

Una prima spiegazione di questo moto ci viene fornita da un antico testo datato fra il 1.400 e il 1.000 a.C.: qui troviamo il cielo diviso in tre *vie*, dedicate a tre diverse divinità. Lungo ciascuna via, dodici stelle divinità indicavano i mesi dell'anno con il loro sorgere eliaco[4].

[3] Il plenilunio viene detto anche Luna Piena, la fase in cui la Luna ci si presenta completamente illuminata.
[4] La loro prima levata insieme al Sole.

Fra le tavolette di argilla ritrovate negli scavi archeologici ne sono state rinvenute alcune raffiguranti il cielo stellato, su cui erano tracciate le figure di alcune costellazioni. Il calendario babilonese era regolato dal novilunio, con 12 mesi lunari in un anno solare ed un tredicesimo mese in aggiunta di tanto in tanto[5], 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*.

Tavoletta babilonese "Mulapin" con catalogazione delle costellazioni circumpolari.

Sempre in quel periodo (a cavallo del I millennio a.C.), iniziarono le osservazioni sistematiche della volta celeste. Particolare attenzione era riservata al pianeta Venere, del quale veniva annotata la posizione in cielo sia al mattino sia alla sera. Gli astronomi, inoltre, sapevano che le eclissi di Sole potevano verificarsi solo al novilunio, quando la Luna si trova fra noi e il Sole. Erano anche a conoscenza del fatto che le eclissi di Luna potevano verificarsi solo al plenilunio, quando la Terra si trova fra il Sole e la Luna.

Del periodo che va dal VII al VI secolo a.C., durante il regno di Nabucodonosor II (il distruttore di Gerusalemme nel 587 a.C.), va anche segnalato un almanacco, all'interno del quale grande attenzione viene prestata ai movimenti della Luna e dei pianeti, e dove vengono annotate le loro congiunzioni con le stelle fisse. È di questo periodo la prima suddivisione del cerchio in 360 gradi, come conseguenza del cammino del Sole nel cielo.

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. Esse 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 venivano conservati nei templi come una sorta di ex-voto per avere la benedizione dei vari dei per un buon raccolto.

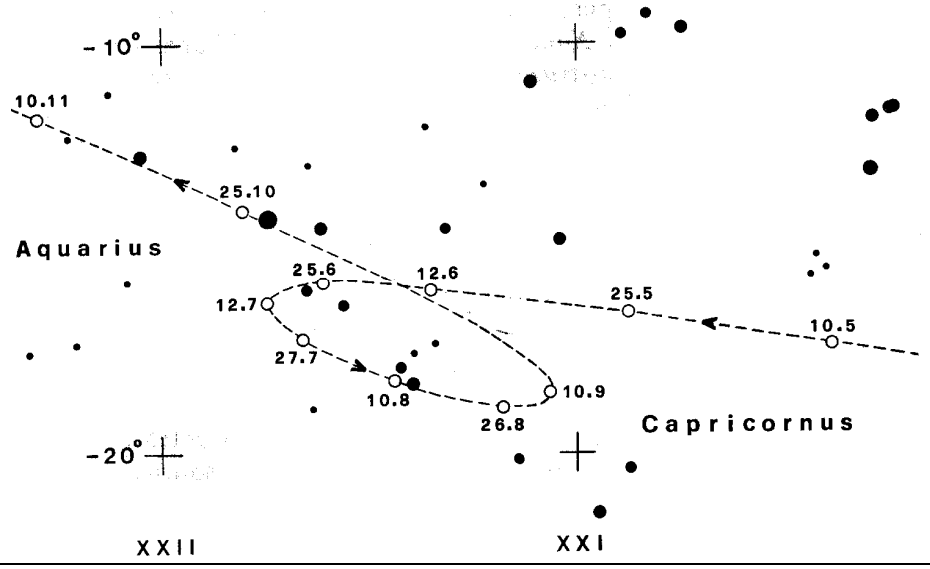
Una maggiore precisione nelle osservazioni comporta migliori metodi di calcolo e migliori previsioni di fenomeni celesti; la prima registrazione di una eclisse è datata il 19 marzo 721 a.C.. Questa ed altre osservazioni di eclissi lunari vengono usate ancor oggi per i calcoli sul moto della Luna. A tale proposito ai Babilonesi si attribuisce la scoperta del *Ciclo di Saros*, una successione di 223 lunazioni. Ad ogni ciclo di Saros, ritornando la Luna e il Sole nella stessa posizione, le eclissi si ripetono nello stesso ordine del precedente.

Per quel che riguarda i pianeti, eseguirono osservazioni dei loro moti tra le stelle, studiandone in dettaglio le stazioni[6] e le retrogradazioni[7] lungo quella che essi chiamavano *via del Sole*, il nostro Zodiaco. In antiche tavolette si trovano spesso le posizioni dei cinque pianeti visibili ad occhio nudo[8], determinate rispetto alla Luna, alle stelle o al Sole.

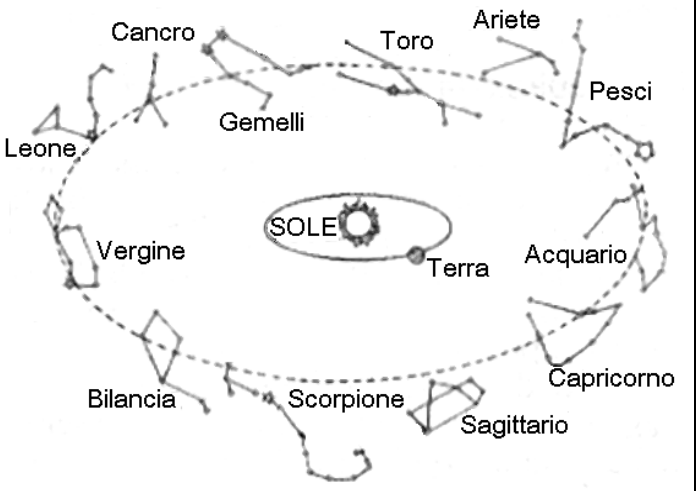
Veniva poi data una enorme importanza astrologica alle comete, alle meteore ed ai bolidi: ogni volta che apparivano in cielo venivano seguiti con molto interesse.

Pur essendo il loro studio esclusivamente rivolto a previsioni astrologiche, ai Caldei 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 comunque non giunsero mai ad una conoscenza approfondita della geometria e della trigonometria, che forse li avrebbe portati a soluzioni più rigorose dei vari problemi astronomici.

[5] In questo c'è una notevole somiglianza con il calendario cinese, a testimonianza di contatti tra le due civiltà.
[6] Istanti in cui i pianeti sembravano fermare il loro moto per poi invertirlo
[7] Il moto di un pianeta tra le stelle è generalmente da ovest verso est, ma in alcuni periodi lo inverte.
[8] Sono Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno.




Traiettoria apparente di Marte in cielo fra il 10 maggio ed il 10 novembre 1971 e cioè attorno all'epoca dell'opposizione (il punto in cui un pianeta esterno arriva più vicino alla Terra), che si verificò il 10 agosto. Come si vede, il 12 luglio il pianeta fu in *stazione*, cioè fermo, poi apparve muoversi di *moto retrogrado* (da est verso ovest) fino al 12 settembre, epoca della seconda grande *stazione*, ed infine riprese il *moto diretto* (da ovest verso est).




Lo Zodiaco è una fascia immaginaria nel cielo che si estende per 9° circa da entrambi i lati dell'eclittica[9]. 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 (vedi pag. 10) 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.

## Gli antichi Egizi

Per gli antichi Egizi l'universo era sagomato come un grande parallelepipedo; sulla faccia rivolta verso il basso si trovava la Terra, mentre su quella rivolta verso l'alto si trovava il cielo. Questo era costituito da una mucca appoggiata con le zampe sui quattro angoli della Terra, o anche da una donna appoggiata sui gomiti e sulle ginocchia. Successivamente divenne il coperchio metallico di una scatola.

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 astri del cielo erano immaginati come lampade sospese alla volta celeste, oppure spostate dagli dèi. Per quanto riguarda i pianeti, essi navigavano sulle proprie imbarcazioni lungo canali che fluivano dalla Via Lattea, considerata la controparte celeste del fiume Nilo.

[9] Piano dell'orbita della Terra intorno al Sole. Dal nostro punto di osservazione sulla Terra, il piano dell'eclittica è tracciato dal moto apparente del Sole in cielo (relativamente allo sfondo delle stelle) nel corso di un anno. Le orbite di tutti i pianeti, ad eccezione di Plutone, sono molto vicine al piano dell'eclittica in altre parole, quasi tutti i pianeti si trovano più o meno nello stesso piano.

Una rappresentazione della dea del cielo NUT

La spiegazione delle fasi lunari era la seguente: 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. Le eclissi di Sole erano invece causate da un grande serpente che lo ingoiava.

La Via Lattea è quella fascia lattiginosa di stelle che attraversa il cielo notturno, segnando il piano della Galassia (un insieme di circa 100 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, realizzata da Alfredo Trombetta dell’Associazione Astrofili “Crab Nebula“, è stata ripresa la zona verso il centro (nella costellazione del Sagittario). Le zone chiare sono stelle lontane, quelle scure sono nubi di gas e polveri fredde.

La storia degli egiziani ebbe inizio intorno al 3.400 a.C. quando Menes, re dell'Alto Egitto, conquistò il Basso Egitto. La cosiddetta *epoca aurea* continuò fino al XII secolo a.C. In ventitré secoli di storia tutte le branche della scienza ebbero il tempo di svilupparsi e prosperare: fra queste,

naturalmente, anche l'astronomia. Al contrario dei Babilonesi, gli Egizi utilizzavano un calendario solare, ossia basato sul cammino della Sole sulla volta celeste, lungo il cerchio dell'eclittica. L'anno egizio iniziava con la levata eliaca della stella Sirio (la stella più luminosa visibile dalla Terra) la quale coincideva con le piene del Nilo che portavano nei campi il limo che li rendeva fertili. L'anno egizio era formato da dodici mesi di trenta giorni, più cinque supplementari.

Lo zodiaco circolare del tempio di Hathor a Dendera è l'unica mappa completa del cielo antico che abbiamo e che 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.

Da buoni osservatori del cielo gli Egizi si erano accorti dei ritardi nella levata di Sirio (dovuti alla processione degli equinozi: vedi scheda pag. 10), e avevano calcolato un ciclo completo di 1460 anni perché l'astro più luminoso del firmamento sorgesse di nuovo insieme con il Sole in un preciso giorno[10]. Questo ciclo era detto *anno sotiaco* da Sothis, nome della stella Sirio. Va ricordato inoltre che il periodo della levata eliaca di Sirio (d'estate) veniva indicato con l'appellativo di *canicola*, successivamente passato ad indicare il caldo torrido della stagione della stella del Cane (Sirio è nella costellazione del Cane Maggiore).

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. Nelle ore notturne veniva anche utilizzato il sistema dei *decani*: si divideva l'eclittica in trentasei zone di circa dieci gradi ciascuna, associate a stelle singole o gruppi di stelle, all'interno delle quali si potesse scorgere la levata del Sole, e che venivano quindi attraversate dal Sole stesso durante l'anno. Il Sole, dieci giorni dopo essere sorto in un decano, passava in quello successivo e, conseguentemente, il sorgere del primo decano segnalava che ci si trovava nell'ora decanica prima dell'alba.

In grande considerazione era poi tenuta l'ora decanica rappresentata dalle stelle della costellazione del Leone, che si verificava al momento della già citata levata eliaca di Sirio. Questo orario, infatti, segnalava l'inizio dell'anno e delle piene del Nilo.

## I Greci

Parlare di astronomia presso gli antichi Greci vuol dire percorrere alcune delle tappe fondamentali di questa scienza, soprattutto nella costruzione della struttura dell'Universo.

I primi greci ritenevano che la Terra fosse costituita da un disco circolare circondato dal grande Fiume Oceano, in perpetuo corso, e che sopra vi fosse la conca emisferica del cielo. Nelle opere di Omero appare chiaramente questo modello cosmologico ed è probabile che fosse universalmente accettato fino al VI secolo a.C.

Questo modello pone immediatamente il problema di cosa accade alle stelle, al Sole e agli altri pianeti quando spariscono all'orizzonte occidentale.

Anticamente i greci ritenevano 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.

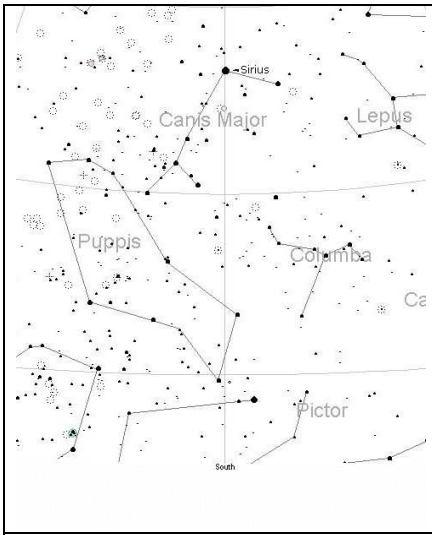
[10] Oggi sappiamo che questo periodo è molto più lungo, è circa 26 000 anni ed è dovuto alla precessione degli equinozi.

Un altro problema legato ad una Terra piatta è la spiegazione della diversa altezza delle stelle. Se guardiamo la stessa stella quando raggiunge la sua massima altezza a sud, osserviamo che questa altezza cambia a seconda del posto da cui la si osserva: più si va a nord e più è bassa sull’orizzonte.

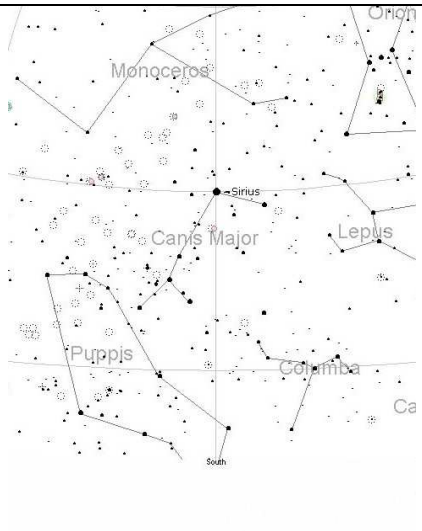
Nel 600 a.C. Talete di Mileto, a capo della scuola ionica, insegnava che la Terra era sferica, che la Luna è visibile solo poiché riflette i raggi solari ed affermava anche che le stelle del cielo erano fatte di fuoco.

Della scuola ionica fece parte anche Anassimandro, che completando gli studi del predecessore fu il primo a fare delle osservazioni celesti utilizzando strumenti come lo gnomone (pare da lui stesso inventato).

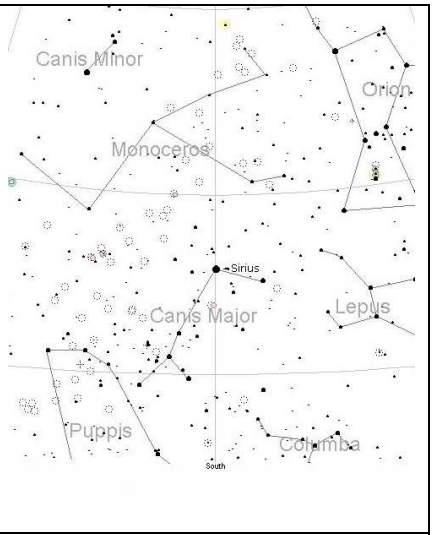
La Terra piatta dei primi greci



Altezza della stella Sirio vista dal Cairo.

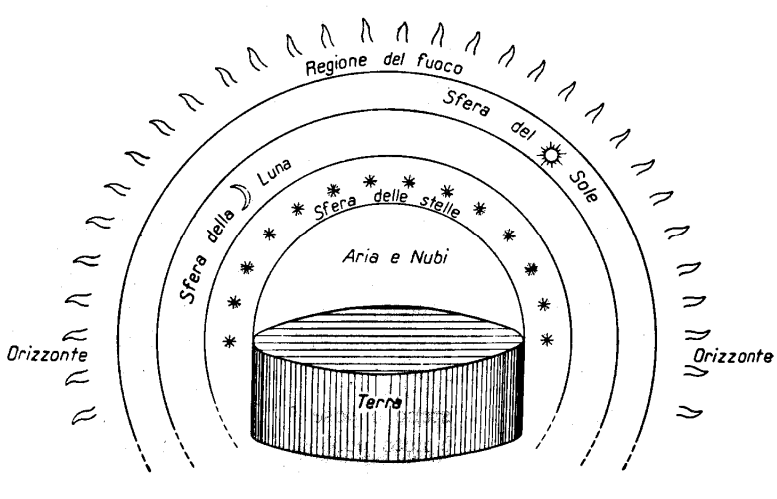


Altezza della stella Sirio vista da Macerata.



Altezza della stella Sirio vista da Londra.

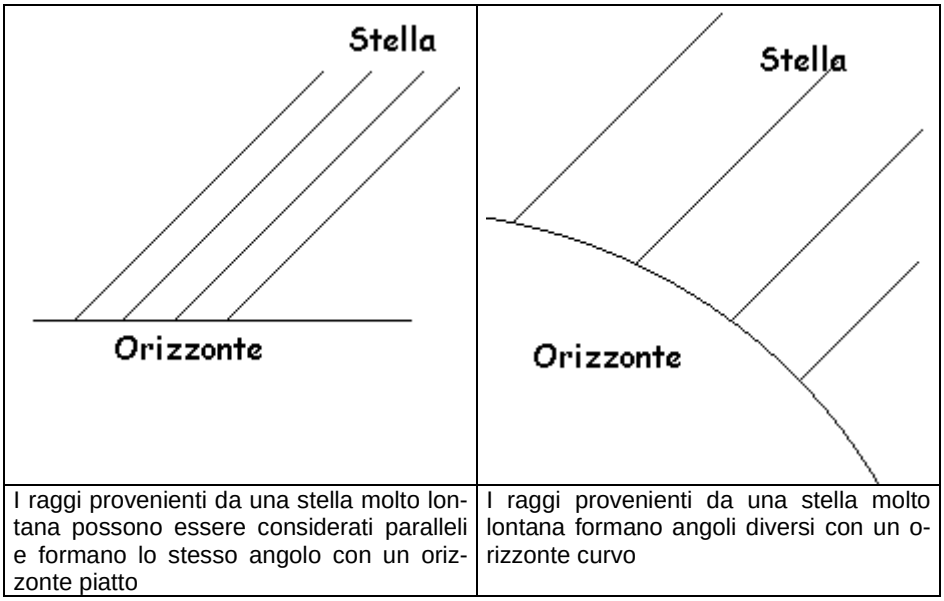
Il fatto che a diverse latitudini le stelle visibili non siano le stesse portava a distruggere la concezione di una Terra piatta. Infatti, dall'Egitto erano chiaramente visibili stelle che non potevano assolutamente essere viste dalla Grecia e, viceversa, alcune stelle circumpolari (ad esempio dell'Orsa Maggiore), che non tramontavano mai in Grecia, tramontavano se osservate dall'Egitto. Ciò portava necessariamente a presupporre una qualche curvatura della superficie terrestre.



L’Universo cilindrico di Anassimandro

Anassimandro immaginò che la Terra fosse curva. Egli riteneva però che la sua curvatura andasse solo nella direzione nord-sud. La Terra aveva quindi una superficie cilindrica.Questa ipotesi, oltre a spiegare la differenza di visibilità delle stelle tra la Grecia e l'Egitto, era anche adatta a conservare l'antico mito secondo cui il regno dei morti si trova molto lontano verso occidente.

Intorno al V secolo a.C., nel centro della cultura mondiale di quel tempo, per mano di Pitagora nasce e si sviluppa l'omonima scuola 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.




| | |
|---|---|
| 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 |

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. Ora cominciava ad essere immaginabile che le stelle e gli altri corpi celesti potessero continuare a percorrere orbite circolari sotto la Terra anche dopo il loro tramonto.

Della scuola di Pitagora era anche Filolao di Crotone, che verso la fine V secolo a.C. ipotizza una prima struttura dell'Universo, con 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. Il fuoco centrale è nascosto ai nostri occhi dalla massa della Terra stessa, sempre rivolta dalla parte opposta. 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, pur essendo molto fantasiosa, possedeva il pregio di mettere in evidenza il moto della Terra. La Terra non è immobile e 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.

Né Platone, né tantomeno Aristotele presero in considerazione le idee di Filolao, che non ebbero quindi seguito, e nonostante Eraclide un secolo dopo riprendesse in qualche modo le sue teorie, con Ipparco e Tolomeo la Terra divenne "definitivamente" immobile.

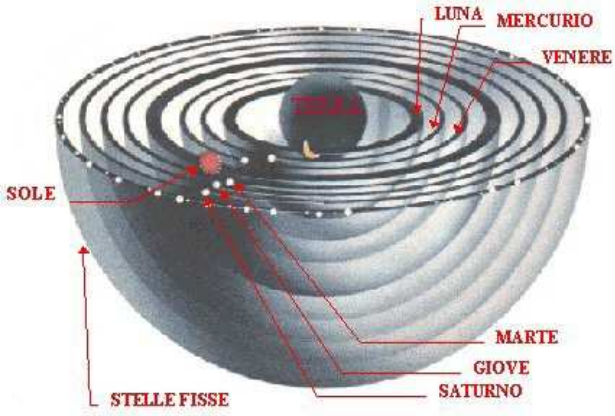
Fra il 429 ed il 347 a.C. appare una figura che lascerà una notevole traccia del suo passaggio: Platone. Tra le allusioni astronomiche ritrovate nei suoi scritti si possono rintracciare i primi accenni a epicicli e deferenti, ai moti della Luna e dei pianeti ed alla materia che componeva le stelle. Sostenne, con una dimostrazione filosofica, che la Terra fosse sferica: la Terra è sferica perché la sfera è la forma più perfetta per un corpo, possiede la massima simmetria; perciò la Terra, che sta al

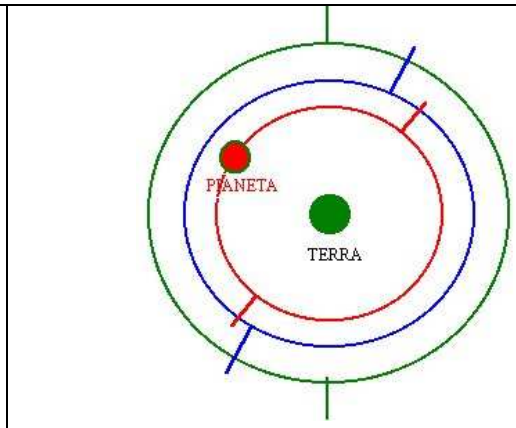
centro dell'universo, deve essere sferica. Nonostante l'inconsistenza di questa dimostrazione l'idea della sfericità della Terra fu universalmente accettata, proprio per la grande fama di Platone. Ecco come il grande filosofo descrive, nel *Timeo*, l'Universo:

"*...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, quello dei sette moti. Dunque fece che esso girasse uniformemente, circolarmente, senza mutare mai di luogo....; e così stabilì questo spazio celeste rotondo e moventesi in rotondo*".

Il problema maggiore di un tale sistema (*geocentrico*) è quello di spiegare il moto dei pianeti e le loro variazioni di luminosità e di velocità nel tempo.

Platone ideò un sistema geocentrico, a sfere concentriche ognuna delle quali conteneva un pianeta, il Sole e la Luna. Il sistema in seguito fu perfezionato da Eudosso e ripreso da Aristotele. Eudosso da Cnido (409-356 a.C.) per primo tentò di risolvere in modo meccanico il problema dei movimenti irregolari dei pianeti. Per dare risposta alle sue teorie egli si recò a studiare in Egitto, dove i sacerdoti custodivano una innumerevole serie di cronache su antiche osservazioni celesti. Riuscì nel suo intento, dotando il sistema planetario di una serie di sfere motrici (in tutto 27).




Secondo Eudosso, il modello delle sfere era molto più complesso di quello ipotizzato da Platone: soltanto le stelle fisse possedevano un'unica sfera. La Luna e il Sole, ad esempio, possedevano ben tre sfere ciascuno. Nel disegno a fianco, si vede un corpo celeste che si trova inserito in un sistema di tre sfere legate tra loro da vincoli di rotazione. Infatti la sfera interna, sulla quale è fissato il corpo celeste, ruota su se stessa attorno un asse vincolato alla seconda sfera, la quale a sua volta ha l'asse di rotazione vincolato alla terza sfera, più esterna.
Solo in questo modo si potevano spiegare (in parte) i complessi movimenti dei pianeti. Con questo modello Eudosso non spiegava solo i moti retrogradi dei pianeti, ma anche l'inclinazione della loro orbita rispetto a quella terrestre.

Il sistema di universo costruito da Eudosso e perfezionato da Callippo qualche anno più tardi, con l'aggiunta di alcune sfere per Mercurio, Venere, Marte, la Luna ed il Sole, fu ripreso anche da Aristotele; egli, a dispetto degli anni (quasi 1800) in cui le sue teorie resteranno valide per tutti o quasi, non è da considerare un vero e proprio astronomo.

Aristotele aveva diviso il cosmo in due parti. La prima, quella oltre la Luna, era costituita da sfere concentriche ove erano incastonati i pianeti e le stelle, composti di una quintessenza incorruttibile ed immutabile ed animati dall'unico moto che incarna la perfezione, il moto circolare uniforme; la seconda, sublunare, era costituita dal mondo caotico e corruttibile e formata da quattro sfere (Terra, Acqua, Aria e Fuoco) in cui l'ordine era solo una tendenza per ogni cosa e dove era possibile un solo moto naturale, quello rettilineo verso il basso. Al di là della più esterna delle sfere, quella delle stelle fisse, Aristotele collocava il *motore* di tutto l'Universo, che trasmetteva il moto con una serie di sfere di collegamento (per un totale di 55).

Dopo Aristotele la teoria di Eudosso fu scartata, perché non poteva spiegare un fatto fondamentale: la variazione di luminosità dei pianeti. Marte, ad esempio, quando è più vicino alla Terra appare notevolmente più luminoso, e viceversa. Secondo la teoria di Eudosso, invece, Marte e gli altri pianeti stanno sempre alla stessa distanza dalla Terra.

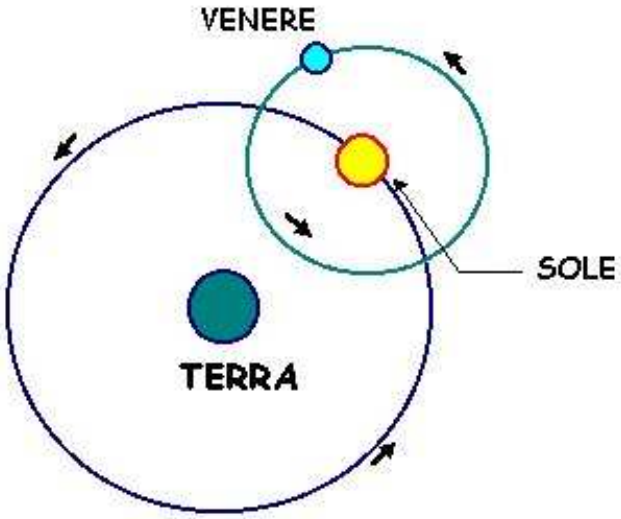
Proprio da considerazioni di questo tipo Eraclide Pontico (390-310 a.C.) giunse a ipotizzare quella teoria che verrà poi chiamata da Ipparco e Tolomeo teoria degli epicicli.

Venivano spiegati in questo modo, sia i moti retrogradi (a causa del moto dell'epiciclo, nessun pianeta appare ruotare attorno alla Terra a velocità uniforme e sempre da ovest verso est, ma agli occhi di un osservatore terrestre, esso percorre, a ritmi regolari, anche un moto retrogrado - da est verso ovest) sia le variazioni di luminosità (il pianeta si avvicina e si allontana dalla Terra).

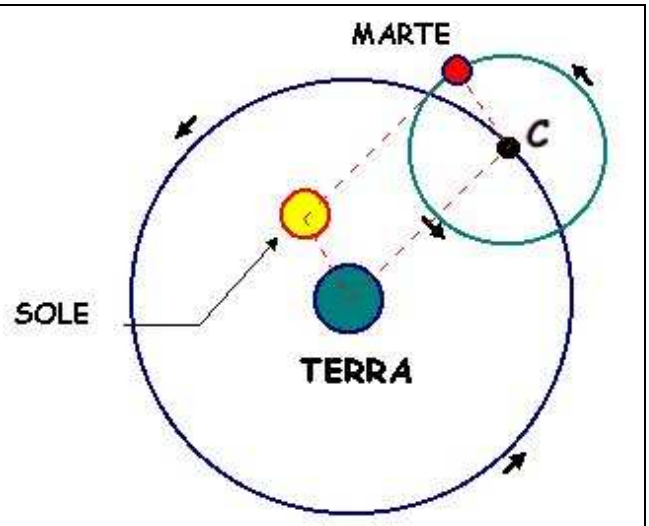
Le ipotesi di Eraclide Pontico sono molto importanti soprattutto perché furono le prime a dare una centralità al Sole che, pur girando ancora attorno alla Terra, diviene il centro delle orbite di Mercurio e di Venere. Si tratta di concezioni che, curiosamente, anticipano di diciannove secoli il sistema ideato da Tycho Brahe.

Eraclide inoltre riprese e sviluppò le teorie di Filolao, abbandonando l'idea del fuoco centrale e facendo invece ruotare la Terra attorno al suo asse.

L'idea della rotazione terrestre ebbe, purtroppo, scarso seguito. Infatti con Ipparco e Tolomeo (II sec. a.C.) la grande concezione di Eraclide decadde definitivamente e di nuovo si pensò che fosse la volta celeste a muoversi. Secondo Tolomeo, infatti, se fosse stata la Terra a muoversi un oggetto lanciato in aria avrebbe dovuto ricadere più indietro.




La teoria degli epicicli prevede per un pianeta interno, come ad esempio Venere, un sistema di questo tipo. Il Sole ruota attorno alla Terra e Venere, a sua volta, ruota attorno al Sole. Venere quindi esegue un piccolo "ciclo" che si trova su un'orbita più grande. (Il termine "epì" in greco significa "sopra")



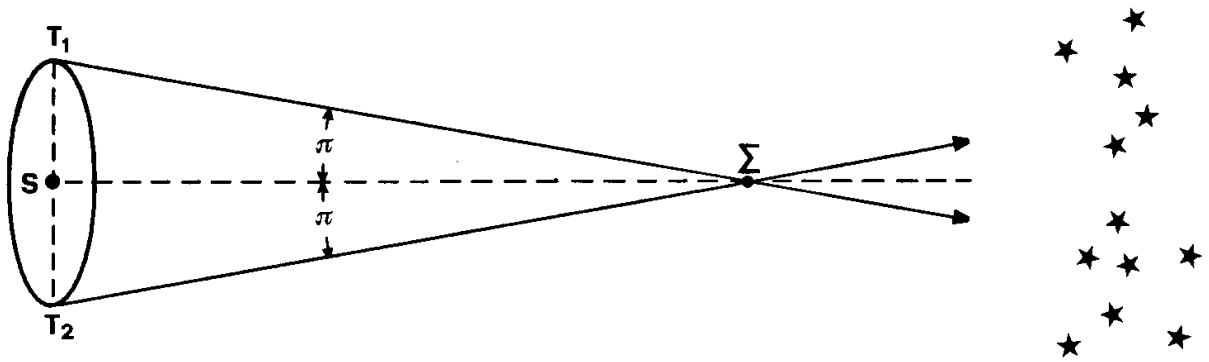

Per un pianeta esterno, come ad esempio Marte, le cose si complicano: il pianeta ruota attorno ad un centro C con lo stesso periodo di rotazione del Sole attorno alla Terra e, nello stesso tempo, il centro C ruota attorno alla Terra con lo stesso periodo di rotazione di Marte attorno al Sole. Non si sa con precisione se la spiegazione dell'orbita di Marte sia propria di Eraclide o se si tratta di una elaborazione di un pitagorico a lui vicino.

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. Siamo molto vicini alla teoria eliocentrica attuale. Aristarco stesso 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.

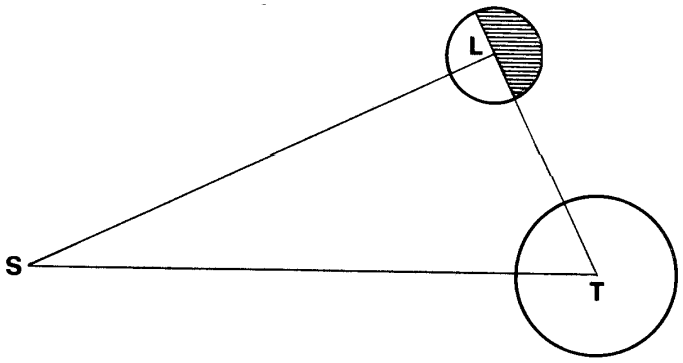
Inoltre Aristarco capì che se fosse stata la Terra a girare attorno al Sole le stelle avrebbero dovuto essere lontanissime. Infatti il cielo stellato, nel corso dell'anno, non subisce variazioni di parallasse e quindi l'orbita della Terra intorno al Sole doveva essere davvero minuscola rispetto alla dimensione della sfera delle stelle fisse.

La teoria eliocentrica di Aristarco, che era la naturale conseguenza delle concezioni di Eraclide Pontico, non venne capita nell'Antichità e non ebbe quindi sviluppi, ma le intuizioni di Aristarco non si fermavano qui. Egli definì un metodo molto ingegnoso per misurare le distanze della Luna e del Sole. Giunse a risultati molto inferiori alla realtà, ma non a causa di errori teorici. Questi risultati ebbero una notevole utilità per cominciare a comprendere gli ordini di grandezza del siste-

ma solare. Si tratta del metodo della dicotomia lunare (dal greco διχοτομια = diviso in due metà).




La parallasse è lo 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 Σ viene vista in due posizioni diverse da $T_1$ o da $T_2$, punti diametralmente opposti nell'orbita della Terra attorno al Sole. Le stelle più vicine hanno angolo di parallasse π dell'ordine dei decimi di secondo d'arco, quantità troppo piccola per essere rilevata a quell'epoca. Oggi scriviamo: $tg\pi = \frac{\overline{ST_2}}{\overline{S\Sigma}}$. Inoltre si definisce parsec (pc) la distanza a cui bisogna portarsi perché la parallasse sia di 1". Si ricava $S\Sigma = 3{,}09 \cdot 10^{16}$ m.




Quando la Luna si trova al primo o all'ultimo quarto, e appare quindi metà in luce e metà in ombra, la congiungente Sole-Luna e quella Terra-Luna formano un angolo retto (si dice che la Luna è in *quadratura*); basta perciò misurare l'angolo $\hat{STL}$, il che si può fare direttamente nel cielo misurando la distanza angolare fra il Sole e la Luna quando entrambi gli astri sono contemporaneamente visibili, per avere i tre angoli del triangolo e quindi conoscere i rapporti fra i lati. Aristarco prese per questo angolo, non si sa bene con quale criterio, il valore di 87°, e sbagliò di grosso perché invece è circa 89°45'; risolto il triangolo, venne fuori che il rapporto fra la distanza Terra-Luna e la distanza Terra-Sole è 1/19 (la tangente trigonometrica di 87° è infatti 19), cioè il Sole è 19 volte più lontano della Luna (mentre in realtà è distante 389 volte).

Un altro astronomo della scuola alessandrina degno di nota fu Eratostene (273 – 192 a.C.), il primo a tentare di calcolare le dimensioni della Terra con metodo scientifico.

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

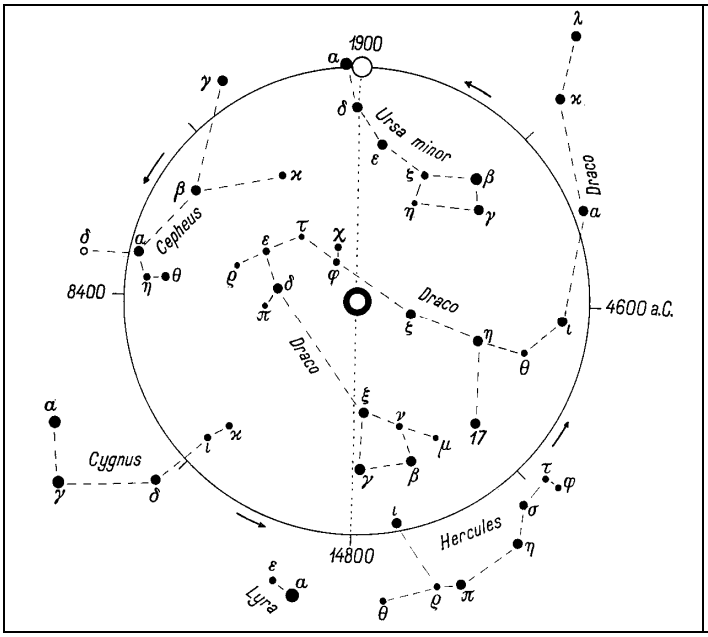
Confrontando le sue osservazioni con quelle dei suoi predecessori egli scoprì degli spostamenti di lieve entità, che potevano essere rilevati solo con osservazioni fatte a distanza di molto tempo le une dalle altre, e che espose nella sua celebre opera *Spostamenti dei punti dei solstizi e degli equinozi*.

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

Le osservazioni astronomiche fatte da Ipparco per determinare l'entità della precessione lo portarono a determinare anche le lievi differenze fra *anno siderale*[11] ed *anno tropico*[12].

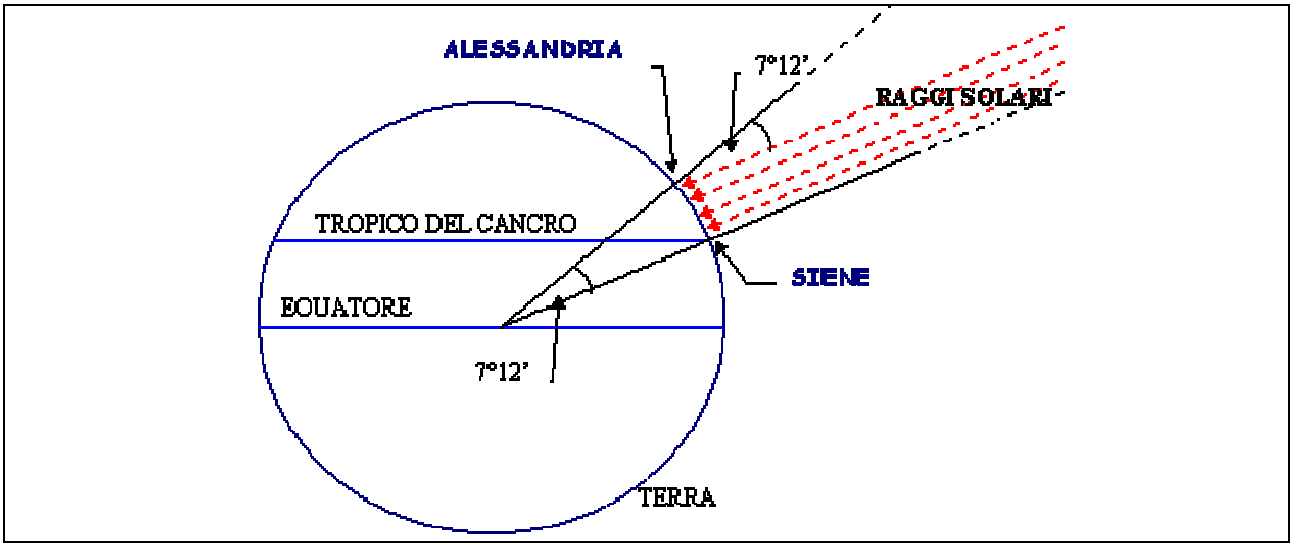
[11] L'anno siderale è l'intervallo di tempo tra due passaggi consecutivi del Sole in uno stesso punto della sua orbita, rispetto alle stelle è pari a 365,25636 giorni.

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




Precessione degli equinozi

La figura mostra il moto del Polo Nord Celeste a causa della precessione degli equinozi.
L’equinozio è il momento in cui il Sole interseca l’equatore celeste; in tale data giorno e notte hanno la stessa durata in qualsiasi luogo della Terra. Nell’emisfero settentrionale l’equinozio di primavera cade il 21 marzo, quello d’autunno il 23 settembre.
La precessione degli equinozi è dovuta al movimento a trottola che la Terra compie a causa dell’attrazione del Sole e della Luna (anche gli altri pianeti influiscono, ma in misura molto minore). Il Polo Nord Celeste si sposta quindi lungo una circonferenza con un periodo di circa 26.000 anni. Ciò fa sì che gli equinozi anticipino ogni anno.

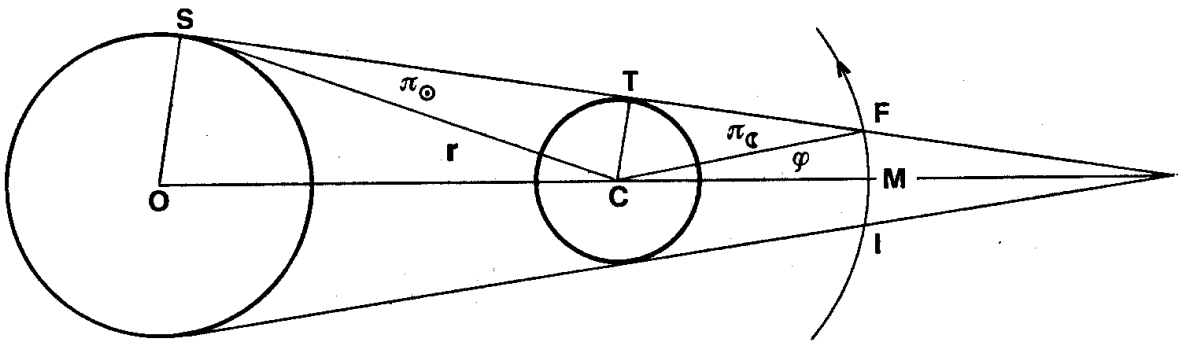



Il calcolo del diametro della Terra si basava sull'osservazione che un bastone verticale posto a Siene (Assuan) in Egitto, nel giorno del solstizio d'estate, non proietta nessuna ombra. Ciò significa che, in quel giorno e a quell'ora, il Sole si trova esattamente allo zenit. Nello stesso giorno dell'anno, e alla stessa ora, un uguale bastone piantato ad Alessandria proietta un'ombra e indica una inclinazione di 7° 12' dei raggi solari rispetto alla verticale. Se Alessandria si trova esattamente a nord di Siene (come Eratostene credeva), la differenza di latitudine tra i due luoghi è allora di 7° 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, se 7° 12' rappresentano un cinquantesimo dell' angolo giro, anche la distanza Siene-Alessandria deve essere la cinquantesima parte della circonferenza terrestre. La stima della distanza tra le due città era allora di 5.000 stadi (1 stadio = 157 metri). Eratostene ottenne un valore del diametro terrestre pari a circa 12.629 km, una misura straordinariamente vicina a quella oggi accettata (12.756 km per il diametro equatoriale, 12.712 km per quello polare).

Per quel che riguarda i pianeti, Ipparco cercò di determinare con la maggiore precisione possibile i loro tempi di rivoluzione, senza peraltro costruire un vero e proprio sistema.

Nel 150 a.C. circa, egli tentò per primo la misura delle distanze del Sole e della Luna, e non solo del loro rapporto come fece Aristarco. Il procedimento di Ipparco è basato sull’osservazione delle eclissi totali di Luna.

Negli anni che seguirono la morte di Ipparco non vi è da registrare alcun progresso di una qualche rilevanza nelle scienze astronomiche, né nomi di una certa rilevanza.




Metodo di Ipparco per la determinazione delle distanze 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 (ovviamente, non sono rispettate le proporzioni né delle dimensioni né delle distanze); I è il punto orbitale 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 il centro della Luna passi per il centro del cono d'ombra, o, ciò che è lo stesso, che nella fase centrale dell'eclisse, Sole, Terra e Luna siano sulla stessa retta.

L'angolo $T\hat{S}C$ è l'angolo sotto cui dal Sole si vede il raggio terrestre, cioè è la parallasse $\pi_\odot$ del Sole; $T\hat{F}C$ è analogamente la parallasse $\pi_\mathbb{C}$ della Luna; SCO è il semidiametro apparente *r* del disco solare e si sa che vale 16' (dalla Terra il disco del Sole ha un diametro angolare di 32'); infine IMF è l'arco entro cui la Luna è in eclisse: sapendo che l'eclisse centrale dura 2 ore e mezzo, la metà di tale arco, e cioè l'angolo $\varphi = M\hat{C}F$, viene percorsa in 1 ora e 15 minuti; siccome la Luna nel suo giro attorno alla Terra si sposta mediamente di 13° in 24 ore, fatta la proporzione si vede che in 1,25 ore si sposta di 40' e perciò $\varphi$ = 40'. Allora, avendosi $\pi_\odot + \pi_\mathbb{C} = r + \varphi$ (infatti gli angoli $r + \varphi$ e $\pi_\odot + \pi_\mathbb{C}$ sono entrambi supplementari dello stesso angolo $F\hat{C}S$) e sapendo che *r* vale 16', si ha:

$\pi_\odot + \pi_\mathbb{C}$ = 56'

A questo punto Ipparco prese pari pari il valore dato da Aristarco per il rapporto $d_\odot/d_\mathbb{C}$ fra la distanza del Sole e quella della Luna, che è uguale al reciproco del rapporto fra le parallassi e cioè $d_\odot/d_\mathbb{C} = \pi_\mathbb{C}/\pi_\odot$ (a rigore non sarebbe così, ma trattandosi di angoli piccoli e data l'approssimazione dei dati e delle ipotesi, si può tranquillamente identificare l'angolo con la tangente o col seno). Col valore di Aristarco $d_\odot/d_\mathbb{C}$ = 19 si ottiene $\pi_\odot + 19\,\pi_\odot = 20\,\pi_\odot$ = 56' da cui Ipparco dedusse $\pi_\odot$ = ~ 3'; $\pi_\mathbb{C}$ = ~ 53'.

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. Per la parallasse lunare il risultato fu buono perché, una volta ammesso che il Sole è molto più lontano della Luna, che sia più lontano 20 volte oppure – poniamo – 100 volte, la parallasse lunare cambia di poco; al limite, infatti, ponendo il Sole a distanza infinita e cioè ponendo $\pi_\odot$ = 0, si sarebbe ottenuto $\pi_\mathbb{C}$ = 56'.

Conoscendo il raggio della Terra (vedi Eratostene) alla parallasse 3' corrisponde una distanza pari a 1100 volte il raggio terrestre, mentre oggi sappiamo che è 23.500 volte. Per quanto l'errore sia notevole, tuttavia se ne ricavava che il Sole, apparendo di mezzo grado, doveva essere un globo 5 volte più grande in diametro del globo terrestre; risultato questo importante, se si considera che ancora in epoca successiva era materia di disquisizione filosofica ritenere il Sole un immenso astro dominante il cosmo oppure un piccolo globo di fuoco entro l'atmosfera sovrastante la Terra piatta.

## Il sistema tolemaico

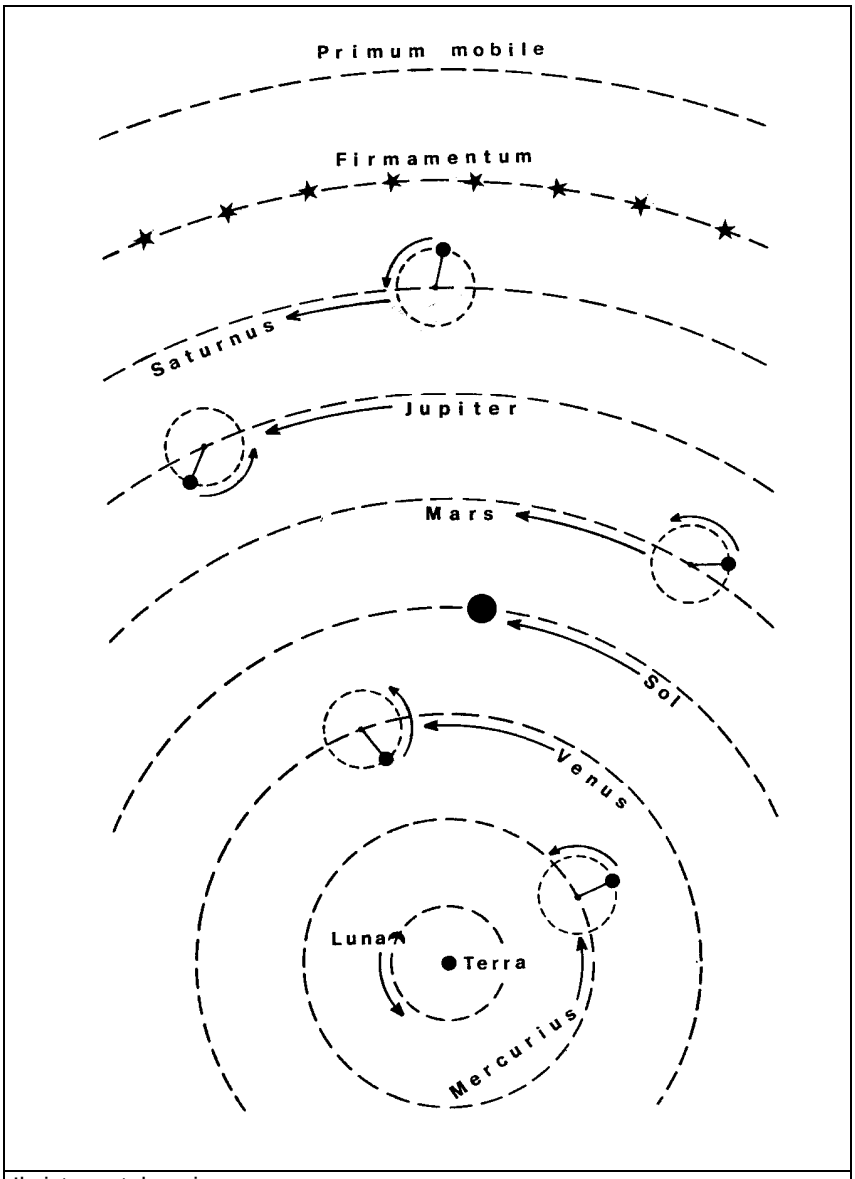
Per ritrovare un piccolo risveglio bisogna arrivare a Tolomeo (circa 100 - 178 d.C.). Claudio Tolomeo, nato ad Alessandria d'Egitto, fu l'ultimo rappresentante dell'antica astronomia greca. Visse nel II secolo d.C. e, secondo la tradizione, svolse la sua attività di astronomo nei pressi della sua città natale. Il merito principale di Tolomeo fu quello di aver raccolto tutto lo scibile astronomico qual era ai suoi tempi dopo i grandi progressi dovuti ad Ipparco, e, arricchitolo con le sue esperienze, di averlo esposto nella sua opera principale, l'*Almagesto*.

Il titolo originale di quest'opera, che è rimasta come testo fondamentale astronomico per tutto il Medio Evo, era *Mathematike Syntaxis* (Composizione Matematica), che tradotto in arabo divenne *Al Magisti*, da cui il titolo a noi conosciuto: Almagesto. In esso Tolomeo aveva esposto un sistema del mondo, noto come sistema tolemaico (anche se non si trattava completamente di farina del suo sacco), che poneva la Terra al centro dell'Universo ed i pianeti, compresi il Sole e la Luna,

ruotanti intorno ad essa col sistema degli epicicli e dei deferenti. In questo sistema Tolomeo negava anche la rotazione della Terra intorno al proprio asse, essendo il movimento diurno proprio della sfera celeste.

A dimostrazione della compiutezza dell'Almagesto il lettore, prima di avere a che fare col suddetto sistema, si trova davanti a capitoli che 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, a completamento, di un catalogo completo delle posizioni di ben 1022 stelle.

Quello di Tolomeo fu per parecchi secoli *il Libro* dell'astronomia. Questo perché i metodi matematici e geometrici di cui Tolomeo si serve nella sua opera lo fecero preferire alle opere simili di quel tempo. Inoltre, per la sua completezza, ebbe una rapida ed ampia diffusione. L'Almagesto fu tradotto in latino, ma la traduzione mai giunta a noi; più importante invece la traduzione in arabo, per ordine del califfo Al Mamun nell'827 d.C., traduzione che si diffuse in Europa e che fu ritradotta in latino a Napoli nel 1230, assai prima che si scoprisse l'originale in greco (1438).



Il sistema tolemaico

Il sistema costruito da Tolomeo è esposto negli ultimi cinque libri, o capitoli, dell'Almagesto. Bisogna riconoscere che si tratta di un sistema piuttosto complicato, che però risponde con una buona approssimazione alle posizioni dedotte col calcolo matematico. 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. Era in tal modo evidente che a questo fatto era possibile anche attribuire la diversa velocità del Sole nel cielo e, soprattutto, l'alternarsi delle stagioni.

Di questo sistema Dante Alighieri fece l'impalcatura del suo Paradiso. Ma non solo: esso continuò ad essere insegnato nelle scuole anche dopo le innovazioni di Copernico, Keplero e Galileo fin quasi ai primi del Settecento.

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 ed a perfezionarsi.

L’Astronomia tramandataci dai greci si fonda quindi essenzialmente su due principi metafisici:

I) la Terra è immobile al centro dell'universo (sistema geocentrico);
II) i cieli sono formati da sfere concentriche ruotanti con velocità uniforme.

# Gli arabi e l’astronomia medievale

Dovettero passare circa seicento anni dopo la morte di Tolomeo prima che venisse compiuto qualche ulteriore, 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.

Anche 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 degli arabi in campo scientifico dobbiamo ricordare 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.

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, almucantarat, almanacco; a termini matematici come algebra e algoritmo.

Già all'epoca della dinastia degli Omèiadi (661 – 750) era operante a Damasco un osservatorio. Fu per merito del califfo Al Mamun aver promosso la fondazione di un grande osservatorio a Baghdad, nell'anno 828. Al Mamun promosse anche l'attività del grande matematico e astronomo persiano Mohamed Ben Musa Al Khowarizmi, cui si deve una raccolta di tavole astronomiche.

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, fra l'altro, di migliorare i valori dell'obliquità dell'eclittica e della processione.

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.

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 Zarqála, noto come Arzachel (1029-1087). Le tavole di Toledo contengono anche una descrizione degli strumenti e dei metodi di calcolo impiegati.

Dopo la conquista di Bagdad nel 1258, a opera di Hulagu Khan, nipote del conquistatore mongolo Gengis Khan, il contributo del mondo arabo alla scienza in generale e all’astronomia in particolare si esaurì.

Per tutto il medioevo, in Europa, l’Astronomia non fece progressi degni di nota. Fra gli autori di quel periodo ricordiamo Gerardo da Cremona (1114 – 1187), che tradusse l’Almagesto di Tolomeo e molti lavori di astronomia arabi; Leonardo da Pisa (1170 – 1240) detto Fibonacci, che introdusse in Italia il metodo posizionale in base dieci adottato dagli arabi per la scrittura dei numeri e l’esecuzione delle quattro operazioni; l’inglese John Holywood, più noto come Giovanni Sacrobosco (morto intorno al 1250), il quale scrisse un famoso trattato elementare di astronomia sferica (*Sphaera mundi*) che venne tradotto e commentato in diverse lingue e costituì per diversi secoli un

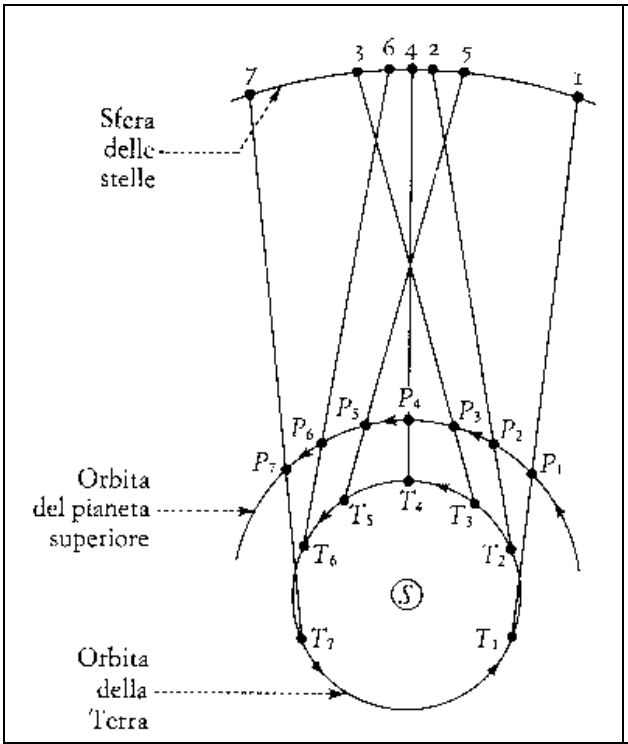
riferimento fondamentale; il re Alfonsa X di Castiglia (1221 – 1284), che nel 1252 fece elaborare da una cinquantina di astronomi appositamente raccolti a Toledo, quelle effemeridi che divennero poi le *Tavole Alfonsine*.

## Il sistema copernicano

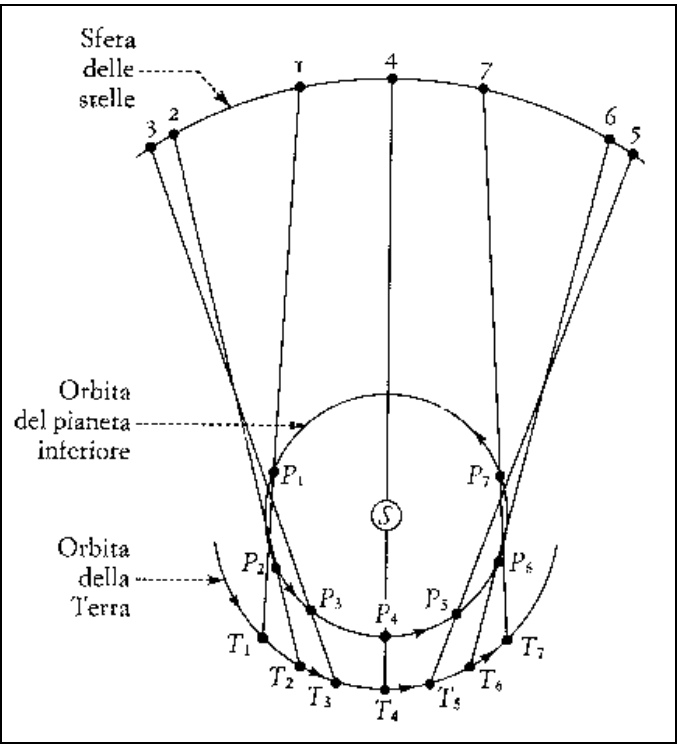
Come abbiamo detto, dovevano passare quasi due millenni perché queste idee fossero messe in discussione. Ciò avveniva nel 1542 con la pubblicazione e la diffusione dell'opera *De Rivolutionibus Orbium Coelestium* di Nicolò Copernico (1473 – 1543), avvenute dopo molti dubbi e ripensamenti. L'autore riprendeva in sostanza una vecchia idea di Aristarco, che può essere sintetizzata nel seguente modo:

i) la Terra compie una rotazione attorno al proprio asse da ovest a est in circa ventiquattro ore;
ii) 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;
iii) i pianeti, come la Terra, ruotano attorno al Sole, che occupa il centro dell'universo.

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




Posizioni di un pianeta esterno (o superiore) proiettate sulla sfera delle stelle, viste dalla Terra.




Posizioni di un pianeta interno (o inferiore) proiettate sulla sfera delle stelle, viste dalla Terra.

La concezione eliocentrica che con opportune correzioni ci appare oggi del tutto naturale, era stata accantonata per quasi venti secoli dagli studiosi perché appariva attaccabile sia dal punto di vista strettamente fisico, sia da quello metafisico. Fisicamente, l'ipotesi che la Terra orbitasse attorno al Sole veniva scartata per i seguenti motivi:

a) innanzi tutto sembrava contraddire il senso comune che prevedeva in una tale eventualità effetti catastrofici quali crollo di edifici, caduta degli oggetti non più lungo la verticale, eccetera;
b) in secondo luogo, poiché l'angolo sotto cui le stelle vengono viste da un osservatore posto

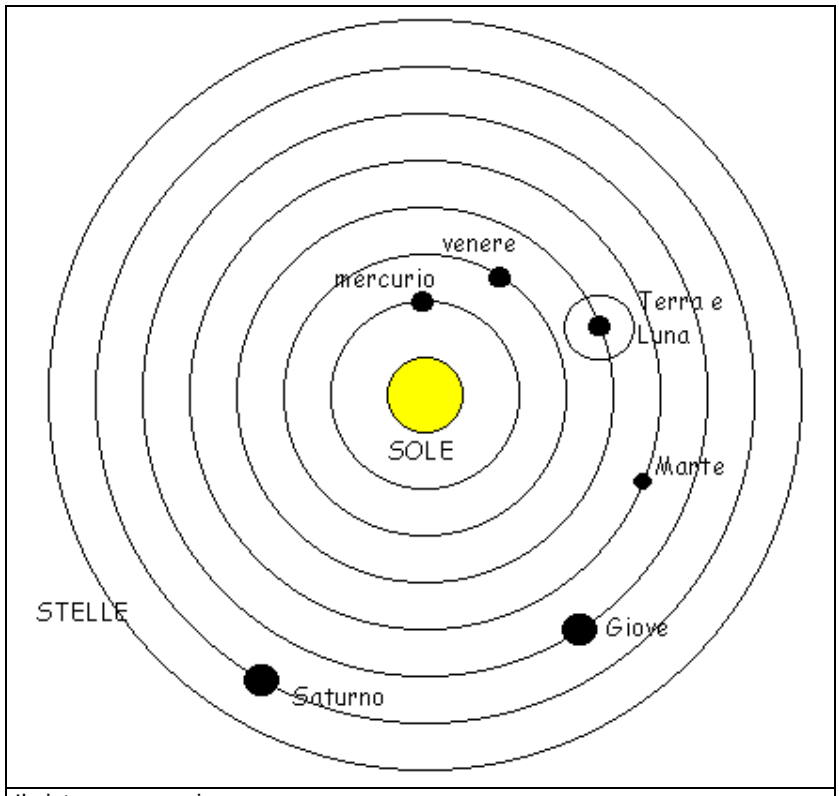
sulla Terra dipende dalla posizione della stessa, si dovrebbero osservare variazioni nel corso dell'anno nella posizione apparente delle stelle nella volta celeste. (Ovviamente gli antichi non potevano sapere che a causa delle enormi distanze delle stelle queste variazioni sono talmente piccole da risultare inosservabili ad occhio nudo.)

Se a queste obiezioni si potevano in qualche modo contrapporre argomentazioni scientifiche, ben poco poteva essere fatto se gli attacchi avevano fondamenti 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 (vedi Giordano Bruno).

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 sorprendano dunque i dubbi e le titubanze di Copernico, visto che doveva passare ancora più di un secolo perché le sue idee fossero accettate dalla comunità scientifica, e visto che ancora nel XVIII secolo tra i sostenitori delle due teorie si accendevano dispute accanite.

Con Copernico erano state gettate le basi della moderna astronomia, ma per arrivare ad una descrizione di tipo quantitativo del moto dei corpi celesti dovevano passare ancora molti decenni.

Un ruolo fondamentale ebbero in questo senso i dati di continue osservazioni della volta celeste raccolti e catalogati per più di trenta anni dal matematico ed astronomo danese Tycho Brahe (1546 – 1601).



Il sistema copernicano

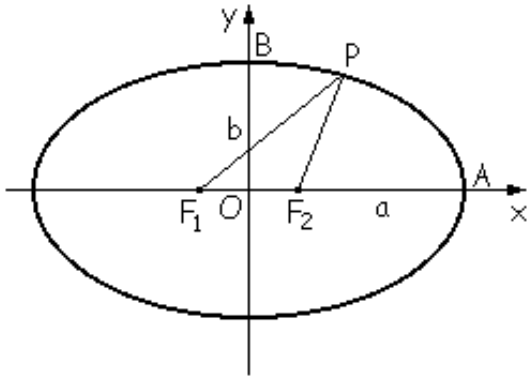
Sulla base delle proprie osservazioni egli propose una teoria che si collocava a metà strada tra quella tolemaica geocentrica e quella copernicana eliocentrica.

Secondo Tycho, infatti, mentre pianeti come Mercurio e Venere ruotavano attorno al Sole, altri come Giove, Marte, Saturno ed il Sole stesso orbitavano attorno alla Terra. Questa strana teoria, comunque, non fece proseliti né tra i sostenitori della concezione tolemaica né tra quelli della teoria copernicana e per questo venne presto abbandonata.

## Le leggi di Keplero

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

Già allievo di Tycho Brahe, egli continuò con passione, anche dopo la morte del maestro avvenuta nel 1601, il paziente lavoro di osservazione e raccolta di dati relativi al moto dei corpi del sistema solare. Analizzando poi con intelligenza le precise osservazioni di Tycho, nonché le proprie, giunse a formulare quelle leggi ormai universalmente note come le leggi di Keplero, che di seguito enunciamo.

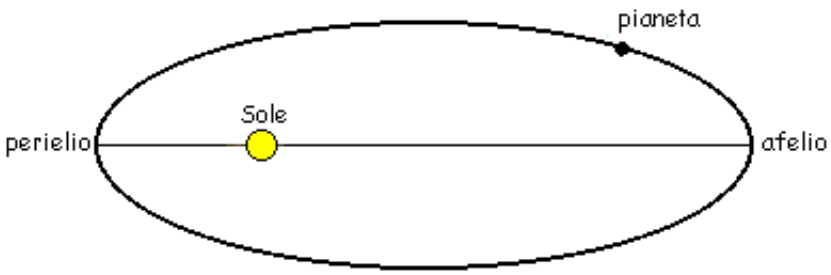



Ellisse

**Prima legge:** ***Le traiettorie descritte dai pianeti attorno al Sole sono ellissi di cui il Sole occupa uno dei fuochi.***

L'ellisse è una curva algebrica definita come il luogo dei punti la somma delle cui distanze da due punti fissi (detti fuochi) si mantiene costante.

Il Sole occupa uno dei due fuochi. Si noti che la distanza di un pianeta dal corpo centrale non è costante ma varia da un valore minimo ad un valore massimo. Lo stesso 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.

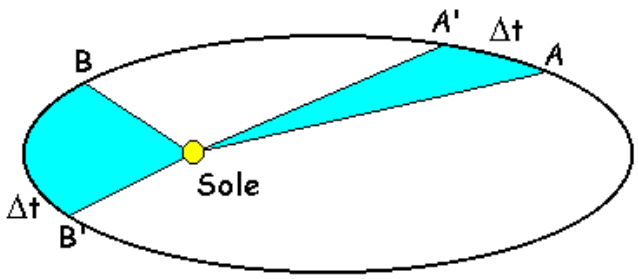



Prima legge di Keplero; afelio e perielio

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

Da questa legge consegue che la velocità con cui i pianeti orbitano attorno al Sole non è uniforme, ma risulta inversamente proporzionale alla radice quadrata della loro distanza dal Sole.

Infatti se le aree tratteggiate in figura sono uguali, e vengono descritte dal raggio vettore in tempi uguali ne consegue che il tratto di orbita AA’ è maggiore del tratto BB’ per cui la velocità in AA’ è maggiore di quella in BB’.




Seconda legge di Keplero

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

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

Questa 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. Keplero vedeva in essa l'espressione più alta dell'armonia dell'Universo. Con la scoperta di queste leggi, l'astronomia compiva un gigantesco passo in avanti. Era infatti risolto il problema che aveva assillato per secoli generazioni di scienziati: il calcolo della posizione di un pianeta nella sua orbita in un qualsiasi istante.

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

A questo punto la cinematica del moto planetario era completa.

## Galileo e le prime osservazioni del cielo con il telescopio

Galileo Galilei nacque a Pisa il 15 febbraio 1564. Per seguire la volontà del padre a 17 anni si iscrive nello Studio Pisano per ottenere la laurea in medicina, ma la passione del giovane per le matematiche prevalse sui progetti paterni: così ritroviamo Galileo professore di Matematica dieci anni dopo nella stessa Università pisana. Al periodo pisano appartengono gli studi sul moto che condurranno Galileo ad accettare la teoria copernicana dell'Universo, cioè a spiegare i moti degli astri in cielo come dovuti ai moti della Terra. Galileo considera la Matematica come il linguaggio con cui è scritto il Libro della Natura, di cui l'astronomia non è che un capitolo. Galileo è un astronomo diverso da quelli che lo hanno preceduto, forse meno attento all'astronomia di posizione (che comunque conosce molto bene), ma molto più curioso di tutti quei fenomeni che potevano gettare una qualche luce sul *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.

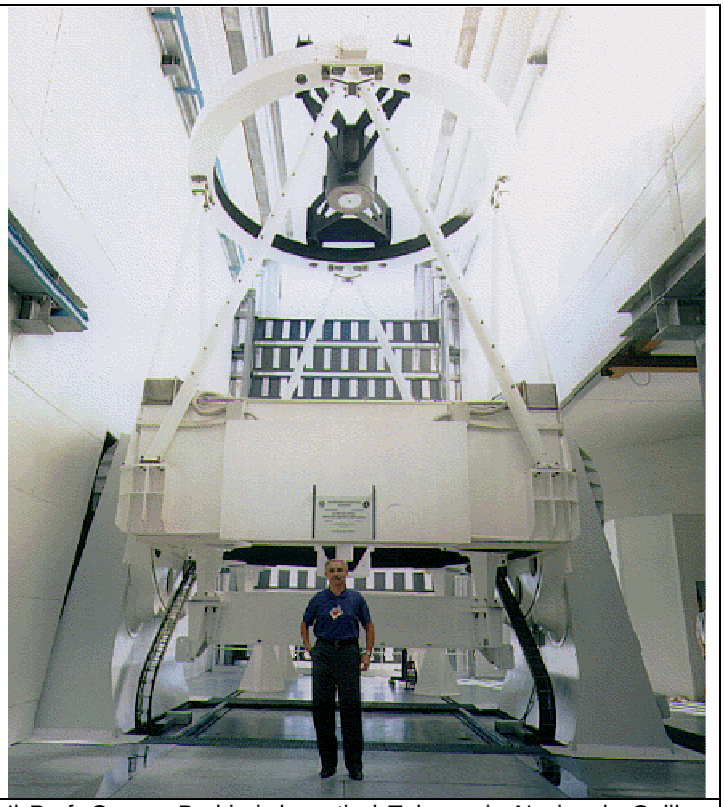
La sua curiosità per la natura e la ricerca della *sensata esperienza* trova un aiuto fondamentale dall'applicazione del cannocchiale allo studio degli astri. Nel 1609 Galileo viene a saper dall'amico Jacopo Badovere che a Parigi era stato costruito un strumento che consentiva di vedere più vicini gli oggetti lontani. Sono i primi cannocchiali la cui invenzione, se di invenzione si può parlare, venne successivamente rivendicata dagli occhialai olandesi, ma già 20 anni prima Gian Battista Della Porta ne aveva "descritto" uno nella sua *Magia Naturalis*[13]. Galileo, che ora insegna a Padova, ha

[13] 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

una piccola officina in cui costruisce strumenti matematici, subito si mette all'opera per perfezionare questo nuovo strumento e riesce a costruire un cannocchiale che ingrandisce di ben trenta volte. Il cannocchiale non viene subito utilizzato per osservazioni astronomiche, ma diventa prima uno strumento di guerra per le navi della Repubblica Veneta. Dopo averne consegnati 12 alla Serenissima, Galileo si appresta a osservare il cielo con questo nuovo strumento. L'annuncio dei risultati delle osservazioni viene dato al mondo da Galileo per mezzo di un opuscolo dal titolo *Sidereus Nuncius*. Molte e di diversa natura sono le scoperte annunciate da Galileo in questo libro.

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

Cannocchiale di Galileo.
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. L'oculare non è originale.

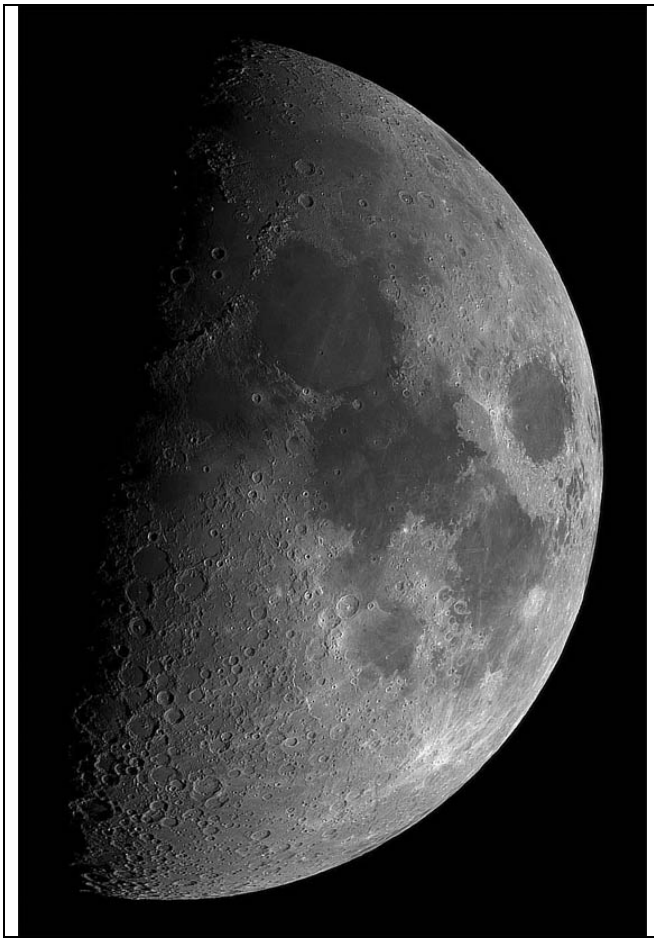


Il Prof. Cesare Barbieri davanti al Telescopio Nazionale Galileo (TNG) all’interno della cupola a Roque de los Muchachos (Isole Canarie).

Il cannocchiale, rivolto al cielo, svela a Galileo un mondo completamente diverso da quello che tutti conoscevano. Scopre che le nubi luminose della Via Lattea altro non sono che una congerie infinita di stelle.

La Luna poi 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?*

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



La Luna al primo quarto.
Foto di Giorgio Di Iorio dell’Associazione Astrofili “Crab Nebula”.

Dalla Luna Galileo si sposta ad osservare Giove, il più brillante dei pianeti. E qui lo attende una incredibile scoperta: Giove ha intorno a sé ben quattro lune! Nel gennaio 1610 Giove si trovava in una posizione molto favorevole per l'osservazione. Il pianeta era molto alto in cielo al tramonto del Sole e passava al meridiano alle $20^h\ 40^m$ . Nel Nuncius Galileo scrive:

Giove

Saturno

Le Immagini sono state ottenute da Cristian Fattinnanzi (Associazione Astrofili “Crab Nebula”) sommando un insieme di fotogrammi ripresi con una webcam Philips Vesta Pro. La somma è stata fatta via software (IRIS) ed i colori calibrati con Photoshop

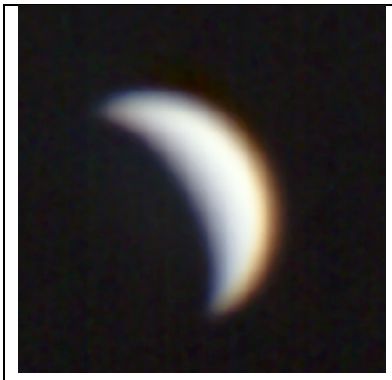
[…] *il giorno 7 gennaio del corrente anno 1610, alla prima ora della notte seguente, mentre guardavo gli astri celesti con il cannocchiale, mi si presentò Giove; e poiché mi ero preparato uno strumento proprio eccellente, m'accorsi,* […] *che gli stavano accanto tre Stelline piccole invero, ma pur lucentissime; 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.*

La scoperta dei pianeti medicei viene utilizzata da Galileo come ulteriore argomento per sostenere la teoria copernicana.

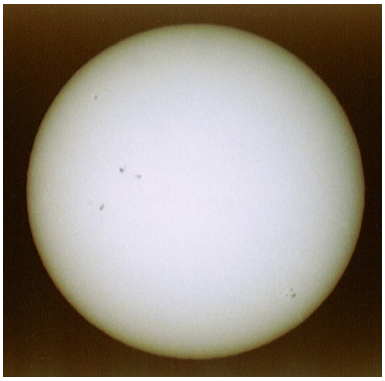
I satelliti Galileiani di Giove: Io, Europa, Ganimede, Callisto. Le immagini sono state riprese dalla sonda Galileo che dal 1990 orbita attorno a Giove e i suoi satelliti

Ma non finiscono qui le scoperte di Galileo. Il 30 luglio 1610 Galileo, 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 risolvere e che solo il fisico olandese Huygens osserverà compiutamente.

L'anno 1610 fu pieno di scoperte astronomiche, tutte dovute all'uso che Galileo stava facendo del suo cannocchiale. Il cielo gli era propizio perché in quell'anno si vedevano bene Giove, Saturno e Venere; nel caso di Venere l'osservazione era facilitata, essendo l'elongazione di quel pianeta di circa 37° ad est del Sole, per cui era comodamente visibile di sera.



Venere.
Foto di Alfredo Trombetta Associazione Astrofili “Crab Nebula”



Sole. Sulla sua superficie sono visibile delle macchie.
Foto di Angelo Angeletti Associazione Astrofili “Crab Nebula”

Galileo scoprì che Venere presentava le fasi come la Luna. La questione è controversa, perché c'è chi sospetta che sia stata compiuta dall’allievo Benedetto Castelli, che poi, 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.

Ma non basta: Galileo, osservando con il suo cannocchiale il Sole al tramonto, scopre che la sua superficie presenta delle macchie, che non sono pianeti mai visti prima di ora ma proprio aree

scure sul Sole, e per di più ne dimostrano la rotazione.

Lo studio degli scritti di Copernico e i risultati delle osservazioni avevano profondamente convinto Galileo della plausibilità del modello del mondo ipotizzato da Aristarco da Samo e poi ripreso da Copernico. La grande differenza rispetto a Copernico e a Keplero sta nel fatto che Galileo era convinto che il modello di Copernico non fosse semplicemente un comodo artificio per calcolare le effemeridi[14] dei pianeti, ma che corrisponda ad una reale struttura fisica dell'Universo (che allora non andava oltre l'orbita di Saturno). Erano lì in cielo eloquenti le testimonianze di questo fatto: 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 orbitava attorno al Sole, Saturno tricorporeo che confutava la perfetta sfericità della quinta essenza, ovvero della sostanza dei cieli.

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, lo scienziato, 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, ormai 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 gennaio1642.

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

## Newton e la legge della gravitazione universale

Mentre Keplero enunciava le sue leggi senza inquadrarle in una teoria più generale, Galileo dava il suo fondamentale contributo allo sviluppo della teoria della gravitazione con la scoperta del principio d'inerzia.

Questa era la situazione verso la metà del XVII secolo.

A questo punto compare sulla scena la figura di Isaac Newton (1642-1727), sicuramente uno dei più grandi geni di tutti i tempi. Newton, avvalendosi del principio d'inerzia e di una brillante intuizione di Hooke (questi gli aveva infatti consigliato di studiare il moto dei pianeti dividendolo in due parti: una prima parte rappresentata dal moto inerziale lungo la tangente alla traiettoria, la seconda rappresentata da un moto accelerato in direzione del Sole), scoprì quale fosse il significato fisico delle leggi di Keplero.

In primo luogo, dal momento che il moto dei pianeti non è rettilineo ed uniforme, doveva esserci una forza diretta verso il Sole che *regola*, ma non *causa* il moto. Newton accertò che tale forza segue la legge dell'inverso del quadrato della distanza.

In parte per la sua naturale riservatezza, e in parte perché memore di precedenti controversie che lo avevano alquanto amareggiato, Newton rese pubbliche le sue scoperte solo dopo qualche anno.

Seguiamo da vicino i punti salienti del suo ragionamento:

a) tutti i corpi cadono in prossimità della superficie terrestre con un'accelerazione pari a 9,8 $m/s^2$;
b) 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;
c) anche la Luna deve perciò avere un peso e deve in qualche modo cadere[15] sulla Terra; questo si-

[14] 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

[15] 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.

gnifica che la presenza della Terra regola il moto orbitale della Luna.

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.

Mediante questi dati è possibile calcolare le grandezze cinematiche relative al moto della Luna e precisamente:
velocità orbitale della Luna: $v_L \approx 1$ km/s
accelerazione centripeta della Luna: $a_{C,L} = 0{,}0027$ m/s$^2$.

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

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

dunque la Luna si trova 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").

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

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

Nel libro III, Proposizione IV Teorema IV, dei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*[16] 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 riportata nel riquadro qui sotto.

Ricordiamo che 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 $h = 5\ m$ nel primo secondo dopo l'abbandono dello stato di quiete $\left( h = \frac{1}{2} g (1s)^2 \right)$, mentre lo spazio $s$ di cui cade la Luna nello stesso intervallo di tempo è dato da: $s = \frac{1}{2} a (1s)^2$. Da queste considerazioni si ricava che:

[16] È l'opera in cui Newton espone i suoi principi della Dinamica, nonché la legge della gravitazione Universale. La prima edizione fu pubblicata nel 1687, è certo però che gran parte del lavoro su quest'opera 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.

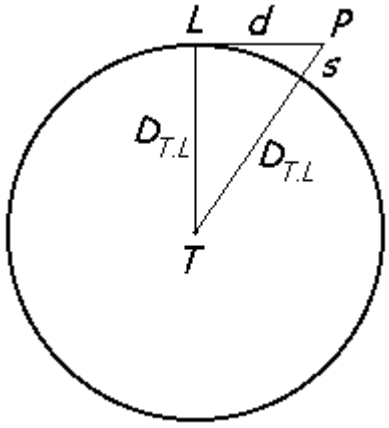
$$\frac{h}{s}=\frac{\frac{1}{2}g(1s)^2}{\frac{1}{2}a(1s)^2}=\frac{g}{a}$$

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*.

D'altra parte possiamo osservare che 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.




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

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

$$\overline{TL}^2+\overline{LP}^2=\overline{TP}^2$$

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

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

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

nella terza espressione 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*.

I dati in possesso di Newton permisero un buon risultato che però non lo soddisfaceva: così per diverso tempo non lo rese noto. Solo più tardi (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 allo straordinario risultato che la gravità segue la legge secondo la quale l'intensità della forza *F* varia con l'inverso del quadrato della distanza.

In primo luogo il risultato corretto ottenuto per il sistema Terra-Luna non autorizzava a pensare che esso potesse essere altrettanto corretto in altri sistemi con caratteristiche totalmente diverse da quello preso in esame. Ebbene Newton suppose questo nel 1666 e 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 sorgeva il problema non secondario 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 prima sviluppare quegli strumenti matematici (il calcolo infinitesimale) che gli permisero poi 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 tutta la massa di ciascun corpo sia concentrata nel centro del corpo stesso (il baricentro).

Ma non è tutto. Fino a quel momento, infatti, era opinione corrente che il moto dei pianeti si svolgesse attorno ad un punto coincidente con il centro del corpo centrale (il Sole) ritenuto immobi-

le. Newton superava questa concezione applicando al moto planetario la sua terza legge del moto, il principio di azione e reazione. Affermò infatti che per il terzo principio 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 poi 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

$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ N \cdot m^2/kg^2.$$

Dopo aver stabilito con la sua legge i parametri dai quali dipendeva la forza che si esercita tra tutti i corpi dell'universo 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.