



Università degli Studi di Messina

**Scuola Interuniversitaria Siciliana di Specializzazione per l'Insegnamento Secondario
S.I.S.S.I.S. (VII ciclo) Classe 49/A (Fisico – Informatico – Matematico)**

STORIA DELL'ASTRONOMIA

Di:

Dr. Parrillo Francesco

Dr. Romeo Maurizio Giuseppe

Dr. Spinelli Umberto Antonio

Introduzione

L'Astronomia, la più antica scienza del mondo, è talmente vecchia che non sappiamo quando ebbe inizio.

Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno, erano noti agli antichi ed altri tre sono stati scoperti nell'era moderna. Giove è il più grande di essi, ed il suo immenso globo potrebbe contenere più di un migliaio di corpi della grandezza della Terra, ma anche Giove è minuscolo, se paragonato al Sole. Le stelle del cielo sono esse stesse dei soli, molte di esse sono più grandi e più luminose del sole, e ci appaiono smorte e piccole solo a causa della loro lontananza. D'altro canto la luna splende più intensamente di ogni altro corpo celeste, eccezion fatta per il sole. Ma questa sua importanza è solo relativa; la luna è un corpo celeste del tutto trascurabile e non possiede luce propria. E' di gran lunga l'oggetto più vicino a noi nei cieli ed ha un diametro di solo un quarto di quello della terra.

Tutta la volta celeste sembra ruotare attorno alla terra una volta al giorno. Questo moto apparente è causato naturalmente dal fatto che la terra ruota sul suo asse da occidente ad oriente. Di tutti i corpi celesti, la luna è il solo dotato di un vero movimento attorno alla terra.

Noi siamo abituati a considerare questi fatti come postulati, ma all'inizio della storia dell'umanità si credeva che la terra fosse piatta ed immobile. Il sole e la luna erano adorati come dei, e l'apparizione di qualcosa di insolito nei cieli era considerato come un segno della disapprovazione divina.

I caldei, gli egizi ed i cinesi sono generalmente considerati i primi astronomi, ma questo corrisponde solo in parte a verità; è vero che questi antichi popoli dividevano le stelle fisse in gruppi o "costellazioni" e distinguevano anche pianeti, comete ed eclissi, ma non possedevano alcuna vera conoscenza sulla natura dell'universo e nemmeno della terra stessa, sicché è difficile definirli astronomi nel vero senso della parola.

La storia comincia all'incirca nel 3000 a.C., allorché l'anno di 365 giorni fu per la prima volta adottato in Egitto ed in Cina. Questa fu anche approssimativamente l'epoca della costruzione di quella considerevole mole conosciuta come la Grande Piramide di Cheope. La piramide è ancor oggi una delle maggiori attrazioni turistiche dell'Egitto; Cheope stesso, sovrano rude e deciso, vi investì tanto denaro da rovinare il suo paese, ed anche adesso non sappiamo esattamente perché considerasse la piramide tanto importante. Dal punto di vista astronomico è interessante, poiché il suo passaggio centrale è rivolto verso quello che era allora il polo nord del cielo.

L'asse di rotazione della terra è inclinato di 23 gradi e mezzo, ed è rivolto a nord, verso il polo celeste. Oggigiorno il polo è contrassegnato approssimativamente da una stella lucente chiamata polare, familiare ad ogni navigante poiché sembra quasi immobile, mentre gli altri corpi celesti le ruotano attorno. Ai tempi di Cheope, tuttavia, il punto polare si trovava in una posizione diversa, vicino ad una stella assai più debole, Thuban, nella costellazione del Drago. La causa di questo cambiamento è che la terra "ondeggia" leggermente come una trottola sul punto di cadere, e la traiettoria dell'asse descrive un cerchio nel cielo. L'ondeggiamento è leggerissimo, ma lo spostamento dell'asse è divenuto notevole dacché la piramide è stata costruita, 5000 anni or sono.

L'Egitto è ancor oggi considerato la terra del mistero. E' noto che la maggior parte dei misteri dell'antico Egitto furono creati dai sacerdoti, che erano i più istruiti della loro razza e che si rendevano conto che il sistema migliore per tenere sotto controllo il popolo era di mantenerlo nell'ignoranza. Ma anche i sacerdoti avevano dei limiti ben definiti, e benché fossero molto bravi nell'arte di eseguire esatte misurazioni, non riuscirono mai a scoprire che la terra è sferica. Essi credevano che il mondo fosse rettangolare, con l'Egitto in mezzo e deserti e mari tutt'intorno. L'astronomia cinese non era più progredita. Ci sono pervenute annotazioni di comete e di eclissi, ma alcune delle idee di quell'epoca sembrano strane al giorno d'oggi.

Possiamo stabilire che l'astronomia sia sorta in Babilonia, ma la cosmologia, distinta dalle cosmogonie mitologiche, nacque soltanto in Grecia. I greci si liberarono degli impacci mitologici e si sforzarono di trovare le leggi che regolano i fenomeni naturali, meditando con una libertà intellettuale a cui i loro precursori orientali non erano mai pervenuti.

La terra secondo i Greci

I primi greci ritenevano che la Terra fosse costituita da un disco circolare circondato dal grande Fiume Oceano che nasceva a nord delle colonne d'Ercole e piegava poi a nord, a est e a sud della terra, chiudendosi quindi su se stesso, mentre sopra vi era la conca emisferica del cielo che ricopriva tutto come un'enorme campana. 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.

Anassimandro (610 – 546 a.C.) fu il primo ad immaginare che la Terra fosse curva; la Terra era piatta o convessa per quanto riguarda la sua superficie, ma più simile ad un cilindro che a un disco e la sua altezza è un terzo della larghezza. Il **cilindro** nasce certamente da un'analogia osservativa, ma l'idea della libera sospensione della Terra nello spazio e la spiegazione della sua stabilità non trovano alcuna possibile analogia nell'intero campo dei fenomeni osservabili. Da Aristotele sappiamo che Anassimandro credeva che la Terra non poggiasse su una qualche cosa, ma rimanesse ferma per il fatto

di essere ugualmente distante da tutte le altre cose. L'insufficienza delle informazioni sui filosofi più antichi è particolarmente significativa per Talete di Mileto nato intorno al 640 a. C. e morto all'età di 78 anni. Secondo le sue idee la Terra è un cilindro appiattito che galleggia "come un pezzo di legno o qualcosa di simile" ¹sull'oceano, la cui acqua è il principio o l'origine di ogni cosa ed evaporando forma l'aria.

Secondo Teofrasto fu Parmenide di Elea, vissuto nella prima parte del V secolo a. C. e seguace di Pitagora (570-597 a.C.), il primo 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. Cominciava ad essere immaginabile che le stelle e gli altri corpi celesti potevano continuare a percorrere orbite circolari sotto la Terra anche dopo il loro tramonto. Inoltre, si riferisce che Parmenide fu il primo a dividere la terra in cinque zone; in particolare, quella centrale, torrida e inabitabile, fu considerata successivamente quasi due volte più ampia, estendendosi oltre i cerchi dei tropici fino alle zone temperate.² Si può anche ritenere che Parmenide suppose che la Terra dovesse avere la stessa forma di ciò che la circonda³, visto che egli sistema l'universo in una serie di strati concentrici intorno alla terra. Ci imbattiamo così per la prima volta nel *sistema di sfere concentriche*, destinato a svolgere una parte importante nella storia dell'astronomia.

L'idea di una Terra sferica non venne però generalmente accettata fino all'epoca di Platone (427-348 a.C.). Egli ne dà una dimostrazione filosofica: 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 che aveva Platone.

I primi argomenti sicuri contro la vecchia teoria della terra piatta sono dati da Aristotele, nato nel 384 a.C. e morto nel 322. Aristotele fu uno degli uomini più geniali del mondo antico, ed il suo pensiero contiene il meglio del pensiero greco. Come fa notare Aristotele, le stelle paiono cambiare d'altezza sull'orizzonte secondo la latitudine dell'osservatore. La stella polare sembra rimanere abbastanza alta nel cielo vista dalla Grecia, perché la Grecia è molto a nord dell'equatore terrestre; dall'Egitto la stella polare è più bassa; dalle

¹ ARISTOTELE, *De caelo*, II, 13, p. 294 a; cfr SENECA *Nat. Quaest.*, III, 13, *terrarum orbem aqua sustineri*.

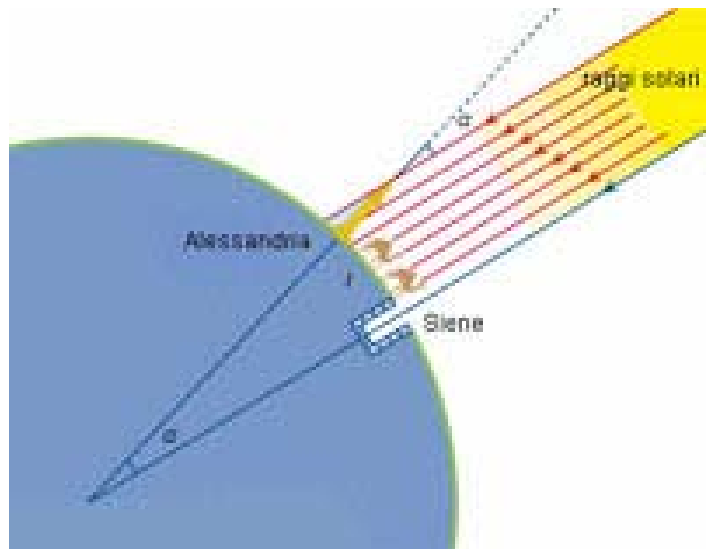
² STRABONE, II, p. 94; AEZIO, III, 11, p. 377, dove non si menziona l'ampiezza straordinaria della zona torrida.

³ Come più tardi fece Aristotele (*De Caelo*, II, 4, p. 287 a).

latitudini meridionali non si può vedere affatto, dato che non sorge mai sopra l'orizzonte. D'altra parte, Canopo, una stella brillante della parte meridionale del cielo, può essere vista dall'Egitto ma non dalla Grecia. Questo è quanto ci si aspetterebbe secondo la teoria di una terra rotonda, ma non si può spiegare questo comportamento se supponiamo che la terra sia piatta. Aristotele notò che durante un'eclissi di luna, allorché l'ombra della terra si proietta sulla luna, il margine dell'ombra è curvo, segno che anche la superficie della terra deve essere curva.

Eratostene di Cirene intorno al 230 a.C. misurò per la prima volta le dimensioni della Terra. Il suo calcolo si basava sull'osservazione che un bastone verticale posto a Siene (Assuan) in Egitto il giorno del solstizio d'estate, non proietta nessuna ombra. Ciò significa che, in quel giorno e a quell'ora, il Sole si trova esattamente allo zenit. Nello stesso giorno dell'anno

e alla stessa ora, un uguale bastone piantato ad Alessandria, proietta un'ombra e indica una inclinazione di $7^{\circ} 12'$ 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 di $7^{\circ} 12'$. Conoscendo la distanza tra Siene e Alessandria era possibile calcolare, per mezzo di una



proporzione, la misura della circonferenza e quindi del diametro terrestre. Infatti, se $7^{\circ} 12'$ rappresentano un cinquantesimo dell'angolo giro, anche la distanza Siene-Alessandria deve essere la cinquantesima parte della circonferenza terrestre. Le stime della distanza tra le due città era allora di 25.258 stadi (1 stadio = 157 metri). Ottenne un valore del diametro terrestre pari a circa 12629 km, una misura straordinariamente vicina a quella oggi accettata (inferiore soltanto di circa 113 Km). Se i Greci avessero compiuto un altro passo avanti ponendo il sole al centro del sistema planetario, il progresso dell'astronomia sarebbe stato rapido. In realtà alcuni filosofi provarono a farlo, ma Aristotele pensava che la terra fosse il centro dell'universo, e l'autorità di Aristotele era talmente indiscussa che pochi osavano metterla in dubbio. Inoltre, il decentramento della terra, avrebbe

significato un cambiamento delle leggi "fisiche", poiché la teoria aristotelica delle "cose che prendevano il loro posto naturale" sarebbe stata assai indebolita.

Il geocentrismo e l'eliocentrismo dei Greci

Pitagora nacque a Samo attorno al 580, si stabilì a Crotone, nel mezzogiorno d' Italia, intorno al 540 o al 530, e morì colà o a Metaponto, attorno al 500 o poco dopo. Tra tutti gli antichi filosofi greci Pitagora occupa una posizione a sé. Egli fondò una scuola filosofica la cui durata superò i duecento anni. Essa fu spesso al centro dell'attenzione sia perché i suoi membri formarono una specie di confraternita religiosa, sia perché si dedicarono anche alla politica esponendosi a persecuzioni nell'Italia meridionale. I pitagorici si dedicarono particolarmente all'interpretazione della natura. La filosofia pitagorica è incentrata sul concetto di numero; esso non rappresenta soltanto le relazioni reciproche dei fenomeni ma è la sostanza delle cose, la causa di tutti i fenomeni della natura. Pitagora e i suoi discepoli giunsero a questa concezione dopo aver osservato che in natura ogni cosa è governata da relazioni numeriche, che l'armonia dei suoni musicali dipende da intervalli regolari, che i moti celesti si svolgono con assoluta regolarità.

La filosofia pitagorica non fu nota ai Greci subito dopo la fine violenta del pitagorismo a Crotone, e la prima pubblicazione uscita dalla scuola è attribuita a Filolao, contemporaneo di Platone nato in Italia meridionale e vissuto a Tebe per un certo numero di anni. Anche se il libro di Filolao è andato quasi completamente distrutto, opere di altri autori, riprendendo le sue dottrine, ci consentono di farci un'idea del sistema cosmico di questo filosofo, anche se non si può stabilire con certezza se sia dovuto interamente a lui o sia stato sviluppato progressivamente dai seguaci di Pitagora.

Filolao riteneva che l'influenza predominante nell'universo doveva provenire dal suo punto centrale e che la Terra non può trovarsi al centro perché essa non esercita tale influenza predominante. La Terra quindi ruota attorno ad un centro, che non era occupato dal Sole, ma da un fuoco centrale "sede di Zeus" dove risiede il principio dell'attività cosmica. Il fuoco centrale è nascosto ai nostri occhi dalla massa della Terra stessa, la quale è sempre rivolta dalla parte opposta. Per compiere un giro attorno al fuoco centrale la

Terra doveva impiegarci un giorno: ecco spiegato il motivo per cui si ha il succedersi del giorno e della notte, come pure la rivoluzione apparente diurna di tutti gli astri.

Per Filolao il Sole non era un corpo che emetteva luce da sé. Infatti il fuoco centrale avrebbe dovuto essere 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.

Oltre al Sole e alla Terra, anche la Luna e gli altri pianeti giravano attorno al focolare dell'universo.

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.

Nelle opere di Platone (nato intorno al 427 e morto nel 347 a. C.) non ci sono indizi che fanno pensare ad un suo interesse per la scienza fisica. Egli considerava *l'idea* come pura essenza, unico oggetto di conoscenza, mentre la materia informe non si sottomette mai completamente al potere informante delle idee. L'opposizione tra forma e materia fa sì che la verità assoluta sia raggiungibile solo nelle idee eterne e immutabili, non nel mondo fisico; il mondo è inteso come ciò in cui l'idea governa suprema. In queste asserzioni sulla struttura del mondo, Platone non discende a particolari e, inoltre, spesso non è facile seguirlo poiché le sue argomentazioni assumono spesso il carattere di un gioco intellettuale e sono spesso intercalate a favole mitologiche da cui si deve estrarre il significato filosofico.

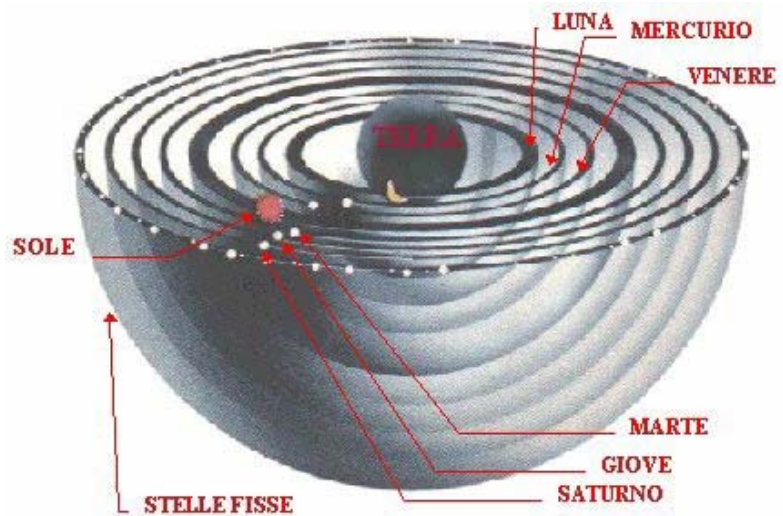
Né Platone né Aristotele presero in considerazione le idee di Filolao, che non ebbero quindi seguito e, nonostante Eraclide un secolo dopo riprendesse in qualche modo le sue teorie, con Ipparco e Tolomeo la Terra divenne "definitivamente" immobile.

L'esame delle dottrine astronomiche di Platone ha consentito di rilevare che nella prima metà del IV secolo a. C. c'erano dei filosofi che avevano qualche conoscenza del moto dei pianeti. Certo è che non si può pensare all'esistenza in quel periodo di strumenti astronomici, nemmeno di quelli più grossolani, ad eccezione dello *gnomone* che serviva a seguire il percorso del sole. Doveva anche essere noto che la Luna non segue di mese in mese e di anno in anno lo stesso percorso fra le stelle; solo così si spiega che Elicone, discepolo di Eudosso, abbia potuto prevedere l'eclisse del 12 maggio 361. Ma la prova più

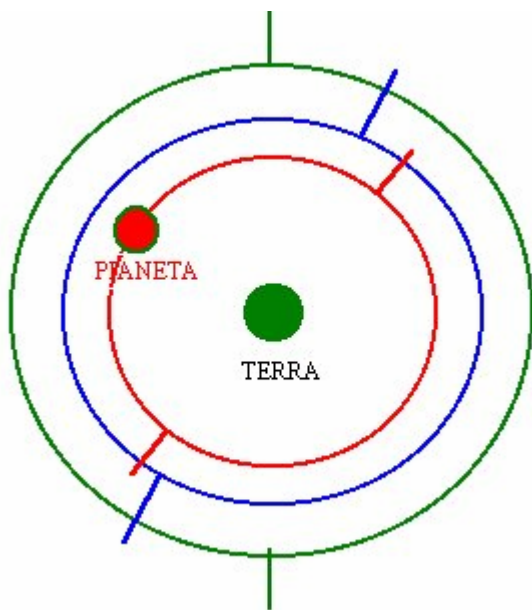
chiara che al tempo di Platone si possedevano conoscenze non trascurabili sul moto dei corpi celesti, ci è fornita dall'importante sistema astronomico del suo contemporaneo, di lui più giovane, Eudosso di Cnido, autore del primo tentativo di spiegare le più notevoli irregolarità di questi movimenti.

I greci, non possedendo nessuna teoria fisica sul perché i pianeti si muovono in orbite, si diedero da fare a immaginare modelli nei quali i corpi celesti si dovevano necessariamente muovere secondo orbite circolari. In questo modo veniva colmata la carenza di una teoria fisica e nello stesso tempo andavano d'accordo con l'idea della perfetta simmetria della sfera enunciata da Platone. Senza una teoria così semplice e geometrica, l'universo sarebbe apparso inesplicabilmente privo di leggi. La concezione dei moti circolari persistette fino a Keplero e Keplero stesso esitò a lungo prima di abbracciare la concezione delle orbite ellittiche. Eudosso di Cnido (408-355 a.C.) fu il primo a elaborare matematicamente un sistema di sfere celesti: *le fere omocentriche di Eudosso*. Il sistema delle sfere cristalline non era così semplice come comunemente si crede. Ci immaginiamo infatti un semplice sistema di sfere concentriche ordinate nel seguente modo (partendo dal centro): sfera della Luna, sfera di Mercurio, di Venere, del Sole, di Marte, di Giove, di Saturno e sfera delle stelle fisse.

Secondo Eudosso invece, il modello era molto più complesso: soltanto le stelle fisse possedevano un'unica sfera. La Luna e il Sole, ad esempio, possedevano ben tre sfere ciascuno. Il sistema a sfere omocentriche prevede una sfera delle stelle fisse che racchiude l'intero universo. Essa ruota con moto uniforme da oriente verso occidente attorno all'asse del mondo, e la durata della sua rotazione è il giorno siderale. Ogni astro errante, ovvero ogni pianeta, ha invece un proprio meccanismo indipendente. Nell'"inscatolamento" geocentrico delle sfere, l'astro è situato ogni volta sull'equatore della sfera più interna. Le altre sfere non portano invece alcun astro (Teofrasto le chiamerà appunto "anastre"). La prima sfera, più esterna, ruota attorno a un asse che passa per il centro del mondo. La



seconda partecipa al moto della prima, ma tale moto si compone in essa con un secondo movimento di rotazione uniforme, il cui asse, verso e velocità sono suoi propri. La terza sfera riceve invece il moto già composto delle prime due, aggiungendovi la propria rotazione uniforme, e la composizione prosegue così fino a quando la sfera che porta l'astro produce il moto composto che "salva" i fenomeni che si osservano in cielo. Le diverse combinazioni presentano due caratteri comuni: in tutti i casi la prima sfera ruota da oriente verso occidente con un periodo uguale a quello dell'aplanes, ovvero della sfera delle stelle fisse, e attraverso di essa ogni astro prende parte alla rotazione diurna. In tutti i pianeti, inoltre, la seconda sfera ruota da occidente verso oriente attorno a un asse normale al piano dell'eclittica, ma la durata di questa rivoluzione non è uguale per tutti - giacché, per ciascun pianeta, essa è uguale al tempo che l'astro impiega a percorrere l'eclittica. Il moto delle stelle fisse richiede una sola sfera, quelli del Sole e della Luna ne richiedono tre ciascuno, e quelli dei pianeti quattro. In totale si tratta quindi di 27 sfere.



Nel disegno a sinistra 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 (rossa), sulla quale è fissato il corpo celeste, ruota su se stessa attorno un asse vincolato alla seconda sfera (blu), la quale a sua volta ha l'asse di rotazione vincolato alla terza sfera (verde), più esterna.

Con questo modello Eudosso, non solo spiegava i moti retrogradi dei pianeti, ma anche l'inclinazione dell'orbita dei pianeti rispetto a quella terrestre. Quello di "salvare le apparenze", o meglio "i fenomeni" (per

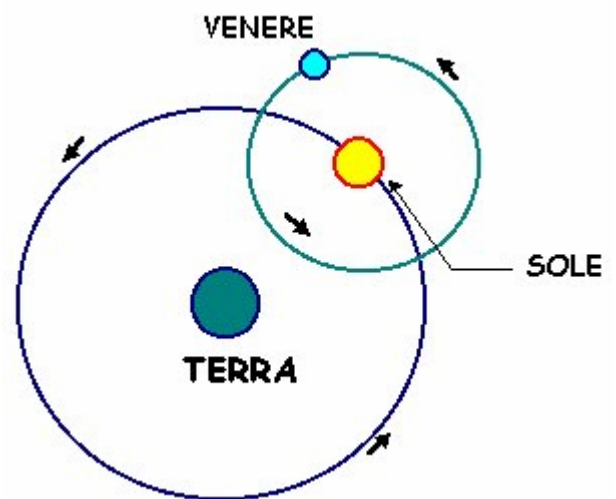
riprendere l'espressione cara a Pierre Duhem) sembra essere stato l'unico obiettivo in vista del quale Eudosso costruisce le sue sfere rotanti e omocentriche. Mutamenti apportati da Callippo al sistema di Eudosso si riducono, secondo la Metafisica di Aristotele, all'aggiunta di due sfere per salvare i moti della Luna e del Sole, e di una sfera per salvare quelli dei pianeti, con l'eccezione di Giove e di Saturno. Aristotele (384-322 a.C.) accettò in pieno la sua teoria, ma commise il grave errore di attribuire una realtà fisica alle sfere di Eudosso (cosa che egli non aveva mai pensato). Tale errore

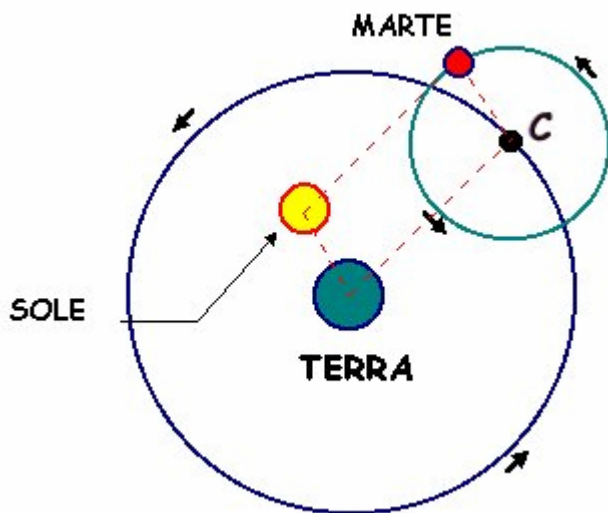
costrinse Aristotele a cercare di combinare i gruppi separati di sfere in un unico complicatissimo sistema meccanico di sfere concentriche legate le une alle altre. Per riuscire a dar spiegazione ai fatti, il suo sistema arrivò a prevedere un totale di oltre 50 sfere!. A differenza di Platone, Aristotele ritiene che i fenomeni, così come sono percepiti dall'esperienza sensoriale, forniscono un'effettiva conoscenza di ciò che si presenta ai nostri sensi. Poiché la sua filosofia ha la tendenza di considerare l'universo come un sistema di unità ciascuna delle quali è importante per la comprensione del tutto, i suoi scritti hanno carattere enciclopedico, abbracciando tutti i campi del sapere. Le opere in cui si occupa di argomenti astronomici sono i quattro libri *De caelo* e, in qualche misura, i quattro libri *Meteorologica*, in cui sono affrontati anche alcuni argomenti astronomici.

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. e contemporaneo di Eudosso) giunse a ipotizzare quella teoria che verrà poi chiamata da Ipparco e Tolomeo teoria *degli epicicli*.

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").
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 Eracleide o se si tratta di

una elaborazione di un pitagorico a lui vicino.

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 Eracleide 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 simile ideato da Tycho Brahe.

Eracleide 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 Eracleide decadde definitivamente e di nuovo si pensò che fosse la volta celeste a muoversi. Secondo Tolomeo infatti, se fosse stata la Terra muoversi, un oggetto lanciato in aria avrebbe dovuto ricadere più indietro.

Secondo una attendibile testimonianza di Archimede, Aristarco di Samo (nato verso il 310 a.C.) giunge per primo 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 quasi equivalenti.

Inoltre Aristarco comprese che se fosse stata la Terra a girare attorno al Sole, di conseguenza le stelle avrebbero dovuto essere lontanissime. Infatti il fondo 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. Le geniali 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. In ogni caso questi risultati ebbero una notevole utilità per cominciare a comprendere gli ordini di grandezza del sistema solare.

Ipparco (185-127 a.C.), nonostante abbia contribuito a far abbandonare la teoria eliocentrica di Aristarco, è considerato il più grande astronomo dell'antichità. Nacque a Nicea di Bitinia e visse per la maggior parte della sua vita a Rodi. Trascorse qualche tempo anche ad Alessandria d'Egitto che era un centro di attrazione per i migliori artisti, scienziati e tecnici dell'epoca. Le sue opere, che non sono giunte fino a noi, sono state tramandate da Tolomeo, suo grande ammiratore, che visse tre secoli dopo. Fra i suoi notevolissimi contributi all'astronomia sono da evidenziare i confronti sistematici e critici di antiche osservazioni con quelle da lui eseguite al fine di scoprire variazioni di piccole entità. Infatti Ipparco era uno studioso scrupolosissimo e inventò anche degli strumenti appositi per l'osservazione astronomica (come l'astrolabio e la diòtra). Riuscì a compilare un famoso catalogo delle stelle fisse, circa ottocentocinquanta, fornendo per ciascuna di esse la latitudine, la longitudine e lo splendore. Al fine di perfezionare i suoi calcoli astronomici, gettò le basi di quel ramo della geometria che più tardi si chiamerà trigonometria e scoprì fra l'altro la precessione degli equinozi, ovvero di quel lento moto retrogrado che fa scivolare i nodi dell'orbita terrestre lungo l'eclittica. La prima osservazione a lui attribuibile con certezza è quella dell'equinozio d'autunno del 26 settembre del 147 a.C.; l'ultima, quella della posizione della Luna il 7 luglio del 127. I particolari delle sue teorie astronomiche ci sono noti grazie a Tolomeo, che non nasconde mai i suoi debiti verso Ipparco. Questi deve a sua volta ad Apollonio, che lo aveva preceduto di circa 75 anni, la quantità di modelli geometrici che sono alla base delle sue teorie, ma per determinare i parametri che sono alla base di ciascuno di questi modelli egli profonde un'attenzione e una cura estreme

nell'uso delle osservazioni astronomiche, sia quando le esegue lui stesso, sia quando le attinge dagli archivi.

La scoperta cui è legato indissolubilmente il nome di Ipparco, quella della precessione degli equinozi, mostra anche in quale misura l'astronomia benefici del passare del tempo. Ogni anno i punti equinoziali risalgono l'eclittica ad anticipare l'incontro con il Sole. Da questo lento spostamento annuale derivano due effetti osservabili: le variazioni nella longitudine eclitticale delle stelle, di circa 50 secondi d'arco all'anno, e la differenza di durata fra l'arco siderale e l'anno tropico, di circa 20 minuti di tempo. È attraverso questo duplice approccio che Ipparco dimostra la realtà della precessione degli equinozi e ne determina il valore. Gli studi accurati dei moti del Sole e della Luna gli permisero di determinare la lunghezza dell'anno solare in 365 giorni e 6 ore e a predire le eclissi con maggiore precisione di altri.

Il sistema astronomico di Ipparco respingeva la teoria delle sfere di Eudosso, che non spiegava come mai i pianeti si avvicinassero e si allontanassero periodicamente dalla Terra. Riprese invece, parzialmente, l'ipotesi di Eraclide Pontico che immaginava Mercurio e Venere in rotazione attorno al Sole. Ipparco affermò che tutti i pianeti, la Luna e il Sole ruotavano attorno a cerchi di raggio minore (epicicli) i quali a loro volta ruotavano attorno alla Terra secondo orbite con raggio maggiore. Rifiutò l'idea della rotazione della Terra attorno a se stessa e rifiutò anche l'ipotesi eliocentrica di Aristarco.

Negli anni che seguirono la morte di Ipparco non vi è da segnalare alcun notevole progresso nell'astronomia fino a Claudio Tolomeo, l'ultimo grande astronomo di scuola greca, che visse in Alessandria nel II secolo d.C.. Della vita di Tolomeo non si sa nulla se non che scrisse l'Almagesto, un testo di astronomia che è rimasto il testo fondamentale per tutto il medio evo.

Claudio Tolomeo assorbì integralmente l'opera di Ipparco senza introdurre idee originali. Egli riuscì però a sviluppare e a esporre in forma ordinata e sistematica la sua teoria geocentrica. Una sua importante variazione consisteva nel sostituire delle sfere al posto dei cerchi epiciclici di Ipparco.

L'ipotesi di partenza di Ipparco e Tolomeo era che comunque tutti i moti dovevano essere circolari, ipotesi già formulata tre secoli prima da Eudosso. Purché venisse soddisfatta questa ipotesi fondamentale, essi accettavano modelli sempre più complessi di epicicli nei quali però si tolleravano alcuni gradi di libertà in più rispetto alla teoria di Eudosso.

Ad esempio, la Terra poteva non trovarsi esattamente al centro delle orbite dei centri degli epicicli (orbite eccentriche). Inoltre i centri degli epicicli potevano non avere moti uniformi, ma potevano variare di velocità.

Mentre la teoria delle sfere epicicliche viene presentata come ipotesi matematica, l'immobilità della Terra è per lui un principio fisico di simmetria delle forze dell'universo che avrebbero dovuto trattenere la Terra al centro del mondo. Rifiutava anche la rotazione terrestre: se la Terra si muovesse non reggerebbe alla disintegrazione. Inoltre, secondo lui, a causa della rotazione, un oggetto lanciato in alto sulla verticale non sarebbe ricaduto nello stesso punto, bensì più indietro rispetto alla posizione del lancio (verso occidente).

Dalla pubblicazione dell' *Almagesto* di Tolomeo dovettero passare ben 14 secoli prima di vedere qualche progresso significativo nelle scienze astronomiche.

La rivoluzione

Nicola Copernico (1473-1543), fu un grande astronomo polacco che per primo mise in dubbio il sistema geocentrico delle teorie di Aristotele e di Tolomeo. Copernico era un pensatore chiaro, oltre che un abile matematico e al principio della sua carriera vide tanti punti deboli nel sistema tolemaico che si sentì preso dal desiderio di abbandonarlo. Sembrava irragionevole pensare che le stelle potessero compiere una rotazione al giorno attorno alla terra. Usando le sue stesse parole: *"Perché dovremmo esitare ad attribuire alla terra un moto naturale e corrispondente alla sua forma sferica? E perché non siamo disposti ad ammettere che l'apparenza di una rotazione giornaliera appartiene ai cieli, la sua realtà alla terra? Il rapporto è lo stesso di quello di cui parla l'Enea virgiliano: Noi salpiamo dal porto e la terra e le città si allontanano"*.

Nicola Copernico (Nicolaus Koppernigk) nacque a Torun (Thorn) sulla Vistola il 19 febbraio 1473. Nel 1491 si iscrisse all'Università polacca di Cracovia dove, pur essendo destinato alla carriera ecclesiastica, mostrò una decisa inclinazione per l'astronomia e la matematica. A 23 anni si recò in Italia e trascorse cinque anni presso l'Università di Bologna (uno dei maggiori centri culturali d'Europa), dove lavorò sotto la direzione di Maria da Novara da cui apprese gli elementi di astronomia pratica. Nel 1550 andò a Roma e l'anno seguente tornò nell'Europa nord-orientale, a Frauenberg, dove fu insediato canonico per opera dello zio Lucas Waczenrode, vescovo di

Ermland. Dopo pochi mesi dall'insediamento nella sua canonica, tornava ansioso in Italia, questa volta a Padova rimanendovi per altri cinque anni. Durante i dieci anni che trascorse complessivamente in Italia studiò legge, teologia, medicina, matematica, astronomia e i classici. Lo studio dei classici fu di importanza fondamentale poiché gli permise di leggere i lavori dei grandi astronomi greci nella loro lingua originale. Nel 1506, ritornando definitivamente in patria, Copernico poneva termine alla sua vita studentesca e si ritirò nel castello di Heilsberg per prendersi cura del vecchio zio vescovo. Cominciava allora a pensare al suo nuovo sistema cosmogonico, gettando le basi del suo monumentale lavoro, *De revolutionibus Orbium Coelestium*, che fu pubblicato soltanto 37 anni dopo, poco prima della sua morte. Copernico morì nell'anno 1543 all'età di settanta anni. Il secolo seguente fu denso di accese controversie sulla teoria copernicana.

Il motivo per cui, dopo Tolomeo, per ben quattordici secoli, la scienza astronomica non fece più progressi, si può individuare in alcune cause.

Il decadimento dell'Impero romano e la netta scissione tra Europa occidentale e orientale che lo caratterizzò, contribuirono a far sì che in occidente si dimenticasse quasi completamente il bagaglio scientifico dei greci. Inoltre la diffusione del cristianesimo portava con sé una tendenza a interpretare letteralmente la Bibbia. Nel libro della Genesi sono riportate ingenue nozioni astronomiche prese a prestito da altri popoli. Affermazioni di questo tipo non furono particolarmente dannose per il popolo ebreo che non aveva mai avuto un grande interesse per l'astronomia, ma determinarono un grave regresso e rallentamento dello sviluppo di questa scienza in occidente. Ad esempio nella Bibbia, la sfera celeste sarebbe stata una separazione tra le acque superiori e quelle inferiori. Sopra il cielo doveva quindi esserci un altro oceano che, al momento prestabilito, si sarebbe riversato sulla Terra attraverso un foro, come era avvenuto al tempo di Noè. Si ritorna quindi a deridere la sfericità della Terra, prima grande scoperta dei greci. E si tornò all'idea primitiva che il Sole e le stelle, una volta tramontati avrebbero percorso un giro verso nord appena sotto l'orizzonte per poi ritrovare ad est il punto da cui sorgono.

Per circa quattordici secoli, la visione tolemaica della Terra immobile al centro dell'universo e circondata dalle sfere celesti, non era mai stata messa in discussione. Copernico, nel suo *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, ipotizzava innanzitutto che la Terra non fosse il centro dell'Universo, ma che ruotasse attorno al Sole. Una tale idea, che toglieva alla Terra la sua posizione privilegiata al centro dell'Universo, avrà una straordinaria ripercussione nel

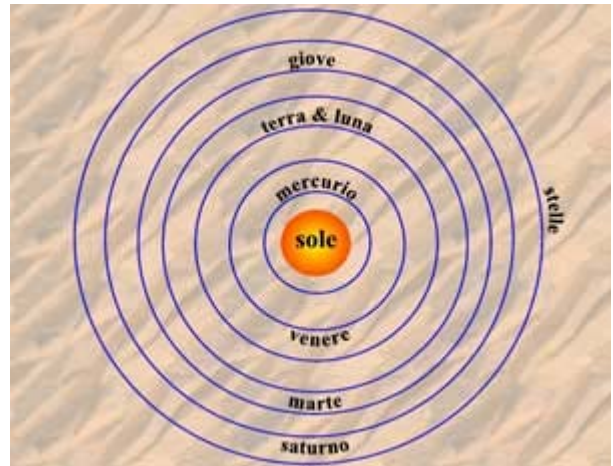
modo di pensare in tutto l'Occidente. Si parla infatti di Rivoluzione Copernicana.

Nella sua opera principale, *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, Copernico discute la concezione geocentrica tolemaica e propone la sua teoria eliocentrica.

Copernico presenta innanzitutto tre postulati fondamentali: la forma

sferica dell'Universo, la sfericità della Terra e i moti dei pianeti che devono essere composti da moti circolari uniformi. Egli non può ammettere la mancanza di uniformità perché "l'intelletto indietreggia con orrore, essendo indegno di sostenere una tale veduta intorno ai corpi, che sono costituiti nell'ordine più perfetto".

Copernico spiega poi il principio del moto relativo, per il quale, agli effetti dell'apparenza, è lo stesso se si muova il Sole o se si muova la Terra. Attribuisce quindi alla Terra un movimento di rotazione attorno a se stessa per spiegare il moto complessivo di tutte le stelle, mentre suppone anche che essa ruoti intorno al Sole in un movimento di rivoluzione annuo per rendere ragione dell'apparente movimento annuale dell'astro lungo l'eclittica. Era più semplice pensare che fosse la Terra a ruotare attorno a se stessa che non tutta la sfera celeste. Inoltre non era assolutamente plausibile che la Terra fosse l'unico corpo celeste a restare immobile. Una delle principali obiezioni di Copernico all'ipotesi Tolemaica dell'immobilità della Terra aveva come base delle conoscenze fisiche che i greci non potevano possedere. Tolomeo affermava infatti che se la Terra fosse in movimento, un oggetto lanciato in aria sarebbe ricaduto indietro. Copernico obiettò che il moto di un oggetto lanciato in aria è dato da due componenti: una componente verticale dovuta al lancio in alto e una componente orizzontale (circolare) dovuta al movimento della Terra. Un oggetto ricade verticalmente per il semplice fatto che noi stessi partecipiamo alla componente orizzontale del suo moto e quindi non ce ne possiamo accorgere. Tolomeo inoltre affermava che se la Terra ruotasse attorno a se stessa avrebbe dovuto disintegrarsi. Copernico rispose facendo osservare quanto maggiormente dovrebbe disintegrarsi la sfera delle stelle, dato che le stelle, molto distanti, dovrebbero muoversi ad una velocità di rotazione molto più elevata di quella della Terra. La sua teoria



eliocentrica spiegava in maniera più semplice alcune caratteristiche incomprensibili del moto dei pianeti negli epicicli, Ad esempio secondo Tolomeo i pianeti esterni dovevano compiere un giro sui loro epicicli nello stesso tempo impiegato dal Sole per girare attorno alla Terra. Ma perché? Copernico, mettendo il Sole al centro, dimostrava che quelle strane caratteristiche dei moti planetari erano semplicemente una conseguenza del moto terrestre. Inoltre mettendo la Terra al terzo posto nella sequenza delle distanze planetarie dal Sole (cioè tra Venere e Marte) era possibile dividere i pianeti in due gruppi: pianeti interni (Mercurio e Venere) e pianeti esterni (Marte, Giove e Saturno). Veniva in questo modo chiarita semplicemente l'inspiegabile necessità tolemaica di differenziare il meccanismo degli epicicli di questi due gruppi di pianeti. E' qui che si dimostra la notevole semplificazione introdotta dal sistema copernicano rispetto al tolemaico; in questo modo si risolveva il problema dei moti retrogradi e dei punti stazionari dei pianeti. Nella sua opera tratta inoltre il problema della precessione degli equinozi spiegandone l'origine in un movimento lento dell'asse terrestre che ha un ciclo di 26.000 anni. Con una particolare disposizione degli epicicli riesce a spiegare le principali irregolarità del moto lunare e di altri pianeti. Il sistema copernicano non rappresenta quindi il sistema eliocentrico oggi noto, proprio per il difetto di conservare una struttura ad epicicli (pur semplificata rispetto a quella tolemaica). I moti ellittici dei pianeti erano interpretati ancora come composizione di moti circolari. Soltanto con le scoperte di Keplero si riuscì a superare questo "pregiudizio" della necessità dei moti circolari.

Come Copernico era stato il primo europeo dal tempo dei greci ad innalzarsi all'altezza di Aristarco e di Tolomeo nel campo teorico, così Tycho Brahe fu il primo ad innalzarsi all'altezza di Ipparco nel campo dell'osservazione astronomica. Sinceramente contrario alla teoria copernicana, il suo sistema era ancora geocentrico anche se diverso dal sistema Tolemaico. Egli infatti immaginava che la Terra fosse immobile al centro dell'universo, che il Sole e la Luna ruotassero attorno alla Terra e che tutti i pianeti ruotassero attorno al Sole. Fino alla fine della sua vita egli non fu capace di accorgersi che questa cosiddetta nuova teoria era esattamente uguale a quella di Copernico. Infatti dal punto di vista matematico, la trasformazione da un sistema all'altro è insignificante. Pur essendo ingenuo in campo teorico, il suo lavoro di osservazione fu preziosissimo per lo sviluppo successivo dell'astronomia. Tycho Brahe, nato in Danimarca a Knudstorp nel 1546 solo alcuni mesi dopo

la morte di Copernico, era completamente diverso dal gentile e colto matematico polacco. Dopo aver compiuto gli studi a Copenaghen e in Germania, si interessò presto di astronomia e di astrologia. Possiamo già farci un'idea della sua particolare personalità da un fatto curioso: arrivò a sfidare a duello un compagno di studi che aveva osato mettere in dubbio le sue capacità matematiche. Ci rimise il naso che si fece poi ricostruire con una protesi in oro. Osservando nel 1563 una congiunzione di Giove e Saturno si rese conto che anche le più recenti e aggiornate tavole astronomiche (le *Tabulae Prutenicae* di Erasmo Reinhold) erano in errore di parecchi giorni. Cominciò a progettare e collezionare strumenti di osservazione sempre più imponenti fra cui un grande quadrante per osservazioni stellari e un globo celeste sul quale andava segnando le posizioni delle stelle confermando ancora l'imprecisione e la lacunosità delle misurazioni astronomiche fino ad allora eseguite. Il grande contributo di Tycho Brahe all'astronomia fu infatti soprattutto quello di imporre l'esigenza di misurazioni e osservazioni continue e sempre più precise, a differenza dei precedenti astronomi che, influenzati dalla concezione aristotelica, davano molta più importanza agli aspetti qualitativi che a quelli quantitativi. Nel novembre del 1572 compariva una stella molto luminosa nella costellazione di Cassiopea. Si trattava di una supernova. Tycho la osservò accuratamente nelle sue fasi di luce, notando che doveva essere molto più lontana della Luna. Infatti non presentava nessuna parallasse sensibile e quindi doveva appartenere al cielo delle stelle fisse. La cosa dovette suscitare un certo 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 e corruzioni.

Viaggiò parecchio in Germania e in Italia, pensando poi di andare a stabilirsi a Basilea con la famiglia. Il re Federico II, che era un protettore delle arti e delle scienze, per timore di perderlo gli fece un dono favoloso: gli conferì l'isola danese di Hveen con tutte le rendite che produceva e si impegnò a costruirgli un osservatorio a spese dello stato. Nacque così un grande edificio chiamato Uranjborg (castello del cielo), una singolare costruzione situata nel mezzo di un giardino quadrato circondato da mura come una fortezza e orientato con i vertici verso i quattro punti cardinali. Il castello possedeva torri di osservazione con tetti mobili, una biblioteca, un laboratorio di alchimia e altri locali di lavoro e di abitazione. Vi installò molti strumenti astronomici (sestanti, armille equatoriali, strumenti parallattici, orologi ecc.). Un secondo edificio, costruito da Tycho in seguito, fu chiamato Stjerneborg

(castello delle stelle). Aveva la particolarità di essere in gran parte sotterraneo, probabilmente per porvi gli strumenti in posizioni più stabili che non sulle terrazze. I tetti di questi vani sotterranei erano a forma di cupola e le osservazioni potevano essere eseguite attraverso delle aperture praticate sulle cupole stesse.

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 nuovo sistema cosmologico. La megalomania di cui soffriva lo portò presto a tiranneggiare i poveri abitanti dell'isola di Hveen con balzelli non dovuti e condanne per insolvenze. Si circondò persino di una incredibile "corte" con tanto di "nano-buffone" che pranzava sotto la tavola (vedi Big science ai tempi di Amleto di Gianbruno Guerriero in Le Scienze n. 344). Proprio per porre un freno a questa situazione, il successore di Federico II cominciò a limitarne gli appannaggi di cui godeva e Tycho, offeso, abbandonò l'isola e riprese le sue peregrinazioni per l'europa portandosi dietro la famiglia e i suoi numerosi strumenti. Finì alla corte di re Rodolfo II (personaggio altrettanto eccentrico) con l'incarico di Mathematicus imperialis. Nel 1600 incontrò Keplero nel quale Tycho sperava di trovare un fedele discepolo della sua teoria, ma il rapporto tra i due astronomi fu breve e insofferente. Tycho infatti morì nel 1601 senza riuscire a convincere Keplero sul suo sistema geocentrico.

Giovanni Keplero nacque a Würtemberg il 27 dicembre del 1571, quasi un secolo dopo Copernico. Da ragazzo, per la sua malferma salute, fu avviato alla carriera ecclesiastica e nel seminario dell'Università di Tubinga si appassionò ai problemi astronomici. Si sentì subito attratto dalle teorie copernicane, che difese appassionatamente in pubbliche dispute. Ciò gli precluse la possibilità di continuare gli studi ecclesiastici e lo portò ad accettare, nel 1594, un modesto posto di insegnante di matematica a Graz. Nel 1596 pubblicò *Mysterium Cosmographicum*, un'opera giovanile nella quale dimostrava che le distanze ineguali tra le sei orbite planetarie potevano essere determinate da cinque poliedri regolari. Quest'opera lo rese famoso e gli procurò l'amicizia di Tycho Brahe, allora matematico della corte imperiale di Praga. Nel 1600 Keplero fu espulso dalla Stiria perché protestante; lasciò Graz stabilendosi a Praga nel gennaio di quell'anno. Tycho gli offrì un posto come suo assistente, incaricandogli di rifare il calcolo dell'orbita di Marte, ma l'unione non doveva essere facile per Keplero dal punto di vista umano poiché, come egli stesso nota, Tycho era un uomo con il quale non si poteva vivere senza esporsi ai più grandi insulti. Dopo la morte di Tycho (1601)

l'imperatore Rodolfo II lo nominò matematico di corte. Sul suo letto di morte Tycho implorò Keplero di non dimenticare il sistema che egli stesso aveva difeso, secondo cui il Sole gira attorno alla Terra e tutti gli altri pianeti si muovono attorno al Sole. Keplero promise che non lo avrebbe dimenticato e, sebbene fosse consapevole che tale sistema era di poco diverso da quello Copernicano, nei lavori successivi tenne fede a questa promessa. Senza il prezioso frutto delle osservazioni di Tycho, Keplero molto difficilmente avrebbe potuto determinare la vera natura delle orbite planetarie. Keplero arrivò a maturare l'ipotesi che le orbite potessero non essere circolari come si era sempre creduto. Enunciò quindi la sua prima legge che descrive la forma ellittica dell'orbita dei pianeti e poté elaborare la seconda legge che descrive le velocità del pianeta lungo la sua orbita ellittica. I risultati di questi studi, pubblicati nel 1609 (*De motibus stellae Martis*) furono poi estesi a tutti gli altri pianeti (*Epitome astronomiae copernicanae*).

Alla morte dell'imperatore Rodolfo II (1612), Keplero insegnò matematica a Linz fino al 1626. In questo periodo, entusiasta dalla scoperta del telescopio, si dedicò allo studio dell'ottica esponendo fra le altre cose, nella sua opera *Dioptrica*, il processo visivo dell'occhio e il fenomeno della rifrazione nell'atmosfera. Sempre in questo periodo (1618) pubblicò la sua opera preferita: *Harmonices mundi*, nella quale, oltre ad esporre la sua terza legge, metteva in relazione le leggi armoniche dei suoni con i movimenti dei pianeti. Nel 1626 fu costretto a lasciare l'Austria a causa delle persecuzioni contro i protestanti. Visse a Ulma, a Sagan e infine a Ratisbona, conducendo una vita difficile, piena di amarezze e di dolori. Nel 1627 pubblicò le *Tabulae Rudolphinae*, le nuove tavole fondamentali dei pianeti basate sul moto ellittico ed eliocentrico. Quest'opera, iniziata da Keplero sin dai tempi in cui era assistente di Tycho, permise per oltre un secolo di calcolare con la massima esattezza la posizione dei pianeti del sistema solare, confermando definitivamente la validità delle sue tre leggi. Keplero dedicò le *Tabulae Rudolphinae* alla memoria di Tycho Brahe, per gratitudine al suo "difficile" maestro. Morì nel 1630 a Ratisbona.

La più importante innovazione di Keplero fu quella di riuscire a liberarsi dal pregiudizio che le orbite dei pianeti dovessero essere necessariamente circolari o comunque composte da moti circolari. Egli infatti, oltre a riaffermare l'ipotesi eliocentrica, fu il primo a proporre un modello di orbite ellittiche per descrivere il movimento dei pianeti intorno al sole. Ecco, in sintesi, le tre leggi di Keplero sulle orbite planetarie:

PRIMA LEGGE - Ciascun pianeta ruota attorno al Sole percorrendo un'orbita piana che ha la forma di un'ellisse; il Sole occupa uno dei due fuochi dell'ellisse. Il punto in cui il pianeta raggiunge la massima distanza dal sole si chiama afelio, mentre il punto di minima distanza viene detto perielio. (Vedi un approfondimento sull'ellisse).

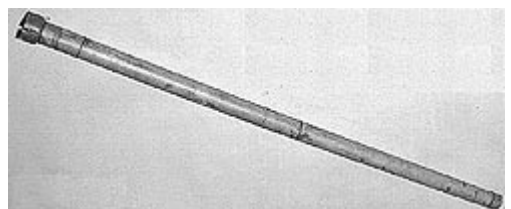
SECONDA LEGGE - La velocità di ciascun pianeta lungo la sua orbita non è uniforme, ma cambia a seconda della sua posizione: il pianeta sarà più veloce nei pressi del perielio e più lento nei pressi dell'afelio. Precisamente, il raggio vettore che unisce il pianeta al sole, percorrerà aree uguali in tempi uguali. Nella figura, le aree azzurre rappresentano tratti di orbita percorsi nello stesso intervallo di tempo e quindi sono uguali.

TERZA LEGGE - E' la relazione tra le dimensioni delle orbite e i periodi di rivoluzione dei pianeti: i quadrati dei periodi di rivoluzione sono proporzionali ai cubi delle distanze cioè:

$$\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2 = \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^3$$

Dove P_1 e P_2 sono periodi di rivoluzione di due pianeti e a_1 e a_2 sono i semiassi maggiori delle loro orbite.

L'opera di Keplero non fu il solo importante sviluppo della prima parte del XVII secolo. Nel 1608 un fabbricante di occhiali di Middleburg in Olanda, Hans Lippersheim, scoprì che sistemando due lenti in una certa maniera si potevano ottenere delle immagini ingrandite di oggetti distanti. Occhiali erano stati usati per qualche tempo; secondo alcune fonti essi furono inventati da Ruggero Bacone; ma nessuno aveva scoperto il principio del telescopio prima che lo facesse, più o meno accidentalmente, Lippersheim. La notizia della scoperta dilagò in Europa, e giunse alle orecchie di Galileo Galilei, professore di matematica dell'Università di Pisa. Galileo comprese immediatamente che il telescopio poteva essere adoperato in astronomia, e *"senza risparmio di spesa e di energie"* come egli stesso scrisse, costruì da sé uno strumento. Era un piccolo oggetto, pietosamente debole se paragonato ad un moderno cannocchiale tascabile, ma fu di aiuto per una completa rivoluzione del pensiero scientifico.



Galileo ottenne le prime immagini telescopiche dei cieli verso la fine del 1609. Improvvisamente l'universo cominciò ad aprirsi davanti ai suoi occhi. La luna era coperta di pianure buie, alte montagne e giganteschi crateri; Venere, la stella serotina degli antichi, presentava delle fasi sul tipo di quelle della luna, tanto da essere a volte nascente e talvolta quasi piena; talvolta mezza. Giove era servito da 4 lune tutte per sé e la Via Lattea risultò composta da innumerevoli deboli stelle. Galileo aveva sempre creduto nel nuovo sistema dell'Universo, ed il suo lavoro al telescopio lo aveva reso vieppiù sicuro del suo credo. Inevitabilmente si trovò nei guai con la chiesa. Era duro per le autorità religiose il riconoscere che la terra non era il corpo più importante dell'Universo, e Galileo appariva ai loro occhi come un eretico pericoloso. Venne arrestato ed imprigionato, dopodiché fu processato e costretto a "maledire, abiurare ed odiare" la falsa teoria che la terra si muoveva attorno al sole.

Pochi si lasciarono illudere, e prima della fine del secolo, la teoria tolemaica fu abbandonata per sempre. La pubblicazione dei *Principia* di Isacco Newton, nel 1687, portò ad una vera comprensione di come si muovevano i pianeti. Se Keplero trovò "come" i pianeti su muovono, Newton scoprì "perché". Egli costruì anche un telescopio di tipo assolutamente nuovo. Lo strumento di Galileo era un rifrattore, e si serviva di un obiettivo per raccogliere la sua luce. Newton arrivò alla conclusione che i rifrattori non sarebbero stati mai del tutto soddisfacenti, e si diede da fare per ovviare a questa difficoltà. Finalmente decise di eliminare del tutto l'obiettivo, e di raccogliere la luce per mezzo di uno specchio di forma adatta. Quando Newton eliminò il rifrattore perché non soddisfacente, commise uno dei suoi rari errori. Tuttavia, il "riflettore" newtoniano divenne presto popolare, e tale è rimasto. Gli specchi si costruiscono più facilmente delle lenti, ed anche oggi tutti i maggiori strumenti sono del tipo riflettente. L'astronomia si evolveva. Fintantoché le osservazioni dovevano venire compiute solo ad occhio nudo, si poteva imparare poco sulla natura dei pianeti e delle stelle; i loro movimenti potevano venire studiati, ma tutto finiva lì. Non appena si resero disponibili i telescopi, degli osservatori veri e propri fecero la loro comparsa. Copenhagen e Leida aprirono la serie; l'osservatorio di Parigi venne completato nel 1671, e quello di Greenwich nel 1675.

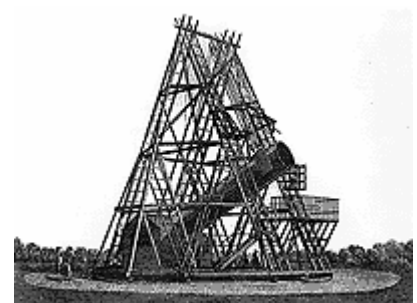
Greenwich venne fondata per una ragione particolare. L'Inghilterra è sempre stata una nazione marinara e prima della scoperta di orologi di cui si potesse



fidare il solo modo per i marinai di stabilire la loro posizione in mezzo all'oceano, allorché non v'era terra in vista, era di osservare la posizione della luna in mezzo alle stelle. Questo implicava l'uso di un buon catalogo di stelle ed il migliore che si potesse ottenere, quello di Tycho, non era ancora sufficientemente esatto. Carlo II aveva perciò ordinato che i campi stellari dovevano *"venire nuovamente osservati, esaminati, e corretti ad uso dei miei marinai"*. Venne scelta una zona nel parco reale di Greenwich, e Sir Cristopher Wren, egli stesso professore di astronomia, progettò la costruzione del primo osservatorio. Il Reverendo John Flamsteed fu nominato astronomo di corte, e in tempo debito il riveduto catalogo delle stelle fu completato.

I telescopi furono costantemente migliorati. Alcuni dei primi strumenti erano davvero curiosi; uno di essi, usato dall'osservatore olandese Christiaan Huygens, era lungo più di 200 piedi, tanto che l'obiettivo dovette venir fissato ad un tronco. Ma gradatamente le maggiori difficoltà vennero superate e sia rifrattori che riflettori acquistarono in potenza e convenienza. Anche la matematica astronomica compiva dei grandi passi. L'ostacolo maggiore era sempre rappresentato dal sistema tolemaico, ma una volta eliminato quello, la strada era spianata. La distanza tra la terra ed il sole venne misurata con sufficiente precisione, e nel 1675 l'astronomo danese Ole Roemer misurò perfino la velocità della luce, che risultò di 300.000 km. al secondo. Roemer fece questo casualmente, osservando i movimenti delle quattro grandi lune di Giove.

Ma benché la conoscenza dei corpi del sistema solare si fosse arricchita al di là di qualsiasi immaginazione, poco si conosceva sulle stelle, che venivano ancora considerate come semplici punti di riferimento. Il primo serio tentativo per infrangere questa barriera venne compiuto da William Herschel, che viene giustamente definito il "padre dell'astronomia stellare". Herschel era nato a Hannover nel 1738, undici anni dopo la morte di Newton. Venne in Inghilterra e divenne organista presso la Octagon Chapel di Bath; il suo principale interesse era l'astronomia, ed egli costruì telescopi a riflessione che erano i migliori della sua epoca. Il maggiore dei telescopi di Herschel costruito relativamente tardi nella sua carriera, aveva uno specchio di 48 pollici di diametro. Herschel doveva guadagnarsi di che vivere, e per qualche anno non poté dedicare tutto il suo tempo allo studio dell'astronomia. Poi, nel 1781, fece una scoperta che cambiò completamente il



corso della sua vita. Una sera, mentre stava esaminando alcune deboli stelle della costellazione dei Gemelli, incontrò un oggetto che non era certamente una stella. Dapprima lo credette una cometa, ma non appena fu calcolata la sua orbita, non vi fu più alcun dubbio sulla sua natura: non era una cometa, ma un pianeta, quello che noi chiamiamo oggi Urano. La scoperta giunse completamente inaspettata. Esistevano 5 pianeti conosciuti, e questi assieme alla luna ed al sole, davano un totale di 7. Il 7 era il numero magico degli antichi, e si era pensato perciò che il sistema solare fosse completo. Herschel divenne famoso in tutto il mondo; fu nominato astronomo di corte da re Giorgio III, e da allora poté abbandonare completamente la sua carriera musicale. Herschel si impose un tremendo programma. Egli si propose di esplorare tutti i cieli, per potersi così formare un'idea di come le stelle fossero distribuite. Fino alla fine della sua lunga vita, nel 1822, egli lavorò pazientemente al suo progetto e le sue conclusioni finali si sono dimostrate estremamente accurate. Naturalmente, Herschel fece numerose scoperte durante le sue esplorazioni celesti. Molte stelle che sembravano semplici, risultarono essere doppie, e c'erano anche ammassi stellari, come pure delle deboli macchie luminose conosciute come "nebulose" dalla parola latina che significa "nuvole". Herschel era un osservatore oltremodo meticoloso. Egli catalogò tutte le sue scoperte, ed esaminando le carte che pubblicò non possiamo che meravigliarci della mole di lavoro che riuscì a svolgere. Dato che visse in Inghilterra gran parte della sua vita, non ebbe occasione di esaminare le stelle della parte meridionale dell'emisfero australe che non appaiono mai a latitudini nordiche, ed è notevole il fatto che il completamento dei suoi "rastrellamenti stellari" fu compiuto in seguito da suo figlio, sir John Herschel, che si recò appositamente al Capo di Buona Speranza, rimanendovi per parecchi anni. Nei primi anni del XIX secolo un ottico tedesco, Fraunhofer, cominciò ad eseguire degli esperimenti con dei prismi di vetro. Newton aveva già scoperto che la comune luce "bianca" non è affatto bianca, bensì un miscuglio di tutti i colori dell'arcobaleno. Fraunhofer comprese che questa scoperta poteva divenire importante, ed il suo lavoro portò allo sviluppo di un nuovo strumento, lo spettroscopio astronomico. Esattamente come un telescopio raccoglie la luce, così uno spettroscopio la scompone. Con l'analisi degli "spettri" ottenuti, è possibile riuscire a sapere molte cose sullo stato della materia che emette la luce. Per esempio, lo spettro del sole rivela due righe scure che possono essere causate solo dall'elemento sodio, cosicché abbiamo la prova dell'esistenza del sodio sul sole. È possibile

ora rintracciare degli elementi noti in stelle remote, e perfino in altri sistemi stellari, sperduti nelle immensità dello spazio.

Nel 1838, Friedrich Wilhelm Bessel, direttore dell'osservatorio di Königsberg, ritornò al problema della distanza delle stelle. Nello studiare i movimenti apparenti di 61 Cygni, un pallido oggetto nella costellazione del Cigno, poté dimostrare che giaceva ad una distanza di circa 60 milioni di milioni di miglia. Due mesi più tardi un astronomo britannico, Henderson misurò la distanza della luminosa stella australe Alpha Centauri, e giunse al risultato abbastanza esatto di 20 milioni di milioni di miglia. Alpha Centauri è una stella tripla, ed il membro più debole del trio è il corpo conosciuto più vicino, al di fuori del nostro sistema solare. Il nostro cervello non è fatto per comprendere delle distanze così immense. Fortunatamente abbiamo un'unità molto migliore a disposizione, basata sulla velocità della luce. Sappiamo che la luce viaggia alla velocità di 300.000 km al secondo. Un raggio di luce impiega 8 minuti ed un terzo per giungere dal sole a noi, ma nel caso di Alpha Centauri il tempo impiegato è di 4 e $\frac{1}{3}$ anni: non vediamo la stella come è adesso, ma come era 4 e $\frac{1}{3}$ anni fa. Diciamo perciò che Alpha Centauri dista da noi 4 e $\frac{1}{3}$ anni-luce, e che la distanza di 61 Cygni è di quasi 11 anni-luce.

Un altro grande avvenimento dell'ultimo secolo fu l'avvento della fotografia astronomica. Nel 1845 venne eseguito il primo "dagherrotipo" fotografico del sole, seguito nel 1850 da una fotografia della luna. Entro 50 anni magnifiche fotografie dei corpi celesti vennero scattate non solo negli osservatori ufficiali, ma anche da dilettanti. Il riflettore da 48 pollici di Herschel, venne ben presto sorpassato. Nel 1845 in Irlanda Lord Rosse, costruì uno specchio da 72 pollici. era difficile e complicato ad usarsi, ma era di gran lunga lo strumento più potente allora esistente, e Rosse lo adoperò per studiare gli ammassi stellari e le nebulose trovate da Herschel. Alcune delle nebulose risultarono essere costituite interamente da stelle deboli, benché altre non potessero essere risolte nello stesso modo. Ancor più interessante il fatto che alcune delle nebulose stellari rivelarono una forma a spirale, in modo da assomigliare assai a delle ruote.

Il telescopio da solo, non avrebbe mai potuto svelare la natura delle misteriose nebulose; ma lo spettroscopio sì. Nel 1864, Sir William Huggins esaminò una tenue nebulosa nella costellazione del Drago, e trovò che non era composta da stelle, ma da un gas luminoso. Sappiamo ora che gli oggetti nebulosi sono di tre tipi. Nel nostro sistema, conosciuto comunemente come

Via Lattea, ma più correttamente come Galassia, troviamo i normali ammassi stellari e le nebulose gassose, la maggior parte di esse alla distanza di centinaia di migliaia di anni-luce da noi. Al di là della Galassia, si trova un vasto golfo, e quindi si giunge al primo dei sistemi separati esterni, giacente alla distanza di molto superiore al milione di anni-luce. La Grande Spirale di Andromeda, che può essere vista ad occhio nudo, come una tenue macchia polverosa, si dimostra una galassia a sé stante, ancor più grande della nostra. Herschel aveva sospettato qualcosa di simile, e il lavoro di Rosse e Huggins confermava il suo punto di vista, benché la questione non venisse definitivamente risolta che nel 1933. Perfino il riflettore da 72 pollici di Rosse non mantenne il suo primato a lungo. Ogni decennio assisteva al sopraggiungere di nuovi e più grandi telescopi; nel 1917 venne il riflettore da 100 pollici di Monte Wilson, in California, e nel 1948 quello da 200 pollici del Palomar.

Vi sono alcuni oggetti nello spazio che non emettono solamente della luce visibile, ma anche delle radiazioni di lunghezza d'onda molto maggiore, conosciute generalmente col nome di radio-onde. quando si scoprì questo fatto per la prima volta, nel 1931, si sviluppò una branca completamente nuova dell'astronomia. I radio telescopi non assomigliano per nulla ai normali telescopi; hanno la forma di grandi antenne, ed hanno permesso agli astronomi di studiare delle regioni nello spazio che non avrebbero potuto essere esplorate in nessun'altra maniera. Non sono più i tempi di Tycho Brahe, allorché i soli strumenti a disposizione erano l'occhio umano e rudimentali strumenti di misurazione.

