

Guardando il cielo: da Tolomeo ad Einstein

Tolomeo era un astronomo egizio vissuto nel II secolo d.C. Delle sue opere ci rimane solo l'*Almagesto*, in cui sono esposte le sue osservazioni. Il Sistema Geocentrico Tolomaico considera il pianeta Terra, immobile e piccolissimo rispetto all'Universo, occupante la posizione centrale, attorno alla quale ruotano il Sole, la Luna, i pianeti e le stelle incastonati in sfere. Poiché sono ammessi solo movimenti circolari, per spiegare le anomalie nel moto dei pianeti, Tolomeo ha elaborato un complesso meccanismo



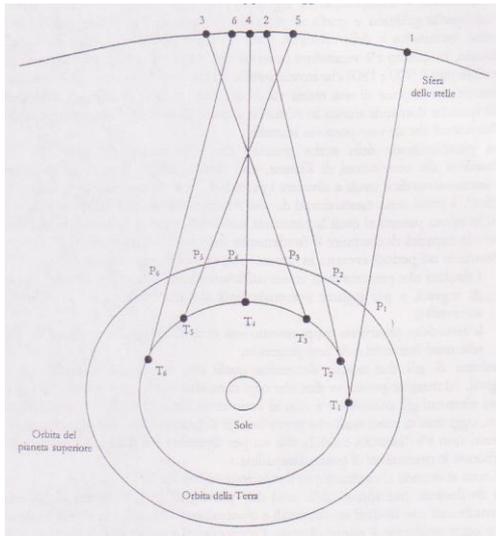
che prevede il loro movimento su un piccolo cerchio, l'*epiciclo*, il cui centro si muove su un cerchio più grande, il *deferente*; quest'ultimo non ha al centro la Terra, che si trova in posizione eccentrica. La prima sfera è quella della Luna e non ha l'epiciclo; è seguita da quelle di Mercurio e Venere che si muovono secondo epicicli. La successiva sfera solare ha un movimento eccentrico senza epicicli. Dopo il Sole si trovano Marte Giove, Saturno, tutte con movimenti epiciclici, e la sfera delle stelle fisse riunite in 48 costellazioni.

Se osserviamo Marte lo vediamo posizionato ad esempio in A, come in figura, poi in B, poi in C e in D. Quindi il suo moto non sembra essere circolare uniforme. Il moto circolare uniforme è quello che dà la percezione, l'eternità, cioè che fa sempre lo stesso giro sempre con la stessa velocità; invece questo pianeta faceva questa cosa strana, andava prima avanti e **poi tornava indietro**. Perché accade ciò?

Cerchiamo di spiegarlo alla luce di ciò che sappiamo oggi, mettendo il Sole al centro.

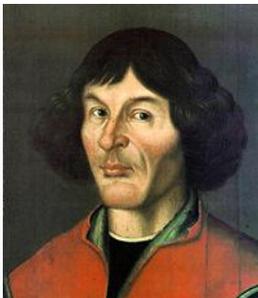
Se io sono in T_1 sulla Terra e guardo il pianeta posizionato in P_1 , lo proietto sulla sfera delle stelle nel punto 1. Poi la Terra e il pianeta si spostano. La Terra T_2 guarda il pianeta in P_2 e lo proietta nel punto 2. E così per 3. Però il punto 4 anziché essere più avanti di 3, torna indietro, così anche 5 torna indietro. Quindi la proiezione del pianeta esterno come è visto dalla Terra sulle stelle. Esse fa questo moto: prima va avanti e poi torna indietro. Il pianeta di fatto fa sempre lo stesso giro, non torna indietro, però la proiezione del moto del pianeta come è visto dalla Terra è apparente. Se stessimo sul Sole non ci sarebbero problemi, vedremmo il pianeta fare il suo giro completo.

Ma ai tempi di Aristotele si pensava che la Terra era a centro. Copernico scrive nel "Commentariolus": Essendomi reso conto di questo, andavo spesso meditando se per caso non si potesse trovare un più razionale sistema di cerchi, con i quali fosse possibile spiegare ogni diversità apparente, e dopo aver affrontato il problema, per modo di dire insolubile, mi venne in mente infine il modo in cui questo potesse essere risolto. Con mezzi meno numerosi e più convenienti dei precedenti purché venissero ammesse alcune assunzioni o come le chiamano assiomi. Nascono da qui i sette postulati su cui si basa la teoria copernicana



Con l'aumentare delle osservazioni, il sistema tolemaico andava sempre più complicandosi per adattarlo alle nuove scoperte; per questo occorreva una nuova spiegazione dei fenomeni astronomici più semplice e coerente.

Nel 1543, anno della sua morte, il canonico polacco **Nicolò Copernico** (1473-1543) pubblicò il *De revolutionibus orbium coelestium*, proponendolo come semplice ipotesi di lavoro, non come modello rispondente alla realtà. Il suo sistema eliocentrico pone il Sole al centro del cosmo, attorno al quale ruotano, incastonati in sfere, i pianeti allora conosciuti: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno, alla fine c'è la sfera immobile delle stelle fisse. Questo modello spiega in modo migliore i moti dei pianeti, tuttavia si aggiungevano nuovi problemi perché non erano ammessi movimenti ellittici ma solo circolari.



Il nucleo centrale della teoria di Copernico, l'essere il Sole al centro delle orbite degli altri pianeti, e non la Terra, fu pubblicato nel libro *De revolutionibus orbium coelestium* (Delle rivoluzioni dei mondi celesti) l'anno della sua morte. Il libro è il punto di partenza di una conversione dottrinale dal sistema geocentrico a quello eliocentrico e contiene gli elementi più salienti della teoria astronomica dei nostri tempi, comprese una corretta definizione dell'ordine dei pianeti, della rivoluzione quotidiana della Terra intorno al proprio asse, della precessione degli equinozi.

La teoria di Copernico non era però senza difetti, o almeno senza punti che in seguito si sarebbero rivelati fallaci, come per esempio l'indicazione di orbite circolari, anziché ellittiche - come oggi sappiamo - dei pianeti e degli epicicli. Questi errori rendevano i risultati concreti degli studi, come per esempio le previsioni delle effemeridi, non più precise di quanto non fosse già possibile ottenere col sistema Tolemaico.

La teoria impressionò grandi scienziati come Galileo e Keplero, che sul suo modello svilupparono correzioni ed estensioni della teoria. Fu l'osservazione galileiana delle fasi di Venere a fornire il primo riscontro scientifico delle intuizioni copernicane.

Il sistema copernicano può sintetizzarsi in sette assunti, così come dal medesimo autore enunciati in un compendio del *De revolutionibus* ritrovato e pubblicato nel 1878:

1. Non vi è un unico punto centro delle orbite celesti e delle sfere celesti;
2. Il centro della Terra non è il centro dell'Universo, ma solo il centro della massa terrestre;
3. Tutti i pianeti si muovono lungo orbite il cui centro è il Sole, che quindi è al centro dell'Universo (il nostro sistema solare);
4. La distanza fra la Terra ed il Sole, paragonata alla distanza fra la Terra e le stelle del Firmamento, è infinitamente piccola;
5. Il movimento del Sole durante il giorno è solo apparente, e rappresenta l'effetto di una rotazione che la Terra compie intorno al proprio asse durante le 24 ore, rotazione sempre parallela a sé stessa;
6. La Terra (insieme alla Luna, ed esattamente come gli altri pianeti) si muove intorno al Sole ed i movimenti che questo sembra compiere (durante il giorno e nelle diverse stagioni dell'anno, attraverso lo Zodiaco) altro non sono che l'effetto del reale movimento della Terra;
7. I movimenti della Terra e degli altri pianeti intorno al Sole possono spiegare le stagioni, le stagioni e le altre particolarità dei movimenti planetari.

Queste asserzioni rappresentavano l'esatto opposto di quanto affermava la teoria geocentrica, allora comunemente accettata. Esse mettevano quindi in discussione tutto il sistema di pensiero allora prevalente in filosofia e religione; la perdita della centralità della Terra rispetto al resto dell'universo, infatti, nonché la considerazione della sostanziale omogeneità dei fenomeni celesti e terrestri, entrambi sottoposti alle medesime leggi matematiche e fisiche, portarono a una rivoluzione nel pensiero che non fu solo scientifica, ma anche antropologica e sociologica.

Il I e il II postulato scardinano il paradigma che per 1400 anni aveva resistito tranquillamente, mentre il IV, V e VI postulato servono soltanto ad "apparare" una serie di critiche che venivano fatte al sistema eliocentrico. Trascorrerà ancora molto tempo prima che questo sistema fosse accettato e di conseguenza affermato. La prima critica mossa riguardava il concetto di parallasse

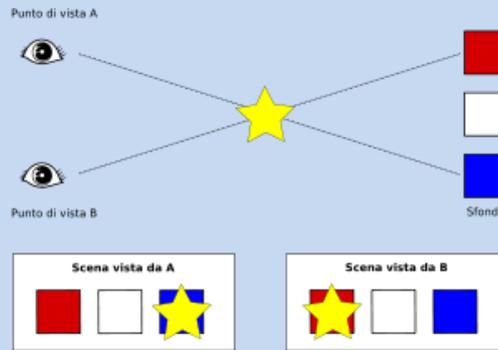
"Voi dite che il Sole sta al centro e che la Terra ci gira intorno, voi, voi dell'eliocentrismo, ma se è vero questo, dovrei vedere un effetto che è lo spostamento apparente delle stelle"

Dal IV postulato si evince che Copernico ipotizza l'universo sconfinato, enorme proprio per giustificare il fatto che l'effetto c'è ma non si vede.

Poiché con Copernico l'uomo viene tolto dal centro dell'universo occorre dare un "contentino" teologico alla vicenda.

La Parallasse

La **parallasse** è il fenomeno per cui un oggetto sembra spostarsi rispetto allo sfondo se si cambia il punto di osservazione.



Quando osservate qualcosa che sta davanti a voi e poi vi muovete prima verso destra e poi verso sinistra noterete che la posizione dell'oggetto sembra cambiare. Questo fenomeno è chiamato parallasse

Da punto di vista quantitativo, con il termine **parallasse** si indica il valore dell'angolo di spostamento.

Il termine deriva dal greco *παράλλαξις* (*paràllaxis*), che significava originariamente *accavallamento*, ma aveva anche assunto il significato scientifico attuale^[1].

Misure di distanza

Misurando l'angolo della parallasse e la distanza tra i due punti di osservazione è possibile calcolare la distanza dell'oggetto per mezzo della trigonometria. Questo è un caso particolare della triangolazione, in cui dato un lato e due angoli oppure un angolo e due lati è possibile calcolare l'intero triangolo. Nella misura della parallasse il triangolo è in genere molto stretto e lungo, con una piccola base e gli angoli prossimi a 90°. Per questo le misure devono essere effettuate con grande precisione.

La tecnica viene usata in astronomia per determinare la distanza di corpi celesti non eccessivamente lontani. Il punto di osservazione dalla Terra può cambiare in seguito alla rotazione terrestre e si ha la **parallasse diurna** oppure in seguito alla rivoluzione annuale intorno al Sole, ed in tal caso si ha la **parallasse annua**.



La Luna e le Pleiadi visti nello stesso momento da quattro punti diversi sulla Terra.

NB: è solo una simulazione illustrativa della parallasse lunare, nella realtà le Pleiadi non sono visibili al Polo Sud.

Parallasse lunare

Una prima tecnica elementare per calcolare la parallasse lunare è quella ottenuta sfruttando una eclissi lunare. L'ombra terrestre proiettata sulla Luna ha un raggio di curvatura apparente uguale alla differenza tra il raggio apparente della Terra ed il raggio del

Sole visti dalla Luna. Questo raggio è di 0,75 gradi, da cui, dato il raggio solare pari a 0,25 gradi e il raggio terrestre di 1 grado, si ottiene una distanza Terra-Luna pari a 60 raggi terrestri, ovvero 384000 Km.

Un altro sistema per calcolare la parallasse lunare è di osservarne contemporaneamente la posizione rispetto alle stelle fisse da due punti diversi della Terra. Considerando l'orientazione terrestre, la posizione e l'inclinazione dei due punti, la distanza lunare può essere triangolata come:

$$distanza\ luna = \frac{distanza_{punti\ di\ osservazione}}{tangente\ dell'angolo}$$

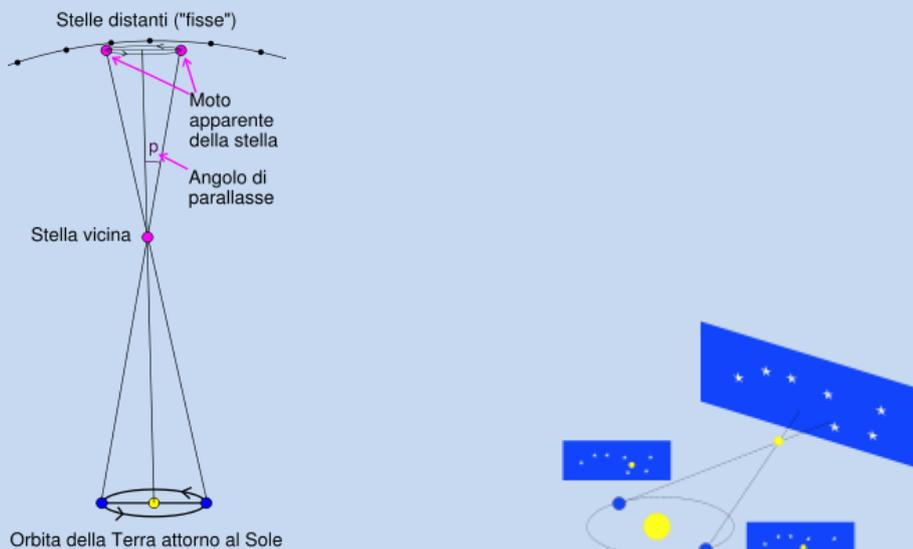
Parallasse solare

Dopo che Johannes Kepler formulò il modello del sistema solare basato sulle leggi da lui scoperte, mancava ancora una scala delle dimensioni. I rapporti tra le orbite erano determinati, per cui sarebbe stato sufficiente misurare direttamente la distanza Terra-Sole, chiamata Unità astronomica.

Un primo metodo per determinare la distanza dal Sole fu proposto nell'antichità da Aristarco da Samo. Se il Sole non era eccessivamente distante, il momento del primo ed ultimo quarto delle fasi lunari non cade esattamente a metà tra il plenilunio ed il novilunio. I tentativi di calcolo erano però basati sull'ipotesi di orbite circolari, ed i risultati ottenuti furono molto imprecisi.

Nel 1716 Edmund Halley suggerì che il transito di Venere sul disco solare potesse essere impiegato per ricavare la parallasse solare. I transiti di Venere sono piuttosto rari, e le prime misure furono fatte solamente nel 1761 e nel 1769. Il metodo è viziato però da un margine di incertezza a causa dell'effetto goccia nera che rende difficile stabilire con precisione gli istanti di contatto tra i dischi dei corpi celesti.

Agli inizi del XX secolo, per determinare con maggiore precisione la scala del sistema solare, fu misurata la parallasse di alcuni asteroidi, in particolare Eros, che passa periodicamente a soli 22 milioni di Km dalla terra. Studi sulle riflessioni radar di Venere (1958) e di asteroidi come Icaro hanno permesso di misurare direttamente queste distanze e calcolare meglio la parallasse solare. Oggi l'unità astronomica è determinata con precisione per mezzo della telemetria effettuata con sonde spaziali.



Esempio di parallasse stellare.

Per determinare la parallasse stellare si sfrutta il cambiamento di posizione assunto dalla Terra durante il suo moto orbitale. La tecnica sottintende la conoscenza del diametro dell'orbita terrestre e richiede l'osservazione dello stesso oggetto celeste a sei mesi di distanza per determinarne lo spostamento apparente rispetto allo sfondo. Più precisamente si definisce *parallasse annua* quella derivata da uno spostamento pari alla distanza media tra terra e sole (raggio medio dell'orbita) ^[2] Questa tecnica ha introdotto in astronomia l'uso di una nuova unità di misura delle distanze, il *parsec*, definito come la distanza alla quale la parallasse annua è esattamente di un secondo d'arco, ed equivale a 3,26 anni luce. In queste unità di misura la distanza è calcolata semplicemente come l'inverso dell'angolo di parallasse annua. Per esempio la stella a noi più vicina, Proxima Centauri, presenta una parallasse di 0,750" (secondi d'arco). Ne consegue che la sua distanza è $1 / 0,750 = 1,33$ parsec, ovvero 4,3 anni luce. La prima misura di parallasse stellare fu fatta nel 1838 da Friedrich Wilhelm Bessel su 61 Cygni.

Nel 1989 fu lanciato in orbita il satellite Hipparcos con lo scopo di determinare con precisione la parallasse ed il moto proprio di 100000 stelle vicine con una precisione di 0,002". Anche con questa precisione le distanze massime misurabili direttamente sono nell'ordine di poche centinaia di parsec. Il satellite Gaia, che verrà lanciato nei prossimi anni, migliorerà sostanzialmente la situazione.

Vista tridimensionale

Nell'uomo e in altri animali i due occhi osservano la stessa scena ma da due punti di vista leggermente diversi, pari alla distanza interpupillare. Se si osserva un oggetto vicino tenendo lo sguardo all'infinito, coprendo alternativamente i due occhi si nota che l'immagine sfocata dell'oggetto sembra spostarsi. Questo principio è detto *visione binoculare* e consente, attraverso l'elaborazione compiuta dal cervello, di percepire la profondità.

Sono stati inventati diversi sistemi per offrire la visione tridimensionale di fotografie e film (stereoscopia). Si tratta di mostrare ai due occhi due immagini scattate da due posizioni opportunamente traslate tra loro per mezzo di un visore dotato di due obiettivi. Fotografie di questo tipo sono state fatte anche sulla Luna nel corso del Programma Apollo.

Un sistema usato comunemente è quello degli anaglifi, che utilizzano degli occhiali con due filtri colorati sulle lenti, uno rosso ed uno ciano. L'immagine, costituita sovrapponendo le due immagini attraverso filtri rossi e ciano, viene filtrata dagli occhiali e percepita differenzialmente dai due occhi, ricostruendo il senso di profondità.

Altri sistemi impiegano occhiali dotati di due otturatori a cristalli liquidi e di un film in cui i fotogrammi corrispondono alternativamente all'immagine di destra e di sinistra. Gli otturatori sono comandati elettronicamente in modo che ciascun occhio veda il fotogramma corretto. Nei sistemi di realtà virtuale sono impiegati caschi con due visori LCD, uno per occhio.

Strumenti di misura e fotografici

Se uno strumento di misura ottico, quale un telescopio, microscopio o teodolite, non è correttamente focalizzato, il reticolo di misura appare spostarsi se l'operatore sposta leggermente l'occhio rispetto allo strumento. Per questo motivo è importante curare la messa a fuoco dello strumento e la posizione dell'operatore.

Anche in strumenti di misura non ottici, quali un righello o uno strumento elettrico analogico la parallasse può dare origine a errori di lettura (*errori di parallasse*). Spostando il proprio punto di vista i segni sul righello appaiono spostarsi rispetto al punto da misurare, così come una lancetta sembra muoversi sopra la scala graduata, con effetto più consistente quanto maggiore è lo spessore dello strumento o la distanza della scala: per questo motivo è necessario osservare lo strumento da una posizione perfettamente verticale allo strumento stesso.

Un metodo pratico per ridurre l'errore di lettura è quello di porre uno specchietto sul piano della scala graduata, al di sotto dell'indice mobile: in tal modo, chiudendo un occhio, la lettura corretta si otterrà solo quando l'indice e la sua immagine sullo specchio coincideranno. Gli strumenti di misura elettrici più precisi sono infatti dotati di una striscia a specchio sulla scala, e l'utilizzatore deve posizionarsi in modo che l'immagine riflessa sia nascosta dall'indice stesso.

In fotografia l'angolo parallasse è l'angolo che si forma tra l'asse ottico dell'obiettivo e l'asse ottico del mirino (nelle vecchie macchine reflex biottiche come rolleiflex, rolleicord). L'effetto della parallasse fa sì che l'immagine di oggetti vicini vista attraverso il mirino differisca da quella ripresa dall'obiettivo e per questo capita che in alcune foto le persone fotografate rimangano parzialmente tagliate fuori dalla scena, classiche sono le vecchie foto senza testa o col soggetto eccessivamente eccentrico rispetto alla foto. Questo inconveniente viene eliminato nelle reflex monoculari nelle quali si vede esattamente quello che viene fotografato (l'immagine per il puntamento e per lo scatto sono riprese dallo stesso obiettivo). Nelle macchine fotografiche a mirino galileiano questo difetto non può essere eliminato.

Fotogrammetria aerea

In geografia, per determinare il profilo altimetrico di una regione si effettuano fotografie aeree ad intervalli regolari, parzialmente sovrapposte in modo che per ogni punto siano disponibili almeno due immagini distinte. Conoscendo l'altitudine di volo e la distanza percorsa tra i due scatti è possibile elaborare queste immagini al fine di calcolare l'altezza dei diversi punti e costruire le linee di quota da rappresentare nelle carte geografiche

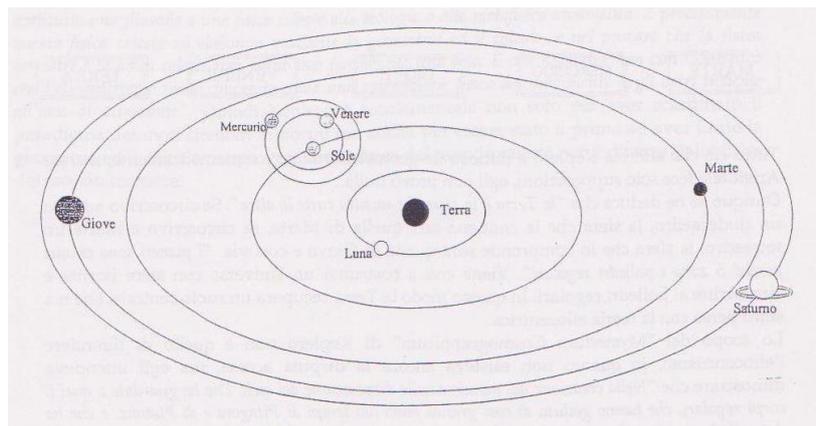
Siamo nel 1543, muore Copernico quando viene pubblicata la prima copia del "De revolutionibus orbium coelestium", di conseguenza non viene a conoscenza di quale sia l'impatto della sua opera sulla comunità

scientifico. Inoltre, Copernico non ebbe neppure modo di leggere ciò che Andrea Osiander¹ aveva scritto come prefazione alla sua opera. Tuttavia tale prefazione salvò l'opera dall'essere messa all'indice dalla Chiesa. La Chiesa non si preoccupò più di tanto dell'opera di Copernico in quanto "era solo una teoria, fatta di calcoli matematici e quindi non poteva che interessare solo quattro matematici".

Dopo Copernico: Tycho Brahe e Keplero

Tycho Brahe, un tempo chiamato in italiano anche **Ticone** (Schloss Knutstorp, 14 dicembre 1546 – Praga, 24 ottobre 1601), è stato un astronomo danese.

Nel novembre 1572, Brahe osservò una stella molto luminosa che era improvvisamente apparsa nella costellazione di Cassiopea. Poiché si riteneva fin dall'antichità che il mondo delle stelle fisse fosse eterno e immutabile, alcuni osservatori sostennero che il fenomeno era dovuto a qualcosa nell'atmosfera terrestre. Brahe comunque, osservò che la parallasse non cambiava di notte in notte, suggerendo che l'oggetto fosse molto distante. Brahe argomentò che un oggetto vicino avrebbe dovuto cambiare la sua posizione relativamente allo sfondo. Pubblicò un piccolo libro, *De Stella Nova* (1573), coniando il termine nova per una "nuova" stella (oggi sappiamo che quella stella era una supernova). Questa scoperta fu decisiva nella sua scelta dell'astronomia come professione. Keplero cercò, senza riuscirci, di persuadere Brahe ad adottare il modello eliocentrico del sistema solare. Brahe credeva in un modello geocentrico, che prese poi il nome di modello ticonico, per gli stessi motivi per cui sostenne che la supernova del 1572 non era vicina alla Terra. Egli sostenne che se la Terra fosse stata in moto, allora le stelle vicine avrebbero dovuto cambiare posizione relativamente alle stelle più lontane. In realtà questo effetto di parallasse esiste; non poteva essere osservato ad occhio nudo né con i telescopi dei duecento anni a seguire, perché anche le stelle più vicine sono molto più lontane di quanto gli astronomi dell'epoca ritenessero possibile. Secondo il modello ticonico, l'universo è fatto in maniera mista, ovvero alcuni pianeti ruotano intorno al Sole e altri pianeti ruotano intorno alla Terra. Questa visione dell'Universo si ebbe per la prima volta da Apollonio nella scuola alessandrina. Secondo Brahe, intorno al Sole ruotano Mercurio e Venere e tutti e tre insieme ruotano intorno alla Terra. Il resto dei pianeti ruotano sia intorno alla Terra che intorno al Sole. Questo sistema non ebbe molto successo



¹ Osiander era interessato anche alla matematica ed alla scienza in generale: nel 1543 si occupò di pubblicare "*De revolutionibus orbium coelestium*" di Nicolò Copernico. Per quest'opera, scrisse di sua iniziativa una prefazione anonima che spiega che il sistema eliocentrico non doveva essere inteso come descrizione dell'Universo com'è effettivamente, ma era soltanto uno strumento matematico per chiarire e semplificare i calcoli che hanno a che fare con il movimento dei pianeti (tesi questa che difese nel 1616 il cardinale Roberto Bellarmino contro Galileo).

Fu Keplero a rivelare il secolo successivo che l'autore della prefazione non era Copernico ma il teologo riformato.

Nel 1600, Brahe invita Keplero a raggiungerlo a Praga per fargli da assistente; Brahe muore l'anno dopo e Keplero gli succede nell'incarico di matematico alla corte di Rodolfo II

*“ La Geometria ha due grandi tesori: uno è il teorema di Pitagora; l' altro è la **Sezione Aurea** di un segmento. Il primo lo possiamo paragonare ad un oggetto d' oro; il secondo lo possiamo definire un prezioso gioiello”. Johannes Kepler [1571-1630]*

Nel 1596 pubblicò un trattato chiamato "*Mysterium Cosmographicum*" nel quale rappresentò l'universo costituito dalla serie di solidi platonici² annidati l'uno dentro l'altro con le sfere inscritte che determinano le orbite dei pianeti.

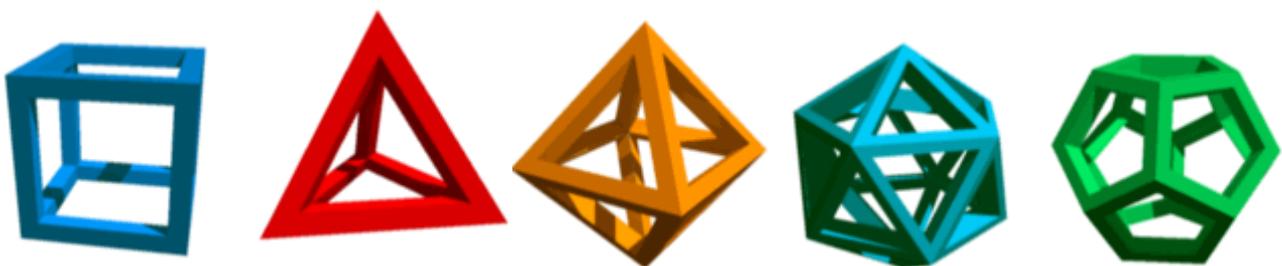
Keplero collega l'esistenza di 5 solidi platonici ai 5 elementi di Aristotele (fuoco, aria, terra, acqua e la cosiddetta quinta essenza). Keplero dimostra che Marte gira intorno al Sole in modo tale che la sua orbita è inscritta o circoscritta a un tetraedro; analogamente accade per Mercurio, Giove, Venere e Terra.

Tutto ciò che afferma Keplero è dimostrato geometricamente e matematicamente mentre Aristotele fece solo supposizioni, egli non provò nulla. Se ne deduce che “la Terra è la sfera che misura tutte le altre”. Se circoscrivo ad essa un dodecaedro, la sfera che la contiene sarà quella di Marte; se circoscrivo a Marte un tetraedro, la sfera che lo comprende sarà quella di Giove e così via. Viene così a costruirsi un Universo con sfere inscritte e circoscritte ai poliedri regolari; in questo modo la Terra recupera il ruolo centrale che aveva perso con la teoria eliocentrica.

Lo scopo del “*Mysterium Cosmographicum*” di Keplero non è quello di difendere l'eliocentrismo perché ancora non era viva la disputa quanto piuttosto cercare di dare una giustificazione dietrologica al mistero dell'Universo attribuendo alla mano divina il disegno ordinato delle orbite secondo i solidi cosiddetti platonici. Il concetto dell'armonia del mondo sarà ribadito nell'opera “*Harmonices mundi*” in cui afferma,

² I poliedri regolari possono avere come facce solo triangoli equilateri, quadrati e pentagoni. Ne segue che le sole possibilità sono che su ogni vertice concorrano 3, 4 o 5 triangoli, 3 quadrati e 3 pentagoni.

Da cui si ricava che i soli poliedri regolari (SOLIDI PLATONICI) siano:



Platonici Solidi	Forma delle facce	Numero di Vertici (V)	Numero di Spigoli (S)	Numero di Facce (F)	Verifica formula di Eulero: V-S+F=2
Tetraedro	Triangolo equilatero	4	6	4	4-6+4 = 2
Cubo	Quadrato	8	12	6	8-12+6 = 2
Ottaedro	Triangolo equilatero	6	12	8	6-12+8 = 2
Dodecaedro	Pentagono	20	30	12	20-30+12 = 2
Icosaedro	Triangolo equilatero	12	30	20	12-30+20 = 2

tra le altre cose, che ogni pianeta ha una propria musica celestiale che non sentiamo poiché ne siamo abituati all'ascolto perenne e secolare.

