



# Storia e filosofia della scienza

Prof. Marcello Pelillo

(a.a. 2008/09)

## Verso la rivoluzione astronomica I: Da Aristotele a Copernico



# I fenomeni celesti



## Lo gnomone

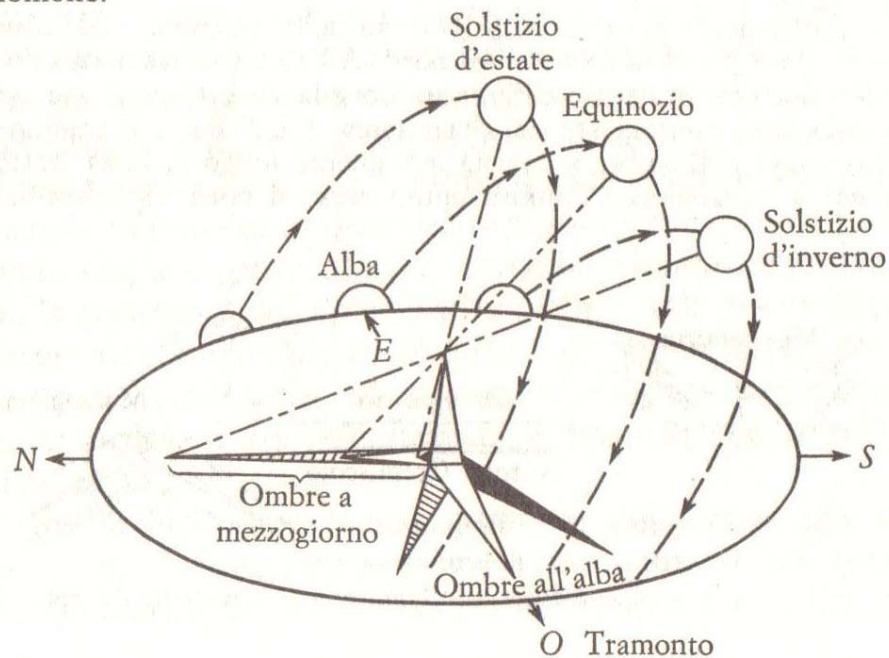


dal manuale "Giovani Marmotte" vol. 1 - walt disney ed. - milano 1987 - pag. 34



# Il moto apparente del sole

Relazione fra la posizione del Sole all'alba, l'altezza sull'orizzonte del Sole a mezzogiorno e la variazione stagionale dell'ombra dello gnomone.





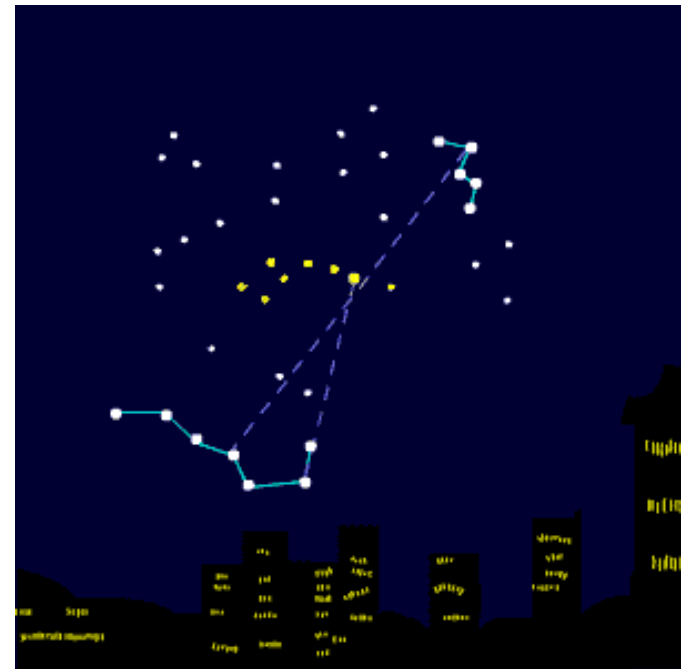


# Le stelle



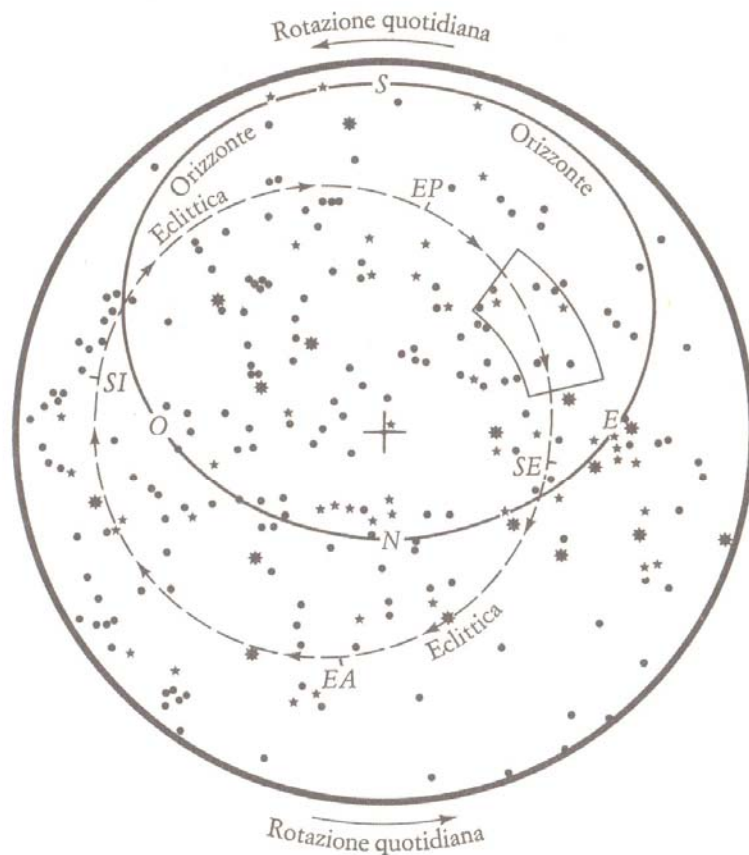
Photo Michael, Cosmos Observatory

Stellarium



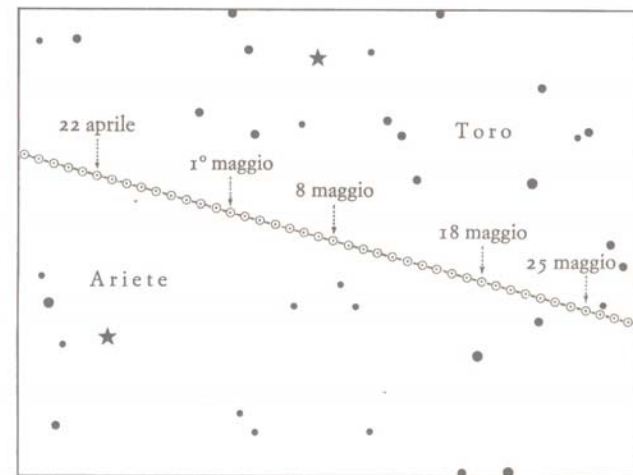


# Il sole come stella mobile



SI Solstizio d'inverno  
EP Equinozio di primavera  
SE Solstizio d'estate  
EA Equinozio d'autunno

Moto del Sole attraverso le costellazioni dell'Ariete e del Toro. I cerchietti rappresentano la posizione del Sole al tramonto, in sere successive che vanno dalla metà di aprile fin verso la fine di maggio.



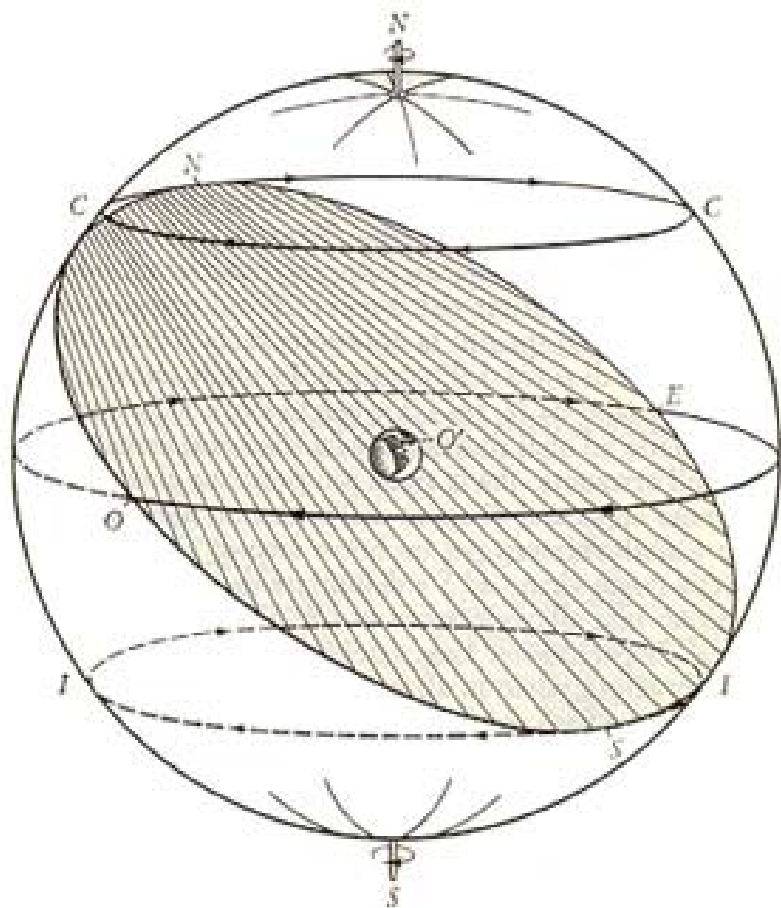


# La luna





## L'universo a due sfere



« La Terra era una minuscola sfera sospesa e ferma nel centro geometrico di una sfera molto piú grande e ruotante, che portava le stelle. Il Sole si muoveva nel vasto spazio fra la Terra e le sfere delle stelle. Al di fuori della sfera esteriore non c'era nulla; né spazio né materia, nulla.

[...]

Una sfera interna per l'uomo e una sfera esterna per le stelle »

Thomas S. Kuhn

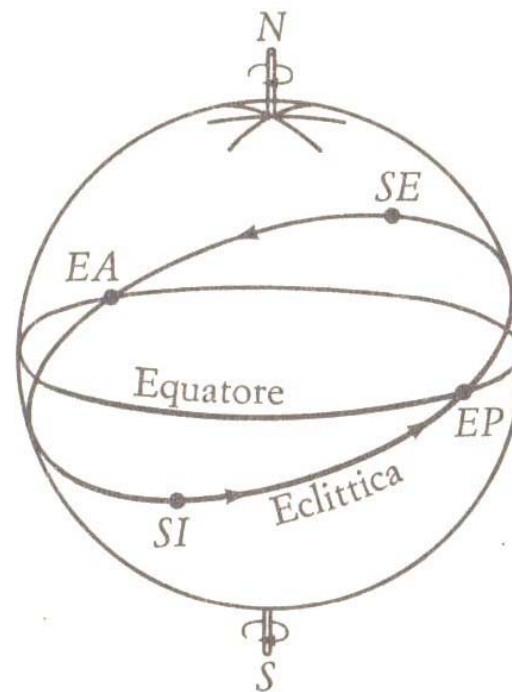
*La rivoluzione copernicana* (1957)





# L'eclittica

L'equatore e l'eclittica sulla sfera celeste.

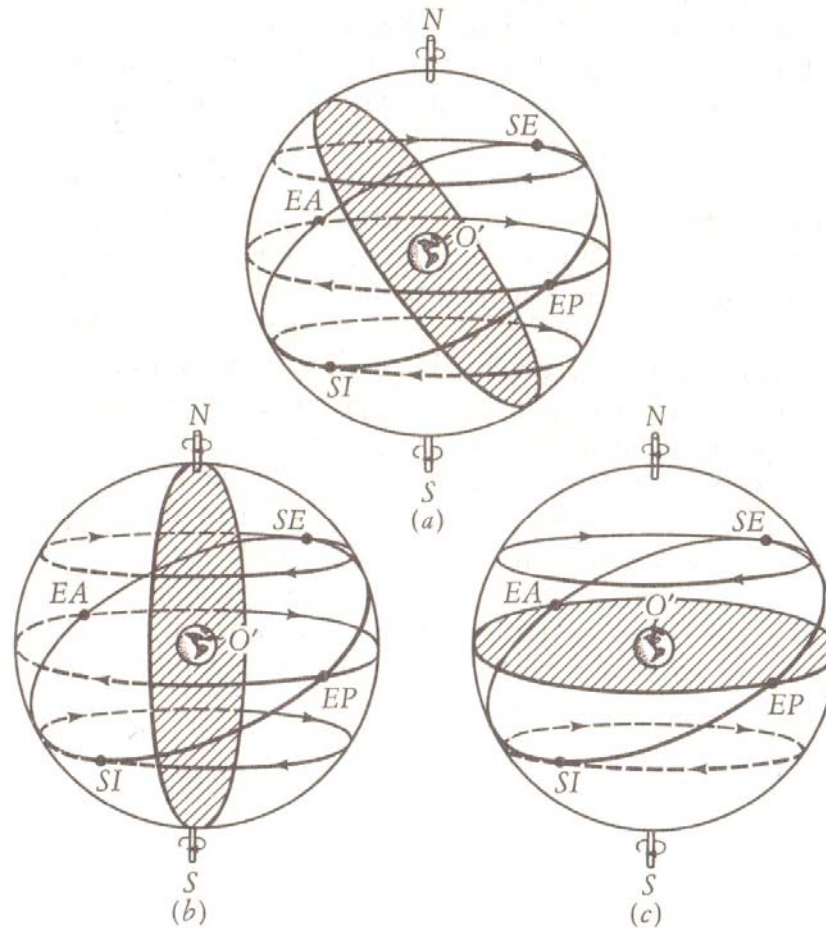


*SI* Solstizio d'inverno  
*EP* Equinozio di primavera

*SE* Solstizio d'estate  
*EA* Equinozio d'autunno



# Equinozi e solstizi



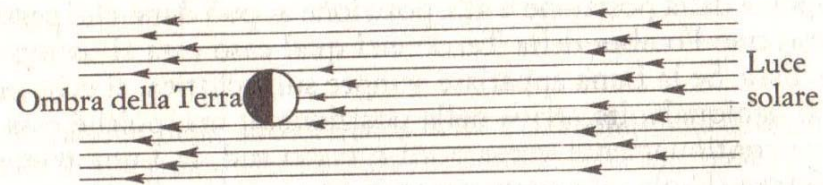
SI Solstizio d'inverno  
EP Equinozio di primavera

SE Solstizio d'estate  
EA Equinozio d'autunno

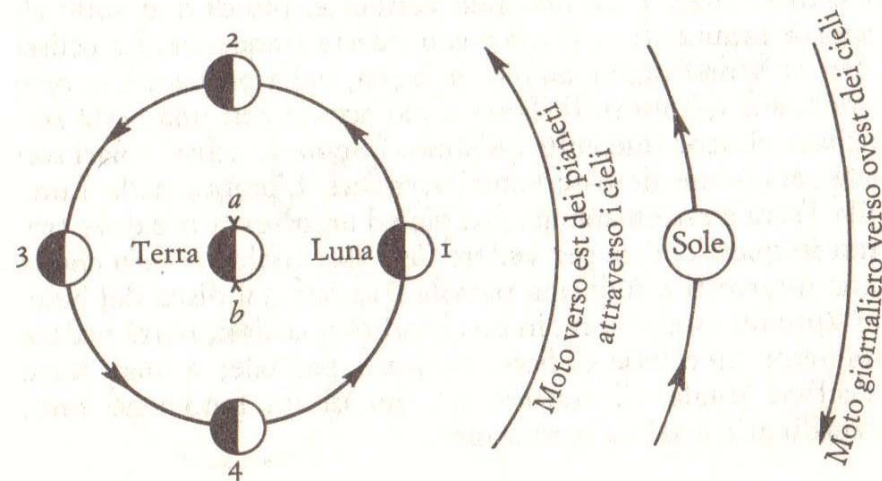


# Le fasi della luna

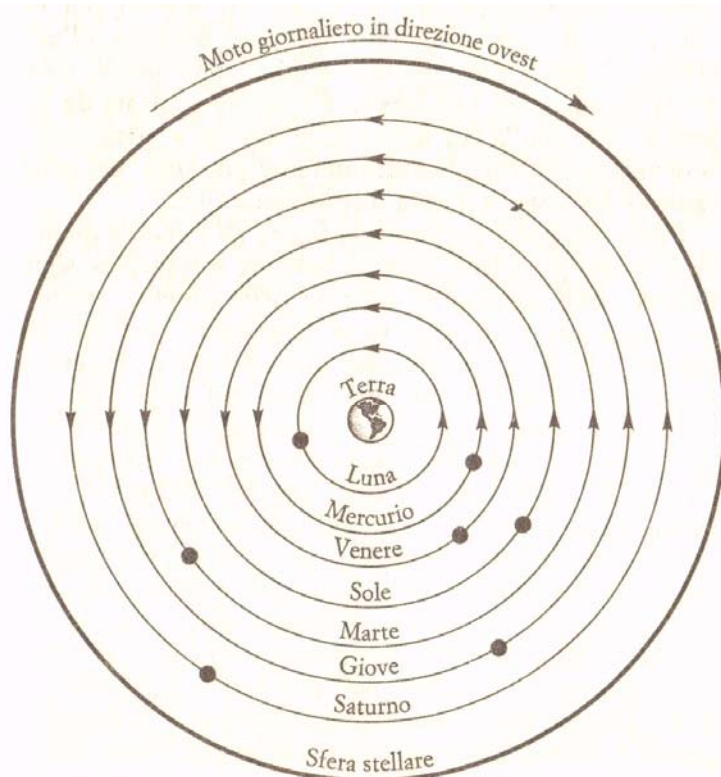
La spiegazione antica (e moderna) delle fasi della Luna. Il disegno (a) mostra che la metà soltanto della superficie di una sfera è illuminata dai raggi del Sole lontano. Il disegno (b) mostra la parte di questo emisfero illuminato, visibile da un osservatore terrestre per diverse posizioni *relative* del Sole, della Terra e della Luna. La posizione 1 rappresenta la Luna nuova; la 2 la mezzaluna crescente; la 3 la Luna piena e la 4 la mezzaluna calante.



(a)



(b)



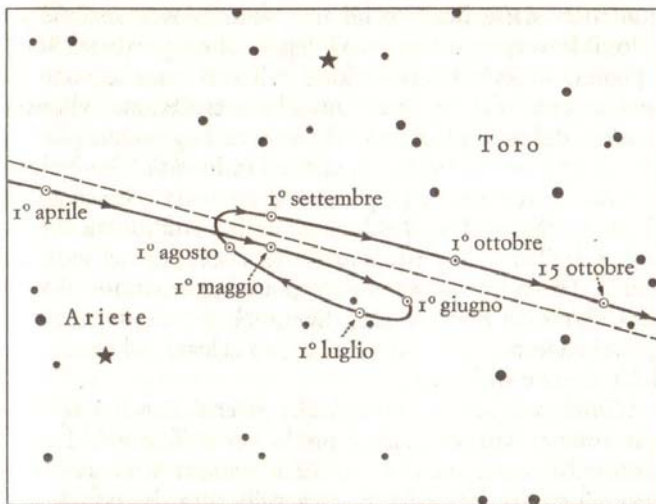
« Così, se sulla ruota di cui usano i vasai prendessero posto sette formiche, e nella ruota, intorno al perno che la regge, si facessero altrettanti canali crescenti verso l'esterno, nei quali esse sien costrette a girare, e la ruota si volga indietro; necessariamente le formiche, contro il giro della ruota, faranno un cammino inverso; e quella che sarà più vicina al centro andrà più presto, mentre quella che correrà al limite estremo della ruota, per quanto vada lesta, compirà il giro molto più tardi a causa della lunghezza del circuito.

Similmente gli astri. »

Vitruvio, *Dell'architettura* (I sec. a.C.)



# Il problema dei pianeti



Marte e Urano, 2003

« In un universo chiuso, in cui le stelle fisse non ponevano problemi particolari, solo i pianeti lanciavano una sfida all'intelligenza; il grande compito della cosmografia era quello di costruire un sistema che spiegasse i movimenti della Luna, del Sole e dei cinque altri pianeti. »

Arthur Koestler, *I sonnambuli* (1959)





## “Salvare i fenomeni”

« [Platone] pone ai matematici questo problema: quali sono i movimenti circolari, uniformi e perfettamente regolari che conviene prendere come ipotesi per poter salvaguardare le apparenze presentate dai pianeti? »



Simplicio

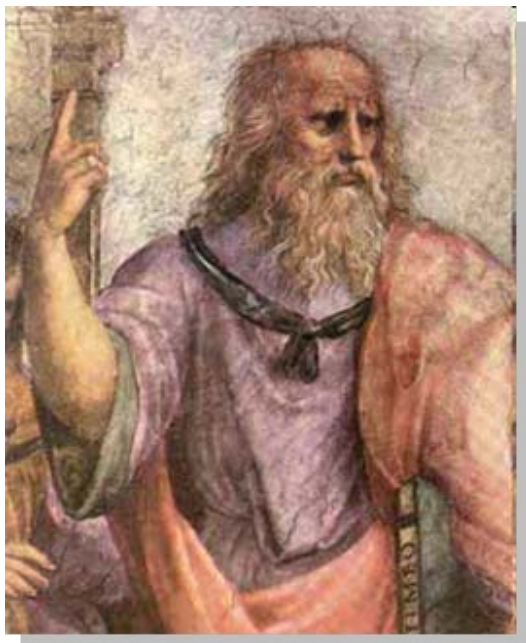
*Commento al De caelo di Aristotele*



## L'ossessione per la circolarità

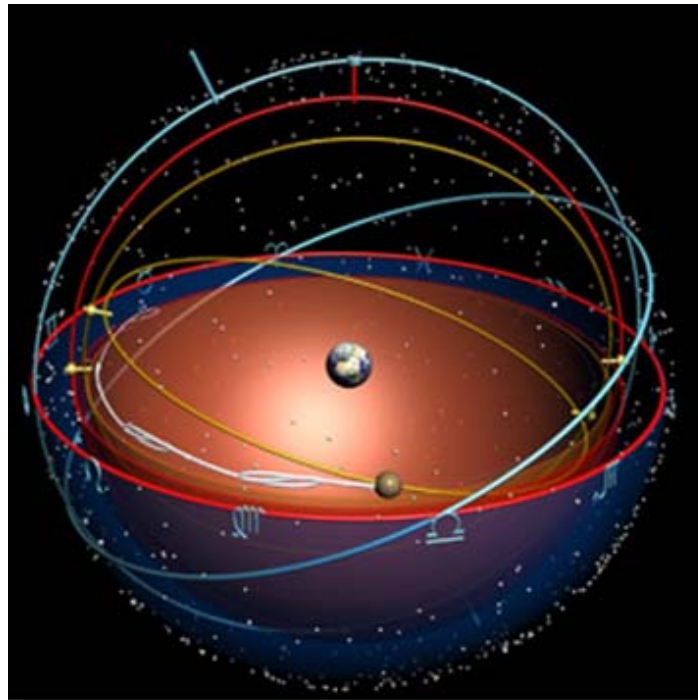
« Ecco perché torni l'universo come una sfera, in forma circolare, ugualmente distante, in ogni parte, dal centro alle estremità, che è fra tutte le figure la più perfetta e la più simile a se medesima. »

Platone, *Timeo*





## Le sfere omocentriche di Eudosso (408–355 a.C. circa)



[Video di Massimo Mogi Vicentini. "Honorable Mention" alla N.S.F. Science and Engineering Visualization Challenge 2005; premio di categoria al Festival Internazionale "Vedere la Scienza" del 2007.](#)



# L'universo aristotelico

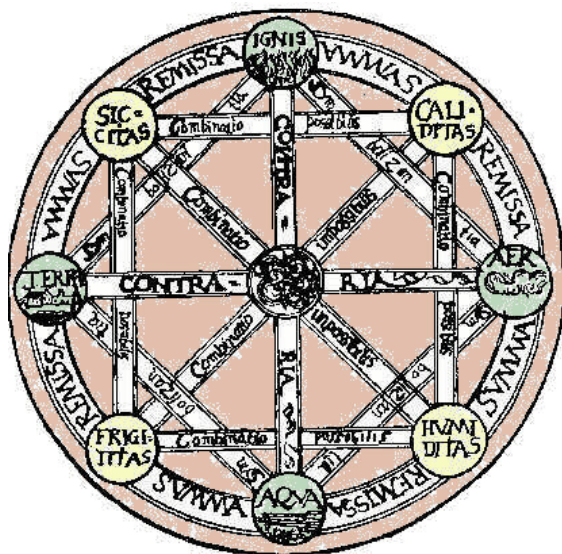


## Gli elementi

« Poiché le qualità elementari sono quattro [caldo, freddo, secco, umido], e di quattro termini si danno sei combinazioni, e poiché, d'altra parte, i contrari non possono ovviamente formare una coppia (è impossibile, infatti, che il medesimo oggetto sia caldo e freddo oppure umido e secco), risulta con evidenza che le combinazioni degli elementi saranno quattro, vale a dire caldo-secco e caldo-umido, e, d'altra parte, freddo-secco e freddo-umido.

E queste quattro combinazioni sono [...] assegnate come proprietà ai corpi che sembrano semplici, vale a dire al **fuoco**, all'**aria**, all'**acqua**, e alla **terra**.

Il fuoco, infatti, è caldo e secco, l'aria è calda e umida (giacché essa è una sorta di vapore), l'acqua è fredda e umida, la terra è fredda e secca. »



Aristotele,

*Della generazione e della corruzione*, II, 3, 330 a-b







## L'etere

« Che il corpo primo dunque è eterno, non s'accresce e non diminuisce, e non è soggetto ad invecchiamento, alterazione o altre affezioni [...] risulta evidente da quanto ora esposto. [...]

Ed anche il suo nome pare che dagli antichi si sia tramandato fino ai nostri giorni [...]

Considerando il corpo primo come un'altra sostanza oltre a terra, fuoco, aria e acqua, essi chiamarono il luogo eccelso **etere**, e gli diedero questo nome perché esso corre sempre nell'eternità del tempo. »

*Aristotele, Del cielo, I, 270 b*





## Il mondo eterno e immutabile

« Perciò gli enti di lassù non son fatti per essere nel luogo, né li fa invecchiare il tempo, né si dà alcun mutamento in nessuno degli enti posti al di là dell'orbita più esterna, ma, inalterabili e sottratti ad ogni affezione, trascorrono essi tutta l'eternità in una vita che di tutte è la migliore e la più bastante a se medesima. »

Aristotele, *Del cielo*, I 279a





## Il mondo “chiuso”

« È evidente dunque da quanto esposto che al di fuori del cielo non c'è, né è ammissibile che venga ad essere, alcuna mole corporea; il mondo nella sua totalità è dunque formato di tutta la materia propria ad esso

[...]

Cosicché né ora vi sono più cieli, ne vi furono, né è ammissibile che abbiano mai a sorgere: questo cielo è uno, e solo, e perfetto. »

Aristotele, *Del cielo*, I 279a





## I luoghi naturali

« Non capita a qualunque cosa di essere in alto, ma questo è il luogo dove viene trasportato il fuoco e ciò che è leggero;

analogamente, il basso non è il luogo per qualunque cosa a caso, ma è il luogo delle cose che sono pesanti e composte di terra.

I luoghi non differiscono dunque solo per la posizione, ma anche per le forze che essi hanno. »

*Aristotele, Fisica, IV, 1 208b*







## I tre “movimenti”

« Poiché non c'è movimento né della sostanza né della relazione né dell'agire e del patire, resta solo la possibilità che vi sia movimento **secondo la qualità, la quantità e il luogo**, giacché in ciascuna di queste categorie esistono i contrari.

Pertanto, il movimento qualitativo sarà alterazione [...]

Il movimento quantitativo [...] non ha un appellativo unico, ma è accrescimento o diminuzione rispetto a ciascuno dei contrari [...]

È privo di appellativo anche il moto locale [...] tuttavia nell'insieme si potrà chiamarlo spostamento. »

Aristotele, *Fisica*, V 226a





## I moti semplici

« Il moto locale, che è quello che noi chiamiamo “traslazione”, è sempre o rettilineo o circolare, o misto di questi due: perché semplici sono questi due soli.

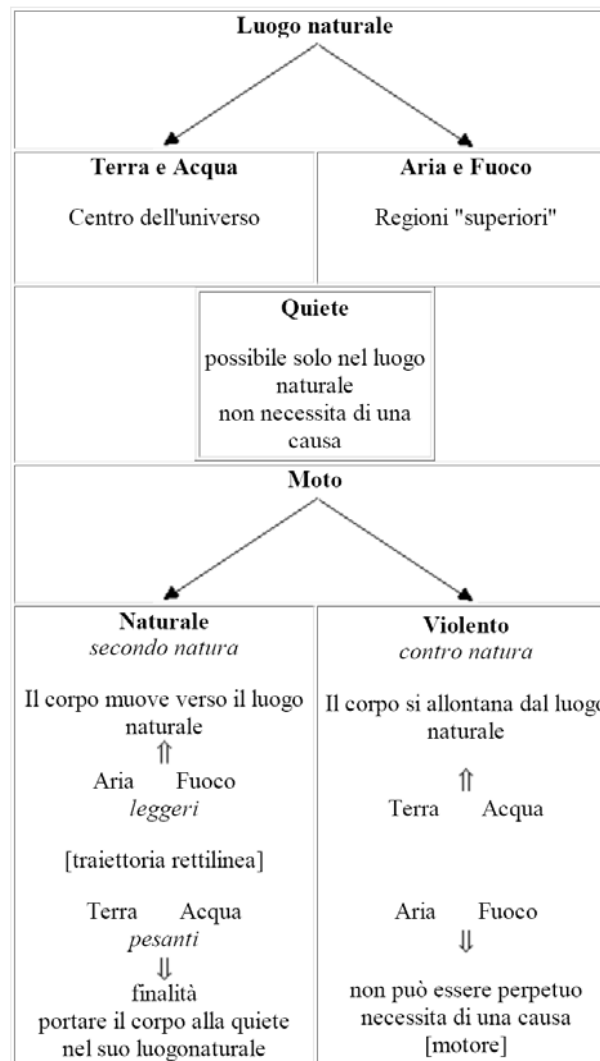
E la ragione è che ci sono anche due sole grandezze semplici, la linea retta e quella circolare. »

*Aristotele, Del cielo, I 268b*





<p><b>Mondo sublunare</b> [Terra]</p> <p>mutamento <i>nascita/morte</i> <i>generazione/corruzione</i></p> <p><b>quattro elementi</b></p> <table border="1"><tbody><tr><td>Terra</td><td>Acqua</td></tr><tr><td colspan="2"><i>pesanti</i></td></tr><tr><td>Aria</td><td>Fuoco</td></tr><tr><td colspan="2"><i>leggeri</i></td></tr></tbody></table> <p>corpi materiali ↓ mescolanza dei quattro elementi</p> <p>"pesantezza" e "leggerezza" determinata dalla proporzione dei 4 elementi</p>	Terra	Acqua	<i>pesanti</i>		Aria	Fuoco	<i>leggeri</i>		<p><b>Mondo celeste</b> [Stelle e Pianeti]</p> <p>inalterabilità</p> <p><b>quinto elemento</b></p> <table border="1"><tbody><tr><td>etere</td></tr><tr><td><i>solido cristallino</i></td></tr><tr><td><i>imponderabile</i></td></tr><tr><td><i>trasparente</i></td></tr><tr><td><i>immutabile</i></td></tr></tbody></table> <p>stelle e pianeti fissati alle sfere celesti rotanti tutte costituite di etere</p>	etere	<i>solido cristallino</i>	<i>imponderabile</i>	<i>trasparente</i>	<i>immutabile</i>
Terra	Acqua													
<i>pesanti</i>														
Aria	Fuoco													
<i>leggeri</i>														
etere														
<i>solido cristallino</i>														
<i>imponderabile</i>														
<i>trasparente</i>														
<i>immutabile</i>														
<p><b>moto</b> processo divenire mutare in se stesso e rispetto agli altri [stato transitorio]</p>	<p><b>moto</b> circolare perfetto senza inizio nè fine</p>													





## L'universo dantesco

« La *Divina Commedia* di Dante non è solo un poema di grande potenza immaginativa, ma contiene anche una ben precisa costruzione teologica e geometrica del cosmo, attraverso la quale la filosofia cristiana adatta la cosmologia aristotelica alle sue proprie esigenze. »



Hermann Weyl  
*Il mondo aperto* (1932)



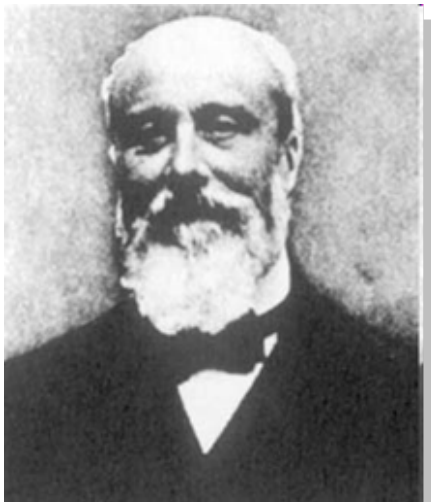


## L'astronomo e il fisico

« Se l'astronomo deve dichiararsi pienamente soddisfatto allorché le ipotesi che egli ha messo assieme hanno salvato le apparenze, lo spirito umano non è forse in diritto di esigere una cosa diversa? Non può forse scoprire e analizzare alcuni caratteri della natura dei corpi celesti? [...]

Non si dovrà dichiarare inaccettabile una combinazione dei movimenti che non sia in grado di adattarsi ad alcuni di questi tipi, quand'anche tale combinazione fosse in grado di salvare le apparenze?

Accanto al metodo dell'*astronomo*, così chiaramente definito da Platone, Aristotele ammette l'esistenza e la legittimità di quest'altro metodo; egli lo chiama il *metodo del fisico*. »



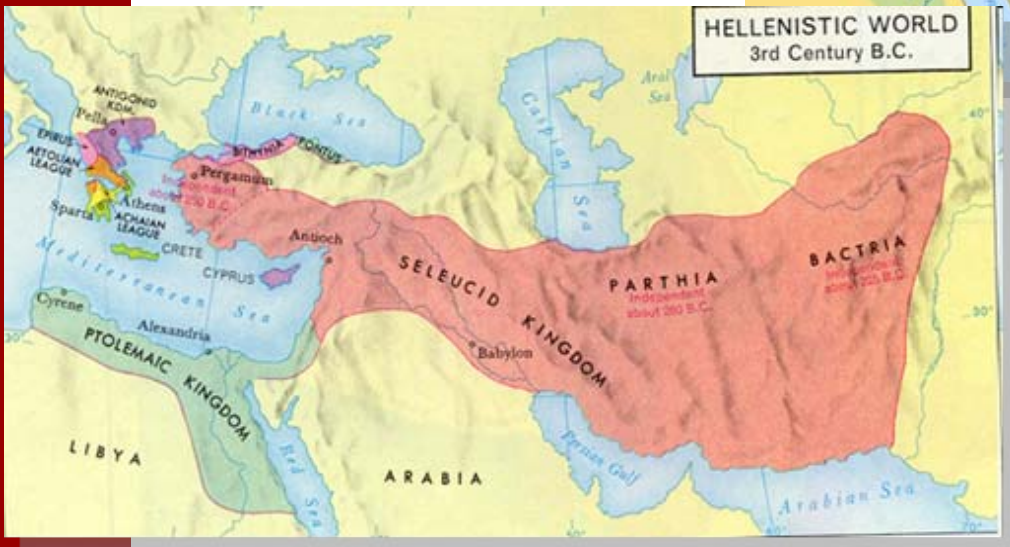
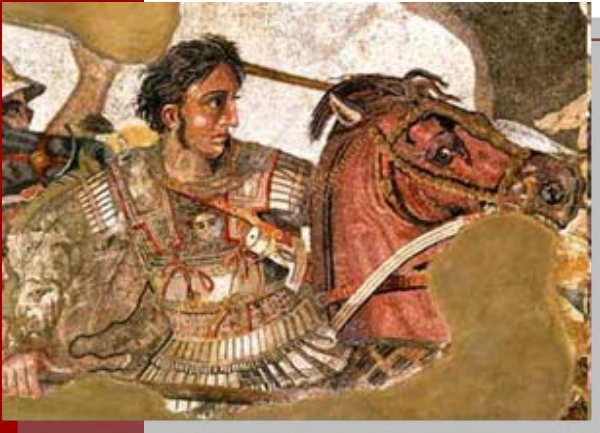
Pierre Duhem  
*Salvare i fenomeni* (1908)



# **Il sistema tolemaico**



# Il mondo ellenistico (323-30 a.C. circa)





## Claudio Tolomeo (100-175 ca)



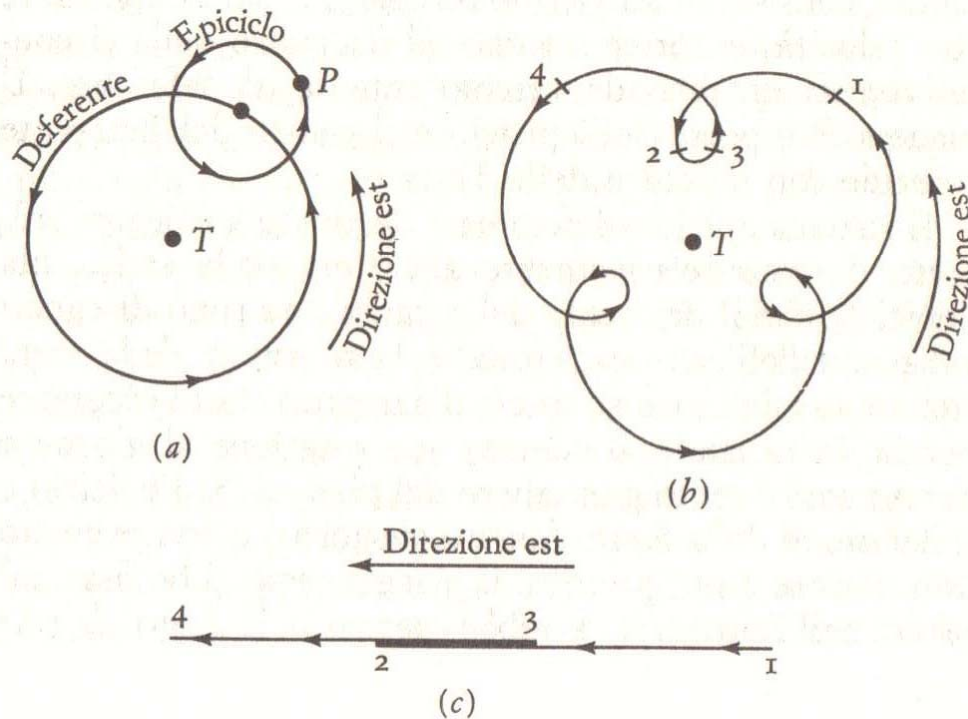
« Se il mondo di Aristotele evoca una cipolla, quello di Tolomeo fa pensare alla grande ruota dei Luna Park. »

Arthur Koestler  
*I Sonnambuli* (1959)



# Epicicli e deferenti

Schema del sistema epiciclo-deferente. Un deferente ed un epiciclo tipici sono disegnati in (a); il moto intrecciato che essi generano nel piano dell'eclittica è illustrato in (b); il terzo disegno (c) mostra una parte (1-2-3-4) del moto di (b), com'è visto da un osservatore sulla Terra centrale  $T$ .

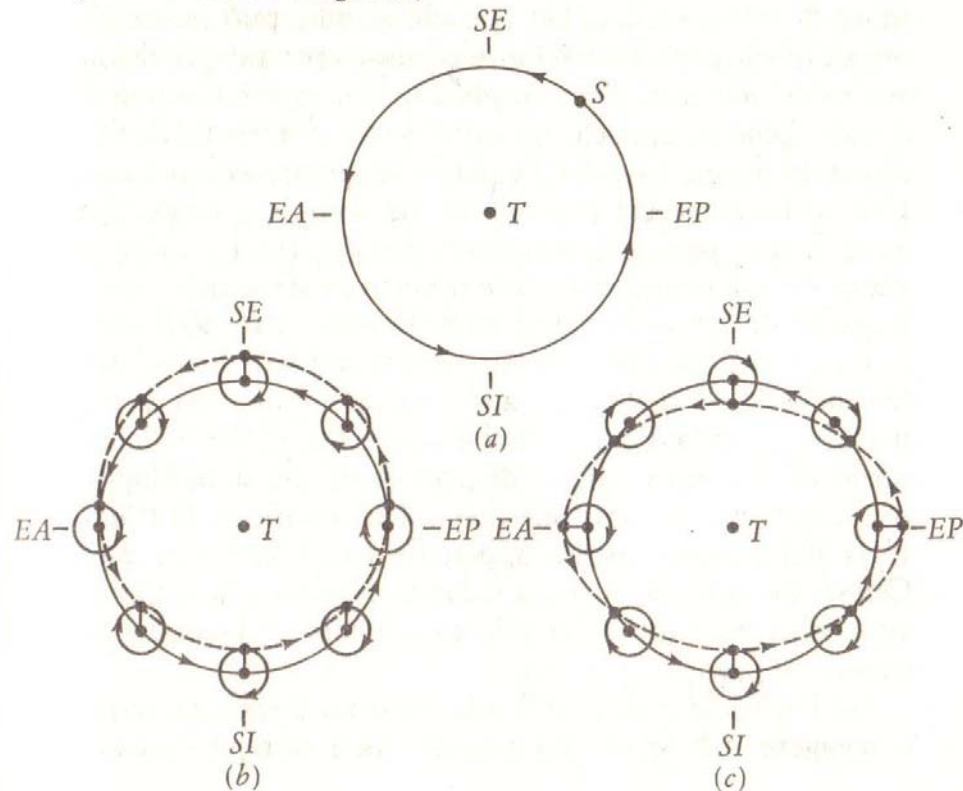






## Epicicli minori

Funzioni di un epiciclo minore. In (a) il Sole, mosso dal solo deferente che ha la Terra come centro, richiede per spostarsi da *EA* ad *EP* lo stesso tempo di cui ha bisogno per fare il percorso inverso. In (b) il moto composto del deferente e dell'epiciclo minore guida il Sole lungo la linea tratteggiata, cosicché lo spostamento da *EP* ad *EA* richiede più tempo del ritorno. Il disegno (c) mostra la curva che risulta quando l'epiciclo minore ruota ad una velocità doppia di quella relativa al disegno (b).

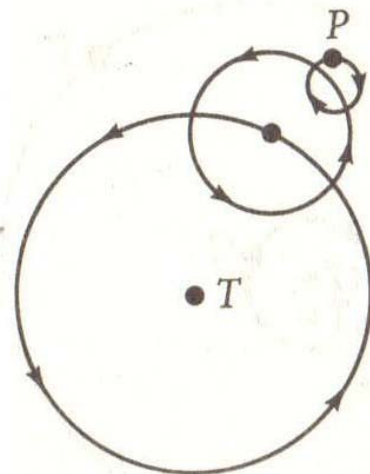




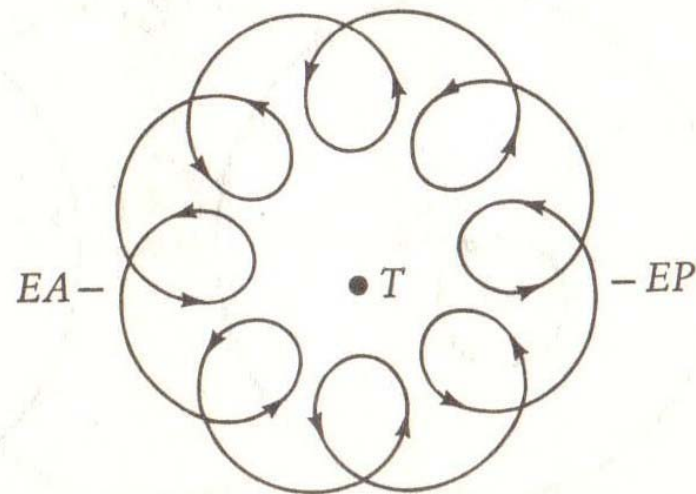


## Epicicli su epicicli

Epiciclo su epiciclo su deferente (*a*) e traiettoria tipica nello spazio (*b*), generata da questo sistema di cerchi composti. Per semplicità si è disegnata una traiettoria che si chiude regolarmente su se stessa, il che non si verifica nel moto reale dei pianeti.



(a)

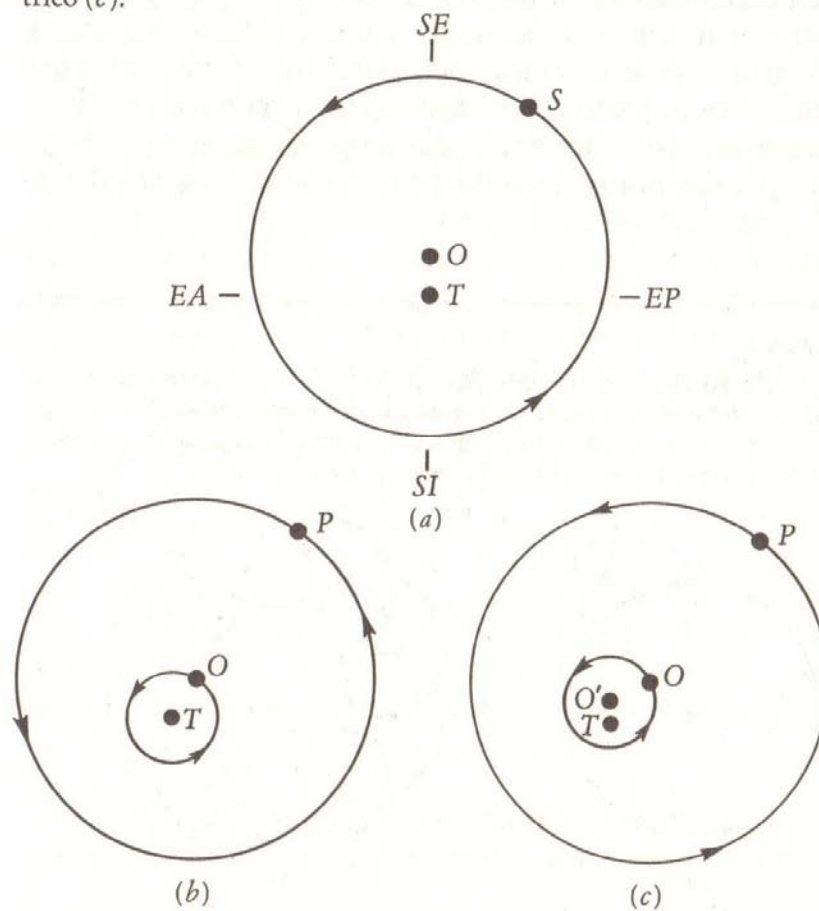


(b)



# Eccentrici

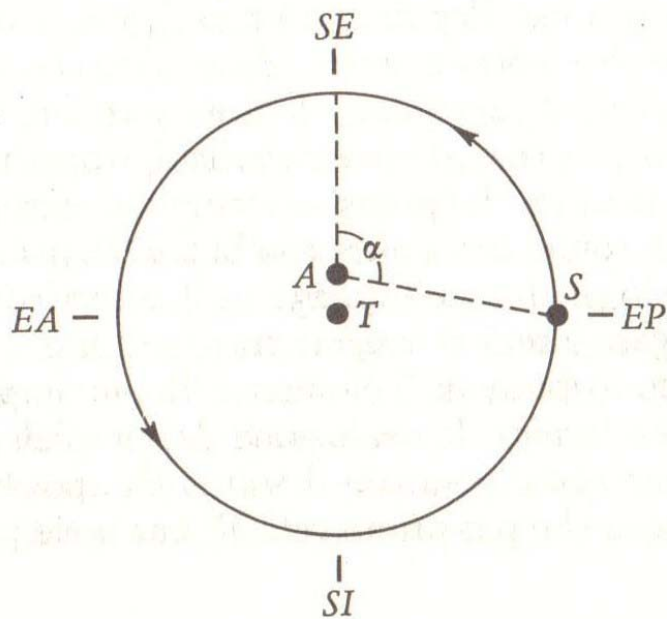
Eccentrico (*a*), eccentrico su deferente (*b*) e eccentrico su eccentrico (*c*).





## L'equante

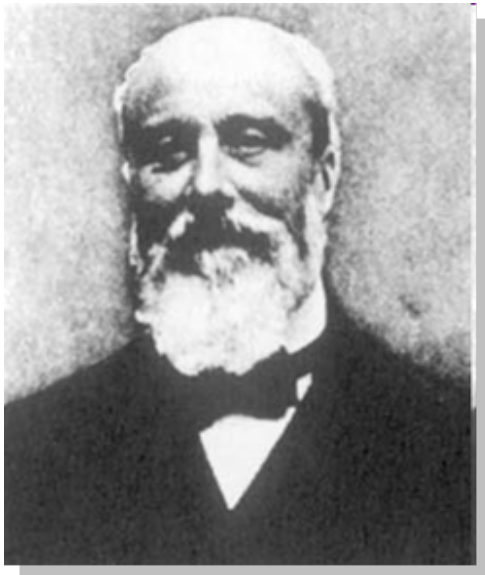
L'equante. Il Sole  $S$  si muove sul circolo che ha per centro la Terra ma a velocità irregolare determinata dalla condizione che l'angolo  $\alpha$  vari uniformemente col tempo.





## Il divorzio tra astronomia e fisica

« Dal giorno in cui Tolomeo per rappresentare le irregolarità del movimento dei pianeti fece muovere ogni pianeta lungo un epiciclo il cui centro, invece di restare sempre ad eguale distanza dal centro dell'universo, descriveva un cerchio eccentrico al mondo, il congegno di sfere immaginato da Adrasto di Afrodisia e da Teone di Smirne divenne incapace di rappresentare un simile movimento. »



Pierre Duhem  
*Salvare i fenomeni* (1908)



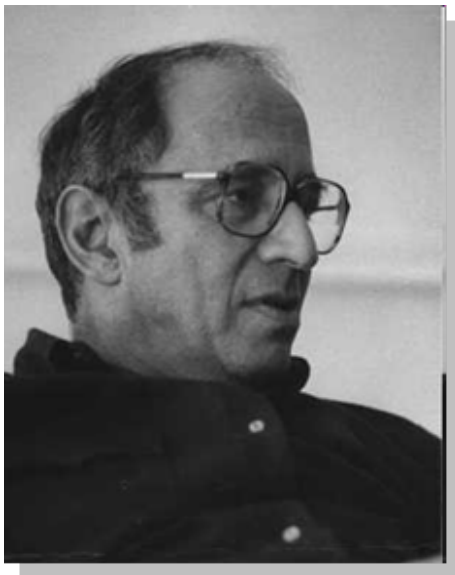
## Il successo del sistema tolemaico

« [L'*Almagesto*] fu il primo trattato organico e matematico che offriva una spiegazione *completa, particolareggiata e quantitativa* di tutti i moti celesti. [...] »

I suoi risultati furono così buoni ed i suoi metodi così efficaci che, dopo la morte di Tolomeo, il problema dei pianeti assunse una nuova forma.

Il problema dei pianeti era diventato semplicemente un problema di disegno. [...] »

Quale particolare combinazione di deferenti, eccentrici, equanti ed epicicli avrebbe spiegato i moti planetari con la massima semplicità e precisione? »



Thomas S. Kuhn  
*La rivoluzione copernicana* (1957)



# La “rivoluzione” copernicana

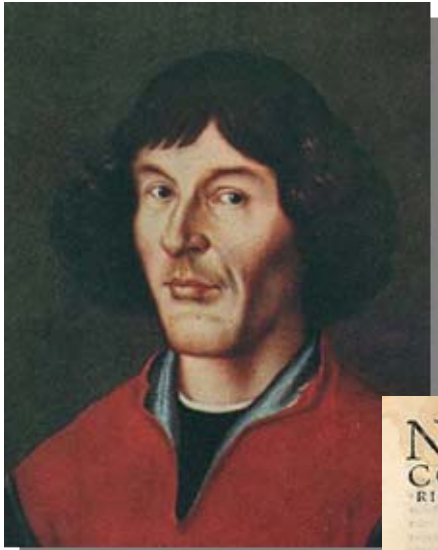
« Tra i grandi uomini di scienza Copernico fu l'ultimo degli aristotelici. »

Arthur Koestler, *I sonnambuli* (1959)





## Nicolò Copernico (1473–1543)



« Copernico passò all'altra vita il giorno 24 di maggio in seguito ad emorragia che gli paralizzò tutta la parte destra, e molti giorni prima della sua morte egli perdette la memoria e l'uso delle facoltà mentali, ed egli vide la sua opera condotta a termine proprio nel giorno della sua morte »

Da una lettera che il vescovo Giese scrisse a Retico il 26 luglio 1543



## La dedica a Paolo III

« Mi rendo ben conto, o Padre Santissimo, che, non appena alcuni saranno venuti a conoscenza del fatto che io, in questi miei libri che ho scritto sulle rivoluzioni delle sfere del mondo, attribuisco certi movimenti al globo terrestre, subito andranno gridando che sono da mettere al bando io e la mia opinione. [...]

E benché sappia che i pensieri del filosofo sono ben lontani dall'opinione comune, proprio perché suo primo compito è cercare la verità in ogni cosa, almeno nei limiti concessi da Dio alla ragione umana, penso tuttavia che siano da evitarsi le opinioni che si allontanano del tutto dalla retta via. [...]

Prendendo spunto da qui cominciai anch'io a meditare intorno alla possibilità di un movimento della terra. E sebbene l'opinione potesse sembrare assurda, tuttavia, poiché sapevo che prima di me ad altri era stata concessa questa libertà, cioè di immaginare qualsivoglia cerchio per spiegare i fenomeni celesti, ritenni che anche a me senza difficoltà fosse concesso di cercare se, ammesso un qualche movimento della terra, si potessero trovare spiegazioni più sicure delle loro sulla rivoluzione delle sfere celesti. »

Nicolò Copernico, *De Revolutionibus Orbium Caelestium* (1543)



## Il “sistema” copernicano

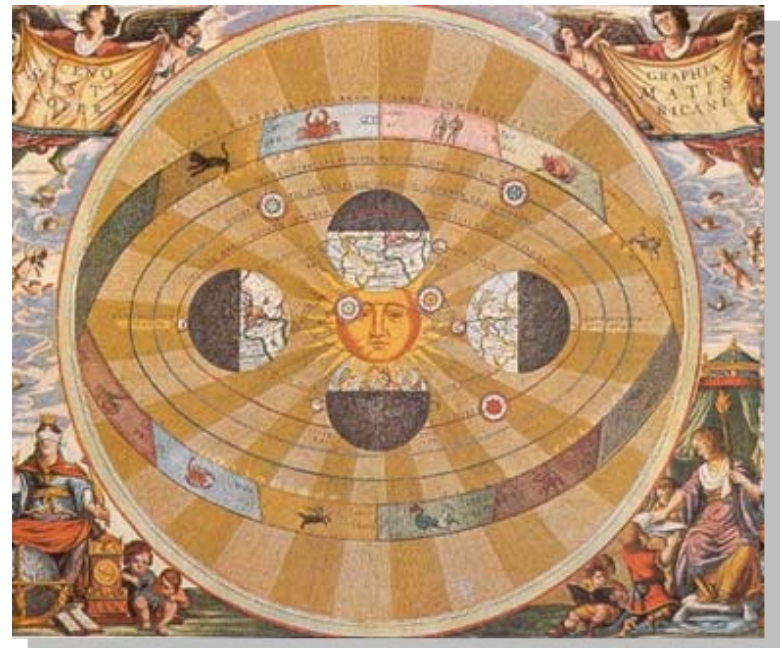
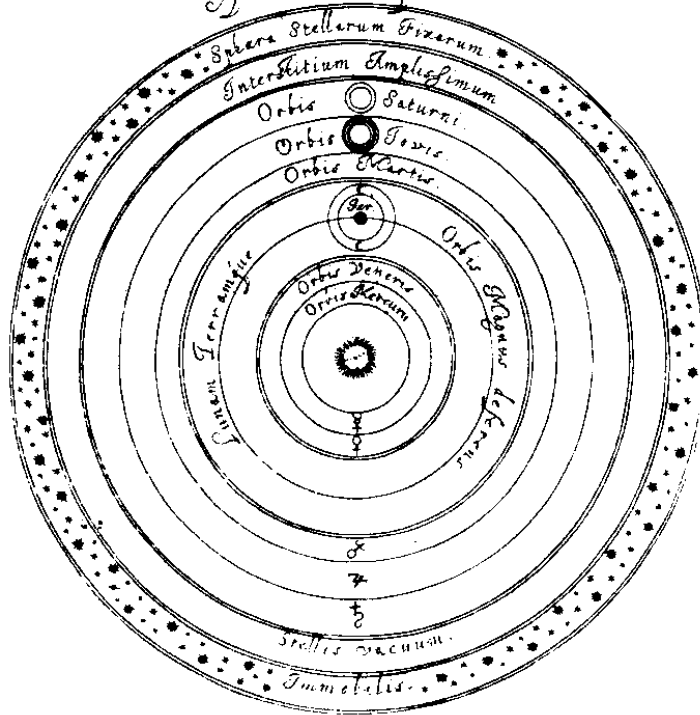
1. Non esiste un solo centro di tutti gli orbi celesti o sfere.
2. Il centro della Terra non è il centro dell'Universo, ma solo della gravità e della sfera della Luna.
3. Tutte le sfere ruotano intorno al Sole come al loro punto centrale e pertanto il centro dell'Universo è intorno al Sole.
4. Il rapporto fra la distanza della Terra dal Sole e l'altezza del firmamento è minore del rapporto fra il raggio terrestre e la distanza Terra-Sole, di modo che la distanza della Terra dal Sole è impercettibile in confronto all'altezza del firmamento.
5. Qualunque moto appaia nel firmamento, non deriva da un qualche moto del firmamento, ma dal moto della Terra. Pertanto la Terra, con gli elementi a lei piú vicini [le acque che giacciono sulla sua superficie e l'atmosfera] compie una completa rotazione sui suoi poli fissi in un moto diurno, mentre il firmamento e il piú alto cielo rimangono immobili.
6. Ciò che ci appare come movimento del Sole non deriva dal suo moto, ma dal moto della Terra e della nostra sfera con la quale ruotiamo attorno al Sole come ogni altro pianeta. La Terra ha, pertanto, piú di un movimento.
7. L'apparente moto retrogrado e diretto dei pianeti non deriva dal loro moto, ma da quello della Terra. Il moto della sola Terra è pertanto sufficiente a spiegare tutte le disuguaglianze che appaiono nel cielo.

Nicolò Copernico, *Commentariolus*

(tratto da: *La rivoluzione scientifica: da Copernico a Newton*, a cura di Paolo Rossi, 1973)



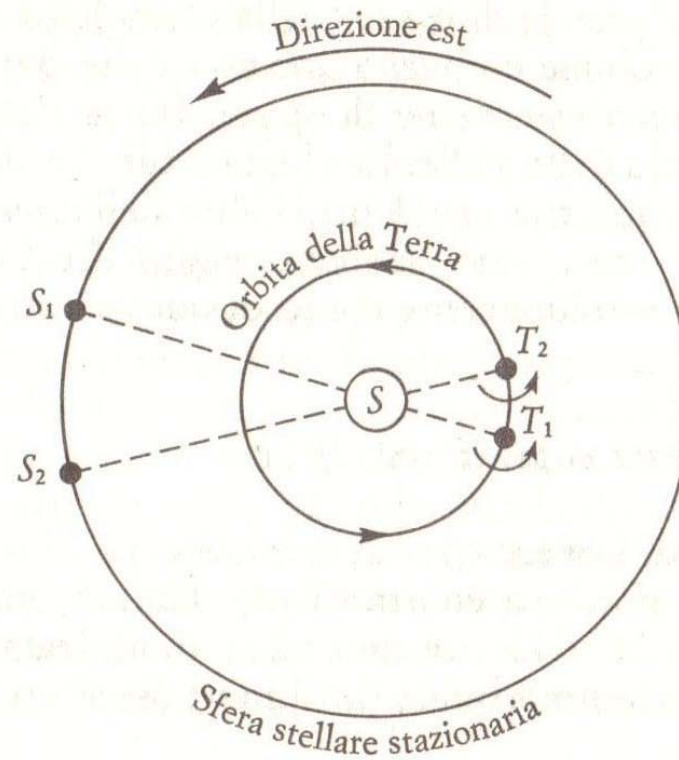
*Hypothecis Copernicana.*





## Il moto del sole

Mentre la Terra, nella sua orbita copernicana, si sposta da  $T_1$  a  $T_2$ , la posizione apparente del Sole centrale  $S$ , vista contro la sfera delle stelle, varia da  $S_1$  a  $S_2$ .

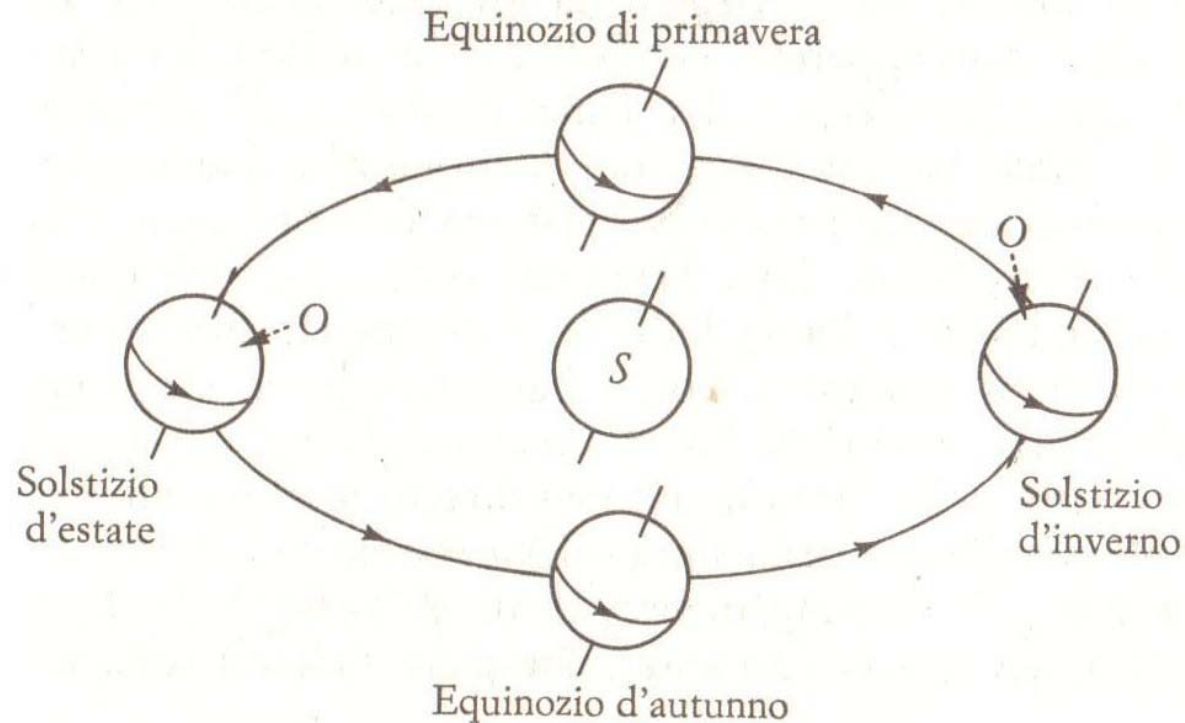






## Equinozi e solstizi

Il moto annuale della Terra attorno alla sua orbita copernicana. In ogni istante l'asse della Terra si conserva parallelo a se stesso oppure alla linea fissa disegnata attraverso il Sole. Di conseguenza un osservatore  $O$ , al mezzogiorno delle medie latitudini nord, trova il Sole molto piú approssimativamente sulla sua verticale nel solstizio estivo che in quello invernale.

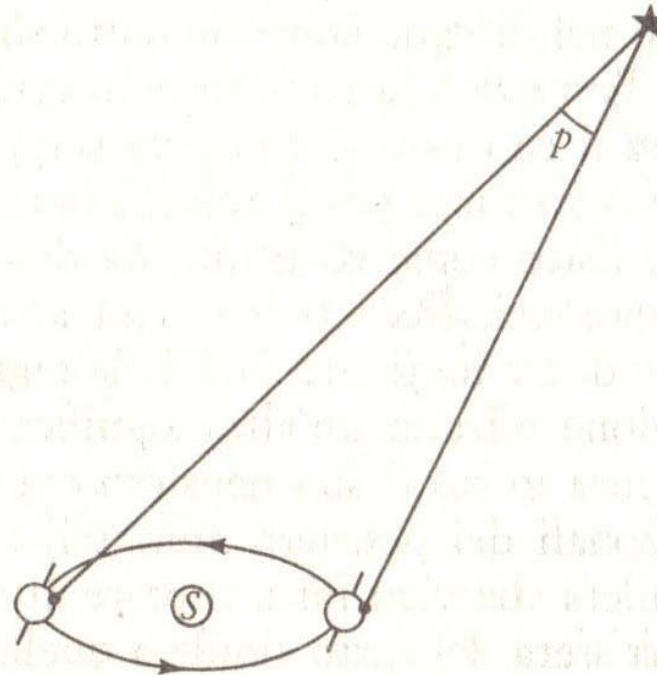






## La parallasse

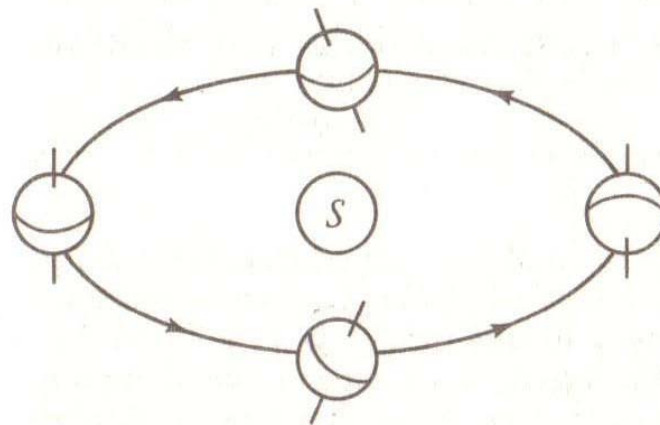
La parallasse annuale di una stella. Poiché la linea fra un osservatore terrestre ed una stella fissa non rimane esattamente parallela a se stessa mentre la Terra si muove lungo la sua orbita, la posizione apparente della stella sulla sfera stellare dovrebbe cambiare di un angolo  $p$  nell'arco di sei mesi.





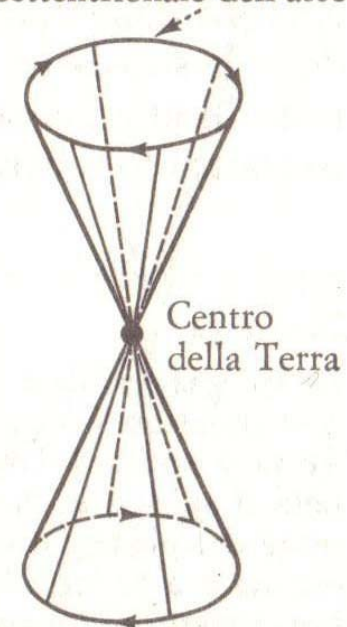
## Il terzo moto della terra

Il «secondo» e il «terzo» moto di Copernico. Il secondo moto, moto di un pianeta fissato in una sfera che ruota attorno al Sole come centro, è illustrato in (a). Questo moto non fa rimanere l'asse della Terra parallelo a se stesso, cosicché non rende necessario il terzo moto conico illustrato in (b) per rimettere l'asse in linea.



(a)

Moto dell'estremità settentrionale dell'asse

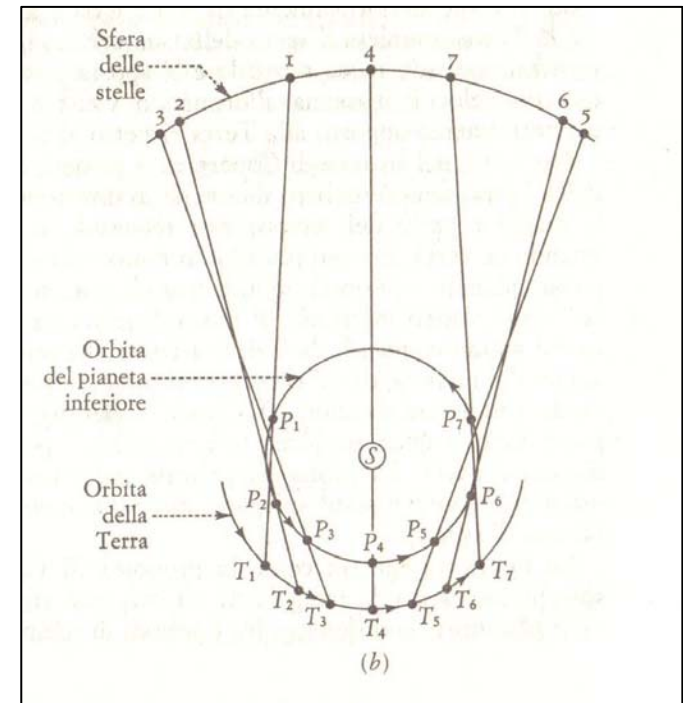
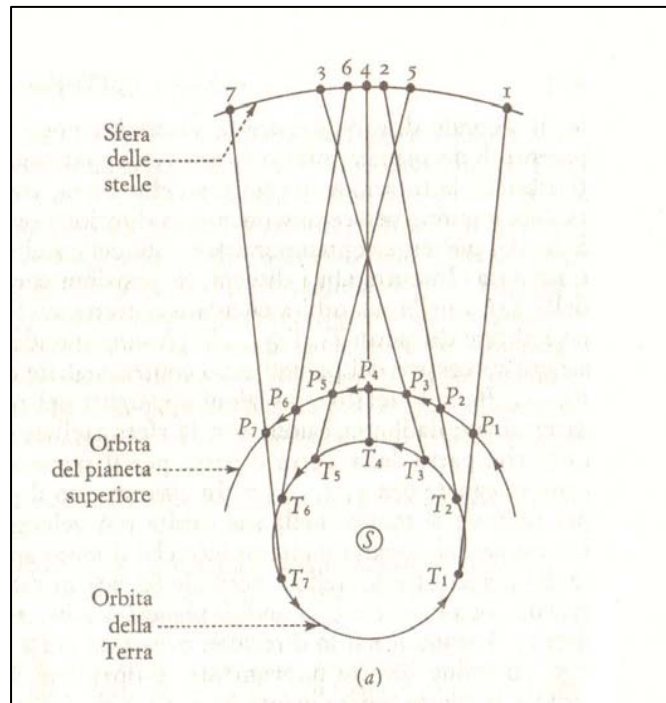


Centro della Terra

(b)



# Il problema dei pianeti: la spiegazione di Copernico

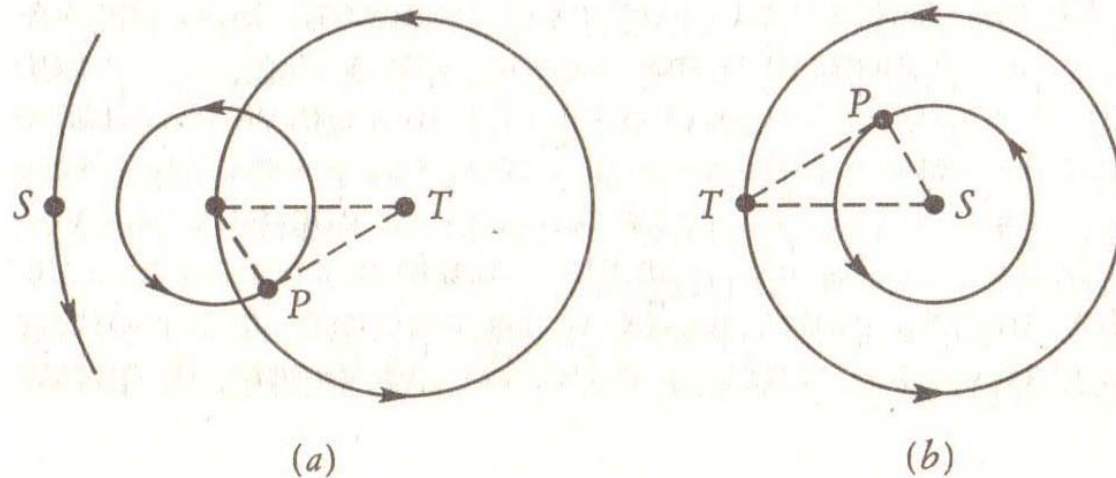


La spiegazione data da Copernico al moto di retrocessione dei pianeti superiori (a) e dei pianeti inferiori (b). In ciascun disegno la Terra si sposta regolarmente sulla sua orbita da  $T_1$  a  $T_7$  ed il pianeta si sposta da  $P_1$  a  $P_7$ . Nel medesimo tempo la posizione apparente del pianeta contro la sfera delle stelle si sposta, in direzione est, da 1 a 7, ma allorquando i due pianeti si oltrepassano c'è un breve tratto di retrocessione in direzione ovest da 3 a 5.



## Eliminazione di ipotesi *ad hoc*

Spiegazione della limitata elongazione dei pianeti inferiori nel sistema tolemaico (a) e nel sistema copernicano (b). Nel sistema tolemaico l'angolo fra il Sole  $S$  e il pianeta  $P$  deve essere limitato tenendo il centro dell'epiciclo sulla linea che passa per la Terra e il Sole. Nel sistema copernicano, con l'orbita del pianeta interamente contenuta in quella della Terra, non è necessaria alcuna limitazione del genere.





## Tolomeo o Copernico?

« Copernico può dare dei moti planetari una spiegazione *qualitativa* più economica di quella di Tolomeo.

Ma per giungere ad una spiegazione ragionevolmente accettabile sul piano quantitativo [...] Tolomeo era costretto a complicare il sistema fondamentale dei dodici circoli con epicicli minori, eccentrici ed equanti e, per ottenere risultati analoghi, anche Copernico fu costretto ad usare epicicli minori ed eccentrici

[...]

Entrambi impiegavano più di trenta circoli; c'era ben poco da scegliere in quanto a economia. Né si poteva fare una distinzione fra i due sistemi sulla base della precisione. »



Thomas S. Kuhn

*La rivoluzione copernicana (1957)*





## La prefazione “anonima” al *De Revolutionibus*

« Non dubito che alcuni studiosi, diffusa ormai la fama della novità di questa opera, che pone la terra mobile e il sole immobile in mezzo all'universo, si siano fortemente risentiti, e ritengano che non c'era alcun bisogno di rendere incerte le discipline liberali, una volta sapientemente stabilite.

Se essi vorranno però riflettere saggiamente sulla cosa, troveranno che l'autore di questa opera non ha commesso nulla che meriti rimprovero. È infatti proprio dell'astronomo prima registrare la storia dei moti celesti mediante osservazioni abili e accurate; quindi, escogitare e supporre le loro cause, ossia certe ipotesi, in un modo qualsiasi, non potendole dimostrare in alcun modo come vere.

Partendo da tali ipotesi, si possono calcolare correttamente i moti celesti, in base ai principi della geometria, tanto nel futuro che nel passato. [...]

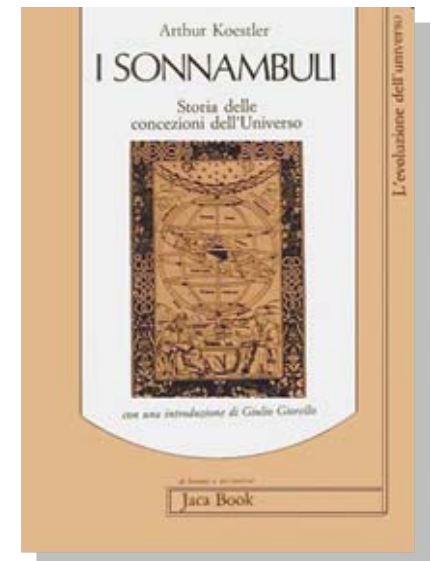
**Permettiamo dunque anche a queste nuove ipotesi, fra le antiche, il diritto di farsi conoscere, ma non come più verosimili, tanto più che sono ammirevoli e semplici, e recano con sé un grande tesoro di osservazioni dottissime. »**

Andreas Osiander, *Al lettore sulle ipotesi di quest'opera*  
[premessa anonima al *De Revolutionibus* di Copernico] (1543)





## Letture consigliate





## Per approfondire...

