

## L'astronomia galileiana

Dopo Tolomeo non vi furono più progressi significativi nel campo dell'astronomia fino al Rinascimento . Con l'avvento del Cristianesimo , e col Medioevo , l'interesse per la ricerca scientifica e per la conoscenza della natura inanimata si affievolì : la complessa struttura geometrica costruita da Tolomeo sembrò al di là di ogni critica , e pochi erano in grado di comprenderla . Con l'avvento dell'umanesimo rifiorì anche l'interesse per la scienza e l'astronomia . Questo interesse non si limitava all'ammirazione ed allo studio delle opere degli antichi ; se ne discutevano le basi .

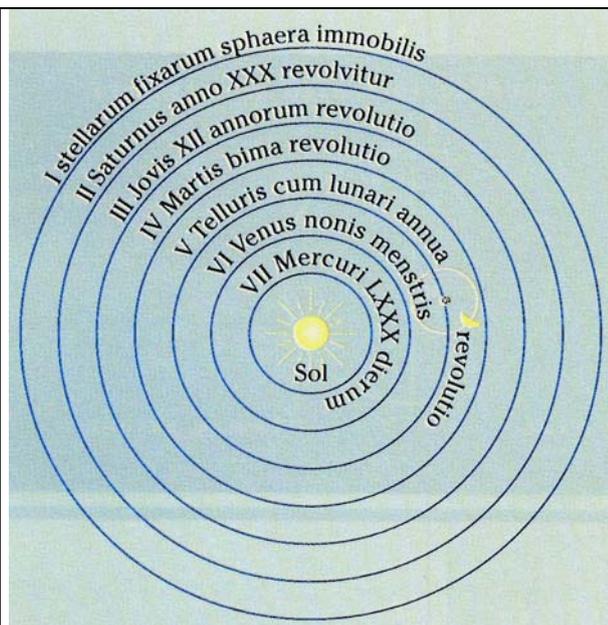
Lo sviluppo della grande rivoluzione compiutasi entro l'ambito delle teorie astronomiche si impernia su quattro nomi : **Nicolò Copernico** ( 1473—1543 ; astronomo polacco ) , **Tycho Brahe** ( 1546—1601 , astronomo danese ) , **Giovanni Keplero** ( 1571—1630 , matematico ed astronomo tedesco ) , **Galileo Galilei** ( 1564—1642 ) . In contrapposizione alla teoria tolemaica , l'astronomo polacco Nicolò Copernico , riprendendo una teoria di Aristarco , fu il divulgatore della **teoria eliocentrica** , in base alla quale il Sole è immobile al centro dell'Universo , mentre la Terra ed i pianeti ruotano su orbite circolari attorno al Sole . La teoria eliocentrica spiega i moti retrogradi dei pianeti con il fatto che essi vengono osservati dalla Terra che è in movimento rispetto al Sole . La teoria di Copernico ha lo scopo di semplificare il sistema tolemaico e di costruire un nuovo sistema in cui tutto si muova uniformemente attorno al suo centro così come richiede la legge del moto assoluto . Copernico rimprovera a Tolomeo l'uso dell' **'equante** per cui i pianeti non si muovono di moto **circolare uniforme** né sui loro deferenti né sui loro epicicli . Lo scopo dell'astronomia , dice Copernico , è quello di ridurre i moti dei pianeti a moti regolari il più possibile . La teoria di Copernico si basa sulle seguenti ipotesi , che coincidono sostanzialmente con quelle di Aristarco :

**1) La Terra compie una rotazione completa intorno al proprio asse da ovest verso est in circa ventiquattro ore .**

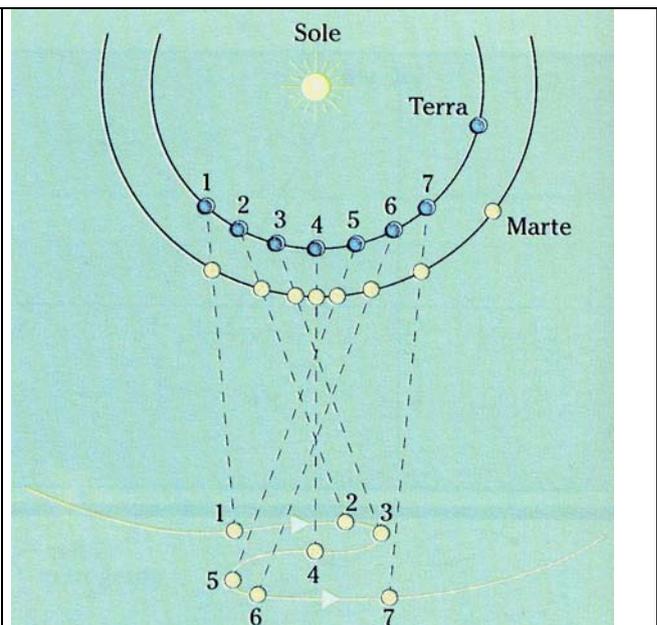
2) La Terra non è il centro dell'Universo , ma solo dell'orbita lunare , e compie una rivoluzione attorno al Sole nel corso di un anno

3) I pianeti ,come la Terra , ruotano attorno al Sole che è il centro dell'Universo.

La prima ipotesi spiega la rotazione apparente della volta celeste nel corso delle ventiquattro ore ; la seconda ipotesi spiega il **moto apparente del Sole** lungo l' Eclittica ; la terza , combinata con la prima , il moto dei pianeti e , in particolare , il loro **moto retrogrado** .



Sistema dell'universo secondo Copernico



Costruzione della traiettoria di Marte vista dalla Terra durante la fase di moto retrogrado . La posizione di Marte nel cielo è individuata dalla linea visuale Terra-Marte

La maggiore opera di Copernico , il **De revolutionibus orbium coelestium libri VI**

( Sei libri sulle rivoluzioni dei mondi celesti ) richiese circa 30 anni di lavoro e fu pubblicata mentre il Nostro stava per morire . Nel “ **De revolutionibus orbium coelestium libri VI** “ vi è una palese dimostrazione del timore che aveva in quel periodo di urtare la Sacra Scrittura che riteneva la Terra al centro dell’Universo . Infatti il teologo **Andreas Osiander** premise al testo dell’opera una prefazione in cui sosteneva il carattere puramente ipotetico della nuova teoria . Il “ **De revolutionibus orbium coelestium libri VI** “ era una grande opera che reggeva bene il confronto con l’ **Almagesto** di Tolomeo . Le due teorie erano contrastanti e tuttavia erano in grado di prevedere con uguale accuratezza il moto dei pianeti . In Italia Copernico aveva subito l’influenza del platonismo matematizzante di Pico della Mirandola assimilando vari elementi dell’antica concezione pitagorica . Posto sull’avviso dai matematici di Bologna delle molte difficoltà insite nel sistema tolemaico , aveva avuto la geniale idea di cercarvi una soluzione nelle dottrine astronomiche dei pitagorici . Furono queste a suggerirgli di sostituire l’ipotesi geocentrica con quella della mobilità della Terra . Accanto ai calcoli Copernico sviluppava parecchi argomenti di carattere non puramente matematico , per risolvere le varie obiezioni sollevate da Tolomeo contro la mobilità della Terra . All’obiezione che la Terra , sottoposta ad un rapidissimo moto rotatorio , avrebbe dovuto sfasciarsi , egli rispondeva che ciò dovrebbe accadere a maggior ragione per le sfere celesti le quali , avendo un raggio assai più lungo di quello della Terra , si muovono ovviamente con velocità maggiore . Malgrado l’esattezza di questa ed altre risposte , è un fatto che l’ipotesi copernicana doveva apparire , nel Cinquecento , tutt’altro che esente da serie difficoltà di ordine scientifico . A quell’epoca non erano ancora note le leggi della meccanica moderna , e si poteva quindi pensare che l’ipotesi della mobilità della Terra fosse incompatibile con parecchi fatti della vita quotidiana , come ad esempio la caduta dei gravi secondo la verticale .

Va inoltre osservato che Copernico non sapeva fare altro che ricorrere a motivazioni teologiche , per rendere ragione del moto dei pianeti attorno al Sole e per giustificare

la pretesa circolarità delle loro orbite . Ed infine , mentre da un lato invocava l'argomento della semplicità a favore della propria ipotesi , mostrava dall'altro di non sapere spiegare perché mai la natura debba seguire proprio le vie più semplici anziché quelle più complesse . Più temibili di tutte le difficoltà ora accennate erano quelle connesse alle conseguenze filosofiche che l'ipotesi copernicana racchiudeva in sé . E' chiaro che essa veniva a privare l'uomo della posizione di privilegio riconosciutagli dal pensiero tradizionale col collocarlo al centro dell'universo .

Le perplessità di carattere teologico scaturivano dalle seguenti considerazioni : il sistema eliocentrico poneva la terra sullo stesso piano di altri pianeti , i quali avrebbero potuto avere una costituzione molto simile a quella della Terra , e su di essi avrebbero potuto ragionevolmente esistere altre forme di vita . Di conseguenze l'uomo perdeva quella posizione di privilegio che aveva sempre pensato di avere , al centro dell'attenzione di Dio, l'Universo intero essendo stato creato in sua funzione .

L'idea stessa che la Terra non fosse il centro dell'Universo era sgradevole ed inquietante . Invece di vivere in un mondo stabile , intorno al quale ruotano tutti gli astri che erano stati creati prima di lui ma per lui , l'uomo si trovava improvvisamente su un granello di sabbia scagliato con velocità paurosa negli abissi cosmici .

Che senso aveva porre l'uomo su un pianeta come un altro , perso nello spazio a velocità folle ? Perché andare contro il senso comune , il rispetto della tradizione , l'autorità di Aristotele e quella della Chiesa , se il sistema tolemaico spiegava il moto dei pianeti altrettanto bene di quello copernicano ?

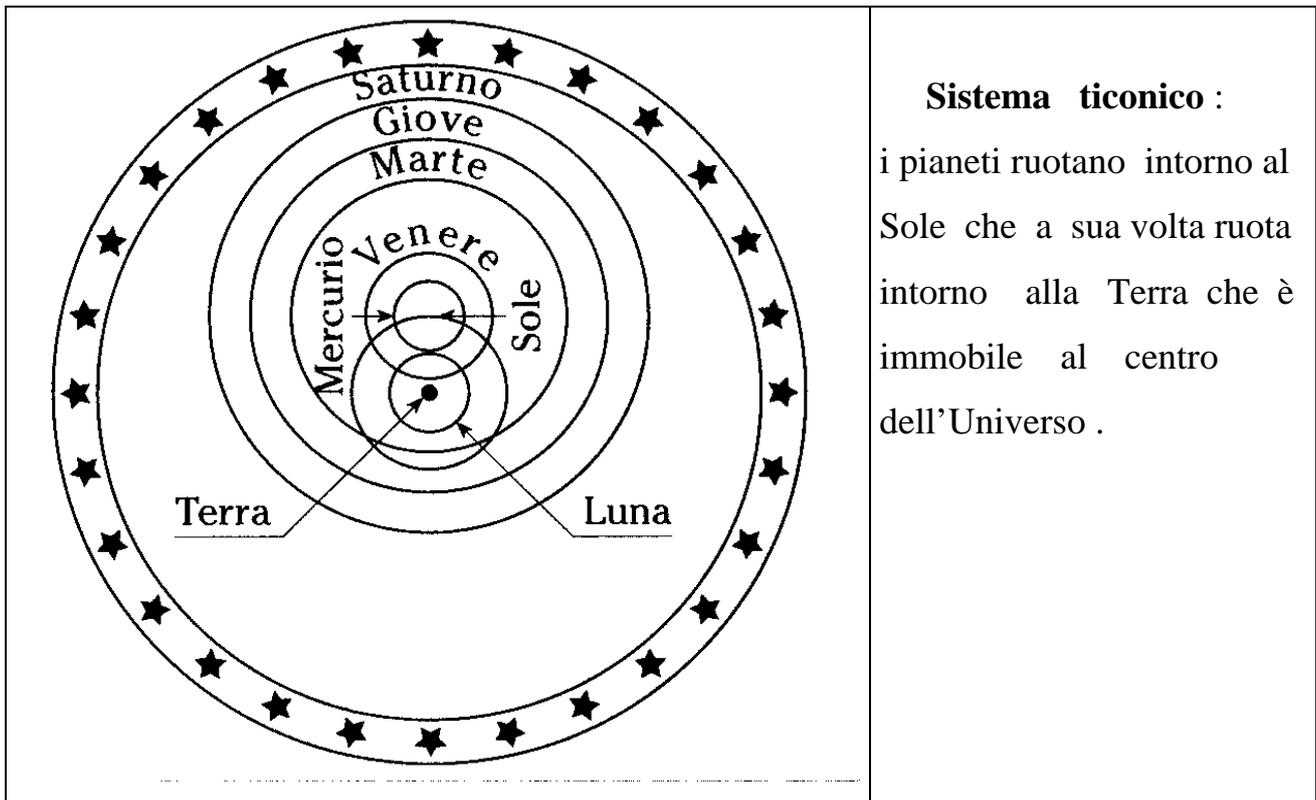
Il maggiore astronomo della generazione immediatamente posteriore a Copernico fu **Tycho Brahe** ( **1546—1601** ) . Nacque il 14 dicembre del 1546 in Danimarca da famiglia nobile . Fin da ragazzo si occupò di astronomia ed osservò con passione e costanza il cielo .

Nel **1572** ebbe la fortuna di scoprire nella **costellazione di Cassiopea** un nuovo astro che , col passare del tempo , diventava sempre più luminoso . In pochi mesi l'astro superò in luminosità la stessa **Venere** e fu visibile anche di giorno e , poiché la sua

posizione non mutava , Tycho esclude che fosse una cometa e concluse che si trattava di una vera e propria stella fissa. Questa nuova stella brillò nel cielo per circa due anni, poi si indebolì ed , infine , scomparve . Questo fenomeno , fino ad allora mai osservato ,destò grande impressione fra gli studiosi , e Tycho divenne celebre in tutta Europa . Il fatto che una stella potesse nascere e poi scomparire segnava infatti la fine di un altro principio aristotelico : l'immutabilità ed incorruttibilità dei cieli .Né Tycho , né i suoi contemporanei erano in grado di spiegare lo strano fenomeno . Tuttavia il sistema astronomico allora dominante fu scosso fino alle fondamenta .

Un compromesso tra le due opposte teorie dell'eliocentrismo e del geocentrismo fu trovato dall'astronomo danese Tycho Brahe che propose un nuovo sistema dell'Universo , non come **sistema ticonico** . Egli accettò la teoria eliocentrica per il moto dei pianeti ad esclusione della Terra che , in accordo con la teoria tolemaica , era concepita immobile al centro dell'Universo : **in tale sistema i pianeti erano considerati in moto attorno al Sole , che a sua volta ruotava intorno alla Terra .**

Questo compromesso di Brahe , mentre da un lato non ripudiava la teoria eliocentrica per la sua indubbia semplicità , dall'altro , d'accordo con le teorie tradizionali , considerava la Terra al centro dell'Universo in ossequi alla teoria geocentrica . Il sistema di Tycho Brahe , che segue di 70 anni la pubblicazione del libro di Copernico e precede di poco le grandi scoperte di Keplero , non trova appoggio né tra i sostenitori di Tolomeo , né tra quelli di Copernico e verrà presto abbandonato .



Nel 1560 , mentre si trovava a Praga per ordine di Rodolfo II di Boemia , assunse come assistente un giovane brillante e già famoso : Giovanni Keplero , cui affidò il difficile incarico di eseguire rilevamenti dell'orbita di Marte . Morì il 13 ottobre del 1601 . Più che un teorico , Tycho Brahe fu un grande osservatore . Riuscì , senza l'uso del cannocchiale , a descrivere con mirabile precisione i movimenti della Luna e dei pianeti . Le tavole dei suoi dati di osservazione costituirono , qualche anno più tardi , un materiale preziosissimo per Keplero , grande fisico , matematico ed astronomo .

Keplero ( 1571—1630 ) era per molti versi l'opposto del suo maestro Tycho Brahe . Povero , introverso , molto religioso con tendenze mistiche , fu tormentato per tutta la sua vita da ristrettezze economiche e dalla cattiva salute . I suoi risultati furono raggiunti con un'ostinazione quasi eroica , lavorando per anni intorno allo stesso problema e fallendo decine di tentativi .

Premettiamo che la disputa fra i sostenitori del geocentrismo e dell'eliocentrismo si accese per il fatto che Tolomeo e Copernico consideravano le proprie teorie vere in assoluto e non ponevano questioni di riferimento di osservazione .

Il punto di vista della **fisica moderna è ora ben diverso** : tutto dipende dal sistema di riferimento . Non c'è dubbio che , se assumiamo un riferimento collegato alla Terra , questa appare ferma conformemente alla teoria Tolemaica . Tale scelta del sistema di riferimento è anche la più spontanea e facile . Se invece assumiamo un sistema di riferimento collegato col Sole , tutti i pianeti , compresa la Terra , ruotano attorno al Sole , come prevede la teoria di Copernico . Quest'ultima scelta si lascia preferire per la sua maggiore semplicità , dal punto di vista cinematico . Se dalla cinematica si passa alla dinamica la teoria di Copernico è ancora più vantaggiosa , perché i fatti sperimentali si interpretano in base ai principi della dinamica nella loro formulazione più semplice rispetto ai sistemi inerziali , senza l'introduzione delle forze apparenti .

In un sistema di riferimenti rigidamente collegato con la Terra , essendo un sistema accelerato rispetto ai sistemi inerziali , è necessario introdurre le **forze apparenti** per l'interpretazione delle traiettorie dei pianeti secondo i principi della dinamica .

In base alle attuali conoscenze della dinamica si può facilmente dimostrare che i pianeti descrivono orbite ellittiche attorno al Sole . A questo risultato Keplero pervenne non per via teorica <sup>♦♦</sup> , ma analizzando , in un periodo in cui nessuno si aspettava che le orbite potessero essere ellittiche e non circolari , le osservazioni visuali del cielo fatte da un grande astronomo suo maestro Tycho Brahe .

Dopo avere verificato che tutte le possibili orbite circolari non davano un buon accordo con le osservazioni , verificò che l'orbita di Marte poteva essere interpretata come ellittica , con il Sole in un fuoco .

Il compito assegnato da Tycho Brahe a Keplero , ossia il calcolo dell'orbita di Marte, sarà determinante per la formulazione delle future leggi .

---

♦♦ Ai tempi di Keplero non si conoscevano le leggi della dinamica e neanche la legge di gravitazione universale

L'orbita di Marte è particolarmente ellittica ed è perciò un'impresa difficile tentare di descriverla attraverso una combinazione di moti circolari. Proprio in questa difficoltà va ricercata la ragione del successo di Keplero .

Se avesse studiato un pianeta con eccentricità minore , come Venere , la cui orbita si discosta pochissimo dalla circonferenza , con tutta probabilità Keplero non avrebbe potuto concludere che tutte le orbite descritte dai pianeti sono ellittiche .

Keplero , convinto della necessità di superare le strettoie del sistema tolemaico , generalizzò il risultato trovato per l'orbita di Marte per l'intero sistema planetario , pervenendo alla formulazione delle leggi sul moto dei pianeti , ogni universalmente note come **leggi di Keplero** .

### **Prima legge di Keplero**

**Le orbite descritte dai pianeti intorno al Sole sono ellissi , di cui il Sole occupa uno dei due fuochi ; le ellissi descritte dai diversi pianeti non giacciono sullo stesso piano , ma formano un certo angolo fra loro .**

### **Seconda legge di Keplero**

**Le aree descritte dal raggio vettore che congiunge il Sole con ciascun pianeta sono direttamente proporzionali ai tempi impiegati a descriverle ( costanza della velocità areolare determinata dal raggio vettore Sole-Pianeta )**

### **Terza legge di Keplero**

**I quadrati dei tempi impiegati dai pianeti a descrivere le proprie orbite ( tempi di rivoluzione ) sono proporzionali ai cubi dei semiassi delle rispettive ellissi .**

$$\frac{T_i^2}{a_i^3} = \text{costante} \quad \text{per tutti i pianeti del sistema solare}$$

La seconda legge , detta anche **legge delle aree** , afferma che le velocità con cui un pianeta si muove sulla sua orbita non è costante , ma è inversamente proporzionale alla sua distanza dal sole . In particolare , all'**afelio**, che è il punto dell'orbita più lontano dal Sole , la velocità è minima , mentre al **perielio** , che è il punto dell'orbita

più vicino al Sole , la velocità è massima . Con la scoperta di queste leggi Keplero ha risolto il problema a cui gli astronomi avevano pensato per millenni ; tali leggi , infatti , permettono di stabilire la posizione di un pianeta sulla sua orbita in un qualsiasi istante . Tutto l'armamentario di deferenti , epicicli , eccentrici , equanti è spazzato via e viene definitivamente abbandonato il principio metafisico del moto circolare , che lo stesso Copernico non aveva osato mettere in discussione .

Elaborò con notevole chiarezza , relativamente alla sua epoca , il concetto di forza e quello di massa , e definì arditamente la gravità come attrazione reciproca del grave da parte della Terra e della Terra da parte del grave .

Prese in considerazione l'ipotesi ( in seguito elevata da Newton a legge universale ) che la forza di attrazione fra due masse fosse inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza ; ritenne però di doverla respingere . Fu pure competentissimo ottico e matematico geniale .

## Galileo astronomo

Galileo Galilei ( **1564—1642**) fu uno dei primi a rendersi conto chiaramente dell'importanza storica delle scoperte scientifiche che venivano fatte in quel periodo. A noi interessa quali siano stati i contributi di Galileo allo studio del sistema solare ; e questi furono essenzialmente due : **le prime osservazioni col cannocchiale e lo studio dei principi della dinamica** . A questi si può aggiungere la critica dei concetti di continuo e di infinitesimo che fu iniziata da Galileo e , attraverso i suoi discepoli portò fino a Newton e Leibniz , alla nascita del calcolo infinitesimale .

Galileo occupa un posto importante nella storia dell'astronomia , grazie alle prime osservazioni col cannocchiale , eseguite nel 1610 , e alle sue doti di brillante scrittore, che portarono a conoscenza di un vasto pubblico i risultati delle sue osservazioni e diedero l'ultimo definitivo impulso al successo del sistema copernicano . Le osservazioni col cannocchiale eliminarono dall'astronomia ogni residuo di metafisica

. Galileo osservò le macchie solari , e dal loro moto dedusse che il Sole ruota attorno al proprio asse con un periodo di 27 giorni . Scoprì le irregolarità della superficie lunare e riuscì perfino a misurare l'altezza delle più alte montagne lunari attraverso la misura delle loro ombre ; il Sole e la Luna non erano corpi di forma sferica perfetta , come sostenevano gli aristotelici . Osservò le fasi di Venere, che erano tutte previste da Copernico . Ma , più importante di tutte , fu la sua scoperta delle lune di Giove : egli osservò distintamente 4 pianeti ruotanti intorno a Giove , che egli stesso chiamò **2 Pianeti Medicei** “ , in onore della famiglia dei Medici . Questa scoperta era un'altra dimostrazione che la Terra non è al centro dell'Universo e che ogni pianeta può essere centro di rotazione per altri corpi celesti più piccoli . Qui è opportuno spiegare che Galileo , pur essendo un acceso fautore sistema copernicano e pur essendo contemporaneo di Keplero , non si preoccupò di leggere e capire le opere dell'astronomo di Praga , con cui era in corrispondenza . In tutta l'opera di Galileo non si fa cenno alle orbite ellittiche , ma ci si riferisce solo a moti circolari e quindi solo allo schema copernicano . Questo non sminuisce l'importanza della scoperta di Galileo , a cui subito se ne aggiunsero altre: col cannocchiale vide che la Luna non aveva una superficie regolare , ma cosparsa di montagne ed avvallamenti ( e questo **sfatava la teoria della perfezione dei corpi celesti** ) . Vide le **fasi di Venere** , vide cioè che Venere non si presentava come un disco luminoso , ma che rifletteva la luce del Sole e quindi appariva come un disco , o una mezzaluna , o una falce , a seconda della posizione in cui si trovava . Infine si accorse che mentre il cannocchiale permetteva di vedere molte stelle invisibili ad occhio nudo e , per esempio , mostrava che la **Via Lattea** , che appare come una massa nebbiosa , è formata da una miriade di stelle . Il secondo e più importante contributo di Galileo riguarda i principi della dinamica . Egli intuì per primo e con chiarezza il **principio d'inerzia** e quello , ad esso legato , di **relatività classica** . Galileo si rese conto che lo stato di moto di un sistema , purché non vi siano variazioni di velocità , non ha alcun effetto sui fenomeni che si svolgono nel sistema.

Non spetta a noi stabilire se la formulazione del **principio d'inerzia** data da Galileo sia completa oppure no .

**Galileo però uso il suo principio d'inerzia con estrema lucidità , applicandolo al moto dei proiettili : egli scoprì che la traiettoria di un proiettile può essere interpretata come la composizione di un moto orizzontale rettilineo uniforme che prosegue per inerzia e di un moto rettilineo verticale uniformemente accelerato . Proprio questo sarà il punto di partenza dell'indagine newtoniana : la stessa forza che determina la traiettoria del proiettile determina anche la traiettoria della Luna attorno alla Terra .**

Galileo rappresenta una **transizione** : egli chiude , con la sua appassionata difesa del **modello copernicano** , l'epoca **antica** dell'astronomia , la ricerca del miglior modo di descrivere i moti celesti. D'altra parte le sue ricerche sulla dinamica e sulla matematica e le sue osservazioni astronomiche iniziano la ricerca di **leggi universali**, valide ugualmente per i corpi celesti e per quelli terrestri .