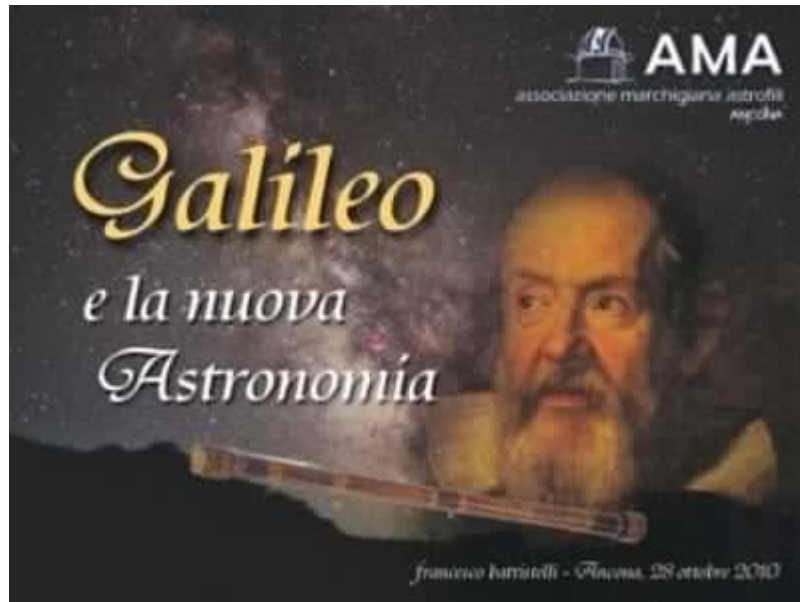


Galileo e la nuova astronomia

di Francesco Battistelli (2010)



Il 1609 è stato un anno decisivo nella storia dell'astronomia. In quell'anno, avendo saputo che in Olanda era stato costruito uno strumento con lenti che permetteva di ingrandire oggetti lontani sulla Terra, Galileo Galilei costruì un cannocchiale e lo puntò per primo verso il cielo per osservare gli oggetti celesti.



a destra Galileo Galilei presenta il cannocchiale al Doge di Venezia Lorenzo Donà

Per celebrare il 400esimo anniversario di questo avvenimento, nel 2009, durante la 125ª missione dello Shuttle, gli astronauti NASA Scott Altman e Michael Massimino hanno portato nello spazio una copia del cannocchiale di Galileo. Al ritorno i due astronauti, insieme all'astronauta italiano Paolo Nespoli e al direttore dell'Istituto e Museo di Storia della Scienza di Firenze Paolo Galluzzi, sono stati ricevuti al Quirinale dal nostro Presidente della Repubblica Giorgio Napolitano.



a sinistra: gli astronauti Altman e Massimino nello Shuttle Atlantis durante la missione STS-125
a destra: Nespoli, Altman e Massimino ricevuti al Quirinale il 17 dicembre 2009

1. astronomia e scienza nel cinquecento

Il cannocchiale era uno strumento nato nell'ambiente degli artigiani, sviluppato con l'uso pratico e utilizzato principalmente per scopi militari: per questo motivo veniva non solo ignorato ma anche disprezzato dagli ambienti accademici.



Galileo Galilei: Telescopio, Firenze, c. 1610
(Istituto e Museo di Storia della Scienza, Firenze)

A quel tempo infatti vigeva ancora la netta separazione posta nel mondo classico tra le arti meccaniche e le arti liberali. Le **arti liberali** erano le nobili attività degli "uomini liberi", tradizionalmente suddivise nel trivio (grammatica, logica e retorica) e nel quadrivio (aritmetica, geometria, musica e astronomia), ed erano contrapposte alle **arti meccaniche**, attività manuali proprie dei servi e delle persone di livello inferiore, tanto che nel Seicento era ancora in uso l'espressione "Vile meccanico!", un insulto per chi era considerato gentiluomo.

Nel Quattrocento insieme alla riscoperta degli antichi si era anche iniziata ad affermare una diversa considerazione del lavoro manuale, con la rivalutazione della vita attiva e la diffusione di personaggi che si dedicano sia alle arti meccaniche che alle arti liberali, come il "senza lettere" Leonardo da Vinci. Caratteristiche fondamentali delle arti meccaniche, che ritroveremo in seguito nella scienza moderna, erano il rispondere a bisogni concreti, il non dipendere esclusivamente dall'autorità o dalla tradizione, la progressività dei risultati e la necessità di collaborare e di condividere un sapere che per sua natura è collettivo.



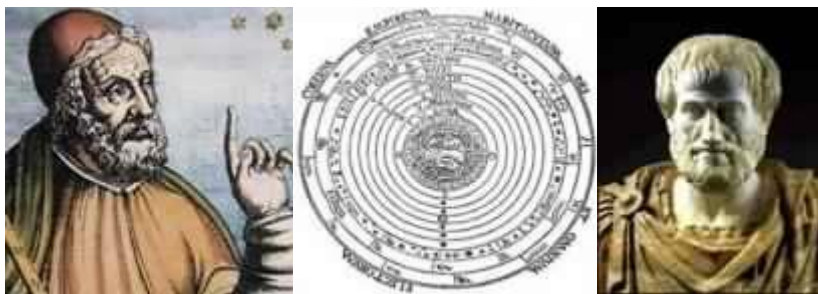
a sinistra: una rappresentazione artistica delle sette arti liberali
a destra: illustrazione da Georgius Agricola (G. Bauer), *De Re Metallica*, 1556

E se nel tardo Cinquecento gli accademici diffidavano delle nuove idee perché ancora convinti che gli antichi avessero trattato esaurientemente tutto lo scibile umano, che andava conosciuto e approfondito esclusivamente nelle loro opere, si erano già diffuse nuove figure di filosofi naturali e liberi sperimentatori che abbandonando il sapere tradizionale si dedicavano agli esperimenti nei loro laboratori. La diffusione di un nuovo ritratto della natura fu favorita dalla stampa dei libri, invenzione tecnica che rivoluzionò la cultura del tempo. Il sapere scientifico nel Seicento subì una svolta tale nelle varie discipline che ritroveremo il termine *novum/nova* in diversi titoli di libri scientifici di questo secolo.

L'astronomia di Tolomeo e la cosmologia di Aristotele

L'astronomia nel cinquecento era ferma al sistema tolemaico, che considerava la Terra immobile al centro dell'Universo. Intorno al nostro pianeta ruotavano i sette pianeti (compresi la Luna e il

Sole) su orbite rigorosamente circolari, mentre le stelle fisse erano disposte su una sfera esterna che ruotava in 24 ore. Il sistema geocentrico di Tolomeo (II secolo d.C.) e la filosofia naturale di Aristotele (384-322 a.C.), filosofo greco che fornì una spiegazione plausibile per tutti i fenomeni naturali osservati, corrispondevano alle osservazioni dei nostri sensi, il cosiddetto "senso comune", e furono un riferimento autorevole per oltre 1000 anni.



Tolomeo e Aristotele, al centro il Sistema tolemaico-aristotelico

In un primo tempo le opere di Aristotele furono proibite dalla Chiesa, ma grazie all'opera di Tommaso d'Aquino vennero accordate con le Sacre Scritture, portando la Chiesa a schierarsi decisamente a favore dell'astronomia tolemaica e della fisica e cosmologia aristotelica.



a sinistra Domenico da Michelino, Dante e Firenze (Firenze, Duomo)

I dogmi da abbattere per costruire la nuova astronomia

- **immobilità e centralità della Terra**
era stata stabilita da Tolomeo e Aristotele, accettata dalla maggioranza dagli studiosi (ad eccezione di casi isolati come i greci Filolao e Aristarco di Samo) e confermata dalla Chiesa, per cui sanciva la centralità dell'uomo nel progetto divino.
- **distinzione tra natura del cielo e natura della terra**
per Aristotele il mondo celeste incorruttibile e immutabile era costituito da un elemento ("quinta essenza") del tutto diverso dai quattro elementi corruttibili (terra, acqua, aria e fuoco) che costituivano il mondo sublunare.
- **distinzione tra moti naturali e violenti**
nella fisica aristotelica i primi dipendevano dalla tendenza dei corpi a raggiungere il luogo naturale (il moto circolare per i pianeti, il moto rettilineo verso il centro per i gravi), i secondi erano provocati da una forza esterna e terminavano quando la causa cessava (*OMNE QUOD MOVETUR AB ALIO MOVETUR*, ovvero "tutto ciò che si muove è mosso da qualcos'altro").
- **i moti celesti sono necessariamente circolari**
era un dogma platonico che tutti avevano rispettato, anche se con le successive osservazioni il modello tolemaico aveva dovuto subire correzioni sempre più complicate, con l'aggiunta di ulteriori cerchi detti epicicli per spiegare i moti irregolari e a volte retrogradi dei pianeti.
- **finitezza dell'universo**
per Aristotele l'infinito non esiste "in atto" ed è solo realizzabile in potenza all'interno di una forma. In pratica non viene mai raggiunto e l'universo aristotelico è formato da sfere concentriche al centro delle quali si trova la Terra, ovvero un cosmo ordinato, finito e limitato dal cielo più esterno delle stelle fisse.
- **separazione tra fisica e cosmologia aristotelica e astronomia tolemaica**
per Tolomeo l'universo era una costruzione geometrica, una pura ipotesi matematica senza realtà fisica; al contrario la cosmologia di Aristotele non era fondata sulla matematica, per lui le sfere celesti introdotte da Eudosso nel suo modello geometrico avevano una consistenza reale, erano solide e cristalline.

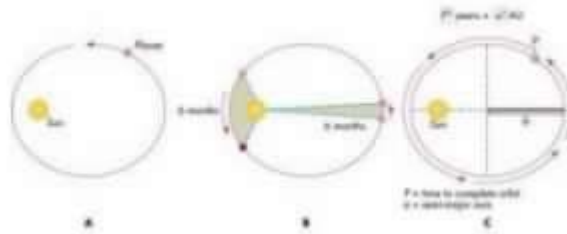
da Copernico a Keplero

Dopo 1300 anni di correzioni al modello di Tolomeo, alcuni astronomi iniziarono a riconsiderare la sua teoria e nel modello di **Niccolò Copernico** (1473-1543) il Sole venne posto al centro dell'Universo, mentre la Terra e i pianeti orbitavano circolarmente attorno ad esso. Copernico era un ecclesiastico e non fu certo un rivoluzionario, tanto che non pubblicò mai la sua opera "*De revolutionibus orbium coelestium*", stampata solo alla sua morte con una prefazione che la definiva una mera ipotesi matematica. Matematicamente la teoria copernicana risultava più semplice di quella tolemaica, visto che tutto era spiegato con il movimento della Terra e dei pianeti, ma Copernico non aveva abbandonato le orbite circolari e per questo motivo le previsioni del suo modello non furono migliori delle previsioni del modello tolemaico.



ritratto di Copernico; a destra: Andreas Cellarius, Sistema cosmografico di Niccolò Copernico (*Harmonia macrocosmica*, 1661)

L'astronomo danese **Tycho Brahe** (1546-1601), il più grande osservatore ad occhio nudo della storia dell'astronomia, si accorse che i due modelli dell'Universo non si adattavano alle osservazioni, ed elaborò una teoria alternativa in cui il Sole e la Luna orbitavano intorno alla Terra, mentre tutti gli altri pianeti orbitavano intorno al Sole. Lo stesso Tycho osservò in Cassiopea la *stella nova* del 1572 e misurò accuratamente la posizione delle comete del 1572 e del 1577, rendendosi conto che dovevano essere oggetti più distanti della luna: queste novità contraddicevano decisamente l'affermazione di Aristotele che il mondo celeste fosse perfetto e immutabile!



ritratto anonimo di Keplero del 1627; a destra: illustrazione delle tre Leggi di Keplero

Sui dati raccolti pazientemente da Tycho lavorò **Johannes Keplero** (1571-1630). Dopo aver abbandonato il sistema tolemaico tentò nel "*Mysterium Cosmographicum*" (1596) di spiegare il moto dei pianeti ricercandone le ragioni fisiche e metafisiche, rappresentando le orbite dei pianeti come gusci sferici separati dai cinque poliedri regolari. Mentre cercava di accordare la teoria con i dati osservativi di Tycho sul pianeta Marte, Keplero abbandonò il dogma del moto circolare, scoprendo che le orbite dei pianeti sono ellittiche e che i pianeti aumentano la loro velocità quando sono più vicini al Sole (è la cosiddetta "legge delle aree"). Nel 1609 terminò di scrivere la "*Nova Astronomia*", ma le sue opere erano di difficile lettura e intrise di misticismo, e le sue intuizioni divennero leggi scientifiche solo dopo che vennero utilizzate da Newton.

2. la vita e le scoperte astronomiche di Galileo

Galileo Galilei nacque a Pisa il 15 febbraio 1564 da una famiglia fiorentina che ritornò a Firenze nel 1574. Nel 1581 andò a Pisa a studiare medicina, ma preferì ben presto dedicarsi agli studi matematici. A quel tempo l'insegnamento era rigido e totalmente acritico e le dottrine aristoteliche e tolemaiche venivano impartite con un metodo autoritario. Galileo preferì studiare da solo Euclide e Archimede, che influenzarono positivamente il suo metodo e il suo stile. Nel 1583 scoprì la legge del pendolo (secondo la tradizione aveva osservato una lampada del Duomo) e nel 1586 inventò la bilancia idrostatica.



Nel 1589 grazie a Guidobaldo del Monte gli viene assegnata la cattedra di matematica a Pisa. In questi anni si dedicò allo studio del moto abbandonando i ragionamenti di Aristotele e combinando l'osservazione empirica con le dimostrazioni matematiche. Dopo la morte del padre le difficoltà economiche e l'ostilità dell'ambiente accademico lo spinsero verso Padova, dove nel 1592 ottenne la cattedra di matematica. Qui visse probabilmente il periodo più sereno della sua vita, insegnando gli Elementi di Euclide e l'Almagesto di Tolomeo, impartendo lezioni private e dedicandosi a problemi di meccanica. Nel 1597 scrisse a Keplero, rivelando di preferire il sistema copernicano, ma non osò pubblicare le dimostrazioni della sua scelta.

Le scoperte di Galileo nel biennio 1609-1610

Nel giugno 1609, mentre era in gita a Venezia, Galileo ebbe la notizia di un occhiale costruito in Olanda. Dopo averlo costruito lo puntò verso il cielo e grazie a questo strumento (da lui chiamato *perspicillum*) fece una serie di scoperte decisive che abbattono i dogmi del sistema tolemaico e della fisica aristotelica. Nel 1609 scoprì le asperità della superficie lunare, le miriadi di stelle che formano la Via Lattea e la natura delle nebulose. Poi nel gennaio del 1610 vide per primo i quattro satelliti di Giove e il 12 marzo stampò il "**Sidereus Nuncius**", opera scritta in 3

giorni, e iniziò a trattare il trasferimento a Firenze come primario matematico e filosofo del Granduca.



A luglio vide due strani satelliti di Saturno (in verità si trattava degli anelli, ma non aveva i mezzi tecnici per distinguerli) e osservò le macchie solari, e giunto a Firenze nel settembre del 1610 scoprì le fasi di Venere, prova decisiva a favore del sistema copernicano. Visti i tempi, Galileo per comunicare la sua scoperta produsse una oscura frase: *Haec immatura a me frustra leguntur oy* ("Queste cose premature sono da me dette invano") che anagrammato dà *Mater Amorum aemulatur Cinthyaefiguras* ("la madre degli amori imita le forme di Cinzia", ovvero Venere muta le figure come la Luna): allora la segretezza era ancora un valore positivo per i dotti e non c'era la corsa a pubblicare della scienza odierna... Ma non tutti furono convinti dalle scoperte di Galileo, e molti aristotelici fidandosi solamente dei cinque sensi dell'uomo negarono la validità delle osservazioni effettuate attraverso il telescopio.

Le scoperte del 1609 e 1610 in dettaglio

1) natura della luna

Aristotele distingueva fra mondo celeste inalterabile e perenne, e mondo terrestre dominato dalla generazione e dalla corruzione e per questo alterabile. Galileo grazie al telescopio vide sulla Luna valli e montagne e si accorse esaminando la parte in oscurità che il suo splendore era luce riflessa. Quindi dedusse che la Luna è corruttibile e imperfetta e che non era fatta di un materiale incorruttibile e cristallino, diverso dai quattro elementi terrestri. Ovvio conseguenza di ciò era che se esisteva un corpo di natura terrestre che si muoveva sui cieli, anche il moto terrestre non era più una assurdità.

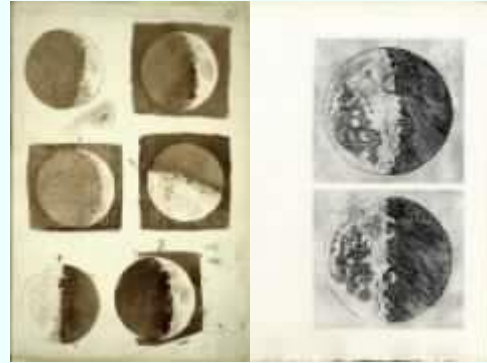


immagine a sinistra: G.Galilei, *Osservazioni lunari*, 1609; a destra: G. Galilei, *Sidereus Nuncius*, 1610 (Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze)

2) la natura della Via Lattea

Puntando il cannocchiale sulla Via Lattea Galileo si rese conto che esistono molti astri invisibili alla vista. Così potevano esserci astri ancora più lontani e diventava poco plausibile l'esistenza di una sfera delle stelle fisse che ruotasse in sole ventiquattro ore ad una incredibile velocità. Inoltre la presenza di stelle fisse a distanza enorme spiegava la mancanza di parallasse osservata, fatto che veniva addotto dagli aristotelici come prova dell'immobilità della Terra.



3) i satelliti di Giove

Galileo osservò quattro satelliti che si muovevano intorno a Giove, e dedicò questa scoperta ai suoi nuovi "datori di lavoro" chiamandoli astri medicei. Di conseguenza comprese che in cielo esisteva un modello ridotto di Sistema planetario copernicano, scoperta che contraddiceva il rigido modello tolemaico dove tutto ruotava intorno al nostro pianeta, che il dogma del tempo imponeva come unico centro di rotazione.



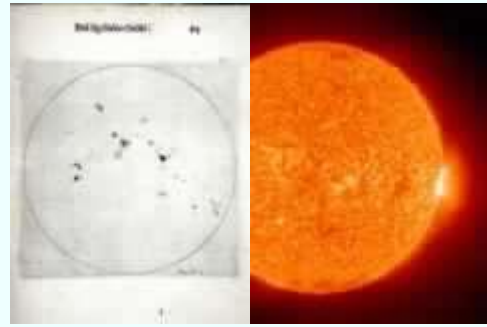
immagine a sinistra: G.Galilei, *Diari di osservazioni*, 1609-1610; a destra: G.Galilei, *Osservazioni dei satelliti di Giove*, 1611-1612 (Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze); sotto immagini fotografiche dei quattro satelliti medicei Ganimede, Callisto, Io ed Europa (fonte NASA).



4) le macchie solari

Galileo vide delle macchie scure sul Sole, comprendendo che non erano nubi interposte tra la Terra e la nostra stella ma che si trovavano realmente sulla sua superficie e ruotavano insieme ad essa. Di conseguenza, come già era avvenuto per la Luna, si rese conto che neppure il Sole, considerato una divinità dai popoli antichi, è un corpo incorruttibile e perfetto.

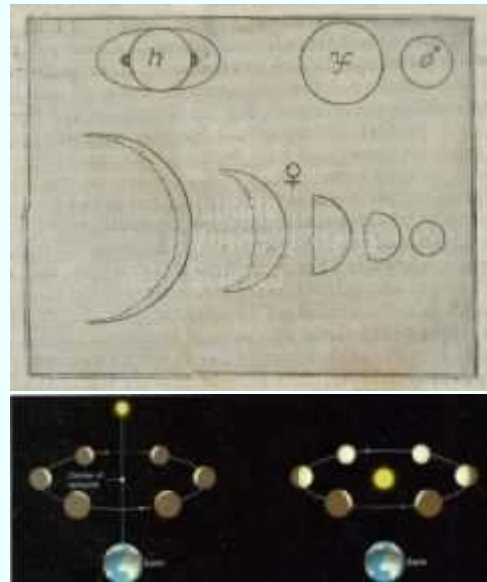
immagine a sinistra: Galileo Galilei, *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari e loro accidenti*, Roma 1613 (Biblioteca Nazionale Centrale di Firenze); a destra: il sole ripreso dalla sonda SOHO (fonte NASA).



5) le fasi di Venere

La scoperta decisiva di Galileo, che lo convinse a sostenere e a difendere pubblicamente il sistema copernicano, fu l'osservazione delle fasi di Venere. Questo fenomeno non era spiegabile nel sistema tolemaico, nel quale Venere non poteva mai trovarsi al di là del Sole rispetto alla Terra, e contraddiceva quanto la Chiesa leggeva nelle Sacre Scritture.

immagine in alto da Galileo Galilei, *Il saggiatore*, Roma 1623; in basso: rappresentazione dell'orbita di Venere vista dalla Terra nei due sistemi tolemaico e copernicano.



Il periodo a Firenze

Dopo le scoperte del 1609-1610 Galileo abbandonò ogni cautela e nel 1611 scrisse a Giuliano de' Medici: "tutti i pianeti sono corpi opachi e ruotano intorno al Sole". Andò a Roma a presentare con successo le sue scoperte scientifiche ai padri gesuiti del Collegio Romano e al papa Paolo V, divenne pieno di ottimismo e si espose ulteriormente, rivendicando l'indipendenza della scienza dalla religione. Ma la Chiesa dopo il Concilio di Trento proibiva che si desse alle Scritture un senso diverso e contrario all'ortodossia, e nel 1615 per la sua opinione eretica dell'immobilità del Sole e il moto della Terra Galileo fu denunciato al Sant'Uffizio. E così nel 1616 il cardinale Bellarmino lo ammonì "perché abbandonasse l'opinione intimandogli di non accoglierla, insegnarla o diffonderla a voce o per iscritto" e nello stesso anno anche i libri di Copernico vennero messi all'Indice.

Nel 1618 apparvero in cielo tre comete e i gesuiti sostennero la tesi di Tycho secondo cui le comete erano corpi di origine celeste. Poiché Galileo era contrario a questa ipotesi e suggeriva l'origine terrestre delle comete ritenute un effetto ottico nell'atmosfera, nel 1619 il padre gesuita Grassi scrisse *Libra Astronomica as Philosophica*, in cui sollecitava Galileo "a pesare con giusta bilancia le sue affermazioni". Galileo rispose pubblicando nel 1623 a cura dell'Accademia dei Lincei il "**Saggiatore**", capolavoro polemico in cui pur partendo da posizioni erranee veniva criticato il principio di autorità ed erano enunciati i principi del metodo matematico-sperimentale, grazie al quale la scienza è in grado di conoscere la natura reale del mondo:



“la filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l’universo), ma non si può intendere se prima non si impara a intender la lingua, e conoscere i caratteri, ne’ quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica (...)” (dal *Saggiatore*).



Il *Saggiatore* piacque al Papa, e Galileo scrisse in volgare il "**Dialogo sopra i due massimi sistemi**", un colloquio tra tre personaggi per confrontare il sistema tolemaico e il sistema copernicano. Il patrizio veneziano Sagredo era un intellettuale libero, il fiorentino Salviati difendeva le posizioni copernicane e l'aristotelico Simplicio era il difensore della tradizione. Galileo non criticava Aristotele ma polemizzava contro gli aristotelici, i quali contro le sue dimostrazioni e le sue osservazioni invocavano l'autorità dei testi della tradizione.

“Sono i suoi seguaci che hanno data l'autorità ad Aristotile, e non esso che se la sia usurpata o presa; e perché è più facile il coprirsi sotto lo scudo d'un altro che 'l comparire a faccia aperta, temono né si ardiscono d'allontanarsi un sol passo, e più tosto che mettere qualche alterazione nel cielo di Aristotile, vogliono impertinentemente negar quelle che veggono nel cielo della natura” (dal *Dialogo sopra i Massimi Sistemi*).

Il *Dialogo* non era un libro di astronomia, Galileo dimostrò l'insostenibilità delle basi della fisica e della cosmologia aristotelica senza analizzare le posizioni dei pianeti e senza tenere conto delle scoperte di Keplero. Nella prima giornata veniva confutata l'incorruttibilità del mondo celeste e la divisione tra cielo e terra, nella seconda giornata erano esposte le prove della mobilità della Terra, anche se la prova principale presentata da Galileo a favore del modello copernicano (il fenomeno delle maree) era errata.

Ci vollero ben due anni per ottenere il permesso di pubblicazione, e questo solo dopo che Galileo si era impegnato a esporre il sistema copernicano come pura ipotesi matematica. Il *Dialogo* venne stampato nel febbraio del 1632, ma nel luglio l'Inquisizione ne sospese la vendita e a settembre lo chiamò a Roma a disposizione del Sant'Uffizio, con l'accusa di avere estorto l'*imprimatur* alla pubblicazione senza aver rivelato il precetto del 1616, che gli vietava di insegnare e difendere la dottrina copernicana.

L'esilio ad Arcetri e l'eredità di Galileo

Galileo fu processato e il 22 giugno 1633 venne condannato dal Tribunale della Santa Inquisizione all'abiura e al carcere. La pena fu commutata in esilio e a dicembre si trasferì nella villa di Arcetri, dove rimase fino alla morte.



Cristiano Banti, Galileo Galilei di fronte all'Inquisizione, 1857



ritratto di Isaac Newton,
G.Kneller (Farleigh
House, Hampshire)



Ad Arcetri Galileo scrisse "**Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze**", che venne pubblicata a Leida nel 1638 e che ripresentava gli stessi protagonisti del *Dialogo*. Con quest'opera fondamentale crollò la concezione aristotelica tradizionale del movimento che ha bisogno di un motore che lo produca e lo conservi, e vennero formulati in modo moderno i principi della dinamica.

La rivoluzione scientifica del Seicento iniziata da Copernico e Galileo venne portata a compimento da **Isaac Newton** (1642-1727), che presentò in linguaggio matematico i principi della fisica nella sua opera "*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*". Fu dimostrato che esiste una sola scienza fisica, valida per il cielo e per la terra, e che il linguaggio della natura è matematico: con la medesima legge di gravitazione universale veniva spiegata la caduta dei corpi verso la superficie della Terra e il moto dei pianeti intorno al Sole.

Galileo morì l'8 gennaio 1642 nella villa di Arcetri, lasciando in eredità il **metodo scientifico**. Lui ci ha insegnato che il sapere scientifico richiede "esperienze dei sensi" e "dimostrazioni certe" e, a differenza della tradizione, richiede che queste cose vadano insieme e siano legate una all'altra. Infatti nella scienza ogni affermazione deve essere pubblica, presentata e dimostrata, discussa e infine soggetta a possibili confutazioni, perché la verità delle proposizioni non dipende dalla autorevolezza di chi le pronuncia e non è legata a qualche rivelazione o illuminazione. E se nella scienza moderna osservare i fenomeni significa "interpretare segni generati da strumenti", il 1609 ci ricorda l'atto di fiducia di Galileo nel suo cannocchiale, un gesto solitario di grande coraggio intellettuale.

