

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO, FACOLTÀ DI SCIENZE M.F.N., CORSO DI STUDI IN
FISICA



Appunti del corso

Storia delle idee in fisica

Prof.ssa Alberico Wanda

2009/2010

INDICE

1. IL PROGRAMMA	p. 3
2. LA RIVOLUZIONE ASTRONOMICA	p. 4
2.1 Aristotele e il sistema tolemaico	p. 4
2.2 Niccolò Copernico	p. 8
2.3 Tycho Brahe	p.11
2.4 Johann Kepler	p.15

1. IL PROGRAMMA:

Il corso si propone di seguire lo sviluppo storico e scientifico di alcuni temi “tipici” della fisica classica e moderna, offrendo il confronto delle idee e dei metodi di indagine scientifica, dalle origini fino al presente, su problemi di particolare rilevanza. Specifico rilievo viene dedicato al metodo delle scienze fisiche, mostrandone la fecondità e la potenzialità in un quadro storico che mette in luce, per gli argomenti trattati, le conoscenze sperimentali e le difficoltà interpretative, commisurate alla rilevanza delle leggi fisiche che ne sono dedotte.

Viene sviluppata con una certa ampiezza la storia del concetto di forza, dalla fisica aristotelica a quella newtoniana e del secolo XIX, esaminando in particolare i casi della forza gravitazionale e della forza elettromagnetica, con l'importante introduzione del concetto di campo, un ingrediente fondamentale della fisica moderna.

Un altro tema affrontato riguarda la relatività, da quella galileiana alla relatività ristretta di Einstein. Un'analisi critica del principio di relatività, e della struttura dello spazio-tempo permette poi di analizzare i fondamenti della relatività generale e di affrontare i problemi della cosmologia moderna, con un sintetico panorama qualitativo dei modelli cosmologici discussi ai nostri giorni.

Infine si offre un cenno alla nascita della fisica quantistica, come cardine dell'esplorazione del mondo submicroscopico.

Vita e opere degli scienziati più rilevanti ricordati durante l'intero percorso vengono inquadrati nell'ambito delle conoscenze relative al proprio periodo storico.

2. LA RIVOLUZIONE ASTRONOMICA

2.1 Aristotele e il sistema tolemaico

Per poter comprendere la portata della rivoluzione astronomica, ovvero l'importanza delle opere di coloro che sono considerati i protagonisti di questa rivoluzione come Niccolò Copernico, Tycho Brahe, Galileo Galilei, e Isaac Newton, è opportuno riprendere il sistema che si era consolidato nei secoli e che è stato messo in discussione da questi grandi nomi.

Il sistema cui si fa riferimento è opera, in buona parte, di Aristotele (384-322 a.C.) che ha rielaborato e sistemato in modo organico la conoscenza del suo tempo. Il celebre filosofo, che non può essere considerato un fisico nell'accezione moderna del termine, si è occupato dello studio della natura, ovvero della *fisica*, che egli annoverava tra le scienze teoretiche¹. La fisica studia i corpi (enti dotati di materia) sotto l'aspetto del movimento, dove con 'movimento' (*kinesis*) si intende ogni forma di mutamento (*metabole*).

Aristotele distingue quattro tipi di mutamento: *sostanziale* (il venire ad essere e il perire), *qualitativo* (che riguarda le proprietà che un corpo può possedere), *quantitativo* (l'accrescere e il diminuire), e *movimento locale* (il mutamento di luogo). Mentre i primi tre tipi di mutamento riguardano i corpi sottoposti a generazione e corruzione, ovvero i corpi terrestri che sono costituiti dai quattro elementi, il quarto riguarda solo i corpi celesti che sono incorruttibili, in quanto costituiti della "quinta essentia" (in seguito chiamata 'etere')².

Il movimento locale è un movimento circolare che conosce solo due direzioni: dall'alto verso il basso e dal basso verso l'alto, questo è il solo mutamento dei corpi celesti, mentre i corpi terrestri sono suscettibili di muoversi secondo una pluralità di moti, anche contrari tra di loro.

Vi è un'ulteriore distinzione rilevante riguardo al movimento dei corpi terrestri o sub-lunari: quella tra *moti naturali* e *moti violenti*. I primi sono quelli che assecondano la naturale tendenza del corpo, in quanto ogni corpo è composto dai quattro elementi, e a seconda della proporzione in cui essi sono mescolati avrà una tendenza naturale a muoversi o verso l'alto o verso il basso. In particolare, se un corpo è costituito prevalentemente di aria o di fuoco sarà un corpo leggero, pertanto il suo moto naturale sarà verso l'alto, mentre se un corpo è costituito prevalentemente di terra o di acqua sarà un corpo pesante e il suo moto naturale sarà verso il basso.

Il luogo a cui i corpi terrestri, e gli elementi tendono naturalmente si chiama "luogo naturale", ma nell'esperienza quotidiana non facciamo esperienza solo di corpi che si muovono verso di esso, come nel caso della pietra che viene gettata in alto o della freccia scagliata da un arco. Questi sono

¹ Le scienze sono divise da Aristotele in teoretiche, pratiche e poietiche. Le scienze teoretiche sono la filosofia prima (o metafisica), la fisica e la matematica, esse riguardano ciò che è o avviene necessariamente o per lo più nello stesso modo. Le scienze pratiche e poietiche, invece, concernono ciò che può essere in un modo o nell'altro, questa è la caratteristica dell'azione (*praxis*) e della produzione (*poiesis*) di oggetti.

² L'etere o *quinta essentia* è solido, cristallino, imponderabile, trasparente, non soggetto a modificazioni.

esempi di *moti violenti* dovuti all'azione esterna al corpo stesso, *cessante causa, cessat effectus* (una volta che cessa la causa, cessa anche il movimento); se questa causa non intervenisse, il corpo continuerebbe a muoversi grazie al sostegno del mezzo. Questa considerazione unita all'osservazione che se non ci fosse un mezzo che oppone resistenza al moto non vi sarebbe alcuna differenza tra corpi leggeri e pesanti, induce Aristotele ad affermare l'inesistenza del vuoto.

Pertanto, il sistema aristotelico si presenta geocentrico, in quanto la Terra essendo il corpo più pesante occupa il centro dell'universo. Al di sopra del mondo terrestre vi sono la Luna, il Sole, i pianeti ed il cielo delle stelle fisse (o primo cielo). Per spiegare il loro movimento Aristotele riprende le dottrine di Eudosso e Callippo: questi corpi celesti sono fissati su sfere concentriche che si muovono di moto locale intorno alla Terra. Questo movimento è eterno e immutabile come il mondo nel suo complesso, ovvero non ha né un inizio né una fine, ma non per questo è infinito spazialmente. Aristotele, infatti, non ammetteva l'infinito in atto, inoltre in uno spazio infinito non vi potrebbe essere un centro. Esclude anche l'ipotesi di Democrito degli infiniti mondi.

Infine, per poter spiegare la continuità e l'eternità dei moti celesti lo stagirita ricorre al primo motore immobile (la divinità) che è atto puro³ e muove il primo cielo (o cielo delle stelle fisse) come una causa finale, ovvero come un oggetto di amore muove gli oggetti che lo amano. È il primo mobile a muoversi in direzione di esso, ed a trasmettere il movimento alle altre sfere.

Come si è in precedenza affermato, il modello cosmologico aristotelico costituisce una ripresa del modello di Eudosso di Cnido (IV sec. a.C.), ma con una importante differenza: il primo pretende di fornire una descrizione degli enti fisici reali, mentre il secondo si presenta come una costruzione matematica astratta. Questo aspetto è da sottolineare, in quanto sarà un elemento ricorrente.

Un esempio di questa contrapposizione tra un'astronomia concepita come costruzione matematica, e un'astronomia che intende presentarsi come una descrizione di eventi reali è costituito dalla *Syntaxis*, meglio nota come *Almagesto*, di Claudio Tolomeo vissuto ad Alessandria d'Egitto nel II sec d.C. In esso è descritto il moto dei corpi celesti e la costituzione dell'universo.

Per Tolomeo, l'universo è limitato dalla sfera delle stelle fisse e ha nel suo centro la Terra immobile. La sfera del cielo ruota intorno ad un asse fisso, come è dimostrato dal moto delle stelle circumpolari e dal fatto che le altre stelle sorgono e tramontano agli stessi punti dell'orizzonte. I pianeti⁴ ruotano attorno al centro dell'universo. Tutti i loro movimenti irregolari, come la differente distanza dalla Terra e il moto retrogrado, devono essere ricondotti a moti circolari. Gli eccentrici,

³ Uno dei concetti cardine del pensiero aristotelico è la distinzione tra potenza e atto. La prima indica in generale la capacità di subire o produrre un mutamento, in particolare si dice "in potenza" ciò che non ha ancora raggiunto il proprio fine, ossia non è giunto all'atto. Quest'ultimo, pertanto indica la realizzazione compiuta di un oggetto, oppure l'esercizio effettivo di una facoltà rispetto al suo semplice possesso. La divinità è "atto puro" in quanto non vi è nessun passaggio dalla potenza all'atto, è pensiero in atto, pensiero che pensa se stesso.

⁴ Il termine 'pianeta' deriva dal latino *planēta*, tradotto dal greco *πλανήτης*, ovvero "errante, vagante", che è un derivato di *πλανάω* che significa "andare errando".

gli epicicli, gli equanti (i primi due risalgono ad astronomi antecedenti a Tolomeo) rispondono precisamente a questa esigenza.⁵

Questi ultimi non hanno una realtà fisica, al contrario delle sfere di Aristotele che sono enti reali, solidi, e cristallini. Sono, come afferma Proclo nelle *Hypotyposes* (o esposizione della teoria planetaria di Tolomeo), solo il mezzo più semplice per spiegare i moti dei pianeti. Infatti, l'astronomia veniva presentata da Tolomeo come un campo di attività per matematici, non per filosofi della natura.

Bisogna tener presente che il complicato quadro dell'universo che arrivò ben saldo sino a Copernico, non può essere ridotto alle sole dottrine sopra esposte. Esso fu un coacervo di dottrine fuse tra loro: vi era la fisica aristotelica con l'astronomia tolemaica, frammiste con elementi di neoplatonismo, di astrologia, di teologia dei Padri della Chiesa e dei filosofi della Scolastica. Per comprendere quanto affermato basti pensare all'universo di Tommaso d'Aquino (1225-1274) o a quello della *Divina Commedia* di Dante Alighieri (1265-1321) in cui alle sfere celesti corrispondono le potenze angeliche.

Pertanto, è possibile elencare i presupposti che fu necessario abbattere ed abbandonare per costruire una nuova astronomia ed una nuova fisica:

1. Il dualismo mondo sub-lunare imperfetto e mondo celeste perfetto;
2. La convinzione del carattere circolare dei moti celesti;
3. Il presupposto dell'immobilità della Terra e della sua centralità nell'universo;
4. La credenza nella finitezza dell'universo;
5. L'opinione che non ci sia bisogno di individuare nessuna causa per spiegare lo stato di quiete di un corpo, mentre ogni movimento deve essere spiegato facendo riferimento ad una causa specifica che l'ha prodotto;
6. La scissione tra ipotesi matematiche dell'astronomia e la descrizione di ciò che è della filosofia naturale.

Nel corso di circa un secolo questi presupposti vennero messi in discussione e abbattuti. Ne risultò una nuova immagine dell'universo destinata a trovare il suo compimento nell'opera di Isaac Newton che ci ha lasciato quella grandiosa costruzione nota come "fisica classica".

⁵ Con 'eccentrico' si intende un cerchio ausiliario impiegato per spiegare il moto dei pianeti intorno alla Terra, detto più comunemente *deferente*; con 'epiciclo' si intende un Circolo sul quale si supponeva muoversi un pianeta intorno alla Terra, e il cui centro descriveva a sua volta una circonferenza detta *deferente*; infine, con 'equante' si intende il punto interno dell'eccentrico, giacente sulla linea degli apsi, da cui il moto del centro dell'epiciclo appariva uniforme.

L'UNIVERSO NELLA CONCEZIONE TOLEMAICA:

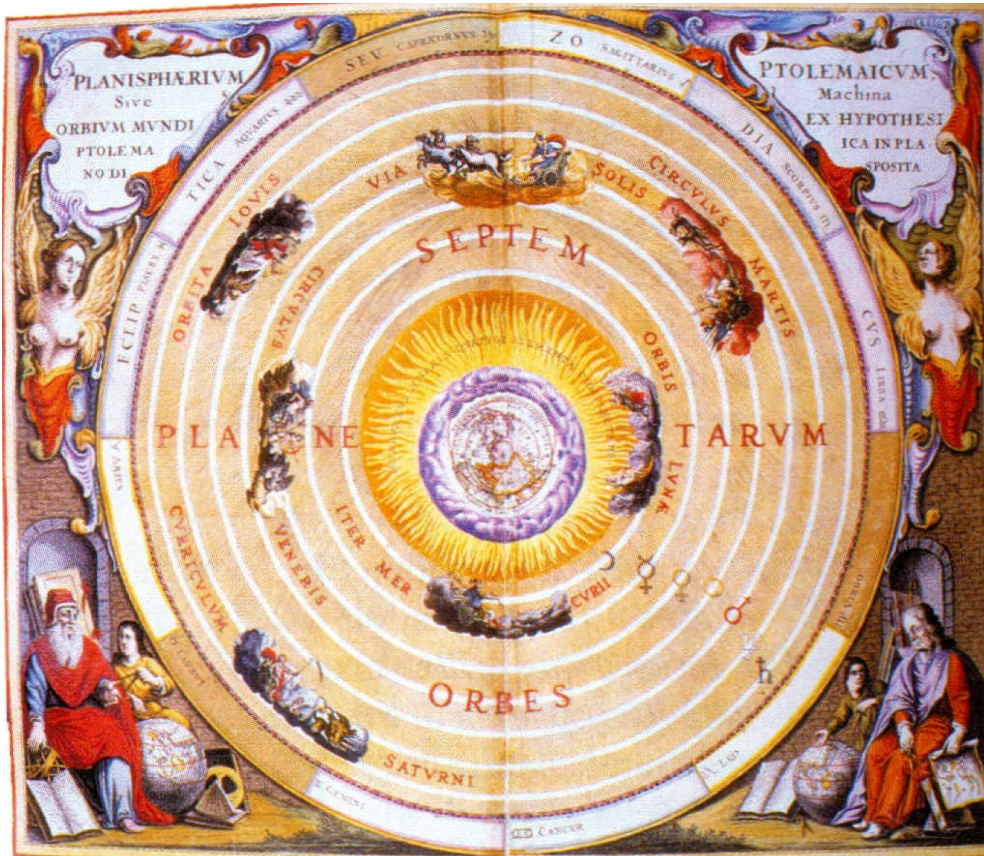


Fig. 1

2.2 Niccolò Copernico (1473- 1543)

Niklas Kepperlingk, latinizzato in Copernicus, nacque nel 1473 a Thorn (odierna Torun), in una città della Prussia orientale che era passata nel 1466 sotto la sovranità del re di Polonia. Figlio di un mercante, fu adottato da uno zio materno che era un canonico. Dopo gli studi a Cracovia (ove gli fu maestro A. da Bruzdewo) fu spinto dallo zio ad un soggiorno in Italia per studiare nelle principali

università. Nel 1946 andò a Bologna, dove fu “piuttosto amico e assistente che allievo” come sostenne Rheticus, dell’astronomo Domenico Maria Novara.⁶

Nel 1500 si recò a Roma per l’anno santo dove tenne delle conferenze, e l’anno seguente fece ritorno in patria per prendere il possesso del canonicato di Frauenburg. Tornò in Italia nello stesso anno, a Padova, per studiare legge e medicina per quattro anni, e a Ferrara dove conseguì il dottorato in diritto canonico. Nel 1506, dopo nove anni di permanenza in Italia, tornò in Polonia come segretario e medico presso lo zio. Dopo la morte di quest’ultimo nel 1512, si stabilì a Frauenburg (odierna Frombork) dove rimase per più di trent’anni lavorando al suo capolavoro sino alla morte avvenuta nel 1543.

Intorno al 1514-15 (ma non tutti gli specialisti concordano) Copernico stese un *De hypotesibus motuum coelestium a se constitutis commentariolus*. In esso vengono presentate, senza dimostrazione, sette *petitiones* (seguendo il modello di esposizione euclideo, ripreso in seguito da Newton) che contengono *in nuce* le tesi che verranno sostenute nell’opera maggiore:

1. Non esiste un solo centro di tutti gli orbi celesti o sfere (ci sono, a differenza di Tolomeo, due centri di rotazione: la Terra che è il centro di rotazione della Luna, e il Sole che è al centro della rotazione degli altri pianeti);
2. Il centro della Terra non coincide con il centro dell’universo, ma solo con il centro della gravità e della sfera della Luna (rimane da spiegare la gravità);
3. Tutte le sfere ruotano attorno al Sole (che è dunque eccentrico rispetto al centro dell’universo);
4. Il rapporto fra la distanza Terra-Sole e l’altezza del firmamento⁷ è minore del rapporto fra il raggio terrestre e la distanza Terra-Sole. Quest’ultima è pertanto impercettibile in rapporto all’altezza del firmamento (se l’universo ha dimensioni così grandi, non avverrà che il moto della Terra dia luogo ad un moto apparente delle stelle fisse);
5. Tutti i moti che appaiono nel firmamento non derivano dai moti del firmamento, ma dal moto della Terra. Il firmamento rimane immobile, mentre la Terra, con gli elementi a lei più vicini - l’atmosfera e le acque della sua superficie- compie una completa rotazione sui suoi poli fissi in un moto diurno (il moto di rotazione era particolarmente difficile da giustificare in quanto l’uomo non ne fa esperienza)⁸;

⁶ Si ricordi che veniva insegnato il sistema tolemaico. Copernico ravvisò in esso molte insufficienze, e si dedicò allo studio degli autori classici alla ricerca di un sistema che spiegasse meglio i dati osservativi a sua disposizione.

⁷ ‘Firmamento’ deriva dal latino *firmamentum*, ossia “cielo”, nel latino classico significava “appoggio, sostegno”. È un derivato di *firmare*, ovvero “rendere stabile”, secondo il modello del greco στερέωμα (οὐρανοῦ) che indica la volta stabile sostenente l’oceano celeste.

⁸ Una delle obiezioni più ricorrenti al moto di rotazione è quella secondo la quale se la Terra ruotasse su se stessa si disgregherebbe, poiché non si presenta come un tutto omogeneo, e l’aria si “strapperebbe” in quanto non riuscirebbe a seguire la Terra.

6. Ciò che ci appare come movimenti del Sole non deriva dal suo moto, ma dal moto della Terra e della nostra sfera con cui ruotiamo attorno al Sole come ogni altro pianeta. La Terra ha, pertanto, più di un movimento (anche il moto di rivoluzione della Terra intorno al Sole era difficile da dimostrare, in quanto il Sole sembra sorgere e tramontare)⁹;
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 sufficiente a spiegare tutte le disequaglianze che appaiono nel cielo (i moti retrogradi diventano *moti apparenti*, dipendenti da moto della Terra).

Quest'opera circolò manoscritta tra i dotti del tempo, venne smarrita e poi ritrovata nel 1877. Tra i suoi estimatori vi fu Georg Joachim Lauschen, latinizzato in Rheticus (nome che indica la provenienza dall'antica provincia romana della Rezia) che si recò personalmente da Copernico nel 1539 per conoscere la sua dottrina. Rheticus pubblicò nel 1540 la celebre *De libris revolutionum Narratio prima* che, accanto ad una serie di considerazioni astrologiche, contiene una esposizione della cosmologia copernicana. Attraverso questo scritto l'opera di Copernico ebbe maggiore risonanza.

In quest'opera Rheticus insisteva sulla maggior semplicità e armonia del sistema copernicano rispetto a quello tolemaico, infatti con il semplice moto della Terra si riuscivano a spiegare molti più fenomeni. Come afferma lo stesso autore, se vediamo che “mediante questo solo movimento della Terra trova spiegazione un numero quasi infinito di fenomeni, perché non dovremmo attribuire a Dio, creatore della natura, l'abilità che osserviamo presso i semplici fabbricanti di orologi?”, e ancora “bastava la sola ottava sfera immobile, il Sole essendo anch'esso immobile al centro dell'universo, e per spiegare i moti degli altri pianeti bastavano combinazioni di epicicli ed eccentrici, di epicicli ed epicicli”.

Anche Copernico ribadì la maggiore semplicità ed armonia del suo sistema nella *Dedica* a papa Paolo III del *De revolutionibus orbium coelestium*, pubblicato nel maggio del 1543. In realtà la semplicità del nuovo sistema era più apparente che reale.

Bisogna precisare che l'opera di Copernico non si presentava come l'esposizione di nuovi dati osservativi,¹⁰ ma come una nuova costruzione cosmologica che si accordava meglio con i dati dell'astronomia tolemaica. Questa nuova cosmologia era ancora molto debitrice del sistema aristotelico- tolemaico (oltre al fatto che l'intera opera è in continuo parallelismo con l'*Almagesto* di Tolomeo): l'universo copernicano è sferico come i corpi celesti in esso contenuti, è finito, le sfere cristalline si muovono di moto circolare, e la stessa immobilità del Sole è la conseguenza della sua

⁹ Nell'uso abituale della lingua si continuano ad usare espressioni come “il sole sorge o tramonta”, nonostante siano passati secoli dalla rivoluzione copernicana, il motivo è che il modello eliocentrico è per noi contro intuitivo, è contrario all'esperienza comune.

¹⁰ Copernico, infatti, basò i suoi calcoli sui dati osservativi di astronomi a lui precedenti, ma questo non gli impedì di ottenere risultati straordinariamente vicini a quelli che oggi abbiamo a disposizione.

natura divina, mentre la sua posizione centrale è legata al fatto che è la collocazione più idonea perché possa illuminare ogni cosa simultaneamente, in quanto esso è la “lucerna del mondo”.

Lo sforzo di Copernico, consistente nel mantenere questi elementi della tradizione cercando di armonizzarli nella nuova visione del cosmo, condusse ad un sistema tutt'altro che semplice dal punto di vista matematico in cui il Sole non occupava il centro dell'universo (infatti è più corretto definire il suo sistema *eliostatico* che *eliocentrico*), in cui bisognava ricorrere ad una serie di cerchi ruotanti attorno ad altri cerchi, e in cui si attribuiva alla Terra un terzo movimento di declinazione per giustificare la variabilità dell'asse terrestre rispetto alla sfera delle stelle fisse.

La vera forza della rivoluzione copernicana non risiede tanto negli elementi di novità introdotti, che sono comunque presentati con molta modestia (Copernico stesso sosteneva di aver recuperato le antiche tesi di Pitagora e Filolao)¹¹, ma nella portata dei problemi che il nuovo sistema solleva, e nelle sue implicazioni filosofiche. Infatti, affermare che la Terra non è immobile e al centro dell'universo significa privare l'uomo di quella centralità che godeva nel precedente sistema, e relegarlo ad una posizione marginale che mette in evidenza la sua piccolezza di fronte alle dimensioni di un universo che appare finito, ma smisurato.

È opportuno ricordare che l'opera maggiore di Copernico apparve alle stampe con una premessa *Ad lectorem* che non è dell'autore. Infatti, quando Rheticus si trasferì a Lipsia nel 1434 con il manoscritto del *De revolutionibus* per pubblicarlo, lo sottopose prima alla revisione dell'amico teologo Andrea Osiander. Quest'ultimo stabilì che fosse più prudente accompagnare lo scritto con una premessa in cui si presentavano le tesi di Copernico come semplici ipotesi matematiche, senza alcuna pretesa di poter valere come una descrizione della realtà fisica. In questo modo, si veniva a creare una contraddizione con quanto sostenuto dallo stesso astronomo polacco nella *Dedica* in cui insisteva sul significato cosmologico della sua teoria.¹² Copernico, ormai malato, non poté impedire che questo accadesse, e ricevette sul letto di morte una copia della sua opera introdotta da questa cauta premessa che lui non avrebbe voluto.

¹¹ La teoria eliocentrica era già presente nell'antichità, ad esempio era sostenuta dai pitagorici. Il cosmo dei pitagorici è costituito da un fuoco centrale, paragonato ad un focolare di una casa, intorno al quale ruotano la Terra, la Luna, il Sole, i cinque pianeti allora conosciuti, e il cielo delle stelle fisse. I pitagorici aggiunsero anche l'antiterra (forse per raggiungere il numero 10, centrale nella loro dottrina), situata tra il fuoco centrale e la Terra.

¹² Infatti così scrive Osiander nella premessa: “In essa si dice che in molti si sentiranno offesi dalla dottrina del moto della Terra, ma che se si esamina un po' più a fondo la cosa, si vedrà che l'autore non merita alcun biasimo. Il compito dell'astronomo è infatti quello di ricavare la storia dei moti celesti da diligenti osservazioni e quindi di escogitare le cause e ipotesi poiché non è possibile trovare quelle vere, tali che sulla loro base, con l'aiuto dei principi fondamentali, si possano calcolare tali moti, nel futuro come nel passato. Ma non è necessario che tali ipotesi siano vere, anzi, nemmeno verosimili, bensì è sufficiente che il calcolo si accordi con le osservazioni [...] Lasciamo dunque che queste nuove ipotesi si aggiungano alle antiche, poiché sono mirabili e insieme semplici, ma nessuno deve attendersi qualcosa di certo in astronomia, poiché essa non ha tale facoltà, e se qualcuno prenderà per vero ciò che è stato fatto per altri scopi, lascerà questa disciplina più stolto di quando si è accostato ad essa.”

L'UNIVERSO NELLA CONCEZIONE COPERNICANA:

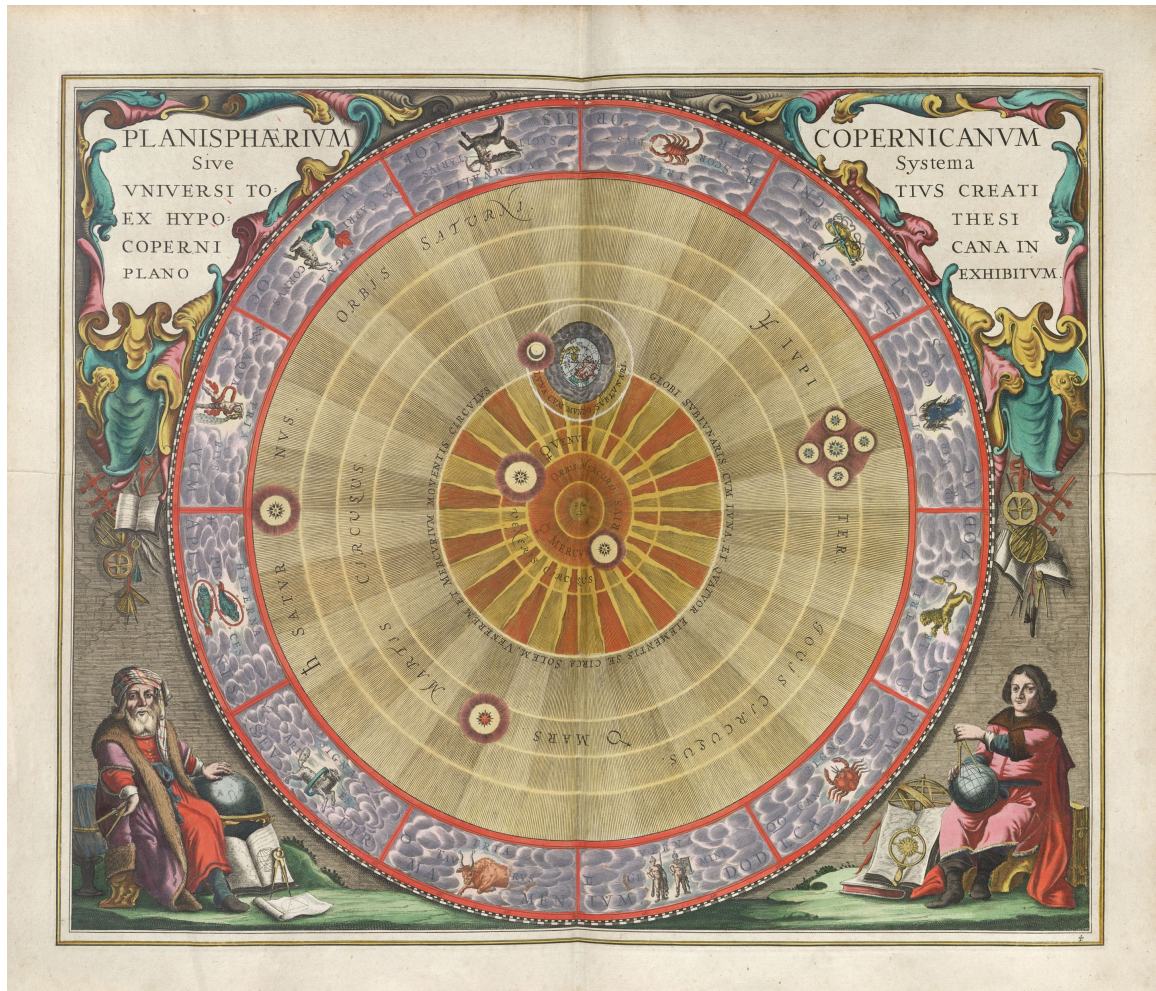


Fig. 2

Thycho Brahe (1546-1601)

L'astronomo danese Tyge Brahe, latinizzato in Tycho, era uno studioso autodidatta che era stato indirizzato dallo zio tutore agli studi in legge. Ma la passione e l'interesse di Tycho erano di diversa natura, infatti non seguì regolarmente i corsi all'Università di Lipsia per dedicarsi allo studio del cielo. Certamente fu il più grande degli osservatori ad occhio nudo che abbia mai avuto la storia dell'astronomia, a lui dobbiamo una mole notevole di dati osservativi che vennero impiegati da Keplero per l'elaborazione delle sue leggi.

L'aspetto rilevante di questa raccolta è la precisione delle sue osservazioni, quasi incredibile se si pensa che erano state eseguite solo con l'ausilio di strumenti tecnologicamente rozzi, alcuni di essi costruiti da lui personalmente.

Tycho fece le sue prime osservazioni intorno ai sedici anni, e continuò per tutta la durata della sua vita. Di una certa rilevanza è quella dell'11 novembre 1572 in cui Tycho vide una nuova stella brillantissima nella costellazione di Cassiopea che poi divenne sempre meno brillante sino alla sua scomparsa due anni dopo. Questo evento fu occasione per una piccola pubblicazione, *De stella nova* (1573), in cui sosteneva che non si trattava di una cometa, ma di una stella che aveva subito una modificazione, in questo modo veniva messo in dubbio il contrasto tra immutabilità dei cieli e la mutabilità del mondo sublunare.

Nel 1576 ebbe in dono dal re di Danimarca, Federico II, l'isola di Hveen dove fece costruire lo splendido castello di Uranborg, dotato di osservatori e laboratori, sede di insegnamento per molti giovani studiosi provenienti da tutta Europa (vedi fig. 4).¹³ Qui proseguì i suoi studi e poté confermare le sue ipotesi sulla stella con le osservazioni delle comete del 1577 e del 1585. Giunse alla conclusione che tutte le comete "si muovono nelle regioni eteree del mondo e mai nel mondo sub-lunare come Aristotele e i suoi seguaci hanno voluto farci credere per secoli".

Proprio lo studio sulle comete lo condusse ad un'altra affermazione in contrasto con il sistema aristotelico- tolemaico, ovvero, se le comete non seguono la legge di nessuna sfera, ma si muovono in contraddizione con esse, allora le sfere non possono avere nessuna realtà, sono semplici ipotesi esplicative. Il cielo, quindi, non è composto da sfere reali ma è fluido e libero, aperto in tutte le direzioni, tale da non opporre alcun ostacolo alla libera corsa dei pianeti.

Nel capitolo VIII del *De mundi aetherei recentioribus phaenomenis liber secundus*, pubblicato a Uranborg nel 1588, troviamo le linee essenziali della concezione ticonica dell'universo. Esso trae vita da un duplice rifiuto: dell'astronomia tolemaica, e dell'astronomia copernicana. La prima viene respinta per le incoerenze con i dati offerti dalle recenti osservazioni condotte sulle comete, la seconda viene rigettata perché non è in accordo con le Sacre Scritture che parlano della fissità della Terra, e perché il moto della Terra non è confermato dalla nostra esperienza (secondo Tycho, se la Terra si muovesse allora una pietra lasciata cadere da una torre non cadrebbe ai piedi di essa, invece noi osserviamo che la pietra cade proprio alla base della torre).

Pertanto, nel sistema ticonico (vedi fig.3), la Terra continua ad essere immobile, e al centro dell'universo che è chiuso da una sfera stellare. Essa è al tempo stesso anche al centro delle orbite della Luna e del Sole, mentre gli altri pianeti ruotano intorno al Sole che si trova nel centro delle loro orbite che sono circolari. In questa sede troviamo un'ulteriore conferma della non realtà delle sfere, infatti le orbite si intersecano in più punti, e questo non potrebbe avvenire se le sfere avessero una realtà materiale.

Il sistema del mondo di Tycho si presenta, in questo modo, come un "sistema intermedio" tra quello copernicano e tolemaico che diventò un punto di convergenza per quanti non accettavano la

¹³ Tycho però non fu un buon castellano, ed in seguito ad una sollevazione dei suoi sudditi venne esiliato dal re di Danimarca Cristiano I, e costretto a trasferirsi prima ad Amburgo, poi a Praga dove gli venne offerto un posto come matematico di corte dal sovrano Rodolfo II. Tycho non fu noto solo per questo episodio, ma anche per essere stato un uomo di un certo temperamento, infatti perse il naso durante una sfida a duello nella giovinezza (per questo nelle raffigurazioni viene ritratto con un naso in metallo).

rivoluzione copernicana, e fu molto apprezzato in particolare dai gesuiti. Questo rappresentò da una parte, un ostacolo per la diffusione delle idee di Copernico, ma dall'altra sancì il superamento, ormai accolto, del sistema cosmologico tradizionale.

L'UNIVERSO NELLA CONCEZIONE TICONICA:



Fig. 3



Fig. 4- L'osservatorio di Uraniborg

2.4 Johann Kepler (1571-1630)

Keplero nacque nel 1571 a Weil, nel Württemberg, in una famiglia luterana di modeste condizioni (suo padre era un mercenario). Fu dapprima avviato ai lavori artigianali, ma inadatto per la sua gracile costituzione, venne indirizzato agli studi ecclesiastici in cui ebbe modo di distinguersi. Con il progetto di diventare pastore, frequentò l'università protestante di Tubinga dove Maestlin insegnava astronomia presentando sia il sistema tolemaico, sia quello copernicano.

Tuttavia, non riuscì a terminare i suoi studi in quanto venne chiamato in Austria per insegnare matematica al seminario di Graz. Bisogna precisare che il suo ruolo prevedeva anche la stesura del calendario annuo e di alcuni "pronostici", e in uno di essi prevede con successo un inverno particolarmente rigido, rivolte contadine, e la guerra con i Turchi. Si occupò anche di redigere oroscopi, alcuni dei quali sono ritratti di notevole penetrazione psicologica, basti pensare a quello di Wallenstein. Si fece così una buona reputazione come astrologo, prima ancora di diventare noto come astronomo.

A Graz Keplero aveva pochi allievi, e molto tempo libero, scrisse così il *Prodromus dissertationum continens mysterium cosmographicum de admirabili proportione orbium coelestium* nel 1595, e lo pubblicò grazie all'ausilio di Maestlin l'anno successivo. Una peculiarità dello stile di Keplero consiste nel cercare di fornire le ragioni che stanno alla base delle sue teorie, non semplicemente esporle corredate da un apparato osservativo. Questo aspetto si può ravvisare anche nell'opera sopra citata in cui si pone il problema di dimostrare che Dio ha guardato ai solidi regolari nella creazione dell'universo.

I solidi regolari, noti anche come "solidi platonici", sono cinque: il cubo, il tetraedro, il dodecaedro, l'icosaedro, l'ottaedro. Keplero ravvisò una corrispondenza mirabile tra essi ed il numero e le dimensioni dei pianeti. Infatti, nella sua cosmologia, la sfera di Saturno circonda il cubo in cui risulta inscritta la sfera di Giove, a sua volta la sfera di Giove circonda il tetraedro in cui è inscritta la sfera di Marte, e così via in una alternanza di sfere e solidi regolari nell'ordine in cui sono stati sopra riportati (come in fig. 5).

Keplero cercò una conferma sperimentale del suo modello, e si rese conto che le dimensioni relative delle orbite dei pianeti non coincidevano con quelle fornite da Copernico, pertanto decise fare affidamento su calcoli più accurati come quelli contenuti nell'opera di Tycho Brahe a cui aveva inviato una copia del suo lavoro.

Ne inviò una anche a Galileo Galilei che si congratulò per la sua adesione al copernicanesimo (anche se probabilmente non l'aveva ancora letta), ma non si peritò di rispondere alle epistole successive di Keplero. Da Brahe, invece, ricevette una critica poiché non è la natura che deve adeguarsi alle costruzioni dell'intelletto, ma viceversa, anche se queste ultime sono eleganti e belle.

Al di là di questa riserva, Brahe nutriva una profonda stima del lavoro svolto nel *Mysterium*, ne è la prova il fatto che gli propose di diventare suo assistente presso la corte boema in cui svolgeva la mansione di matematico imperiale. Keplero si stabilì così a Praga con la famiglia e accettò (nel 1600) di elaborare una teoria dei movimenti di Marte in vista della preparazione di nuove tavole, le *tabulae rudolphinae*, che vennero pubblicate nel 1627. Alla morte di Brahe, avvenuta nel 1601, gli successe nella carica di matematico di corte ed ebbe il diritto di accedere agli appunti del primo.

Nel 1609 pubblicò *Astronomia nova seu physica coelestis tradita commentariis de motibus stellae Martis ex observationibus G. V. Tychonis Brahe* che ebbe poco successo, in cui troviamo l'enunciazione delle prime due leggi che portano il suo nome.

In essa Keplero dà conto dei ben settanta tentativi che ha compiuto per far rientrare i dati ottenuti da Tycho relativamente ai moti di Marte nella concezione da lui proposta (per questo motivo era stato assunto da Brahe). Il problema relativo al moto di Marte, che appariva irregolare rispetto a quello degli altri pianeti, è legato all'eccentricità della sua orbita. Keplero riuscì a fare delle misurazioni piuttosto precise e si rese conto che la sua eccentricità non era un dato che poteva essere eliminato facendo ricorso ad una strumentazione più precisa.

Il suo errore consisteva nell'aver creduto che l'orbita di Marte fosse circolare, come sosteneva la tradizione filosofica, in accordo con la metafisica. Rompendo questa millenaria tradizione Keplero affermò in un primo momento che l'orbita del pianeta era "ovale", e in un secondo momento che era a forma di ellisse. Giunse alla conclusione che i pianeti descrivono nel loro moto di rivoluzione orbite ellittiche, in cui il Sole occupa uno dei due fuochi, questa è la "prima legge di Keplero".

Calcolò anche l'orbita della Terra, osservando che la velocità di quest'ultima aumenta quando si avvicina al Sole, e diminuisce quando si allontana da esso. Giunse, così, alla formulazione di quella che oggi è nota come la "seconda legge di Keplero": in tempi uguali, la linea congiungente il Sole con il pianeta spazza aree uguali. La Terra e gli altri pianeti si muovono di un moto *realmente* non uniforme. La spiegazione fisica di questa variazione viene ravvisata nel Sole che emanerebbe una "forza" (una "*species* immateriale del suo corpo") che attrae gli altri pianeti mettendoli in moto e mantenendoli in movimento; in questo risentirebbe dell'influenza delle teorie sul magnetismo di Gilbert. Invece, il movimento di rotazione locale del Sole viene spiegato ricorrendo ad una forza proveniente da un'anima, ultima concessione al sistema tradizionale.

L'*Astronomia nova* venne letta da pochi, alcuni vennero scoraggiati anche dal prezzo del volume, come afferma lo stesso autore. Per questo motivo Keplero decise di esporre le tue teorie in un'opera che da una parte costituisse una *summa* della sua nuova astronomia, e dall'altra fosse un manuale scritto nella forma della questione-risposta. Nel 1610 pubblicò la *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* (in risposta al *Nuncius Sidereus* di Galileo Galilei), e nel 1611 la *Dioptrice*, infatti Keplero si dedicò anche allo studio dell'ottica e del funzionamento dell'occhio umano (fu il primo a scoprire che l'immagine proveniente dall'esterno e proiettata sulla retina è capovolta).

Per Keplero iniziano le difficoltà economiche e familiari: gli emolumenti erano rari e scarsi, nel 1611 morì sua moglie, Barbara Müller, che era impazzita, e perse un altro figlio (ne aveva già persi due). A questa situazione disagiata si aggiunse l'accusa di stregoneria che colpì sua madre, e solo con grande difficoltà riuscì a salvarla dalla condanna.

Nel 1612, dopo l'abdicazione di Rodolfo II, lasciò Praga, e si trasferì a Linz dove rimase per quattordici anni. Qui si risposò con Susanna Reuttinger, ed ebbe altri sette figli che però perse in buona parte quando questi erano ancora in tenera età. Degli anni della permanenza a Linz ricordiamo *Harmonices Mundi libri quinque* pubblicati nel 1619, in cui emergono alcuni temi pitagorici. Infatti, in essa Keplero associa ad ogni pianeta un tono o intervallo musicale, che però non è udibile dal nostro orecchio. Inoltre, nel terzo capitolo del V libro troviamo quella che è conosciuta come la "terza legge di Keplero":

è un fatto assolutamente certo ed esatto che la proporzione tra i tempi periodici di due pianeti scelti a piacere è esattamente come la potenza di tre mezzi della proporzione tra le loro distanze medie, e cioè fra le loro stesse orbite.

In termini più moderni: i quadrati dei tempi di rivoluzione di una qualunque coppia di pianeti sono proporzionali ai cubi delle loro distanze medie dal Sole.

La guerra scoppiata in Austria contro i protestanti lo costrinse a rifugiarsi a Ratisbona, a Ulm, infine a Sagan sotto la protezione del mecenate Wallenstein che gli promise di fargli ottenere gli arretrati del suo stipendio. Tuttavia, Keplero non riuscì ad ottenere nulla, e morì durante il viaggio verso Ratisbona nel 1630, in cerca di aiuti economici. La sua sorte fu sventurata anche dopo la sua morte, infatti la sua tomba venne dispersa.

L'UNIVERSO NELLA CONCEZIONE DI KEPLERO:

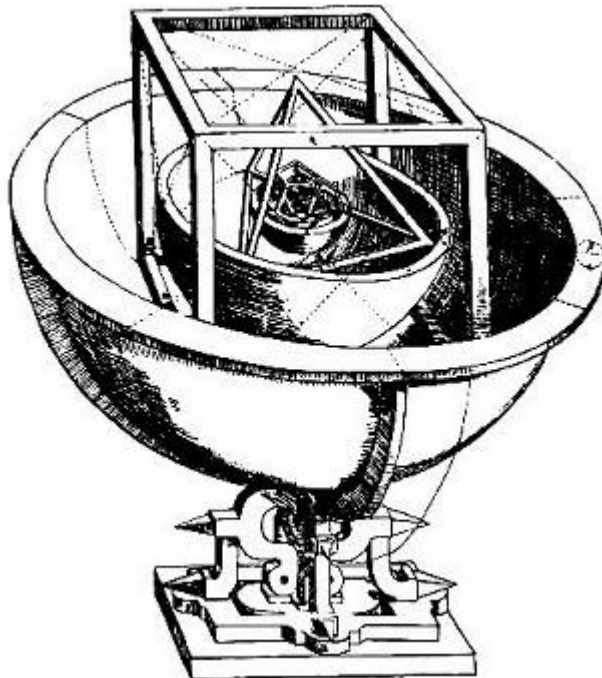


Fig. 5

2.5 Galileo Galilei (1564- 1642)

Galileo Galilei nacque a Pisa il 15 Febbraio 1564, figlio maggiore di Vincenzo Galilei, maestro di canto e teorico della musica, e di Giulia Ammanati da Pescia. Nel 1581 venne iscritto allo Studio di Pisa fra gli “scolari artisti” per seguire gli studi di medicina. Tuttavia, Galileo privilegiò i corsi di suo interesse e prese lezioni private di geometria da Ostilio Ricci da Fermo, allievo di Niccolò Tartaglia, con cui intraprese la lettura di Euclide e Archimede.

Nel 1585, senza aver conseguito alcun titolo, abbandonò lo Studio Pisano. L'anno successivo pubblicò il suo primo lavoro, *La bilancetta*, nel quale illustrò la bilancia idrostatica che aveva progettato sulla base delle indicazioni di Archimede. Questo strumento serviva a dimostrare che il metodo archimedeo era in grado di risolvere il problema della corona del re Gerone.¹⁴

La passione per la fisica non escludeva interessi di carattere letterario, infatti Galileo tenne due lezioni *Circa la figura, sito e grandezza dell'inferno di Dante*, e scrisse delle *Considerazioni sul Tasso*. La sua era una cultura molto vasta e quasi interamente da autodidatta.

Nel 1589 Galilei ottenne la nomina a lettore di matematiche nello Studio di Pisa per tre anni, e a questo periodo risalgono i manoscritti del *De motu* in cui iniziò le ricerche sul moto che lo avrebbero occupato per cinquant'anni sino ai *Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze* (1638). Nel corso di questi anni affrontò una serie di problemi che avrebbero visto anche cambiamenti nelle posizioni da lui sostenute, come l'isocronismo del pendolo, la caduta dei gravi, il moto di proiettili, la coesione, la resistenza dei solidi.

Bisogna precisare che nel *De motu* Galilei non intendeva dimostrare che tutti i corpi cadono alla stessa velocità, ma che la loro velocità è proporzionale alla differenza tra il loro peso specifico e la densità del mezzo attraverso il quale cadono. Galilei era giunto alla erronea conclusione secondo la quale corpi della stessa materia e densità cadono alla stessa velocità indipendentemente dal loro peso, mentre corpi di materia diversa, ma aventi lo stesso peso, non cadono alla stessa velocità, quello più denso cade più velocemente.

Gli interessi per la tecnica, già presenti ne *La bilancetta*, continuano ad essere presenti anche dopo il passaggio alla cattedra di matematica dello Studio di Padova (1592). Le sue lezioni riguardavano argomenti quali gli *Elementi* di Euclide, l'*Almagesto* di Tolomeo e le *Questioni meccaniche* pseudoaristoteliche. Galilei fu costretto a dare, per ristrettezze economiche, anche lezioni private di ingegneria e architettura militare a giovani nobili per i quali scrisse una *Breve istruzione all'architettura militare* e un *Trattato di fortificazione*.

Accanto a questa attività didattica tenne una piccola officina dove venivano prodotti e venduti compassi geometrici e militari, bussole, squadre e altri strumenti meccanici, più tardi cannocchiali. Tra queste invenzioni tecniche il compasso geometrico-militare, destinato a calcoli balistici e geodetici, risale al 1597. Le vendite del compasso ebbero successo e nel 1606 scrisse un manuale in

¹⁴ Archimede venne convocato dal re Gerone per verificare la composizione della sua corona, così da stabilire se l'artigiano che l'aveva prodotta era stato onesto. Archimede scoprì che l'abile e scaltro artigiano aveva impiegato una lega di metalli invece che oro puro. La tradizione vuole che il nostro abbia pronunciato la celebre esclamazione “eureka!” mentre stava facendo il bagno, infatti proprio lo spostamento d'acqua dovuto all'immersione del suo corpo gli avrebbe fatto venire in mente come risolvere il problema postogli dal sovrano.

italiano sull'argomento, in seguito al quale venne accusato ingiustamente da Baldassar Capra di plagio.

La prima testimonianza della sua adesione alle tesi di Copernico si trova in una lettera del maggio 1597 diretta a J. Mazzoni, suo collega dei tempi di Pisa. Nell'agosto dello stesso anno ricevette una copia dell'opera di Keplero, il *Mysterium cosmographicum*, e dopo averne letto la prefazione scrisse all'autore per dichiarare la propria adesione alla dottrina copernicana, ma anche per esprimere il suo timore di rendere pubbliche le sue posizioni.

Intorno al 1602, Galilei iniziò a progettare esperimenti con i corpi in caduta libera¹⁵ in concomitanza con i suoi studi sul moto del pendolo¹⁶ e il problema della brachistocrona, ovvero della curva compresa tra due punti lungo la quale un grave lasciato cadere con velocità iniziale nulla si muove nel tempo minimo.

Intanto, nell'autunno del 1604, la comparsa di una stella *nova* (cioè di una supernova) riaccese il dibattito sull'incorruttibilità dei cieli. In una conferenza pubblica Galilei sostenne che la "nuova stella" era la prova che la materia celeste non è immutabile.

Intorno al luglio del 1609 Galilei ebbe notizia che in Olanda era stato inventato un dispositivo per far apparire più vicini oggetti distanti e realizzò un cannocchiale (da lui chiamato "occhiale") capace di ingrandire gli oggetti fino a nove volte, dandone poi una dimostrazione dal campanile di San Marco. Lo strumento colpì favorevolmente le autorità per il suo possibile impiego nel commercio e in guerra, al punto che confermarono a Galilei un vitalizio e aumentarono il suo stipendio da 520 a 1000 fiorini, una somma senza precedenti per un professore di matematica.

A partire dal 1610, iniziò a studiare il cielo con uno strumento che ingrandiva quindici volte, mentre in seguito si servì di cannocchiali più potenti. La Luna apparve di natura terrestre, come coperta di rilievi (riuscì persino a stimarne l'altezza), la Via Lattea composta da una miriade di piccole stelle, nuove stelle comparvero come emerse dal nulla, e furono scoperti quattro satelliti che orbitavano intorno a Giove. Se Giove con i suoi satelliti ruotava intorno ad un corpo centrale non si poteva più obiettare che l'idea della Terra orbitante intorno al Sole con la sua Luna fosse assurda. Galilei redasse rapidamente il *Sidereus Nuncius* (1610) che dedicò a Cosimo II di Toscana, e i satelliti di Giove furono chiamati, in suo onore, "medicei".

L'opera venne accolta con diffidenza negli ambienti dotti, e vi furono delle difficoltà anche nell'accettare le osservazioni eseguite da Galilei, al punto che si peritò di inviare dei cannocchiali a diversi studiosi affinché potessero verificare personalmente le sue scoperte. L'obiezione più forte

¹⁵ L'immagine corrente di un Galilei pratico e deciso sperimentatore si deve in gran parte al suo primo biografo, Vincenzo Viviani. Fu quest'ultimo ad affermare che Galilei era salito sulla torre di Pisa tra il 1589 e il 1592, e "con l'intervento degli altri lettori e filosofi e di tutta la scolaresca", aveva confutato Aristotele dimostrando che i corpi cadono alla stessa velocità indipendentemente dal loro peso. In realtà, non vi sono prove che Galilei sia realmente salito sulla torre per fare i suoi esperimenti.

¹⁶ Secondo la tradizione Galilei scoprì il moto isocrono del pendolo durante una messa nel Duomo di Pisa. Infatti, avrebbe misurato, con l'ausilio del battito cardiaco, le sue oscillazioni e avrebbe notato che il periodo di esse è uguale.

che gli venne mossa consisteva nella possibilità che il nuovo strumento alterasse la visione, e non restituisse le immagini degli oggetti senza deformazioni. Questo, ovviamente, si aggiungeva a delle perplessità sulla bontà della nuova dottrina di Galilei.

Le sue scoperte astronomiche continuarono prima del suo trasferimento a Firenze con il titolo di “Filosofo e matematico primario” del Granduca di Toscana. Osservò l’aspetto “tricorporeo” di Saturno, in quanto la sua forma allungata venne spiegata ricorrendo alla presenza di due satelliti (il cannocchiale di Galileo non era in grado di osservare il cosiddetto “anello”). Nel 1611 scoprì che Venere ha fasi come quelle lunari “sì che necessariamente si volge intorno al Sole, come anco Mercurio e tutti li altri pianeti”. Ed infine osservò le macchie che si producono e dissolvono sulla superficie del Sole, ulteriore conferma che il mondo al di sopra della sfera della Luna non è inalterabile e incorruttibile.

Si recò a Roma nel 1611, e ricevette accoglienze quasi trionfali: era stato chiamato a far parte dell’Accademia dei lincei, inoltre autorevoli cardinali, gli ambienti gesuitici e lo stesso pontefice Paolo V avevano mostrato comprensione e consenso. Galilei, pieno di fiducia ed ottimismo, scrisse lettere cercando di persuadere alle nuove verità schernendo gli avversari convinto di ottenere una vittoria a breve scadenza. Non si era accorto che le difficoltà dovevano ancora iniziare.

Infatti, il testo dell’*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari* (1613) venne sottoposto a censura, nel 1614 il domenicano T. Caccini in una predica a Santa Maria Novella qualificò come eretica l’opera di Copernico e di coloro che pretendevano di correggere la Bibbia, e lo stesso Galilei venne formalmente denunciato al Sant’Uffizio per il contenuto della lettera al Castelli in cui affrontava il rapporto tra la verità delle Scritture e quella della scienza.

Nel dicembre del 1615 Galilei riprese a discutere e a polemizzare (con la lettera a Madama Cristina). L’anno seguente scrisse sotto forma di lettera al cardinal Orsini il *Discorso sopra il flusso e riflusso delle maree*, mentre il 18 febbraio i teologi del Sant’Uffizio presero in esame la dottrina copernicana nella formulazione rozza data dal Caccini. Questo esame condusse alla condanna di due proposizioni: “*Sol est centrum mundi, et omnino immobilis motu locali*”, e “*Terra non est centrum mundi nec immobilis, sed secundum se totam se movetur, etiam motu diurno*”. La prima proposizione venne censurata in quanto “*stultam et absurdam in philosophia, et formaliter haereticam*”, e la seconda come “*ad minus esse in Fide erroneam*”. Nello stesso anno la Congregazione dell’Indice proibì il libro di Copernico “*donec corrigatur*”.

Paolo V dispose che Galilei venisse ammonito ad abbandonare la dottrina copernicana, nel caso di un suo rifiuto gli sarebbe stato impartito l’ordine (o precetto) davanti ad un notaio, con testimoni, di rinunciare alla dottrina censurata e di astenersi dal trattarla. Nel maggio, Galilei richiese al cardinal Bellarmino una dichiarazione in cui si certificava che non aveva mai abiurato, né aveva ricevuto penitenze, ma gli era solo stata notificata la dichiarazione pubblicata dalla Sacra Congregazione affermando che la dottrina copernicana era contraria alle Scritture, pertanto non si poteva “né difendere né tenere”.

Nel 1623 pubblicò *Il saggiaiore*, uno dei capolavori della letteratura barocca, nata sul terreno di una disputa concernente le comete. Per Galilei le comete sono fenomeni ottici dovuti alla rifrazione della luce solare sulle esalazioni terrestri, senza alcuna realtà fisica, al contrario di quanto affermava Tycho Brahe che aveva interpretato le comete come corpi realmente esistenti.

In quest'opera vi sono anche due celebri dottrine filosofiche di Galilei: quella relativa alla distinzione fra qualità soggettive e oggettive dei corpi, e quella che fa riferimento alla struttura matematica della natura. Per quanto concerne la prima, Galilei distingue tra qualità che ineriscono alla materia indipendentemente dal soggetto che le percepisce con i sensi (pertanto sono chiamate "qualità oggettive"), e le qualità che dipendono invece dall'apparato percettivo del soggetto (per questo chiamate "qualità soggettive"), tali che "rimosso l'animale (sono) levate e annichilate tutte le qualità". Queste ultime sono considerate semplicemente dei nomi, proprio ad indicare la loro presenza soltanto nella percezione del soggetto.

Per quanto riguarda la seconda, Galilei sostiene che la natura, pur essendo "sorda e inesorabile ai nostri desideri" (quindi esente da cause finali), reca un ordine e una struttura geometrica. Pertanto, il libro della natura può essere inteso soltanto da chi ne conosce il linguaggio, e i caratteri: il primo è la matematica e i secondi sono le figure geometriche.

Quando venne eletto al soglio pontificio il cardinal Barberini, che aveva manifestato in più occasioni simpatia e ammirazione per l'opera di Galilei, quest'ultimo si aprì a nuove speranze. Il pontificato di Urbano VIII sembrava caratterizzato da notevole tolleranza, in quanto fece liberare Tommaso Campanella nel 1626, dopo soli tre anni dalla sua elezione a pontefice.

In questo clima rinnovato, Galilei decise di scrivere la *Risposta* alla confutazione del sistema copernicano del giurista Ingoli, e progettò la pubblicazione del *Discorso sopra il flusso e riflusso delle maree*, ma con il titolo meno audace di *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano* (come si può notare già dal titolo il terzo sistema del mondo, quello ticonico, era stato escluso).

Nel proemio *Al discreto lettore* e nelle parole conclusive, Galilei mostra di aderire all'ipotesismo di Urbano VIII, affermando di sostenere la teoria copernicana come una "pura ipotesi matematica". Tuttavia, nonostante questo tono prudente, non poté evitare la sconfitta dell'abiura.

Il colloquio si svolge a Venezia, nel palazzo del patrizio veneziano Giovan Francesco Sagredo che impersona la parte dello spirito libero, disposto ad accogliere il nuovo, e pronto all'ironia. Il secondo personaggio è il fiorentino Filippo Salviati che in questo convito copernicano appare come uno scienziato calmo e misurato, disposto al confronto. Il terzo interlocutore è il fittizio Simplicio, l'aristotelico difensore del sapere tradizionale che considera ogni tesi che si discosta da esso come pericolosa. Scritta in volgare, l'opera è rivolta al pubblico delle corti, della borghesia e del clero, non certo ai professori saccenti identificati nella persona di Simplicio.

Il *Dialogo* si compone di quattro giornate: la prima è rivolta alla distruzione della cosmologia aristotelica, la seconda e la terza rispettivamente dedicate al moto diurno e annuale della Terra, la quarta alla *prova fisica* del moto terrestre che Galilei ritenne di aver raggiunto con la teoria delle maree. Quest'ultima spiega erroneamente il fenomeno del flusso e del reflusso ricorrendo al duplice movimento della Terra: quello di rotazione su se stessa e quello di rivoluzione intorno al Sole. In questo modo le maree sarebbero l'effetto della combinazione dei moti menzionati, e non dell'influsso lunare. Per Galilei, infatti, fare riferimento all'attrazione tra massa acquosa degli Oceani e la Luna era una concessione alla magia e alle proprietà occulte. A tal proposito si stupì che un uomo come Keplero abbia invece dato credito a simili superstizioni.

In quest'opera vi è un'altra celebre argomentazione in difesa del moto terrestre, quest'ultima però fa leva sull'esperienza quotidiana: in una stanza posta sottocoperta in una nave, se ci sono mosche e farfalle e un vaso d'acqua con dentro pesci e un secchiello da cui cade goccia a goccia acqua dentro un altro vaso dalla bocca piccola e se la nave si muove a qualunque velocità "pur che il moto sia uniforme e non fluttuante qua e là, voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina o pure sta ferma". In questo modo Galilei voleva mostrare che è impossibile per un osservatore collocato sulla Terra percepire il moto di rotazione della Terra medesima, pertanto il solo fatto di non percepirlo non può essere prova della immobilità della Terra.

Questo esempio sopra riportato della nave è particolarmente importante perché ci consente di introdurre quello che oggi viene chiamato il "principio della relatività galileiana", secondo il quale in base a osservazioni meccaniche fatte all'interno di un sistema non si può decidere se il sistema stesso sia in quiete o in *moto rettilineo uniforme*. In realtà, Galilei non parla di moto "rettilineo uniforme", ma di moto "non fluttuante qua e là", e non si possono far coincidere i due termini perché questo comporterebbe da parte dello scienziato l'accettazione del principio di inerzia che non è mai stato teorizzato nei suoi scritti.

Nel *Dialogo* Galilei immagina un piano orizzontale, una superficie "né acclive né declive", sul quale il mobile sarebbe stato indifferente "la propensione e la resistenza al moto". Una volta che "gli fusse dato l'impeto", il movimento perdurerebbe per tutta la lunghezza del piano e "se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimenti senza termine, cioè perpetuo. La superficie di cui si parla, però, non è un piano orizzontale tangente alla superficie terrestre, ma una superficie sferica. Galilei, infatti, riteneva che non fosse possibile un moto rettilineo infinito per natura, in quanto la natura "non muove dove è impossibile di arrivare". Questo è uno degli ostacoli maggiori che Galilei non riuscì a superare, il moto in circolo restava per lui il moto per eccellenza che non richiedeva spiegazioni.¹⁷

I detrattori di Galilei riuscirono a metterlo in cattiva luce agli occhi di Papa Urbano VIII. L'inquisitore di Firenze dette ordine di sospendere la diffusione dell'opera, e il primo ottobre del 1632 fu intimato a Galilei di presentarsi a Roma per mettersi a disposizione del Commissario

¹⁷ Proprio per questo principio, Galilei continuò a concepire le orbite dei pianeti come circolari, ignorando la mole di misurazioni che in quegli anni aveva effettuato Keplero.

Generale del Sant'Uffizio. Galilei riuscì a rinviare la partenza fino al gennaio dell'anno seguente, ma minacciato di essere portato a Roma con la forza si mise in viaggio a fine mese. Dopo una lunga sosta dovuta alla quarantena per la peste, giunse a Roma il 13 febbraio. Il mese successivo si presentò fisicamente e moralmente prostrato al Sant'Uffizio.

L'accusa non era quella di aver pubblicato il *Dialogo*, ma di aver estorto l'*imprimatur* senza aver fatto presente a chi doveva concederlo dell'esistenza del *precetto* del 1616 che gli vietava di insegnare e diffondere la teoria copernicana. Durante gli interrogatori Galilei fece presente della dichiarazione rilasciatogli dal cardinal Bellarmino, e affermò di non ricordare di aver ricevuto nessun precetto davanti a testimoni come un verbale non firmato attestava. Suo malgrado, sostenne anche che il *Dialogo* aveva in realtà lo scopo di dimostrare la non validità delle ragioni di Copernico, e questo rese impossibile la sua difesa.

Dopo un mese e un secondo interrogatorio venne pronunciata la sentenza, e lo stesso giorno, il 12 giugno 1633, pronunciò la pubblica abiura:

con cuore sincero e fede non finta abiuro, maledico e detesto li suddetti errori et heresie [...] e giuro che per l'avvenire non dirò mai più né asserirò, in voce o in scritto, cose tali per le quali si possa haver di me simil sospitione, ma se conoscerò alcun heretico o che sia sospetto di heresia, lo denunzierò a questo S. Offizio.

La condanna non colpì solo Galilei, ma anche coloro che credevano in una apertura della Chiesa nei confronti delle nuove idee. Lo stesso Descartes rinunciò alla pubblicazione de *Il mondo o Trattato della luce* quando gli giunse la notizia di quanto era accaduto a Galilei, ritenne più opportuno limitarsi a pubblicare tre saggi (*La diottrica*, *Le meteore*, *La geometria*) in esso contenuti preceduti da una prefazione che fu il *Discorso sul metodo* (1637).

La sentenza prevedeva una condanna al carcere formale, Galilei ottenne inizialmente un trasferimento a Siena dove venne accolto dall'arcivescovo Piccolomini, e in seguito ad Arcetri, nella sua villa, a patto che vivesse ritirato senza troppe frequentazioni.

Nel 1634 morì la sua figlia prediletta e questo segnò un periodo di profonda tristezza e decadenza, peggiorata dalla progressiva perdita della vista che iniziò nel 1637.

Nel 1638, ad insaputa di Galilei, venne stampato a Leida, in Olanda, i *Discorsi sopra due nuove scienze attinenti alla meccanica e al moto locale* in cui sono presenti nuovamente i tre interlocutori del *Dialogo*. Nelle prime due giornate, dedicate al problema della resistenza dei materiali, si svolgeva un vero e proprio dialogo; mentre nella terza e quarta giornata, dedicate rispettivamente ai problemi del moto uniforme, naturalmente accelerato, uniformemente accelerato, e a quello della traiettoria dei proiettili,¹⁸ Salviati legge un trattato in latino. Una "quinta" giornata

¹⁸ Per quanto riguarda il moto dei proiettili, Galilei diede prova delle eccezionali qualità della sua scienza. Egli dimostrò che la traiettoria dei proiettili è una parabola risultante dalla combinazione di due moti indipendenti che non interferiscono l'uno con l'altro: un moto uniforme in avanti secondo l'orizzontale, e un moto uniformemente accelerato verso il basso secondo la verticale.

(sulla teoria delle proporzioni euclidee) e una “sesta” giornata (sul problema della percossa) vennero pubblicate nel 1774 e nel 1718.

Per quanto riguarda la formulazione, nella terza giornata, del moto uniformemente accelerato bisogna ricordare che essa è il compimento di quel processo di sempre maggior astrazione che era iniziato con l’opera giovanile *De motu*. In essa erano ancora presenti i concetti di pesantezza dei corpi, di moto naturale verso il basso, e la velocità di caduta era stata messa in relazione con la densità e il peso specifico dei corpi. Alla ricerca delle cause si sostituisce ora una considerazione cinematica: la velocità è direttamente proporzionale allo spazio percorso. In seguito sostituita con la proporzionalità con il tempo, molto meno intuitiva: “Se un mobile discende, a partire dalla quiete, con moto uniformemente accelerato, gli spazi percorsi da esso in tempi qualsiasi [...] stanno fra loro come i quadrati dei tempi”.

A questo proposito è bene precisare che la celebre narrazione, contenuta nei *Dicorsi*, del canaletto inclinato “dirittissimo” ben pulito e liscio dentro il quale si fa scendere una palla di bronzo durissimo, ben rotonda e pulita, è stata compiuta per assicurarsi che la legge sulla caduta dei gravi fosse corretta. Questo è il modo in cui procedeva Galilei, a cui dobbiamo il grande merito di aver inventato il metodo sperimentale che tuttavia non teorizzò mai. In esso l’esperimento serve a verificare l’ipotesi di partenza e consiste nell’osservare un fenomeno fisico in condizioni privilegiate di osservazione. Il fenomeno, infatti, viene isolato da tutte le connessioni che non sono rilevanti, e da tutti i fattori di disturbo, in questo modo viene osservato in condizioni controllate dall’uomo con l’ausilio di strumenti che rendono possibile la sua misurazione oggettiva.

Negli anni della vecchiaia Galilei continuò a scrivere lettere, a discutere, polemizzare, in compagnia di Viviani e al più giovane dei suoi discepoli, Evangelista Torricelli. L’8 gennaio del 1642 Galilei si spense, e non venne fatto costruire un monumento funebre in sua memoria poiché secondo il Pontefice non era opportuno celebrare con sontuosi mausolei coloro che erano stati processati dalla Santa Inquisizione.

2.6 René Descartes (1596- 1650)

Il celebre filosofo Descartes (latinizzato in *Cartesius*, e poi italianizzato in Cartesio) viene preso in considerazione in questa sede solo in modo parziale, e in riferimento alla sua concezione della fisica (contenuta nel trattato *Il mondo* del 1664, e nei *Principi di filosofia* del 1644-47), in modo da fornire un anello di raccordo tra i due giganti della scienza: Galilei e Newton.

Per Cartesio ogni fenomeno fisico è spiegabile facendo ricorso ad un rigido meccanicismo, in questo quadro l'azione di Dio è limitata a due generi di interventi: la creazione iniziale della sostanza estesa (materia) con la comunicazione a essa del movimento, e la conservazione della materia mantenendo costante la quantità di moto in essa impresso. Ogni altro intervento di Dio è escluso, di conseguenza viene garantita l'invariabilità delle tre leggi che presiedono alla redistribuzione del movimento nella materia. La prima è il principio d'inerzia, secondo la quale ogni cosa persevera sempre nel medesimo stato e non può essere mutata se non da una causa esterna. La seconda legge è che ogni cosa tende a muoversi in linea retta. La terza è il principio della conservazione del movimento, per cui nell'urto dei corpi il movimento non viene perso ma la sua quantità rimane costante.

In base a queste leggi Cartesio è in grado di spiegare come si sia formato l'universo a partire dal caos primigenio. La materia primitiva si presentava sotto forma di cubi (la forma geometrica più semplice) che si sono poi smussati diventando sferette producendo una sorta di limatura. Quest'ultima è il primo elemento che si venne a formare, detto materia luminosa, mentre i cubi smussati divennero sferette che costituiscono il secondo elemento, ovvero la materia luminifera.¹⁹ La limatura poi si riunì in agglomerati a forma di spirale o di viti che andarono ad occupare gli spazi tra le sferette, e dal loro ulteriore addensamento si ottenne la materia di cui è costituita la Terra e i pianeti. Pertanto, il sistema solare si presenta, al termine di questo processo, come interamente occupato da vortici (o *tourbillons*) di diverse dimensioni e velocità che riempiono lo spazio interplanetario (non c'è il vuoto) e sostengono i pianeti spiegandone il movimento. Attraverso questo modello Cartesio si lusinga di poter spiegare anche la gravità senza far ricorso alle aborrute forze a distanza, in quanto il moto vorticoso non solo spinge verso il centro della Terra i gravi, ma mantiene la Terra stessa e gli altri pianeti in orbita intorno al Sole.

La teoria dei vortici, non suffragata da nessuna osservazione, e priva di ogni elaborazione matematica riscosse un certo successo e fronteggiò per qualche tempo la teoria della gravitazione newtoniana. Tuttavia, non le si può negare il merito di fornire un'unica spiegazione per la caduta dei gravi e del moto orbitale dei pianeti senza ricorrere ad una causa trascendente.

¹⁹ Il primo elemento viene detto materia "luminosa" in quanto dalla sua agitazione si produce la luce che viene trasmessa dal secondo elemento, detto per questo materia "luminifera".

2.7 Isaac Newton (1642- 1727)

Isaac Newton nacque a Woolsthorpe, nel Lincolnshire, il 25 Dicembre del 1642 da una famiglia di piccoli proprietari terrieri.²⁰ L'infanzia e la giovinezza di Newton si svolsero in un periodo della storia inglese caratterizzato dall'instabilità politica e religiosa: era scoppiata la guerra civile che si sarebbe conclusa nel 1648 con la decapitazione del re (1649) e l'instaurazione della dittatura di O. Cromwell. Mentre gli anni della maturità furono segnati da un periodo di pace, tolleranza e prosperità economica che si aprì in seguito alla conclusione della Gloriosa Rivoluzione (1688-89).

Rimasto orfano di padre ancor prima della sua nascita, Newton venne affidato alle cure di una nonna, e compiuti i dodici anni frequentò la scuola pubblica di Grantham con la prospettiva di iscriversi all'Holy Trinity College di Cambridge, a cui venne ammesso nel 1661 come *subsizar*, il corrispettivo di quello che ad Oxford era definito 'servitore'.²¹

Di carattere scontroso e tormentato, Newton non si distinse in modo particolare nella carriera scolastica, anzi si allontanò quasi subito dal corso usuale degli studi per dedicarsi a libere letture. I suoi taccuini di studente attestano che furono proprio queste letture a suggerirgli il nucleo di tutte le sue più importanti scoperte. Nel 1664 lesse le opere filosofiche di Descartes, il *Dialogo* di Galileo e le più recenti opere di Boyle, raccogliendo le sue riflessioni nelle *Quaestiones quaedam philosophiae*.

Il 28 aprile dello stesso anno Newton sostenne con I. Barrow un esame sulle sue conoscenze matematiche che risultarono assai scarse (Newton non conosceva la geometria euclidea). Fu forse in seguito a questo episodio che si dedicò allo studio della matematica, acquistando le *Miscellaneae* di Schooten e la *Geometria* di Descartes (da cui trasse stimoli e il simbolismo algebrico) e prendendo a prestito le opere di Wallis.

Nei mesi della peste, tra il 1665 e il 1666, l'università venne evacuata e Newton lasciò Cambridge per rifugiarsi a Woolsthorpe. Questo periodo fu il più fecondo per la sua produzione scientifica, al punto che il 1665 venne chiamato "*annus mirabilis*". Durante il 1665 il suo interesse prevalente fu lo studio della matematica. Nei primi mesi dell'anno seguente elaborò un primo

²⁰ Vi è una apparente coincidenza tra la data di nascita di Newton (25 Dicembre 1642) e la data della morte di Galilei (8 Gennaio 1642), in realtà vi è una grossa discrepanza dovuta al cambiamento di calendario. Infatti nel 1582, nei soli paesi cattolici, era entrato in vigore il calendario gregoriano che aveva comportato una soppressione di 11 giorni, ovvero si era passati dal 4 Ottobre 1582 direttamente al 15 Ottobre. In Inghilterra il calendario gregoriano non venne adottato, questo significa che se si fa riferimento al calendario inglese Galilei morì il 29 Dicembre 1641, non l'8 Gennaio dell'anno successivo, ovvero quasi un anno prima della nascita di Newton.

²¹ In realtà, la madre avrebbe voluto che Newton si fosse dedicato all'amministrazione delle terre di famiglia, e quando rimase nuovamente vedova fece interrompere gli studi al figlio (che aveva circa tredici anni) per farlo tornare nel paese natale. Tuttavia, Newton dimostrò un tale disinteresse per le sue tenute che la madre fu costretta ad accettare che si iscrivesse all'università. Probabilmente fu la madre stessa a iscriverlo come *subsizar* per consentire a Newton di avvicinare i membri più influenti dell'aristocrazia.

schema del calcolo delle flussioni e pose le basi per una spiegazione della teoria dei colori. Nello stesso tempo, iniziò a riflettere sulla possibilità di unificare la fisica di Galilei e le leggi di Keplero sui moti dei pianeti attraverso la legge di gravitazione. Infine, tentò di determinare un confronto tra la forza necessaria “per trattenere la Luna nella sua orbita con la forza di gravità alla superficie della Terra”.²²

Nell'autunno del 1666 Newton raccolse i risultati raggiunti in un manoscritto. Per quanto riguarda il calcolo delle flussioni, di cui elaborò alcune regole, è da notare l'uso di un linguaggio in cui sono commisti termini matematici con termini derivanti dalla meccanica. Ad esempio, una curva viene descritta “per moto continuo di punti” che subisce variazioni che dipendono da una “velocità di accrescimento”.

Per quanto concerne l'ottica, ossia la “teoria dei colori”, Newton si dedicò allo studio della scomposizione della luce solare (luce bianca) attraverso un prisma. Il problema era quello del “celebre fenomeno dei colori”, e Newton fu il primo a sostenere correttamente che la luce bianca proveniente dal Sole contiene gli altri colori. Pertanto, i colori non sono modificazioni della luce provocate dalla rifrazione del prisma o dalla riflessione dei corpi, ma “proprietà originali e innate”. Essi si trovano già nella luce e non vengono creati, appaiono in un prisma dato che la rifrazione li separa, inclinando ogni colore in diversa misura, a seconda della sua rifrangibilità. Newton si preoccupò anche di migliorare le condizioni osservative dell'esperimento realizzandolo in una stanza buia e facendo arrivare la luce esterna da una fenditura nelle imposte.

Nel 1669 Newton, che aveva ottenuto il titolo di *fellow*, venne eletto professore lucasiano di matematica a Cambridge grazie all'interessamento di Barrow. Questo prestigioso incarico gli consentì di dedicarsi senza troppe preoccupazioni allo studio che riguardò ambiti molto diversificati: dalla matematica all'ottica, dalla dinamica all'astronomia. Nel 1669 descrisse al segretario della Royal Society,²³ H. Oldenburg, il telescopio a riflessione che era in grado di eliminare il difetto della ‘aberrazione cromatica’. Lo stesso Newton ne fabbricò uno con le proprie mani che gli valse l'elezione a membro della Royal Society e una notevole fama a livello europeo.

Il successo di questa prima sortita lo convinse a pubblicare il saggio, *A letter of Mr. Isaac Newton containig his new theory about Light and Colors* (1672) sulla rivista «Philosophical Transactions». Con questo scritto, che riprendeva gli studi sulla rifrazione fatti durante il 1665, Newton intendeva dimostrare con un *experimentum crucis* che la luce bianca era composta, e non semplice come era stato ritenuto fino ad allora. Ma contrariamente alle sue aspettative, l'articolo suscitò numerose critiche che possono essere divise in tre gruppi: alcuni non riuscirono a ripetere l'esperimento; altri, come Hooke, non negarono il risultato sperimentale, ma l'interpretazione data da Newton; e infine alcuni, come C. Huygens, affermarono che Newton aveva colto un aspetto

²² Newton commentò questo periodo come segue: “ciò accadeva durante gli anni della peste del 1665 e 1666, infatti in quei giorni ero nel fiore degli anni quanto alle invenzioni, e mi occupavo di matematica e di filosofia più che qualsiasi altro periodo successivo”.

²³ La Royal Society venne fondata a Londra nel 1660, ed era composta da filosofi naturali e da sperimentatori che non erano accademici, ma uomini colti detti “artigiani” con accesso alle accademie.

corretto, ma non interessante, ossia la diversa rifrangibilità della luce. Il vero problema era determinare la natura della luce e gli studi compiuti da Newton non erano utili a tal proposito. Huygens rimproverava a Newton di non aver elaborato delle ipotesi meccaniche sulla natura della luce. Si tenga presente che l'opera di Huygens, *Traité de la lumiere*, in cui si trova l'elaborazione della teoria ondulatoria della luce, venne pubblicata nel 1690.

Negli anni Settanta del Seicento Newton attraversò un periodo di intensa attività di ricerca e di relativo isolamento. Forse a causa della delusione suscitata dalle critiche al saggio del 1672, decise di non pubblicare altri risultati e di farli circolare solo attraverso scambi epistolari. Continuarono le ricerche matematiche senza interruzioni, dopo aver composto un breve scritto *De analysi per aequationes numero terminorum infinitarum* (1669) e aver ultimato il ponderoso *De methodis serierum et fluxionum* (1671), si dedicò allo studio della classificazione delle cubiche e scrisse una serie di lezioni di algebra (comparse poi nel 1707 con il titolo *Arithmetica universalis*).

Nel 1675 Newton, pressato dalle critiche, presentò alla Royal Society il saggio *An hypothesis explaining the properties of light*, nel quale si impegnava a formulare esplicitamente una "ipotesi sulle proprietà della luce". In esso affrontò i fenomeni di interferenza, noti come "anelli di Newton", osservati nelle lamine sottili (come bolle di sapone, mica etc.) da Hooke e altri. Questi "anelli" (diversamente colorati chiari e scuri) si formavano su una lamina di vetro piana quando una lente concava posta su di essa veniva illuminata con la luce solare. Newton spiegò la periodicità di questi anelli con le vibrazioni presenti nell'etere che pervadono la materia. Queste vibrazioni sono prodotte dai corpuscoli che formano la luce, che a seconda del colore differiscono per dimensioni e forza, pertanto a seconda dei corpuscoli l'intensità della vibrazione dell'etere è diversa e produce anelli di interferenza di dimensione diversa.

Newton, tuttavia, insistette nel tenere distinte quelle che sono semplici ipotesi, come quella dei corpuscoli o della vibrazione dell'etere, da quelle che sono le evidenze sperimentali. Nei suoi appunti spiega di aver inviato la sua *hypothesis* alla Royal Society solo per rendere più agevole la comprensione delle osservazioni, ma sottolineando che la certezza di queste ultime non andava confusa con le ipotesi.

Bisogna fare un'ulteriore precisazione, in quanto Newton nel redigere questo testo si era servito di termini e di idee propri della tradizione alchemica. Numerosi manoscritti testimoniano l'interesse di Newton per l'alchimia, ma questo non deve destare perplessità nel lettore contemporaneo che ravvisa, giustamente, in Newton il padre della scienza moderna. Infatti, era comune all'epoca occuparsi di alchimia, gli stessi R. Boyle e J. Locke nutrivano interesse per questa disciplina. È ancora aperto il dibattito storiografico sulla natura e le motivazioni che avrebbero spinto Newton ad occuparsi di alchimia, una interpretazione plausibile potrebbe essere quella che ritiene che Newton si sia avvicinato a questi studi cercando di trovare un'alternativa alla spiegazione meccanicistica dei fenomeni naturali, da lui considerata inadeguata.²⁴

²⁴ Gli scritti alchemici di Newton, insieme a quelli che recavano i commenti del libro dell'Apocalisse vennero conservati in quello che è stato chiamato "baule di Newton". Alla morte del nostro questo baule venne scoperto, ma scandalizzò a tal punto gli studiosi che molte università del calibro della Columbia lo rifiutarono come un corpo

Newton mantenne una grande segretezza sui suoi studi alchemici, ma ancora di più su quelli teologici. Egli infatti arrivò ad abbracciare la dottrina unitariana professata da Ario che negava la natura trinitaria di Dio. Sostanzialmente riteneva che il dogma della Trinità, introdotto con il Concilio di Nicea, fosse il frutto della corruzione della Chiesa. La divulgazione delle sue convinzioni religiose avrebbe potuto stroncare la sua carriera universitaria, in quanto egli insegnava all' *Holy Trinity College* (ovvero all'università della "Santa Trinità") e i docenti erano tenuti al giuramento di fedeltà alla Chiesa Anglicana. Per ragioni ancora poco chiare nel 1675 Newton ottenne dal re la dispensa a prendere gli ordini religiosi.

Nel 1679 Hooke, rompendo il silenzio che si era creato dopo la polemica sulla teoria della rifrazione, scrisse una lettera a Newton per proporgli un'ipotesi sul moto dei pianeti, a cui era giunto in collaborazione con C. Wren. Hooke riteneva che i pianeti si muovessero in uno spazio vuoto, privo di resistenza, e che su di essi si esercitasse una forza diretta verso il Sole. Il sospetto di Hooke era che questa forza variasse con l'inverso del quadrato della distanza dal Sole, ma non possedeva la dimostrazione matematica per provarlo.

A questo si aggiunse la visita di E. Halley a Newton nell'agosto del 1684. Halley aveva discusso con Hooke e Wren dell'ipotesi secondo la quale il Sole esercita una forza sui pianeti, ma non erano giunti al modo per collegare questa ipotesi con le leggi di Keplero. Halley chiese a Newton di risolvere questo complesso problema matematico, e Newton rispose in un breve scritto del dicembre dello stesso anno (*De motu corporum in gyrum*). In esso Newton dimostrava che, per un corpo che si muove in uno spazio privo di resistenza, la seconda legge di Keplero vale solo se il corpo è accelerato da una forza centrale, inoltre, dimostrava che se l'orbita è un'ellisse e la forza è diretta verso un fuoco, allora la forza varia con l'inverso del quadrato della distanza dal Sole.

Halley rimase entusiasta e riferì questa teoria ai soci della Royal Society, spronando al contempo Newton perché la sviluppasse ulteriormente. Newton lavorò alacremente per tre anni nei quali Halley ricevette 460 pagine manoscritte che aveva letto, corretto e commentato. Inoltre, quest'ultimo si preoccupò di mantenere i contatti con la Royal Society sotto i cui auspici i *Philosophiae naturalis principia mathematica* vennero pubblicati nel 1687. Come se non bastasse Halley finanziò l'intera operazione editoriale, fece da mediatore tra Newton e gli altri esponenti della società, e presentò l'opera di Newton mettendo l'accento sulle sue applicazioni per la scienza della navigazione, in modo che potesse essere accolta nonostante la sua complessità che la rendeva di difficile lettura.

I *Principia* sono organizzati in sezioni e la struttura è assiomatico-deduttiva sul modello euclideo, lo stesso Newton precisa di aver preferito non fare ricorso al metodo degli indivisibili, in quanto si tratta di un procedimento arduo e poco geometrico. Il suo scopo dichiarato, infatti, è quello di elaborare un'opera filosofica che unisca le tradizioni di ricerca che in precedenza erano state tenute separate: quella sperimentale, quella matematica e quella filosofica.

estraneo. Vennero in seguito acquistati dall'università di Gerusalemme e passarono ben diciotto anni prima di essere pubblicati.

Newton procede in primo luogo enunciando alcune definizioni relative alla “quantità di materia”, alla “quantità di moto” e alle “forze”, e prosegue introducendo le distinzioni tra spazio assoluto e relativo, e tra tempo assoluto e relativo, contenute nello Scolio. L'autore discute la questione nel dettaglio precisando che è rispetto allo spazio e al tempo assoluti che si deve parlare del moto dei corpi. Per poter distinguere il moto relativo da quello assoluto bisogna considerare gli effetti prodotti dal moto circolare, come egli fa a proposito del celebre esempio del secchio rotante attorno al proprio asse:

Si sospenda un recipiente ad un filo abbastanza lungo, e si agisca con moto circolare continuo fino a che il filo, a causa della torsione, si indurisca completamente. Si riempia il recipiente di acqua e lo si faccia riposare insieme con l'acqua; lo si muova, poi, con forza subitanea, in senso contrario, lungo un cerchio; allora, allentandosi il filo, continuerà a lungo in questo moto. All'inizio la superficie dell'acqua sarà piana, come prima del moto del vaso; e poiché il vaso, comunicata gradualmente la forza all'acqua, fa in modo che anche questa inizi più sensibilmente a ruotare, l'acqua comincerà a ritirarsi a poco a poco dal centro e salirà verso i lati del vaso, formando una figura concava [...] finché compiendo le sue rivoluzioni insieme al vaso in tempi uguali, giacerà nel medesimo in quiete relativa. Tale ascesa indica lo sforzo di allontanamento dall'asse del moto, e attraverso tale sforzo si conosce e viene misurato il vero e assoluto moto circolare dell'acqua, che è completamente opposto al moto relativo.

Quindi, Newton riesce a calcolare i moti assoluti attraverso lo studio dei moti circolari e delle forze agenti. Bisogna tener presente l'importanza di questo Scolio per la storia della scienza, in quanto esso implica una concezione dell'assoluto e del relativo che varrà per due secoli, sino alle critiche di Mach ed Einstein.

Dopo le definizioni e lo Scolio vengono introdotti tre assiomi o leggi del movimento:

1. Ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto uniforme in linea retta, a meno che non sia costretto a mutare il proprio stato da forze impresse;
2. Il mutamento di moto è proporzionale alla forza motrice impressa, e avviene nella direzione della linea retta in cui quella forza è impressa;
3. A un'azione corrisponde sempre una reazione uguale e contraria: ossia, le azioni reciproche di due corpi sono sempre uguali e dirette in senso contrario.

Secondo Newton si tratta di “principi accolti dai matematici e confermati da numerosi esperimenti”, pertanto non fornisce una loro dimostrazione.

Sarebbe ingenuo pensare di trovare nell'opera di Newton la celebre formula $F = m \times a$, così come la si legge nei manuali odierni, l'equazione si trova espressa in questo modo: $Fm = a \times m$, dove con Fm si indica la forza motrice, con a l'accelerazione, e con m la quantità di materia o massa.

Volendo offrire una breve ed approssimata sintesi dei *Principia* si può affermare che il I libro è dedicato ai moti dei corpi ed è quasi completamente occupato dalle dimostrazioni matematiche (o meglio geometriche) delle tre leggi di Keplero. Il secondo libro invece tratta dei moti dei corpi all'interno di fluidi resistenti, questa parte sulla teoria dei fluidi è di particolare importanza perché

consente di unificare la fisica del moto terrestre galileiana e la fisica dei moti planetari.²⁵ Inoltre, rappresenta una potente arma contro la teoria dei vortici cartesiani che secondo Newton “urta totalmente contro i fenomeni astronomici, e conduce non tanto a spiegare quanto ad oscurare i moti celesti”. Infine, il terzo libro tratta del “sistema del mondo” nel quale si discute di astronomia.

Per effettuare il passaggio dai principi esposti nei due libri precedenti al sistema del mondo, Newton pensa che sia opportuno fissare alcune “regole del filosofare” che elenca nella seconda edizione dell’opera del 1713 nel modo seguente:

Regola I: Delle cose naturali non si devono ammettere più cause di quelle che siano vere e che bastino a spiegare i loro fenomeni.

Regola II: Perciò si devono assegnare le stesse cause a effetti naturali dello stesso genere, per quanto sia possibile.

Regola III: Si devono ritenere qualità di tutti i corpi quelle che non possono aumentare né diminuire, e quelle che riguardano tutti i corpi sui quali è possibile fare esperimenti.

Nell’edizione del 1726 si trova un’ ulteriore regola:

Regola IV: Nella filosofia sperimentale, le proposizioni tratte per induzione dei fenomeni, nonostante ipotesi contrarie, si devono ritenere, in modo accurato o approssimato come vere finché non si presentino altri fenomeni, per mezzo dei quali siano rese o più accurate o soggette a eccezioni.

Nel terzo libro si trova il riferimento alla legge di gravitazione universale che viene utilizzata per la spiegazione delle maree²⁶ e per la previsione dei moti lunari. Inoltre, in esso si trova la spiegazione dell’appiattimento della Terra ai poli per effetto della sua rotazione, e la spiegazione della precessione degli equinozi²⁷.

²⁵ Nel secondo libro si trova anche il celebre “problema dei tre corpi”, ossia Newton si rende conto che considerando la forza esercitata da un corpo su un altro si trascura la forza che viene esercitata dagli altri corpi, anche se più distanti (ad esempio, nel calcolare la forza che la Luna esercita sulla Terra bisognerebbe tenere presente anche le forze esercitate dagli altri pianeti del Sistema Solare). Newton propone una soluzione fortemente “ad hoc” in quanto ritiene che la forza centrifuga esercitata da un corpo sia limitata solo ai corpi più vicini, in analogia con quanto avviene con il magnete la cui “virtù” ha quasi termine in prossimità del magnete stesso. In realtà, il problema è rimasto irrisolto sino ad oggi, infatti possiamo ottenere dei risultati esatti dalle equazioni di moto combinate solo se prendiamo in considerazione fino a tre corpi, mentre se ne consideriamo un quarto bisogna accontentarsi di valori approssimativi.

²⁶ Newton spiega correttamente il fenomeno delle maree ricorrendo alla combinazione della forza attrattiva del Sole con la forza attrattiva della Luna, entrambi agenti sulla superficie terrestre. Solo ricorrendo a questa attrazione combinata si può spiegare il fenomeno delle maree che avviene due volte al giorno e in due parti opposte del globo.

²⁷ Con “moto di precessione” in un corpo in rotazione (per es. una trottola o un giroscopio) si intende quel moto che si realizza quando l’asse di rotazione si sposta a sua volta intorno a un altro asse, in modo che durante il movimento l’angolo formato dai due assi rimanga costante. In particolare, la “precessione degli equinozi” è il moto di precessione dell’asse di rotazione terrestre, dovuto al momento esercitato sulla Terra dalla Luna e dal Sole e in misura minore dai pianeti; per effetto del moto di precessione, il punto in cui si trova il Sole all’equinozio di primavera retrocede annualmente.

Riguardo alla gravità Newton afferma anche, nello *Scholium generalis*, che non conosce cosa essa sia e quale sia la sua causa, ma non per questo bisogna “fingere ipotesi”. Sono chiamate ‘ipotesi’ quelle spiegazioni che non vengono dedotte dai fenomeni, e secondo Newton esse non trovano posto nella filosofia sperimentale che non ammette nessun riferimento a cause metafisiche o occulte. Per Newton è sufficiente che la gravità esista, che agisca secondo le leggi da lui esposte, andare oltre vorrebbe dire cercare le cause ultime che per l’intelletto umano non sono attingibili.

Dopo la pubblicazione dei *Principia*, Newton non era più uno sconosciuto matematico di Cambridge, ma l’autore di un’opera letta, commentata e criticata in tutta Europa. Negli anni Novanta del Seicento si dedicò al problema della quadratura delle curve (che condusse alla pubblicazione del *De quadratura curvarum* del 1704), e ad una nuova edizione dei *Principia* che sarebbe apparsa nel 1713. Intanto, cominciarono a presentarsi disturbi al sistema nervoso, forse sorti in seguito all’incendio del suo laboratorio che ha comportato la distruzione dei suoi appunti.

Nel 1689-90 venne eletto rappresentante della sua università al Parlamento, non era schierato né con i Wighs né con i Tories, ma era vicino entrambi. Grazie ad amici influenti presso la nuova corte, Newton ottenne anche l’incarico di *warden* (ispettore) e poi di *master* (direttore) della Zecca di Londra.²⁸ Il prestigio e il potere di Newton aumentarono e raggiunsero l’apice nel 1703, quando fu eletto presidente della Royal Society, e nel 1705 quando ottenne il titolo di *Sir* (baronetto) di cui amava ammantarsi. La sua fama scientifica fu ulteriormente accresciuta dalla pubblicazione dell’*Optiks: or a treatise of the reflexions, inflexions and colour of light. Also treatises of the species and magnitude of curvilinear figures* (1704).

Gli ultimi anni della vita di Newton furono caratterizzati da un progressivo declino della sua creatività e da un’aspra disputa con G. W. Leibniz. Quest’ultima venne provocata dalla pubblicazione di un articolo di un seguace di Newton nelle «Philosophical Transactions» in cui Leibniz veniva accusato di plagio riguardo il metodo delle flussioni. Leibniz, che era membro della Royal Society, chiese una ritrattazione, e il risultato fu la formazione di un comitato che doveva occuparsi di dare un parere a riguardo. Newton, che fino a quel momento si era tenuto fuori dalla polemica, decise di intervenire pilotando segretamente il comitato. Ne seguì la pubblicazione del *Commercium epistolicum* corredato da una recensione in cui Newton scrisse in terza persona confermando le accuse di plagio. Il povero Leibniz, che giunse al calcolo differenziale e integrale in modo indipendente da Newton, morì pochi anni dopo senza essere riuscito a riabilitarsi, e quasi dimenticato.

Newton morì nel 1727, nel 1736 apparve postumo il *Methodus fluxionum et serierum infinitarum*, mentre nel 1756 vennero pubblicate *Four Letters from Sir Isaac Newton to Doctor Bentley containing Some Arguments in Proof of a Deity*. È ancora in corso lo studio e la pubblicazione in edizioni critiche di una immensa quantità di scritti.

²⁸ A Newton si deve il merito di aver escogitato l’espedito della zigrinatura delle monete d’oro, così da impedire che venissero limate per ottenere polvere del prezioso metallo.